



ISSN 2409-9074

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ,
БУДІВНИЦТВО

Випуск 2 (47)' 2016

ACADEMIC JOURNAL

Series: INDUSTRIAL MACHINE BUILDING,
CIVIL ENGINEERING

Issue 2 (47)' 2016



**Міністерство освіти і науки України
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка**

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Серія: ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ,
БУДІВНИЦТВО**

Випуск 2 (47)' 2016

ACADEMIC JOURNAL

**Series: INDUSTRIAL MACHINE BUILDING,
CIVIL ENGINEERING**

Issue 2 (47)' 2016

Полтава – 2016

Poltava - 2016



www.znp.pntu.edu.ua

**Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво /
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка**

Збірник наукових праць видається з 1999 р., періодичність – двічі на рік.

Засновник і видавець – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

Свідцтво про державну реєстрацію КВ 8974 від 15.07.2004 р.

Збірник наукових праць уключений до переліку наукових фахових видань, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (Наказ МОН України №1279 від 6.11.2014 року).

Збірник наукових праць рекомендовано до опублікування вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, протокол № 24 від 11.07.2016 р.

У збірнику представлені результати наукових і науково-технічних розробок у галузі машинобудування, автомобільного транспорту та механізації будівельних робіт; із проектування, зведення, експлуатації та реконструкції будівельних конструкцій, будівель і споруд; їх основ та фундаментів; будівельної фізики та енергоефективності будівель і споруд.

Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Редакційна колегія:

- Пічугін С.Ф.** – головний редактор, д.т.н., професор, завідувач кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (pichugin_sf@mail.ru);
- Винников Ю.Л.** – заступник головного редактора, д.т.н., професор, професор кафедри видобування нафти і газу та геотехніки, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (vynpukov@yandex.ua);
- Льченко В.В.** – відповідальний секретар, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (pntubud@yandex.ua).

Редакційна колегія напряму «Галузеве машинобудування»:

- Нестеренко М.П.** – голова редакційної колегії, д.т.н., професор, професор кафедри будівельних машин і обладнання, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Білецький В.С.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри обладнання нафтових і газових промислів, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Клованич С.Ф.** – д.т.н., професор, професор кафедри механіки і будівельних конструкцій, Вармінсько-Мазурський університет, м. Ольштин, Польща;
- Маслов О.Г.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри основ конструювання машин і технологічного обладнання, Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського;
- Найчук А.Я.** – д.т.н., професор, директор філіалу РУП «Інститут БелНІІС» – Науково-технічний центр, м. Брест, Республіка Білорусь;
- Назаренко І.І.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри механізації технологічних процесів, Київський національний університет будівництва та архітектури;
- Прентковський О.** – д.т.н., професор, професор кафедри технологічного транспортного обладнання, Вільнюський технічний університет ім. Гедиміна, Литва;
- Хмара Л.А.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпропетровськ.

Редакційна колегія напряму «Будівництво»:

- Стороженко Л.І.** – голова редакційної колегії, д.т.н., професор, професор кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Воскобійник О.П.** – д.т.н., с.н.с., професор кафедри організації і технології будівництва та охорони праці, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Жусупбеков А.Ж.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри проектування будівель і споруд, директор Геотехнічного інституту, Євразійський національний університет ім. Л.М. Гумільова, м. Астана, Казахстан;
- Зоценко М.Л.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри видобування нафти і газу та геотехніки, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Павліков А.М.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Сєдін В.Л.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри основ і фундаментів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпропетровськ;
- Семко О.В.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка;
- Сулевська М.** – д.т.н., професор кафедри геотехніки, Білостоцька політехніка, м. Білосток, Польща;
- Шаповал В.Г.** – д.т.н., професор, професор кафедри будівництва та геомеханіки, Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ.

Адреса видавця та редакції – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Науково-дослідницька частина, к. 320Ф, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36011.

тел.: (05322) 29875; e-mail: v171@pntu.edu.ua; www.pntu.edu.ua

Макет та тиражування виконано у поліграфічному центрі

Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка,

Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36011.

Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції. Серія ДК, № 3130 від 06.03.2008 р.

Комп'ютерна верстка – В.В. Льченко. Коректор – Я.В. Новічкова.

Підписано до друку 12.07.2016 р.

Папір ксерокс. Друк різнограф. Формат 60х80 1/8. Ум. друк. арк. – 39,64.

Тираж 300 прим.

**Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering /
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University**

Academic journal was founded in 1999, the publication frequency of the journal is twice a year.

Founder and Publisher is Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

State Registration Certificate KB № 8974 dated 15.07.2004.

Academic journal is included into the list of specialized academic publications where graduated thesis results could be presented (Order of Department of Education and Science of Ukraine № 1279 dated 6.11.2014).

Academic journal was recommended for publication by the Academic Board of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, minutes № 24 of 11.07.2016.

The remit of the journal is the following: reporting the research results on the engineering practice, mechanic engineering, heat and water supply, car operation, building construction improvement; consideration of modern problems of soil mechanics, geotechnics and foundation engineering.

Academic journal is designed for researchers and technologists, postgraduates and senior students.

Editorial Board:

- Pichugin S.F.** – *Editor-in-Chief*, DSc, Professor, Head of Metal, Wood and Plastics Structures Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University (pichugin_sf@mail.ru);
- Vynnykov Yu.L.** – *Deputy Editor*, DSc, Professor, Professor of Oil and Gas Extraction and Geotechnics Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University (vynnykov@yandex.ua);
- Ilchenko V.V.** – *Executive Secretary*, PhD (Eng), Associated Professor of Auto-Road, Geodesy, Land Management and Rural Buildings Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University (pntubud@yandex.ua).

Editorial Board «Industrial Machine Building»:

- Nesterenko M.P.** – *Chief of Editorial Board*, DSc, Professor, Professor of Building Machines and Building Equipment Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Biletskii V.S.** – DSc, Professor, Head of the Oil and Gas Fields Equipment Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Klovanych S.F.** – DSc, Professor, Professor of Mechanics and Building Structures Department, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland;
- Maslov O.G.** – DSc, Professor, Head of Elements of Machinery and Technical Equipment Mechanical Design Department, Kremenchuk National University;
- Naichuk A.Ya.** – DSc, Professor, Branch Director RUE «Institute BelNIIS» – Scientific-Technical Center, Brest, Belarus;
- Nazarenko I.I.** – DSc, Professor, Head of Technological Processes Mechanization Department, Kyiv National Civil Engineering and Architecture University;
- Prentkovsky O.** – DSc, Professor, Professor of Transport Technological Equipment Department, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania;
- Khmara L.A.** – DSc, Professor, Head of Building and Road Machines Department, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipropetrovsk.

Editorial Board «Civil Engineering»:

- Storozhenko L.I.** – *Chief of Editorial Board*, DSc, Professor of Metal, Wood and Plastics Structures Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Voskoboynik O.P.** – DSc, Senior Research Fellow, Professor of Engineering Management and Technology and Occupation Safety Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Zhusupbekov A.Zh.** – DSc, Professor, Head of Buildings and Structures Design Department, Director of Geotechnical Institute, Eurasia National L.N. Gumiliov University, Astana, Kazakhstan;
- Zotsenko M.L.** – DSc, Professor, Head of Oil and Gas Extraction and Geotechnical Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Pavlikov A.M.** – DSc, Professor, Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Strength of Materials Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Sedin V.L.** – DSc, Professor, Head of Foundation Engineering Department, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipropetrovsk;
- Semko O.V.** – DSc, Professor, Head of Architecture and Town Planning Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
- Sulevska M.J.** – DSc, Professor of Geotechnical Department, Bialystok University of Technology, Poland;
- Shapoval V.G.** – DSc, Professor, Professor of Civil Engineering and Geomechanics Department, National Mining University, Dnipropetrovsk.

Address of Publisher and Editorial Board -- Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Research Centre, room 320-F, Pershotravnevyi Avenue, 24, Poltava, 36011, Ukraine.

tel.: (05322) 29875; e-mail: v171@pntu.edu.ua; www.pntu.edu.ua

Layout and printing made in the printing center of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravnevyi Avenue, 24, Poltava, 36011, Ukraine.

State accreditation certificate of publication media, issue ДК № 3130, dated 06.03.2008,

granted by the State Committee for television and radio broadcasting of Ukraine.

Registration certificate of publishing subject in the State Register of Publishers

Manufacturers and Distributors of publishing products. DK Series, № 3130 from 06.03.2008.

Desktop Publishing – V.V. Ilchenko. Correction – Y.V. Novichkova.

Signed to print 12.07.2016.

Paper copier. Print rizograf. Format 60x80 1/8. Conventionally printed sheets – 39,64.

Circulation 300 copies.

*Пижов І.М., д.т.н., професор
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Клименко В.Г., аспірант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ГРЕБІНЦІВ ПРИ БАГАТОПРОХІДНІЙ СХЕМІ ТОРЦЕВОГО ШЛІФУВАННЯ З НАХИЛОМ ОСІ ШПИНДЕЛЯ

Виявлено, що в умовах реалізації процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя за багатопрохідною схемою обробки на оброблювальній поверхні утворюються залишкові гребінці. Їх природа в цілому аналогічна залишковим гребінцям, які мають місце при лезовій обробці інструментом з радіусною вершиною. Але відома залежність, наприклад, при точінні не може бути застосована в цьому випадку внаслідок особливостей кінематики процесу обробки. У зв'язку із цим були виконані теоретичні дослідження, що дозволили отримати аналітичні залежності, які пов'язують такий параметр зони контакту різальної поверхні круга з деталлю, як залишкові гребінці в умовах плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя (багатопрохідна схема обробки).

Ключові слова: параметри зони контакту, залишкові гребінці, кут нахилу осі шпинделя, глибина шліфування, поперечна подача, діаметр круга.

*Пыжов И.Н., д.т.н., профессор
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Клименко В.Г., аспирант
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ГРЕБЕШКОВ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ СХЕМЕ ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ С НАКЛОНОМ ОСИ ШПИНДЕЛЯ

Обнаружено, что в условиях реализации процесса плоского торцевого шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя по многопроходной схеме обработки на обработанной поверхности образуются остаточные гребешки. Их природа в целом аналогична остаточным гребешкам, которые имеют место при лезвийной обработке инструментом с радиусной вершиной. Но известная зависимость, например, при точении, не может быть применена в данном случае в силу особенностей кинематики процесса обработки. В связи с этим были выполнены теоретические исследования, позволившие получить аналитические зависимости, связывающие такой параметр зоны контакта режущей поверхности круга с деталью, как остаточные гребешки в условиях плоского торцевого шлифования с предварительным наклоном оси шпинделя (многопроходная схема обработки).

Ключевые слова: параметры зоны контакта, остаточные гребешки, угол наклона осей шпинделя, глубина шлифования, поперечная подача, диаметр круга.

Pyzhov I., DSc, Professor
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Klimenko V., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

THEORETICAL STUDY OF FORMATION OF RESIDUAL SCALLOPS AT MULTIPLE-PASS SCHEME OF FACE GRINDING WITH SLOPE OF SPINDLE AXIS

The research deals with a special case of flat face grinding, namely processing with preliminary slope of spindle axis. This approach makes it possible to control an important parameter such as the contact area of cutting surface of grinding wheel with a workpiece, and therefore the temperature in grinding area. Ultimately, this is beneficial to the quality of machined surface of the workpiece. An important feature of the process of face grinding with preliminary slope of spindle axis is formation of form deviation on the workpiece surface, and, specifically, its particular form – concavity. In the context of the process of flat face grinding with preliminary slope of spindle axis under conditions of multiple-pass scheme of processing, this leads to the formation of the residual scallops on the machined surface. Their nature is in whole similar to the residual scallops that take place at the edged machining using tool with radiused cutter point. But the known dependence that describes the relationship of the height of residual scallops with processing conditions, for example, at turning can not be applied in this case, due to the peculiarity of kinematics of the machining process. In this connection, theoretical research that make it possible to obtain analytical dependence connecting height of residual scallops with conditions of multiple-pass flat face grinding with preliminary slope of spindle axis have been carried out. In this process the role of the factors such as the angle of preliminary slope of spindle axis, grinding depth, diameter of grinding wheel and transverse feed has been established. Specific role of grinding depth and transverse feed in this process has been established. The value of the former under conditions of multiple-pass processing is a factor limiting the maximum height of residual scallops, and the value of the latter is charged with concrete height of the scallops. In this connection, a special role that played by the ratio of transverse feed with value of the contact width of the wheel cutting surface with the workpiece has been established. This makes it possible in practice to assign the processing conditions that, on the one hand, will guarantees that on the treated surface there will be no areas unaffected with the wheel and, on the other hand, will control the height of the residual scallops. In turn, the width of the contact area of wheel cutting surface with workpiece depends upon the factors such as angle of preliminary slope of spindle axis, grinding depth and diameter of wheel. That is, almost upon the same factors which determine the height of the scallop. It can be considered as a feature of the process. On the basis of the established features of the formation of the residual scallop and the connection of its height with cutting depth, we recommend how to use the proposed analytical dependence in practice in order to eliminate the possibility of errors in the calculations. The correctness of the results obtained on the basis of analytical dependence, and comparing them with the calculations according to the empirical formula was verified using computer geometric simulation in COMPASS software package. The fulfilled study in whole makes it possible to improve the process of flat face grinding and thereby expand its technological capabilities.

Keywords: parameters of contact area, residual scallops, slope angle of spindle axis, grinding depth, cross-feed, diameter of wheel.

Вступ. Перспективність плоскої схеми шліфування підтверджується тим, що значна кількість деталей у машинобудуванні має плоскі поверхні [1 – 5] і підлягає різним видам обробки (обдирне, попереднє, чистове і прецизійне) на плоскошліфувальних верстатах. Значне місце в цьому процесі займає плоске торцеве шліфування, яке має ряд переваг порівняно зі схемою, котра базується на застосуванні периферійних шліфувальних кругів [6 – 9]. Процес плоского торцевого шліфування, який виконується на верстатах з вертикальним та з горизонтальним розташуванням шпинделя, може бути реалізований як на «прохід», так і за багатопрхідною схемою обробки. Ці схеми мають особливості, які треба враховувати при розробленні технологічних операцій плоского шліфування.

Аналіз останніх джерел досліджень та публікацій. Одним з підходів, який забезпечує зменшення ступеня нагріву, а отже, і деформації оброблюваної заготовки при шліфуванні (особливо зі збільшеними глибинами обробки) за рахунок зменшення площі контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю є попередній нахил осі шпинделя на кут α [6 – 9]. Нахил осі шпинделя на кут α (рис. 1) призводить до зміни низки параметрів зони контакту РПК з деталлю, а також впливає на формоутворення оброблювальної поверхні виробу.

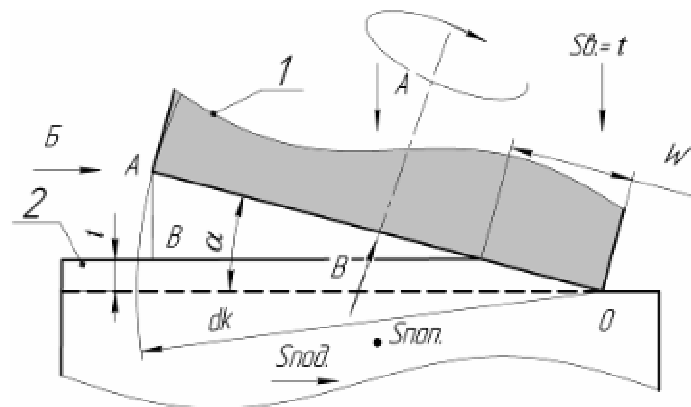


Рисунок 1 – Схема плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя:

1 – торцевий круг; 2 – деталь

До параметрів зони контакту при застосуванні глибинної схеми можна віднести довжину W' (рис. 1), довжину дуги L і ширину B' [10] (рис. 2), зони контакту РПК з деталлю, а також висоту залишкових гребінців H [11] та увігнутість Δ (як поодинокий випадок відхилення від площинності).

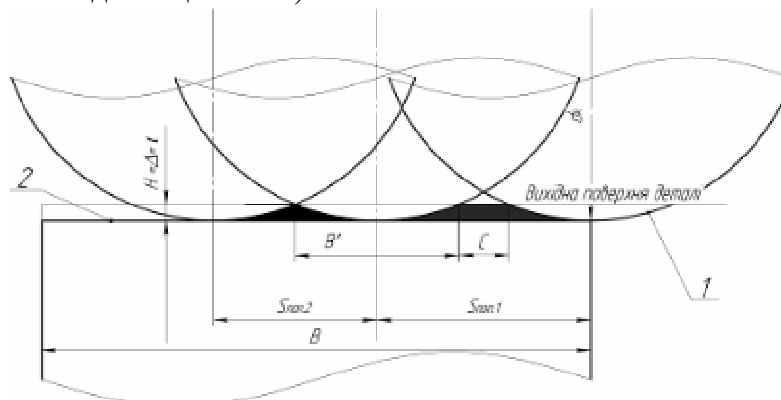


Рисунок 2 – Схема формування залишкових гребінців на поверхні деталі:

1 – торцевий круг; 2 – деталь

Аналіз схеми торцевого шліфування на прохід (з нахилом осі шпинделя) показав, що в разі обробки широких деталей площа контакту різальної поверхні круга (РПК) з оброблюваною деталлю може мати достатньо великі значення, особливо при використанні кругів великих розмірів із суцільним робочим шаром. У зв'язку із цим розв'язання проблеми може бути пов'язане із застосуванням багатопрхідної схеми обробки [11] з попереднім нахилом осі шпинделя. Особливістю цієї схеми є використання додаткової поперечної подачі S_{non} . Це є ще одним технічним прийомом, який дозволить істотно знизити площу контакту РПК з деталлю.

Один із напрямів удосконалення цього процесу лежить у площині виявлення технологічних особливостей формування макро- і мікропрофілю оброблюваної плоскої поверхні деталі [11]. У наших дослідженнях застосовувався чисто геометричний підхід, тобто вважалося, що глибина різання не впливає на формування профілю деталі, з одного боку, і не враховувався можливий вплив явищ, пов'язаних із проявом дії фізичного чинника (наприклад, пружне відновлення і т.д.), з іншого [12].

У процесі багатопрхідного шліфування на оброблюваній поверхні при кожному проході формуються ділянки з увігнутістю, унаслідок чого на плоскій поверхні утворюються залишкові гребінці певної висоти. При цьому й увігнутість, і залишкові гребінці характеризуються параметром H (рис. 2). Це можна вважати відмінними ознаками такого процесу порівняно з обробкою «на прохід». На рисунку контур шліфувального круга умовно показаний у вигляді кола. Слід зазначити, що, хоча глибина різання безпосередньо і не впливає на зміну параметра H , її роль проявляється в обмеженні граничних значень H . Установлено, що величину H визначають такі чинники, як діаметр круга d_k , кут нахилу шпинделя α і поперечна подача S_{non} . Теоретично поєднання їх величин забезпечує знаходження параметра H в інтервалі значень $0 \leq H \leq t$. Величину поперечної подачі S_{non} зручно виражати в частках ширини оброблюваної поверхні деталі. При цьому необхідно за основу брати не всю ширину B , а її частину B' , яка утворюється при одному проході з глибиною шліфування t , що дозволяє внести визначеність при виборі максимального значення S_{non} . Як видно з рисунка, якщо величина поперечної подачі буде більшою від зазначеної вище частини ширини деталі B' , тобто $S_{non1} > B'$ (рис. 2), то висота H буде максимальною. У такому випадку маємо, що $H = H_{max} = t$. При цьому характерним є те, що на обробленій поверхні будуть залишатися незацеплені кругом ділянки шириною C , що недопустимо (якщо тільки це не передбачено кресленням). Відповідно для усунення такого недоліку значення поперечної подачі має бути обмеженим шириною B' , тобто повинна дотримуватись умова $S_{non2} \leq B'$. Випадок, коли $S_{non2} = B'$ (рис. 2), є теоретично граничним. Тут, як і в попередньому прикладі, $H = H_{max} = t$, однак ділянки з необробленою поверхнею теоретично будуть відсутніми. Як видно з розглянутих рисунків, формування оброблюваної поверхні при багатопрхідному шліфуванні має деяку схожість з утворенням шорсткості при обробці лезовим інструментом у разі, коли в роботі бере участь кругове перехідне лезо певного радіуса [12]. Відмінність полягає в тому, що якщо при точінні поздовжня подача здійснюється безперервно, то при багатопрхідному шліфуванні торцевим кругом її роль ніби виконує поперечна подача, яка відбувається періодично (наприклад, на подвійний хід столу верстата).

Теоретично залежно від величини подачі S_{non} такий параметр, як висота H залишкових гребінців на поверхні деталі може визначати в одному випадку відхилення форми, а в іншому – шорсткість обробки. У міру зменшення S_{non} висота гребінців буде відповідно зменшуватися (рис. 2). Тільки при куті нахилу шпинделя $\alpha = 90^\circ$, коли торцевий круг стає периферійним (наприклад, при використанні чашково-циліндричних кругів), справедлива класична формула для визначення висоти залишкових гребінців, наприклад при точінні [12],

$$H = r - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2}, \quad (1)$$

де r – радіус при вершині різця, мм; S – поздовжня подача, мм/об.

У нашому випадку (при $\alpha = 90^\circ$) формула (1) має такий вигляд:

$$H = \frac{d_k - \sqrt{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 - S_{non.}^2}}{2} = \frac{d_k - \sqrt{d_k^2 - S_{non.}^2}}{2}. \quad (2)$$

Оскільки в розглянутому процесі шліфувальний круг нахилений під кутом α , значення якого близьке до нуля, формула (2) дає великі похибки, що робить її практично не придатною для використання. Це вимагає встановлення залежності, придатної для практичного використання в умовах плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя.

У роботі [11] ця задача була розв’язана шляхом комп’ютерного геометричного моделювання, що дозволило встановити емпіричну степеневу залежність висоти залишкових гребінців від умов обробки

$$H = 0,003 \cdot \alpha \cdot S_{non.}^{2,039} \cdot d_k^{-0,949}, \quad (3)$$

де α – кут нахилу осі шпинделя верстата, $^\circ$; S_{non} – поперечна подача, мм/подв. хід; d_k – зовнішній діаметр шліфувального круга, мм.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Визначено, що в умовах реалізації процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя за багатопрохідною схемою обробки на оброблювальній поверхні утворюються залишкові гребінці. Унаслідок особливостей кінематики процесу обробки відомі залежності не можуть застосовуватися в цьому випадку.

Постановка завдань. У роботі було поставлено завдання отримати аналітичну залежність, яка пов’язує параметр H з наведеними вище факторами.

Мета досліджень – установлення аналітичної залежності, котра пов’язує висоту залишкових гребінців з умовами багатопрохідного плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя.

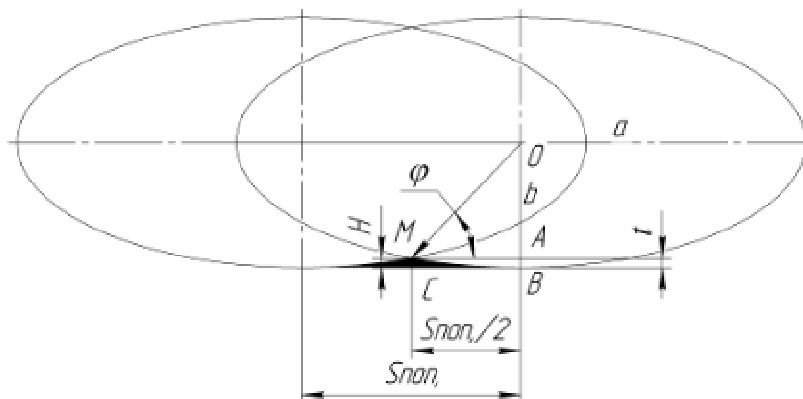
Основний матеріал і результати. Поставлена задача була розв’язана нами шляхом теоретичних досліджень. Правильність отриманих аналітичних залежностей перевіряли шляхом комп’ютерного геометричного моделювання [6, 7].

Для цього скористаємося рисунком 3 (Б, див. рис. 1), який являє собою два еліпси, що зміщені один від одного на величину поперечної подачі S_{non} . Тут a та b більша й менша піввісі еліпса відповідно. Тобто еліпси в цьому випадку теж являють собою проекції кіл на профільну площину. Затемнена зона – залишковий гребінець, формулу для розрахунку висоти якого і треба вивести.

Для цього скористаємося відомим підходом, котрий використовується при виведенні формули для розрахунку висоти залишкового гребінця при лезовій обробці [Ошибка! Источник ссылки не найден.] за умови, коли вершина інструмента (наприклад, різця) виконана у вигляді дуги кола. На підставі схеми, наведеної на рисунку 3, маємо, що

$$H = AB = OB - OA. \quad (4)$$

Підкреслимо, що на рисунку 3 показано крайній випадок, коли $S_{non} = B'$. При цьому висота залишкових гребінців максимальна і теоретично дорівнює глибині шліфування $H = t$. Це надалі буде мати важливе значення з точки зору трактування результатів розрахунків висоти залишкових гребінців.

$$OB = b = a \cdot \sin \alpha = \frac{d_k}{2} \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$


Відрізок OA можна визначити з прямокутного трикутника OAM (рис. 3). Але для цього треба визначити відрізок OM , який (на відміну від відомого випадку [12]) являє собою радіус не кола, а еліпса в точці M (відстань від його центра до цієї точки), тобто є величиною змінною. Така точка збігається з вершиною залишкового гребінця.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ ,}$$

Тоді з урахуванням рівняння (5) маємо, що

$$\frac{S_{non.}^2}{4 \cdot a^2} + \frac{OA^2}{a^2 \cdot \sin^2 \alpha} = 1$$

$$1 - \frac{S_{non.}^2}{4 \cdot a^2} = \frac{OA^2}{a^2 \cdot \sin^2 \alpha}.$$
$$OA^2 = (1 - \frac{S^2}{4 \cdot a^2}) \cdot a^2 \cdot \sin^2 \alpha = (1 - \frac{S^2}{d_k^2}) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha.$$
$$OA = \sqrt{(1 - \frac{S^2}{d_k^2}) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - S^2) \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (6)$$

Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2 (47)' 2016.

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left[d_k - \sqrt{(d_k^2 - S_{non.}^2)} \right] \cdot \sin \alpha. \quad (7)$$

У залежності (7) невідомим фактором є величина поперечної подачі, яка повинна, як було сказано вище, узгоджуватися з шириною зони контакту РПК з деталлю. У роботі [10] **Увага! Історія зміни: встановлено, що значення S_{non} повинне підкорятися нерівності**

$$S_{non.} \leq B' \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}. \quad (8)$$

Це унеможливило утворення на поверхні деталі ділянок, які залишаються не зачепленими шліфувальним кругом.

У результаті попереднього аналізу було встановлено, що в міру зростання подачі S_{non} висота H теж збільшується, а після того як досягне глибини обробки t , повинна перестати змінюватися. Але розрахунки за формулою (7) при подачах, які перебільшують ширину зони контакту B' , показують, що величина залишкових гребінців H продовжує збільшуватися. Тобто точка M , яка є місцем перетину еліпсів (рис. 4), продовжує зміщуватися в бік осі OO_1 в міру зростання подачі у зоні $S_{non} > B'$. Справа в тому, що в цьому випадку реальне значення висоти залишкових гребінців ($H_{реал.}$, затемнена зона) залишається незмінним (і не повинне перебільшувати глибину шліфування t), а розрахункове ($H_{розн.}$) збільшується (див. рівняння (8)) і чисельно дорівнює тій гіпотетичній величині глибини різання $t_{B'}$, яка відповідає поточному значенню B' (оскільки B' залежить від t), а отже, S_{non} .

Тобто розрахункове значення висоти включає її реальне значення і неіснуючу частину гребінця (H' , заштрихована зона). Таким чином, можна записати, що

$$H_{розн.} = H_{реал.} + H'.$$

Цей підхід буде справедливим і у випадку визначення висоти залишкового гребінця при точінні різцем з радіусною вершиною при використанні великих значень подачі.

Аналіз рисунка 4 показує, що у разі шліфування «на прохід» висота H трансформується у відхилення від площинності (увігнутість) $\Delta = t_{B'}$.

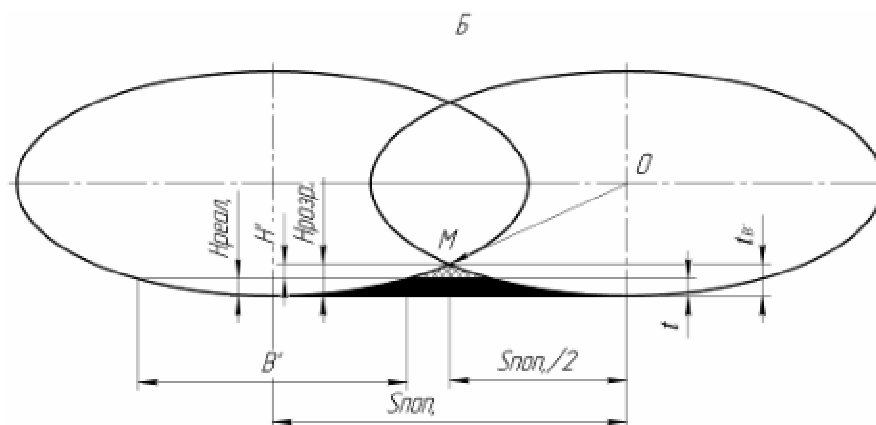


Рисунок 4 – До особливостей визначення висоти залишкових гребінців

Таким чином, при користуванні формулою (7) треба мати на увазі, що в діапазоні поперечних подач $S_{non.} \leq B'$ параметр H являє собою висоту залишкових гребінців (вона не повинна перевищувати глибину обробки t), а в діапазоні подач $S_{non.} > B'$ – увігнутість Δ .

У таблиці наведено фрагмент порівняльних даних за різними способами визначення висоти залишкових гребінців на поверхні деталі.

Таблиця 1 – Порівняльні дані за різними способами визначення висоти гребінців H

d_k , мм	100	150	250	350	500
Комп'ютерне моделювання $H_{км}$, мм	0,06	0,040	0,024	0,017	0,012
Ступенева залежність $H_{сз}$, мм	0,06	0,040	0,025	0,018	0,013
Аналітична залежність $H_{аз}$, мм	0,06	0,040	0,024	0,017	0,012

Загальні умови: $\alpha = 1,5^\circ$; $t = 0,09$ мм; $S_{non} = 30$ мм/подв.х.

Ці дані свідчать про те, що як аналітична формула (7), так і ступенева залежність (3) дають практично однакові результати, які збігаються з даними комп'ютерного геометричного моделювання. Тому обидві залежності мають право на використання залежно від конкретних обставин.

Слід зазначити, що знання такого параметра процесу обробки, як висота залишкових гребінців має важливе практичне значення при розробленні технологічних операцій плоского торцевого шліфування у складі конкретного технологічного процесу виготовлення виробу. Мають на увазі те, що цей факт треба враховувати при розрахунку припусків для чистової і прецизійної стадій шліфування. А це дає змогу технологу визначити кількість проходів із глибиною t на етапі прецизійної обробки з метою забезпечення технічних вимог креслення [10].

Виконані дослідження дозволили сформулювати такі **висновки**:

1. Отримана аналітична залежність, підтверджена результатами комп'ютерного геометричного моделювання, може бути використана для розрахунків величини залишкових гребінців, а також увігнутості плоскої поверхні деталі при багатопрохідному плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя.

2. Дослідження підтвердили правомірність використання на практиці ступеневої залежності, отриманої раніше, але порівняно з нею аналітичні залежності справедливі у більш широких діапазонах параметрів, які характеризують умови обробки.

3. Отримана залежність для розрахунку величини залишкових гребінців має практичне значення при призначенні припусків на обробку й, особливо, для прецизійних стадій шліфування.

Література

1. Dressing of Grinding Wheels / T. Tawakoli, A. Rasifard, M.J. Jackson, J.P. Davim // *Machining with Abrasives*, Springer-Verlag. – Berlin, Heidelberg, 2011. – 230 p.
2. Toenshoff H.K. Basics of Cutting and Abrasive Processes / H.K. Toenshoff, B. Denkena // Springer-Verlag. – Berlin, Heidelberg, 2013. – 210 p.
3. Klocke F. Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping, Springer-Verlag // F. Klocke. – Berlin, Heidelberg, 2009. – 185 p.
4. Malkin S. Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, C. Guo // 2nd Edition, Industrial Press Inc., 2008. – 202 p.
5. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г. Б. Лурье, В. Н. Комиссаржевская. – М. : Высшая школа, 1972. – 416 с.
7. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М. С. Наерман. – М. : Высшая школа, 1985. – 207 с.
8. Лоскутов В. В. Шлифовальные станки / В. В. Лоскутов. – М. : Машиностроение, 1976. – 191 с.

9. *Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. – Т.1 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 944 с.*
10. *Пижов І. М. Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Журнал інженерних наук, наук. журн. Сум. держ. ун-ту. – Суми: Видавництво СумДУ. – 2015. – Т. 2. №1. – С. А10 – А15.*
11. *Пижов І. М. Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: міжнар. науч.-техн. зб. – Харків, 2014. – Вип. 84. – С. 201 – 210.*
12. *Исаев А. И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке / А. И. Исаев. – М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1950. – 108 с.*
13. *Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии / П. С. Александров. – М. : Главная редакция физматлитературы, 1968. – 911 с.*
14. *Пижов І. М. Дослідження особливостей формування відхилень від площинності при плоскому торцевому шліфуванні / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – С-ль, 2014. – Вип. 151/2014. – С. 134 – 139.*

References

1. *Dressing of Grinding Wheels / T. Tawakoli, A. Rasifard, M.J. Jackson, J.P. Davim // Machining with Abrasives, Springer-Verlag. – Berlin, Heidelberg, 2011. – 230 p.*
2. *Toenshoff H.K. Basics of Cutting and Abrasive Processes / H.K. Toenshoff, B. Denkena // Springer-Verlag. – Berlin, Heidelberg, 2013. – 210 p.*
3. *Klocke F. Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping, Springer-Verlag // F. Klocke. – Berlin, Heidelberg, 2009. – 185 p.*
4. *Malkin S. Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, C. Guo // 2nd Edition, Industrial Press Inc., 2008. – 202 p.*
5. *Matalin A. A. Tehnologiya mashinostroeniya / A. A. Matalin. – L. : Mashinostroenie, 1985. – 496 s.*
6. *Lure G. B. Shlifovalnyie stanki i ih naladka / G. B. Lure, V. N. Komissarzhevskaya. – M. : Vysshaya shkola, 1972. – 416 s.*
7. *Naerman M. S. Spravochnik molodogo shlifovschika / M. S. Naerman. – M. : Vysshaya shkola, 1985. – 207 s.*
8. *Loskutov V. V. Shlifovalnye stanki / V. V. Loskutov. – M. : Mashinostroenie, 1976. – 191 s.*
9. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya: v 2-h t. – Т.1 / pod red. А. М. Dalskogo, А. Г. Suslova, А. Г. Kosilovoy, R. K. Mescheryakova. – М. : Mashinostroenie-1, 2003. – 944 s.*
10. *Pyzhov I. M. Doslidzhennia shyryny kontaktu rizalnoi poverkhni kruha z detalliu pry ploskomu tortsevomu shlifuvanni z nakhyлом osi shpyndelia / I. M. Pyzhov, V. H. Klymenko // Zhurnal inzhenernykh nauk, nauk. zhurn. Sum. derzh. un-tu. – Sumy: Vydavnytstvo SumDU. – 2015. – Т. 2. №1. – S. A10 – A15.*
11. *Pyzhov I. M. Deiaki osoblyvosti bahatoprokhidnoho ploskoho tortsevoho shlifuvannia / I. M. Pyzhov, V. H. Klymenko // Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh: mizhnar. nauch.-tekhn. zб. – Kharkiv, 2014. – Vyp. 84. – S. 201 – 210.*
12. *Isaev A. I. Mikrogeometriya poverhnosti pri tokarnoy obrabotke / A. I. Isaev. – M.-L. : Izd-vo AN SSSR, 1950. – 108 s.*
13. *Aleksandrov P. S. Lekcii po analiticheskoy geometrii / P. S. Aleksandrov. – М. : Glavnaya redakciya fizmatliteratury, 1968. – 911 s.*
14. *Pyzhov I. M. Doslidzhennia osoblyvostei formuvannia vidkhylen vid ploshchynnosti pry ploskomu tortsevomu shlifuvanni / I. M. Pyzhov, V. H. Klymenko // Visnyk SevNTU: зб. наук. пр. Seriia: Mashynopryladobuduvannia ta transport. – S-l, 2014. – Vyp. 151/2014. – S. 134 – 139.*

© Піжов І. М., Клименко В. Г.
Надійшла до редакції 31.03.2016

Гнітько С.М., к.т.н., доцент
Шпилька А.М., старший викладач
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСАХ ШЛІФУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

Відомо, що теорію подібності доцільно використовувати для узагальнення даних математичного моделювання руху вібраційної системи процесу шліфування при створенні та дослідженні параметрів певного ряду аналогічних вібраційних систем. Наведено використання теорії подібності для аналізу та створення вібраційних систем і вибору їх параметрів на основі узагальнення попередніх теоретичних та експериментальних досліджень аналогічних систем. З'ясовано, що використання теорії подібності дозволяє розробити критерії для створення ряду систем прецизійної обробки із заданими параметрами, а також визначити взаємний вплив зміни окремих параметрів руху системи в процесі шліфувальної обробки і таким чином установити найбільш ефективні режими шліфування залежно від основних параметрів руху системи.

Ключові слова: теорія подібності, шліфування, динаміка, вібраційні системи.

Гнітько С.М., к.т.н., доцент
Шпилька А.Н., старший преподаватель
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССАХ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Известно, что теорию подобия целесообразно использовать для обобщения данных математического моделирования движения вибрационной системы процесса шлифования при создании и исследовании параметров определенного ряда аналогичных вибрационных систем. Приведено использование теории подобия для анализа и создания вибрационных систем и выбора их параметров на основе обобщения предварительных теоретических и экспериментальных исследований аналогичных систем. Выяснено, что использование теории подобия позволяет разработать критерии для создания ряда систем прецизионной обработки с заданными параметрами, а также определить взаимное влияние изменения отдельных параметров на движение системы в процессе шлифовальной обработки и таким образом установить наиболее эффективные режимы шлифования в зависимости от основных параметров движения системы.

Ключевые слова: теория подобия, шлифование, динамика, вибрационные системы.

SIMILARITY THEORY APPLICATION FOR PARAMETERS ANALYSIS OF THE OSCILLATION SYSTEMS IN POLISHING TREATMENT PROCESSES

As the decision of precision treatment tasks (in a that number the research of polishing process) a mathematical design is often used the oscillation systems parameters theoretical research and it's influence on the processes of treatment. For verification of theoretical calculations and mathematical design of various machines and processes there is a requirement in the construction of experimental test benches for an experimental background and conformities to regularity, got as a result of theoretical check.

The science of the conditions under which physical phenomena are similar. It is related to dimensional analysis and provides the basis for physical modeling. Similarity theory establishes similarity criteria for different physical phenomena and studies the properties of the phenomena by means of these criteria.

Two physical phenomena, processes, or systems are similar if, at corresponding moments of time at corresponding points in space, the values of the variable quantities that characterize the state of one system are proportional to the corresponding quantities of the second system. The proportionality factor for each of the quantities is called the similarity factor.

The development of research on complex physical and physicochemical processes, including mechanical, thermal, and chemical phenomena, has been accompanied by the development of methods of similarity theory that can be applied to these processes. For example, similarity conditions have been established for such phenomena as the friction and abrasion processes undergone by machine parts and the kinetics of physicochemical transformations. Since the parameters characterizing similar phenomena are in proportion, any dimensionless combination of the parameters will have the same numerical value for similar phenomena. Dimensionless combinations formed from the parameters of the phenomena under consideration are called similarity criteria. Any combination of similarity criteria is also a similarity criterion of these physical phenomena.

The theory of similarity is widely used in various engineering industries. During the leadthrough of experimental researches of vibrations of the system of bench-device-instrument-detail with the certain process rate, the theory of similarity can be used for the analysis of change influence of separate system motion parameters in the process of polishing treatment.

The use of similarity theory is expediently for generalization of information, got at the mathematical design of the oscillation system motion at research the analogical oscillation systems parameters subset.

The purpose of the article is the similarity theory using for the polishing treatment systems oscillation analysis and choice of their parameters on the basis of previous theoretical and experimental researches of the analogical systems generalization. Using the similarity theory allows to develop the criteria for creation the subset of the polishing treatment systems with preset parameter, and also to define the cross-coupling of separate parameters change on the system motion in the treatment. It's make the prerequisite to define the most effective polishing modes depending on the basic parameters of system motion.

Keywords: *similarity theory, polishing, dynamic, vibration systems.*

Вступ. Теорія подібності спирається на вчення про розмірність фізичних величин і служить науковою основою моделювання як методу пізнання і дослідження різних об'єктів; основну роль у ній відіграє метод аналогій, тобто схожості об'єктів за певними ознаками. Фізичні явища, процеси або системи подібні, якщо у подібні моменти часу в подібних точках простору значення змінних величин, що характеризують стан однієї системи, пропорційні відповідним величинам іншої системи. Коефіцієнт пропорційності для кожної з величин називається коефіцієнтом подібності.

Теорія подібності встановлює критерії подібності різноманітних фізичних явищ, що дозволяє за їх допомогою вивчати властивості самих явищ. Явні та неявні функціональні зв'язки між критеріями подібності, котрі отримують за допомогою теорії подібності (так звані критеріальні залежності) сприяють розумінню складних фізичних процесів та допомагають інтерпретувати результати як експериментальних досліджень, так і розрахунків.

Застосування теорії подібності при аналізі вібраційних систем у процесах шліфування дасть змогу на основі аналізу математичної моделі визначити необхідні залежності між основними параметрами технологічної системи для забезпечення заданих критеріїв обробки заготовки та призначення відповідних режимів роботи верстата й інструменту.

Аналіз останніх джерел досліджень та публікацій. Теорія подібності застосовується для розв'язання багатьох сучасних технічних задач, у тому числі й для аналізу існуючих машин і механізмів та синтезу нових. Її використання доцільне в тих випадках, коли для повного опису явища недостатньо даних. На підставі теорії подібності виникає можливість переходу від наявної математичної моделі до серії подібних фізичних моделей. Для цього часто використовують метод критеріїв подібності та аналіз розмірностей [1 – 3].

Вплив вібрації на параметри технологічних процесів обробки заготовок на металорізальних верстатах (шліфувальних, фрезерувальних, токарних та ін.) досить складний і викликає увагу науковців [4 – 7] як при створенні нових верстатів із заданими характеристиками, так і при виборі різального інструменту та призначенні параметрів технологічних процесів обробки різанням та прецизійної обробки.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Дослідження впливу вібрації на параметри руху технологічної системи «верстат – різальний інструмент – заготовка» в процесах прецизійної обробки шліфуванням дасть змогу визначити необхідні параметри руху системи для забезпечення ефективної обробки заготовки з необхідною якістю. Для узагальнення даних, отриманих за допомогою математичного моделювання руху вібраційної системи шліфування, при дослідженні параметрів певного ряду подібних вібраційних систем доцільним є використання теорії подібності.

Постановка завдання. Для перевірки даних та закономірностей, отриманих у результаті теоретичних досліджень процесу шліфування матеріалів, виникає потреба в побудові натурних моделей на експериментальних стендах. При використанні значної кількості дослідних зразків із різними кількісними характеристиками (шліфувальних кругів та оброблюваних деталей різних розмірів) доцільно застосовувати теорію подібності. Цей метод моделювання заснований на переході від звичайних фізичних величин до узагальнених величин комплексного типу. Метою дослідження є використання теорії подібності для аналізу та створення вібраційних систем і вибору їх параметрів на основі узагальнення попередніх теоретичних та експериментальних досліджень аналогічних систем.

Основний матеріал і результати дослідження. На підставі теорії подібності легко перейти від наявної моделі вібраційної системи до серії подібних. Скористаємося методом критеріїв подібності, використовуючи при цьому підходи [1 – 3].

Наприклад, вібраційну систему, математична модель якої має вигляд формул (1) – (4), прийmemo як фізичну модель:

$$(m + 2m_o)\ddot{y} - T + f(m + 2m_o)(g - \ddot{z}) = -m_o e \frac{d^2}{dt^2} \sin \varphi ; \quad (1)$$

$$(m + 2m_o)\ddot{z} + c z + \alpha \dot{z} - c_1 z' - \alpha \dot{z}' = -m_o e \frac{d^2}{dt^2} \cos \varphi ; \quad (2)$$

$$M \ddot{z}_1 + c_1 z_1' + \alpha_1 \dot{z}_1' = 0 ; \quad (3)$$

$$I_{ox} \ddot{\varphi} - m_o e (\ddot{x} \cos \varphi - \ddot{z} \sin \varphi) + m_o g e \sin \varphi = M_D - M_C , \quad (4)$$

де y, z, z_1 та φ – узагальнені координати, що відповідають степеням вільності системи;

M_D – обертальний момент двигуна, приведений до шпинделя верстата;

m – маса вібраційної системи;

m_o – неврівноважені маси;

T – сила для забезпечення переміщення по осі y ;

M_C – момент сил опору на привідному валу;

I_{ox} – момент інерції шліфувального круга;

C – коефіцієнт жорсткості;

α – коефіцієнт, який характеризує розсіювання енергії.

Розглянемо механічну систему, динамічно подібну моделі, параметри руху котрої необхідно визначити при створенні натурального об'єкта. Ця система являє собою натурний об'єкт, який проектується (надалі – натура). Відповідні узагальнені координати і параметри обох систем пропорційні, а між точками систем існує матеріальна подібність

$$m_{ni}/m_{mi} = m_c = const.$$

Тут і далі величини, позначені індексами m і n , відносяться відповідно до моделі і натури, а величини, позначені індексом c , є коефіцієнтами пропорційності. У такому випадку між відповідними розмірами натури й моделі повинні виконуватися такі співвідношення:

$$(m + 2m_g)_n = (m + 2m_g)_c (m + 2m_g)_m; \quad C_n = C_c C_m;$$

$$(m_g e)_n = (m_g e)_c (m_g e)_m; \quad \varphi_n = \varphi_c \varphi_m; \quad x_n = x_c x_m;$$

$$y_n = y_c y_m; \quad z_n = z_c z_m; \quad t_n = t_c t_m.$$

Оскільки узагальненими координатами є декартові, то коефіцієнти подібності для всіх координат повинні бути однакові з метою дотримання динамічної подібності між моделлю й натурою:

$$x_n = l_c x_m; \quad y_n = l_c y_m; \quad z_n = l_c z_m.$$

Звідси одержимо

$$\dot{x}_n = \frac{dx_n}{dt_n} = \frac{l_c dx_m}{t_c dt_m} = \frac{l_c}{t_c} \dot{x}_m; \quad \ddot{x} = \frac{d\dot{x}_n}{dt_n} = \frac{l_c}{t_c^2} \ddot{x}_m$$

і аналогічним чином

$$\dot{y}_n = \frac{l_c}{t_c} \dot{y}_m; \quad \ddot{y}_n = \frac{l_c}{t_c^2} \ddot{y}_m; \quad \dot{z}_n = \frac{l_c}{t_c} \dot{z}_m; \quad \ddot{z}_n = \frac{l_c}{t_c^2} \ddot{z}_m;$$

$$\varphi_n = \varphi_c \varphi_m; \dot{\varphi}_n = \frac{d\varphi_n}{dt_n} = \frac{\varphi_c d\varphi_m}{t_c dt_m} = \frac{\varphi_c}{t_c} \dot{\varphi}_m; \ddot{\varphi}_n = \frac{d\dot{\varphi}_n}{dt_n} = \frac{\varphi_c}{t_c^2} \ddot{\varphi}_m$$

Підставивши отримані вирази в рівняння (1), отримаємо диференціальне рівняння для натури

$$\begin{aligned} (m + 2m_g)_c (m + 2m_g)_c \frac{l_c}{t_c^2} \ddot{x} + fm_c m \left(g - \frac{l_c}{t_c^2} \ddot{z} \right) - T = \\ = (m_g e)_c m_g e \left(\frac{\varphi_c}{t_c} \dot{\varphi} \right) \sin \varphi_c \varphi + \varphi - (m_g e)_c (m_g e) \left(\frac{\varphi_c}{t_c^2} \ddot{\varphi} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Для дотримання динамічної подібності між моделлю й натурою необхідне виконання умови $\varphi_c = 1$.

Підставивши вказану умову в рівняння (5), одержимо необхідне співвідношення між масштабами

$$\frac{(m + 2m_g)_c l_c}{t_c^2} = \frac{(m_g e)_c}{t_c^2} = \frac{m_c l_c}{t_c^2}. \quad (6)$$

З рівнянь (1) – (4) можна отримати в такий самий спосіб інші співвідношення масштабів:

$$\frac{(m + 2m_g)_c l_c}{t_c^2} = \frac{2z_c l_c}{t_c} = C_c l_c = \frac{(m_g l)_c}{t_c^2} \quad (7)$$

та ін.

Розділивши почленно рівняння (7) на $C_c l_c$, одержимо сукупність коефіцієнтів подібності, які утворюють одиницю. Вони називаються індикаторами подібності:

$$\frac{(m + 2m_g)_c l_c}{C_c t_c^2} = \frac{\alpha_c}{C_c t_c^2} = \frac{\alpha_{ic}}{C_{ic} t_c^2} = \frac{(m_g e)_c}{C_c l_c t_c^2} = \frac{C_{ic}}{C_c} = 1. \quad (8)$$

З рівняння (8) визначаємо критерії подібності:

$$\Pi_1 = \frac{m + 2m_g}{C t^2} = idem; \Pi_2 = \frac{\alpha}{C t^2} = idem; \Pi_3 = \frac{m_g e}{C l_c t^2} = idem.$$

У такий самий спосіб можемо знайти

$$\Pi_4 = \frac{M}{C_1 t^2} = idem.$$

Вищенаведені три критерії подібності мають те саме значення для моделі та натури (*idem*). Складемо з них комбінацію й одержимо узагальнений критерій подібності

$$\Pi_5 = \frac{\Pi_1 \Pi_2}{\Pi_3} = \frac{m + 2m_g}{m_g e} \frac{\alpha l_c}{C t} = idem, \quad (9)$$

який пов'язує масу, статичний момент невірноважених частин шліфувального верстата та інструменту, які обертаються, координати, час, параметри пружних і дисипативних сил.

У такий самий спосіб можемо отримати й інші узагальнені критерії подібності, а саме:

$$\Pi_6 = \frac{m + 2m_g}{m_g e} \frac{\alpha_1 l_c}{C_1 t} = idem. \quad (10)$$

Далі одержимо новий частковий критерій подібності, розділивши Π_1 на Π_4 ,

$$\Pi_7 = \frac{\Pi_1}{\Pi_4} = \frac{m + 2m_g}{M} \frac{C_1}{C} = idem. \quad (11)$$

Можна одержати й інші критерії подібності, що пов'язують різні величини, наприклад:

$$\Pi_8 = \frac{C_1}{C} = idem. \quad (12)$$

З рівнянь (1) – (4) легко можна знайти такі індикатори подібності:

$$\frac{(m + 2m_g)_c l_c}{(m_g e)_c} = \frac{(m_g e)_c g_c}{M_{\partial c}} = 1 \quad (13)$$

і відповідні критерії подібності:

$$\Pi_9 = \frac{(m + 2m_g)_c l_c}{(m_g e)_c} = idem; \quad (14)$$

$$\Pi_{10} = \frac{(m_g e)_c}{M_{\partial c}} = idem. \quad (15)$$

Розділивши Π_9 на Π_{10} , отримаємо такий критерій подібності з урахуванням того, що $N_{\partial c} = M_{\partial c} \omega$:

$$\Pi_{11} = \frac{(m + 2m_g)_c N_{\partial c} l_c}{(m_g e)_c^2 \omega} = idem. \quad (16)$$

Беручи до уваги (8) і (9), одержимо

$$\Pi_{12} = \frac{MN_{\partial c}}{(m_g e)_c^2 \omega} l_c = idem. \quad (17)$$

При аналізі вібраційних систем у процесах шліфування будемо зберігати значення амплітуди й частоти коливань. Виходячи з цього,

$$\Pi_{13} = \frac{(m + 2m_g)_c N_{\partial c}}{(m_g e)_c^2} = idem. \quad (18)$$

Розглянемо ще раз співвідношення між масштабами (7) з огляду на те, що $m_{ge} = S$,

$$\frac{(m + 2m_g)_c l_c}{t_c^2} = \frac{S_c}{t_c^2}$$

Розділимо його на S_c/t_c^2 й отримаємо індикатор подібності

$$\Lambda = \frac{(m + 2m_g)_c l_c}{S} = 1.$$

Відповідний критерій подібності буде мати такий вигляд:

$$\Pi_{14} = \frac{(m + 2m_g)_c l_c}{S_c} = idem. \quad (19)$$

Оскільки було прийнято, що переміщення для моделі й натури незмінні, враховуючи співвідношення (11) і (8), одержимо

$$\Pi_{15} = \frac{M}{S} = idem. \quad (20)$$

Аналогічним чином можна отримати й інші критерії подібності для визначення або задання параметрів прецизійної обробки для певного технологічного процесу.

Висновки. Використання теорії подібності дозволяє розробити критерії для створення ряду систем прецизійної обробки із заданими параметрами, а також визначити взаємний вплив зміни окремих параметрів руху системи в процесі прецизійної обробки і таким чином визначити найбільш ефективні режими шліфування залежно від основних параметрів руху системи.

Література

1. Алабужев П. М. Подобие и моделирование в задачах и примерах / П. М. Алабужев. – Курск : КПИ, 1983. – Деп. в ВИНТИ. – Часть 1, №4227-83. – 145 с.; часть 2, №5274-83. – 229 с.
2. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы / С. Дж. Клайн. – М. : Мир, 1968. – 302 с.
3. Бриджмен П. В. Анализ размерностей. / П. В. Бриджмен. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
4. Thevenot V. Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling / V. Thevenot, L. Arnaud, G. Dessein and G. Cazenave-Larroche // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 27. – P. 638 – 644.
5. Bravo U. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine / U. Bravo, O. Altuzarra, L. N. Lopez de Lacalle, J. A. Sanchez and F. J. Campa // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45. – P. 1669 – 1680.
6. Campa F. J. Critical Thickness and Dynamic Stiffness for Chatter Avoidance in Thin Floors Milling / F. J. Campa, L. N. Lopez de Lacalle, G. Urbicain, A. Lamikiz, S. Seguy, L. Arnaud // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 188. – P. 116 – 118.
7. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании / А. И. Каширин. – М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с.

References

1. Alabuzhev P. M. Podobie i modelirovanie v zadachah i primerah / P. M. Alabuzhev. – Kursk : KPI, 1983. – Dep. v VINITI. – Chast 1, №4227-83. – 145 s.; chast 2, №5274-83. – 229 s.
2. Klayn S. Dzh. Podobie i priblizhennyye metody / S. Dzh. Klayn. – M. : Mir, 1968. – 302 s.
3. Bridzhmen P. V. Analiz razmernostey. / P. V. Bridzhmen. – Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2001. – 148 s.
4. Thevenot V. Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling / V. Thevenot, L. Arnaud, G. Dessein and G. Cazenave-Larroche // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 27. – P. 638 – 644.
5. Bravo U. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine / U. Bravo, O. Altuzarra, L. N. Lopez de Lacalle, J. A. Sanchez and F. J. Campa // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45. – P. 1669 – 1680.
6. Campa F. J. Critical Thickness and Dynamic Stiffness for Chatter Avoidance in Thin Floors Milling / F. J. Campa, L. N. Lopez de Lacalle, G. Urbicain, A. Lamikiz, S. Seguy, L. Arnaud // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 188. – P. 116 – 118.
7. Kashirin A. I. Issledovanie vibratsiy pri rezanii / A. I. Kashirin. – M.-L. : Izd-vo AN SSSR, 1944. – 262 s.

© Гнітько С.М., Шпилька А.М.
Надійшла до редакції 29.03.2016

Гурко А.Г., к.т.н., доцент
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

СИНТЕЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРНОГО ТИПА

Известно, что значительное количество современных строительных и дорожных машин имеет рабочее оборудование в виде манипулятора – экскаваторы, машины для лесотехнических работ, краны-манипуляторы и т.д. Повышение эффективности таких машин связано с автоматизацией выполняемых ими рабочих процессов. Одной из задач, которую должна решать система управления машинами с рабочим оборудованием манипуляторного типа, является синтез эффективных траекторий рабочего оборудования. Под траекториями здесь понимают законы изменения углов поворота или линейных перемещений звеньев манипулятора машины. Разработана функциональная модель подсистемы синтеза оптимальной траектории рабочего оборудования. В качестве критерия оптимальности предложено использовать минимум работы сил сопротивления, преодолеваемых машиной при выполнении рабочей операции. Эффективность рассмотренного подхода подтверждена результатами моделирования.

Ключевые слова: *строительно-дорожная машина, манипулятор, траектория, система управления, энергетическая эффективность.*

Гурко О.Г., к.т.н., доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СИНТЕЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТРАЄКТОРІЙ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ МАНІПУЛЯТОРНОГО ТИПУ

Відомо, що значна кількість сучасних будівельних і дорожніх машин має робоче обладнання у вигляді маніпулятора – екскаватори, машини для лісотехнічних робіт, крани-маніпулятори тощо. Підвищення ефективності таких машин пов'язано з автоматизацією робочих процесів, що вони виконують. Одним із завдань, які повинна розв'язувати система керування машинами з робочим обладнанням маніпуляторного типу, є синтез ефективних траєкторій робочого обладнання. Під траєкторіями тут розуміють закони зміни кутів повороту або лінійних переміщень ланок маніпулятора машини. Розроблено функціональну модель підсистеми синтезу оптимальної траєкторії робочого обладнання. Як критерій оптимальності запропоновано використовувати мінімум роботи сил опору, які може здолати машина при виконанні робочої операції. Ефективність викладеного підходу підтверджено результатами моделювання.

Ключові слова: *будівельно-дорожня машина, маніпулятор, траєкторія, система керування, енергетична ефективність.*

SYNTHESIS OF ENERGY EFFICIENT TRAJECTORIES OF MANIPULATOR-LIKE WORKING EQUIPMENT

There are many construction and road machines with manipulator-like working equipment such as excavators, forest harvesters, crane-manipulators, etc. The quality requirements for the work performed by these machines are constantly increasing. The complexity of the working equipment is also growing, for instance, the number of its degrees of freedom is rising. All these factors make an operator's work more complex as well and require a very high qualification. Besides, the complexity of a machine leads to the fact that the operator will not be able to realize all its abilities. Therefore, increasing the efficiency and productivity of machines with manipulator-like working equipment is a very important issue, the solution which is inseparably linked with improving control systems of machines' manipulators.

A lot of work has been done over the last two decades in the field of construction and road machinery automation. However, most of the researches focus on working equipment tracking control. Tracking accuracy, undoubtedly, specifies the machine efficiency. Nevertheless, evaluation of its efficiency with quality indexes, which are commonly used in construction machinery, for instance, energy intensity, is preferable.

One of the ways to increase the machine energy efficiency is to plan working equipment optimal trajectories. Therefore, in this paper we present a functional model of the automatic trajectory planning system, which allows to calculate optimal working equipment trajectories in the joint space.

The trajectory planning is based on the kinematics and dynamics models of the machine manipulator, on the evaluation of external disturbances in the system as well as on the information about the desired path in the Cartesian space. To determine the trajectory, the time slice, which is needed for the tool motion along the desired path, is divided into equal intervals that correspond to certain sections of the path. Then the optimal trajectory is calculated for each of the path sections.

The minimization of the work of the resistance forces to be overcome by the machine at work operation has been proposed as the optimality criterion. To minimize the optimality criterion, optimal values of weighting factors, which prioritize the manipulator links movement, have been determined by using the genetic algorithm. The effectiveness of the proposed approach has been confirmed with the simulation results for the robotic excavator.

The results of the research can be extended to the case of the optimal control of industrial robots.

Keywords: *construction and road machinery, manipulator, trajectory, control system, energy efficiency.*

Введение. Разработка и внедрение систем автоматического управления (САУ) рабочим процессом строительных и дорожных машин (СДМ) с рабочим оборудованием (РО) в виде механизмов с открытыми кинематическими цепями (манипуляторов) и, в частности, экскаваторов является одним из наиболее перспективных путей их совершенствования. При разработке таких систем основное внимание уделяется точности перемещения рабочего инструмента (ковша, вибромолота и т.д.) по заданной траектории. Этот показатель характеризует качество системы управления и косвенно – производительность машины. Однако предпочтительным является произведение оценки таких САУ при помощи принятых в теории СДМ показателей, например, энергоемкости рабочего процесса. Кроме определения эффективности уже внедренных или только разработанных систем, подобная оценка позволит сформулировать требования к проектируемым системам управления СДМ.

Снижения энергоемкости рабочего процесса СДМ, кроме всего прочего, можно добиться синтезом траекторий РО, реализация которых требует минимальных затрат энергии.

Под синтезом траектории понимают определение таких законов изменения углов поворота или линейных перемещений звеньев РО при заданных ограничениях на их скорости и ускорения, которые бы обеспечили прохождение рабочего инструмента из начальной точки в конечную через некоторую последовательность контрольных точек [1]. При этом часто требуется поддерживать определенную ориентацию рабочего инструмента. Например, при автоматическом копании экскаватором необходимо, чтобы угол резания сохранял постоянное значение, соответствующее наименьшей силе сопротивления резанию ($30^\circ \dots 50^\circ$) [2].

Анализ последних источников исследований и публикаций. При синтезе оптимальных траекторий манипуляторов наиболее часто используется критерий минимума времени выполнения технологической операции. Количество же публикаций, посвященных определению траекторий, обеспечивающих минимум затрат энергии, значительно меньше. При этом часто исполнительные механизмы рассматриваются упрощенно, как источники вращающих моментов, и оптимальная траектория отыскивается с точки зрения минимизации интеграла от суммы квадратов или суммы абсолютных значений управляющих моментов [3, 4]. Анализ энергоемкости траекторий, полученных некоторыми традиционными методами, выполнен в работах [5, 6]. При этом в качестве объекта рассматривался стэнфордский манипулятор, синтез траекторий осуществлялся в операционном пространстве, а динамикой исполнительных механизмов пренебрегали.

В работе [7] описаны результаты экспериментальных исследований по влиянию траектории робота-манипулятора IRB 1600 с электрическим приводом на затраты энергии, что позволило определять рациональные траектории этого робота. В работах [8, 9] при синтезе оптимальных с энергетической точки зрения траекторий применяется метод динамического программирования.

Рассматривались проблемы построения оптимальных траекторий и для манипуляторов с гидравлическим приводом. В частности, в работах [10, 11] приведены варианты решения задачи синтеза оптимальных по быстродействию траекторий и управления движением вдоль этих траекторий манипулятора машины для лесотехнических работ. В работах [12, 13] параллельно с задачей планирования оптимальной по быстродействию траектории рассмотрена задача минимизации моментов, необходимых для осуществления движения манипулятора экскаватора, при этом учитывались ограничения на силы, развиваемые гидроприводом, а также на скорости и ускорения звеньев.

В статье [14] предложен и в работе [15] распространен на экскаваторы метод синтеза траектории манипулятора, суть которого заключается в решении на каждом шаге k квантования по времени следующего несовместного матричного уравнения:

$$H_k \Theta_k = F_k, \quad (1)$$

где $\Theta_k = [\Delta q_1^k \Delta q_2^k \dots \Delta q_n^k]^T$ – вектор искомых приращений присоединенных координат;

H_k – прямоугольная $(2 \times n)$ -матрица, элементы которой равны:

$$(H_k)_{1,i-1} = \sum_{j=i}^n l_j \sin \alpha_j^{k-1}; \quad (H_k)_{2,i-1} = \sum_{j=i}^n l_j \cos \alpha_j^{k-1}; \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где l_i – длина i -го звена манипулятора;

n – число степеней свободы манипулятора;

α_i – углы между i -ым звеном манипулятора и горизонтальной осью O_0x_0 :

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^i q_j; \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Решением уравнения (1) является решение уравнения (4)

$$(H_k^T H_k + \lambda C) \cdot \Theta_k = H_k^T F_k, \quad (4)$$

где λ – малый произвольный положительный параметр, обеспечивающий устойчивость вычисления матрицы $(H_k^T H_k + \lambda C)^{-1}$;

C – диагональная $(n \times n)$ -матрица, ненулевые элементы которой задаются по формуле

$$C_{i,i} = \gamma_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где γ_i – весовые коэффициенты.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В работе [15] значения весовых коэффициентов γ_i в формуле (5) предлагалось выбирать так, чтобы выровнять максимальные значения угловых ускорений соответствующих звеньев. В то же время целесообразным является использование таких весовых коэффициентов, которые бы привели к оптимальным с энергетической точки зрения траекториям звеньев РО СДМ.

Цель и постановка задач. Целью данной работы, таким образом, является повышение энергетической эффективности рабочего процесса СДМ с РО в виде манипулятора за счет усовершенствования метода синтеза траекторий РО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать функциональную модель подсистемы синтеза траектории РО;
- определить критерий энергетической эффективности траектории РО;
- выполнить расчет оптимальных значений элементов матрицы (5).

Основной материал и результаты. Задачами, решаемыми САУ РО СДМ, являются планирование движения РО с учетом технологических требований, а также обеспечение этого движения с заданным качеством. Упрощенная структурная схема САУ РО СДМ приведена на рис. 1.

Под планированием пути подразумевается определение траекторий перемещения РО в декартовой (обычно мировой) системе координат, а также законы изменения линейных скоростей и ускорений [1]. При этом необходимо учитывать тип машины, возможности ее манипулятора, особенности рабочего процесса, конфигурацию рабочей зоны, наличие препятствий и прочее. Например, в случае одноковшового экскаватора на данном этапе учитываются нанесенные на цифровую карту проектные параметры забоя и место, куда будет производиться выгрузка грунта (отвал или автомобиль).

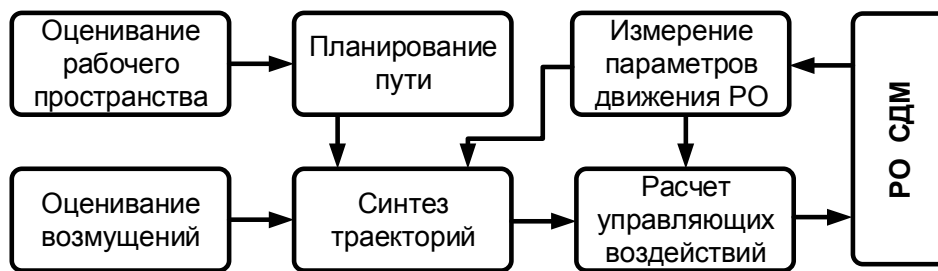


Рисунок 1 – Структурная схема САУ РО СДМ

Планирование пути является весьма сложной отдельной задачей (вычислительная сложность алгоритмов планирования пути экспоненциально растет с увеличением числа степеней свободы манипулятора), которая решается на стратегическом уровне системы управления РО СДМ, и ее решение выходит за рамки данной работы.

Рассмотрим более подробно подсистему синтеза траекторий (рис. 2). Будем считать, что синтез производится предложенным в работе [15] методом на основе выражений (1) – (5).

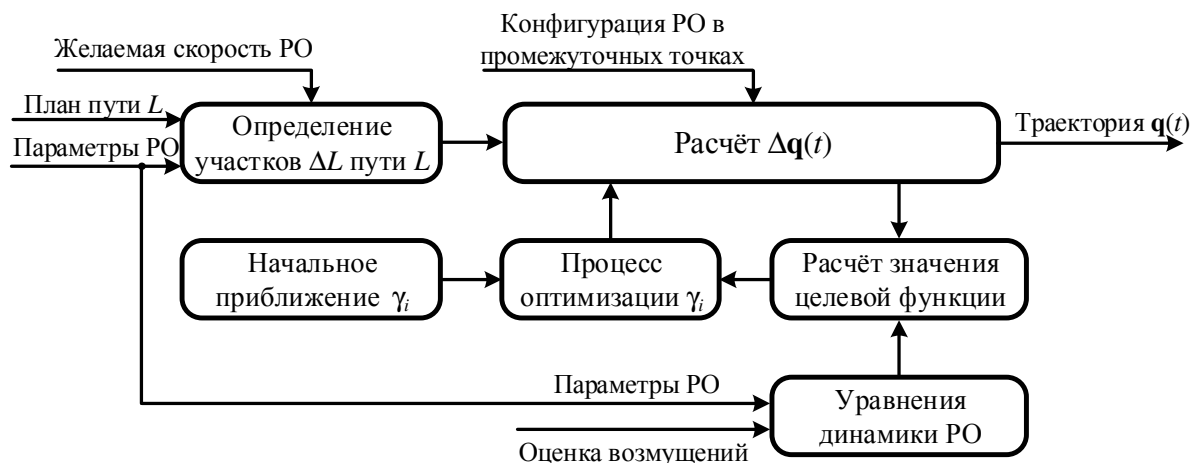


Рисунок 2 – Функциональная модель процесса синтеза траектории

Исходными данными для подсистемы являются информация о рассчитанном на предыдущем уровне иерархии пути L движения рабочего инструмента в декартовой системе координат и конструктивных параметрах звеньев РО. Для определения законов изменения присоединенных координат $q(t)$ временной интервал $[0; T]$, за который рабочий инструмент преодолевает весь путь L , разбивается на I равных промежутков с шагом $\Delta t = T/I$. За промежутки времени Δt рабочий инструмент проходит расстояния $\Delta L = v \cdot \Delta t$, где v – желаемая скорость движения рабочего инструмента. Значение v определяется, исходя из типа машины и выполняемого ею рабочего процесса. Так, скорость копания грунта ковшом экскаватора составляет $v \approx 2$ м/с [16]. Для каждого участка пути ΔL рассчитывается оптимальная траектория $q(\Delta t)$. Согласно принципу оптимальности Беллмана, если все участки $q(\Delta t)$ траектории $q(t)$ оптимальны, то вся траектория $q(t)$ также оптимальна.

Для расчета оптимальных $q(\Delta t)$ необходимо определить оптимальные значения элементов γ матрицы (5). Эта задача решается методами нелинейного программирования. Минимизируемая целевая функция должна учитывать затраты энергии на реализацию траектории $q(t)$. Для этого необходимо также иметь модель, описывающую динамику РО и учитывающую возможное действие внешних возмущений, например,

возникающих при взаимодействии рабочего инструмента с грунтом. Поскольку предсказать точные значения возмущений невозможно, приходится использовать их оценки, полученные либо путем обработки статистических данных, либо на основе информации о принадлежности некоторым доверительным интервалам [17].

Эффективность использования СДМ оценивается по ряду показателей. С точки зрения экономии энергетических затрат удобно пользоваться удельной энергоемкостью

$$N_{y\partial} = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{P_i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3, \quad (6)$$

где N_i – мощность, развиваемая машиной при выполнении i -ой операции, кВт;
 P_i – производительность машины при выполнении i -ой операции, м³/ч;
 m – количество выполняемых операций.

Однако текущее значение производительности получить в режиме реального времени затруднительно. Поэтому выражение (6) непригодно для использования в качестве критерия эффективности САУ РО. В то же время известно, что мощность N_i определяется работой A_i сил сопротивления, преодолеваемых машиной при выполнении i -ой операции, например при копании экскаватором. В связи с этим в качестве критерия энергетической эффективности САУ РО СДМ целесообразно использовать работу A_i , совершаемую при осуществлении рабочего процесса. Тогда в случае РО с вращательными сочленениями САУ должна определить траектории $q_i(t)$, минимизирующие целевую функцию

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{q_0}^q M_i dq_i \xrightarrow{\gamma \in \Gamma} \min, \quad (7)$$

где M_i – момент силы, приводящей i -ое звено в движение;
 Γ – область допустимых значений весовых коэффициентов γ в уравнении (5).

Математическая модель манипулятора СДМ с n степенями свободы может быть представлена в виде следующего матричного уравнения:

$$\hat{D}(q)\ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{B}(\dot{q}) + \hat{M}_L = \frac{\partial h}{\partial q} (A_A \hat{p}_A - A_B \hat{p}_B), \quad (8)$$

где $q = [q_i]^T \in R^n$ – вектор присоединенных координат;

$D(q) \in R^{n \times n}$ – симметричная положительно-определённая матрица инерции манипулятора;

$C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ – матрица, содержащая центробежные и кориолисовы члены;

$G(q) \in R^n$ – вектор сил гравитации;

$B(\dot{q}) \in R^n$ – вектор коэффициентов трения;

$M_L \in R^n$ – вектор сил и моментов сопротивления, действующих на i -ое звено;

$h \in R^n$ – вектор линейных смещений штоков гидроцилиндров привода соответствующих звеньев;

$A_A = \text{diag}\{A_{Ai}\} \in R^{n \times n}$, $A_B = \text{diag}\{A_{Bi}\} \in R^{n \times n}$ – матрицы, диагональными элементами которых являются площади поршней гидроцилиндров со стороны бесштоковой A и штоковой B полостей;

$p_A \in R^n$, $p_B \in R^n$ – векторы давлений в полостях A и B гидроцилиндров.

Так как при синтезе управления значения входящих в уравнение (8) параметров известны приближенно, то приходится пользоваться их оценками, которые обозначены символом « $\wedge$ ».

Как отмечалось ранее, целью подсистемы синтеза траекторий САУ РО СДМ является вычисление таких значений компонентов вектора присоединенных

координат $q(t)$, которые бы обеспечили движение рабочего инструмента по определенному пути, удовлетворяя при этом накладываемые ограничения и условия (7).

Приведенные выше соотношения были использованы при синтезе оптимальной траектории РО СДМ. В качестве примера рассмотрен экскаватор с обратной лопатой с конструктивными параметрами РО, приведенными в табл. 1. Динамика РО моделировалась уравнением (8). Оптимизация значений весовых коэффициентов γ_i , $i = \overline{1,3}$ производилась с помощью генетического алгоритма [18].

Таблица 1 – Параметры манипулятора экскаватора

Звено	Масса m_i , кг	Момент инерции I_i , кг·м ²	Длина l_i , м	Расстояния до ЦМ r_i , м	Углы между осями и ЦМ α_i , рад
Стрела	1566	14250,6	5,16	2,71	0,2566
Рукоять	735	727,7	2,59	0,64	0,3316
Ковш	432	224,6	1,33	0,65	0,3944

На рис. 3 приведена кривая, соответствующая требуемой траектории зубьев ковша в декартовой системе координат, а также положения манипулятора, соответствующие исходной O_0 , конечной O_f точкам движения РО и точке O_g соприкосновения ковша с грунтом.

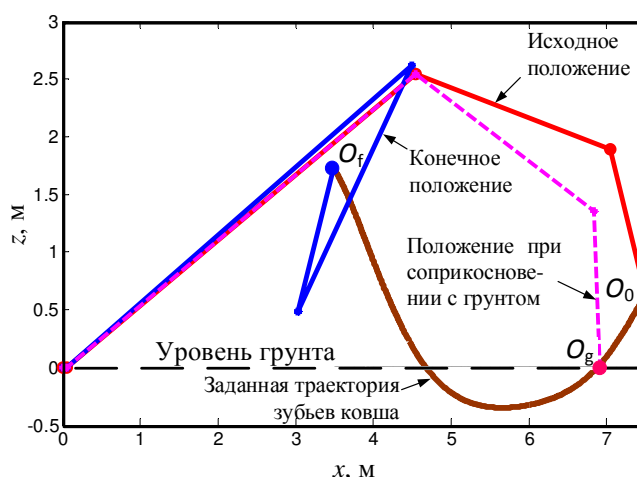


Рисунок 3 – Рассчитанные положения манипулятора экскаватора

Оценку изменения моментов сил сопротивления копанью отображает рис. 4.

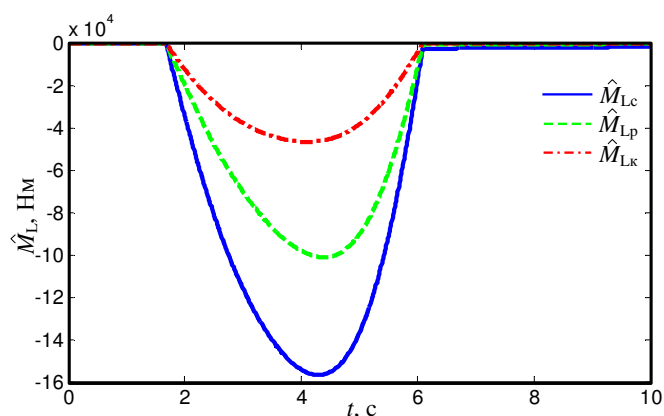


Рисунок 4 – Моменты сил сопротивления копанью

Очевидно, что для уменьшения значения целевой функции (7) необходимо минимизировать движение стрелы. Это также подтверждается рис. 4, который отображает зависимость работы A от коэффициента γ_2 в уравнении (5) при фиксированных значениях $\gamma_3 = \gamma_4 = 0,1$.

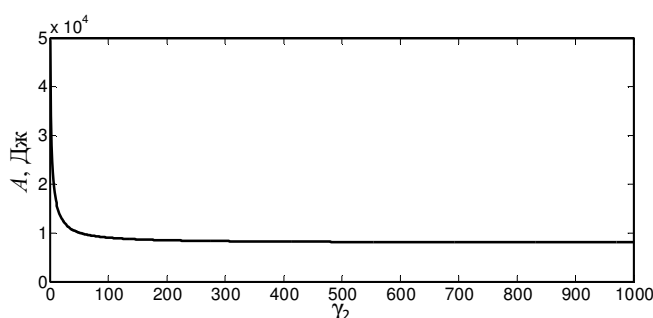


Рисунок 5 – Зависимость значения работы от коэффициента γ_2

Как следует из рис. 5, увеличение значения коэффициента γ_2 свыше 200 не приводит к существенному снижению работы A , т.к. обеспечить заданное движение только за счет перемещения рукоятки и ковша невозможно. В то же время уменьшение области допустимых значений коэффициентов γ_i сокращает время оптимизации. Зависимости $A(\gamma_2, \gamma_3)$ и $A(\gamma_3, \gamma_4)$ приведены на рис. 6. Из рис. 6 видно, что значение работы уменьшается со снижением коэффициентов γ_3 и γ_4 .

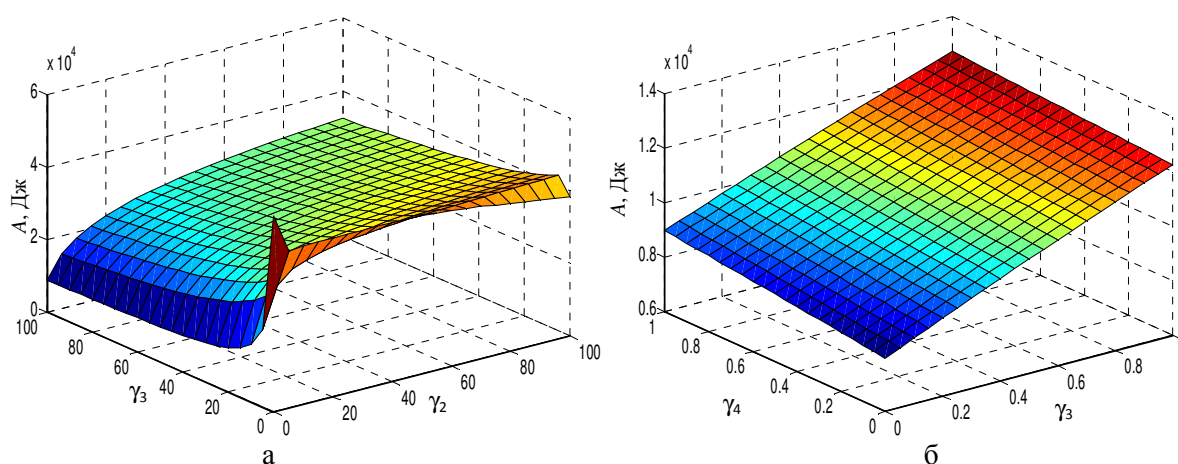


Рисунок 6 – Зависимость работы от коэффициентов γ_i :

а – $A(\gamma_2, \gamma_3)$; б – $A(\gamma_3, \gamma_4)$

Анализ рис. 4 – 6 позволил наложить следующие ограничения на значения весовых коэффициентов $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$:

$$0 < \gamma_2 \leq 200; \quad (9)$$

$$0 < \gamma_3 \leq 1; \quad (10)$$

$$0 < \gamma_4 \leq 1; \quad (11)$$

Кроме того, угол резания ковшом ограничен диапазоном $30...50^\circ$.

Изменение значения целевой функции (7) в ходе оптимизации отображает рис. 7. Как видно из этого рисунка, оптимальное решение получено за 51 шаг (поколение), однако уже через 15 поколений значение целевой функции близко к оптимальному. Полученные значения весовых коэффициентов равны $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 0,01$, $\gamma_3 = 0,01$.

Соответствующее им значение работы составляет $A = 69126$ Дж против $A = 89438$ Дж при значениях весовых коэффициентов, полученных по методике из работы [15].

Полученные оптимальные законы изменения углов поворота стрелы $q_c(t)$, рукояти $q_p(t)$ и ковша $q_k(t)$ приведены на рис 8.

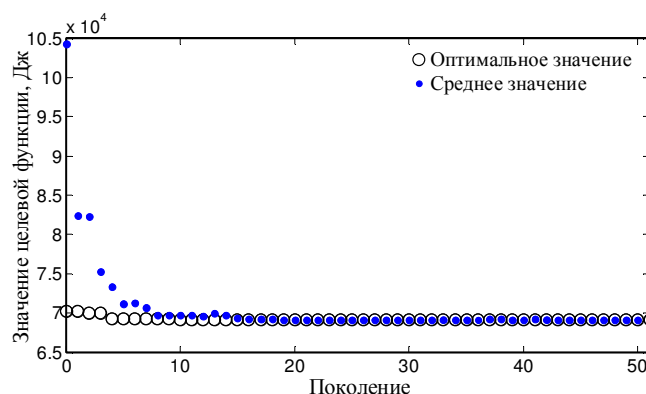


Рисунок 7 – Изменение значения целевой функции в процессе оптимизации

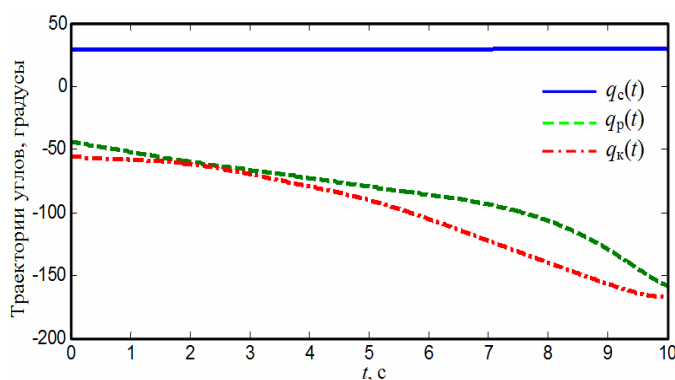


Рисунок 8 – Законы изменения углов поворота звеньев РО

Таким образом, полученные траектории $q(t)$ удовлетворяют заданные условия гладкости, а также являются оптимальными с точки зрения минимума энергетических затрат на реализацию рабочего процесса.

Выводы. Основной целью САУ РО СДМ является повышение производительности машины и снижение энергетических затрат на выполнение рабочего процесса. Затраты энергии в значительной степени зависят от законов изменения (траекторий) присоединенных координат РО.

В результате данного исследования разработана функциональная модель подсистемы САУ РО СДМ, осуществляющей синтез траекторий, которая позволила выделить основные подэтапы процесса синтеза оптимальных траекторий присоединенных координат РО. В качестве критерия энергоэффективности САУ РО СДМ предложено использовать работу сил сопротивления, преодолеваемых машиной при выполнении рабочей операции.

Усовершенствован предложенный в работе [15] метод синтеза траекторий РО СДМ за счет оптимизации параметров уравнения для расчета траекторий.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что предложенная система обеспечивает до 23% экономии энергии по сравнению с существующими решениями.

Приведенные результаты могут быть распространены на случай управления промышленными роботами.

Литература

1. *Springer Handbook of Robotics* / eds. B. Siciliano, O. Khatib. – Springer, 2008. – 1611 p.
2. Акинфиев А. А. Создание системы управления операцией копания для одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения эффективности его работы: дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.04 – дорожные, путевые и строительные машины / А. А. Акинфиев. – М., 1983. – 236 с.
3. Valášek M. Synthesis of optimal trajectory of industrial robots / M. Valášek // *Kybernetika*. – 1986. – V. 22. – № 5. – P. 409 – 424.
4. Hussong A. Restricted minimum-effort motion planning for serial manipulators / A. Hussong, B. Heimann // *Proc. of the 12th IFToMM World Congress*. – 2007. – 6 p.
5. Aljawi A. Selection of a trajectory function for minimum energy requirements of a spherical robot / A. Aljawi, H. Diken, S. Alshahrani // *JKAU: Engineering Science*. – 2004. – V. 15. – № 2. – P. 99 – 110.
6. Alshahrani S. Optimum trajectory function for minimum energy requirements of a spherical robot / S. Alshahrani, H. Diken, A. Aljawi // *6th Saudi Engineering Conf., KFUPM*. – Dhahran. – 2002. – P. 613 – 625.
7. Rassolkin A. Energy saving possibilities in the industrial robot IRB 1600 control / A. Rassolkin, H. Hoimoja, R. Teemets // *7th Intern. Conf. Compatibility and Power Electronics (CPE)*. – 2011. – P. 226 – 229.
8. Chou L. Geometric work of manipulators and path planning based on minimum energy consumption / L. Chou, S. Song // *J. of Mechanical Design*. – 1992. – V. 114. – № 3. – P. 414 – 421.
9. Field G. Iterative dynamic programming: an approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators / G. Field, Y. Stepanenko // *Proc. on 1996 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. – 1996. – V. 3. – P. 2755 – 2760.
10. Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control / D. Morales, S. Westerberg, P. La Hera et. al. // *J. of Field Robotics*. – 2014. – V. 31. – № 3. – P. 343 – 363.
11. Trajectory planning and time-independent motion control for a kinematically redundant hydraulic manipulator / U. Mettin, P. La Hera, D. Morales et al. // *Proc. on Intern. Conf. on Advanced Robotics*. – 2009. – P. 1 – 6.
12. Study on the Virtual Digging Simulation of a Hydraulic Excavator / Y. Kim, H. Kang, J. Ha et al. // *28th Intern. Symposium on Automation and Robotics in Construction*. – 2011. – P. 95 – 100.
13. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators / Y. Kim, J. Ha, H. Kang et al. // *Automation in Construction*. – 2013. – V. 35. – P. 568 – 578.
14. Гурко А. Г. Решение обратной задачи кинематики плоского шарнирного избыточного манипулятора / А. Г. Гурко, И. В. Янчевский // *Механика та машинобудування*. – 2014. – № 1. – С. 136 – 147.
http://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash#2014_1
15. Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback / O. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena, A. Gurko et al. // *Proc. of 39th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2013. – P. 4239 – 4244.
16. Баловнев В. И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации / В. И. Баловнев. – М. : МАДИ, 2012. – 134 с.
17. Guaranteed Control of a Robotic Excavator During Digging Process / A. Gurko, O. Sergiyenko, O. Hipólito et al. // *12th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2015)*. – 2015. – V.2. – P. 52 – 59.
18. Захарова Е. М. Обзор методов многомерной оптимизации / Е. М. Захарова, И. К. Минашина // *Информационные процессы*. – 2014. – Т. 14. – №. 3. – С. 256 – 274.

References

1. *Springer Handbook of Robotics* / eds. B. Siciliano, O. Khatib. – Springer, 2008. – 1611 p.
2. Akinfiyev A. A. *Sozdanie sistemy upravleniya operaciy kopaniya dlya odnokovshovogo gidravlicheskogo ekskavatora s celyu povysheniya effektivnosti ego raboty: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.05.04 – dorozhnye, putevye i stroitelnye mashiny* / A. A. Akinfiyev. – M., 1983. – 236 s.
3. Valášek M. *Synthesis of optimal trajectory of industrial robots* / M. Valášek // *Kybernetika*. – 1986. – V. 22. – № 5. – P. 409 – 424.
4. Hussong A. *Restricted minimum-effort motion planning for serial manipulators* / A. Hussong, B. Heimann // *Proc. of the 12th IFToMM World Congress*. – 2007. – 6 p.
5. Aljawi A. *Selection of a trajectory function for minimum energy requirements of a spherical robot* / A. Aljawi, H. Diken, S. Alshahrani // *JKAU: Engineering Science*. – 2004. – V. 15. – № 2. – P. 99 – 110.
6. Alshahrani S. *Optimum trajectory function for minimum energy requirements of a spherical robot* / S. Alshahrani, H. Diken, A. Aljawi // *6th Saudi Engineering Conf., KFUPM*. – Dhahran. – 2002. – P. 613 – 625.
7. Rassolkin A. *Energy saving possibilities in the industrial robot IRB 1600 control* / A. Rassolkin, H. Hoimoja, R. Teemets // *7th Intern. Conf. Compatibility and Power Electronics (CPE)*. – 2011. – P. 226 – 229.
8. Chou L. *Geometric work of manipulators and path planning based on minimum energy consumption* / L. Chou, S. Song // *J. of Mechanical Design*. – 1992. – V. 114. – № 3. – P. 414 – 421.
9. Field G. *Iterative dynamic programming: an approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators* / G. Field, Y. Stepanenko // *Proc. on 1996 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. – 1996. – V. 3. – P. 2755 – 2760.
10. *Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control* / D. Morales, S. Westerberg, P. La Hera et. al. // *J. of Field Robotics*. – 2014. – V. 31. – № 3. – P. 343 – 363.
11. *Trajectory planning and time-independent motion control for a kinematically redundant hydraulic manipulator* / U. Mettin, P. La Hera, D. Morales et al. // *Proc. on Intern. Conf. on Advanced Robotics*. – 2009. – P. 1 – 6.
12. *Study on the Virtual Digging Simulation of a Hydraulic Excavator* / Y. Kim, H. Kang, J. Ha et al. // *28th Intern. Symposium on Automation and Robotics in Construction*. – 2011. – P. 95 – 100.
13. *Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators* / Y. Kim, J. Ha, H. Kang et al. // *Automation in Construction*. – 2013. – V. 35. – P. 568 – 578.
14. Gurko A. G. *Reshenie obratnoy zadachi kinematiki ploskogo sharnirnogo izbytochnogo manipulyatora* / A. G. Gurko, I. V. Yanchevskiy // *Mehanika ta mashinobuduvannya*. – 2014. – № 1. – S. 136 – 147.
http://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash#2014_1
15. *Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback* / O. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena, A. Gurko et al. // *Proc. of 39th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2013. – P. 4239 – 4244.
16. Balovnev V. I. *Opredelenie optimalnykh parametrov i vybor zemleroynykh mashin v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii* / V. I. Balovnev. – M. : MADI, 2012. – 134 s.
17. *Guaranteed Control of a Robotic Excavator During Digging Process* / A. Gurko, O. Sergiyenko, O. Hipólito et al. // *12th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2015)*. – 2015. – V.2. – P. 52 – 59.
18. Zaharova E. M. *Obzor metodov mnogomernoy optimizatsii* / E. M. Zaharova, I. K. Minashina // *Informacionnye processy*. – 2014. – T. 14. – №. 3. – S. 256 – 274.

© Гурко А.Г.

Надійшла до редакції 12.05.2016

Коробко Б. О., к.т.н., доцент
Вірченко В. В., к.т.н., старший викладач
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СТРІЧКОВО-ЛОПАТЕВОГО РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА

Висвітлено результати дослідження робочих процесів приготування будівельних розчинів різної рухомості у стрічково-лопатевому розчинозмішувачі. Шляхом тривимірного моделювання побудовано поля швидкостей, які визначають характерні складові процесу перемішування: макро- і мікрозмішування. Установлено особливості процесу мікрозмішування, які полягають у русі розчину по стрічці та на контурі додаткових лопаток. На основі тривимірного моделювання показано розподіл часток розчину та їх траєкторії руху в корпусі змішувача зі стрічково-лопатевим робочим органом з урахуванням параметрів і режимів його роботи. Обґрунтовано використання як робочого органа змішувача стрічково-лопатєвого вала, оскільки застосування додаткових лопаток перешкоджає утворенню «мертвих» зон у корпусі змішувача й суттєво підвищує інтенсивність перемішування. Визначено раціональні параметри частоти обертання робочого органа, при яких досягається найвища ефективність його роботи з точки зору мікро- і макрозмішування.

Ключові слова: будівельний розчин, тривимірне моделювання, поле швидкостей, траєкторія змішування, розчинозмішувач.

Коробко Б. О., к.т.н., доцент
Вірченко В. В., к.т.н., старший преподаватель
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЛЕНТОЧНО-ЛОПАСТНОГО РАСТВОРОСМЕСИТЕЛЯ

Изложены результаты исследования рабочих процессов при приготовлении строительных растворов различной подвижности с помощью ленточно-лопастного смесителя. Путем трехмерного моделирования построены поля скоростей, которые определяют характерные составляющие процесса перемешивания: микро- и макросмешивания. Установлены особенности процесса микросмешивания, которые состоят в движении раствора по ленте и на контуре дополнительных лопаток. Основываясь на трехмерном моделировании, показано распределение частиц раствора и их траектории движения в корпусе смесителя с ленточно-лопастным рабочим органом с учетом параметров и режимов его работы. Обосновано использование в качестве рабочего органа смесителя ленточно-лопастного вала, поскольку применение дополнительных лопаток предотвращает появление «мертвых» зон в корпусе смесителя и существенно повышает интенсивность перемешивания. Определены рациональные параметры частоты вращения рабочего органа, при которых достигается наивысшая эффективность его работы с точки зрения микро- и макросмешивания.

Ключевые слова: строительный раствор, трехмерное моделирование, поле скоростей, траектория смешивания.

TAPE-PADDLE MORTAR MIXER WORK PROCESS MODELLING

An article presents mortar with different mobility mixing with type-paddle workbody flow reserching results. With the help of 3d modelling, builded a speedfields, that determines characterized componentsof mixing process: macromixing and micromixing.

Micromixing process features determined that installed in moving of mortar particles by type surface and on extra paddles periphery. Features of macromixing process characterized by moving a big volumes of mortar in workbody frame.

Based on 3d modelling, shown a mortar mix particles distribution and move trajectories in mortar mixing workbody frame when moving in workbody space, considering it work parameters and modes.

Using a type-paddle workshaft justified as a work body. Extra paddles using can prevent appearance «dead» zones in workbody frame and significantly intencives mixing.

Theoretical and experimental results of studying building solutions preparation process determined quality, reliable, energy-efficient, quick mixing mortar required technological properties of equipment where available a working body.

The results of mortars mixing practical observation in the type-paddle mixers have identified the following picture distribution speeds. Tape, rotating, transfers shares of a solution movement, which has two components areas: along the longitudinal axis and the direction of rotation. Paddles transfer solution particles motion in the specified areas.

Thanks to the three-dimensional modeling tools described picture distribution components in the mixer body depends on the components physical and mechanical properties, technological factors, mixing modes and equipment design features items. This mathematical modeling of such a process should take into account the limitations of this problem in the space (working volume mixer) and time.

The resulting image depending allow to analyze the trajectory of each particle inside solution mixer and its speed at any given time.

By mixing quality criterion measure taken to minimize the number of streams at speeds close or equal to zero. Zero speed indicates the presence of «dead» zones in the mixer housing and lack of effectiveness of its work.

Overall, the computer simulation results show that the band-blade mixer use, namely the use of blades in a design working body, where the «dead» zones formation, leading to the new fields excitement velocity emergence of particles in solution and the tape excitement field amount covering the entire the mixer volume, confirming the proposed design effectiveness.

As a research result built a three-dimensional mixer working body model and received visualized image distribution solution components depending on its operating space.

Built models enable to conclude the mixing different modes efficiency and determine his work rational parameters, in which the particle distribution solution will provide intensive mixing components.

Determined rotating frequency rational parameters when maximum work efficiency by the micromixing and macromixing point can be reached.

Keywords: mortar mix, 3d modelling, distribution, mixing, mortar mixer, tape, paddle, working body.

Вступ. Приготування будівельних розчинів являє собою складний процес, під час якого відбувається відносно переміщення часток, завантажених до корпусу змішувача [1, 4, 5] компонентів з метою досягнення максимально можливої рівномірності їхнього розподілу по всьому об'єму приготованого розчину.

Опис картини розподілу компонентів у корпусі змішувача – завдання, яке залежить від фізико-механічних якостей компонентів, технологічних факторів, режимів роботи змішувача, а також конструктивних особливостей елементів обладнання [2, 6]. При цьому математичне моделювання такого процесу повинне враховувати обмеженість розглядуваних явищ у просторі (робочий обсяг змішувача) та в часі.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Попередніми дослідженнями [2, 3, 6, 7] визначено, що найбільш характерними якісними показниками процесу перемішування розчину є ступінь, інтенсивність та енергоємність перемішування. При цьому слід враховувати як конструктивні особливості застосованого обладнання, режими й параметри його роботи, так і характеристики робочого середовища [3].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У той же час при математичному моделюванні робочих процесів виникає необхідність побудови графічних моделей визначення траєкторій та полів швидкостей часток розчину, що утворюються при перемішуванні.

Постановка завдання. У процесі виконання досліджень необхідно розглянути процеси приготування будівельних розчинів різної рухомості у корпусі змішувача зі стрічково-лопатевим робочим органом при різних параметрах та режимах його роботи.

Основний матеріал і результати. Проведений аналіз існуючих конструкцій робочих органів змішувачів показав, що стрічково-лопатевий змішувач [4, 6] є найбільш раціональним з точки зору забезпечення ефективності перемішування та переміщення компонентів розчину в напрямі видачі. Для такої конструкції притаманна наявність як безпосередньо стрічки, жорстко зв'язаної з валом, так і плоских лопаток.

Конструкція такого робочого органа змішувача наведена на рис. 1.

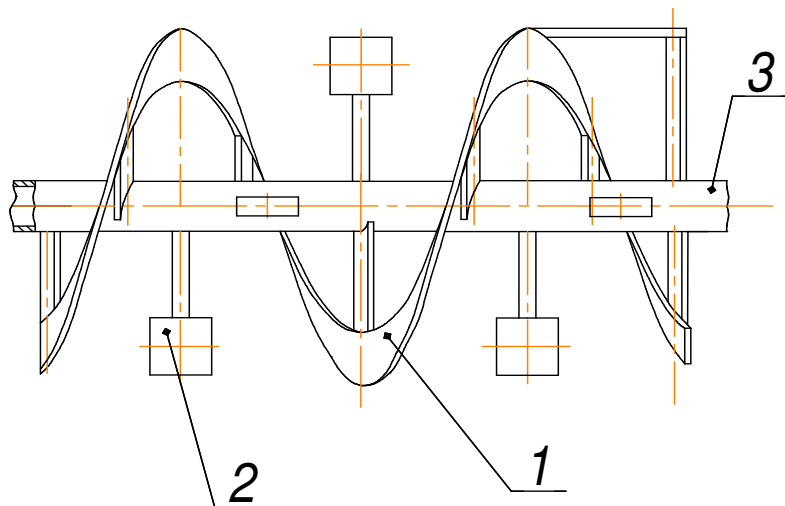


Рисунок 1 – Схема робочого органа стрічково-лопатєвого змішувача:

1 – стрічка; 2 – лопатка; 3 – вал

Додаткове включення лопаток до конструкції змішувача дає можливість прискорити швидкість приготування товарного розчину й поліпшити його якість за рахунок виключення «мертвих» зон.

Вищезазначене обумовило необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень процесу приготування й транспортування будівельних

розчинів для забезпечення якісного, надійного, енергоощадливого та швидкого приготування розчинів потрібних технологічних властивостей обладнанням, де наявний такий робочий орган.

Результатом практичного спостереження процесу приготування будівельних розчинів у стрічково-лопатевому змішувачі є визначення такого розподілення швидкостей. Стрічка, обертаючись, передає часткам розчину рух, котрий має два складових напрями: вздовж поздовжньої осі й у напрямку обертання. Лопатки передають часткам розчину рух за вказаними напрямками [2, 3].

При цьому процес змішування має дві складові:

– мікрозмішування – процес, який відбувається при русі по стрічці 1 (рис. 1) та на контурі додаткових лопаток 2 (рис. 1). При обертотому русі стрічки й лопаток у розчині найбільшим чином змінюються швидкості частинок розчину на контурах цих елементів. Зміна поля швидкості дає ненульову область роторів, поле котрих виходить за область контурів у сторону руху всієї рідини;

– макрозмішування – процес «заміни місцями» великих обсягів розчину в замкненому об'ємі змішувача вздовж осі змішувача та робочих поверхонь стрічок.

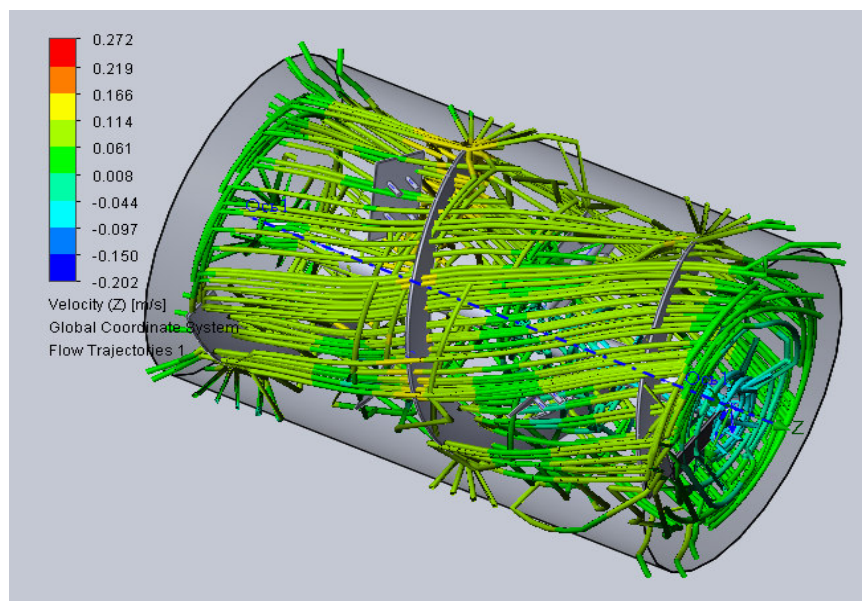
Для дослідження спостережених особливостей і доведення ефективності роботи стрічково-лопатевого змішувача виконано тривимірне моделювання за методом скінченних елементів. Критеріями обрано частоту обертання змішувача та рухомість розчину.

Отримані графічні залежності дозволяють здійснити аналіз траєкторії руху кожної частки розчину в об'ємі змішувача, а також її швидкості в кожний момент часу.

За критерій якості перемішування прийнято показник мінімізації кількості потоків зі швидкістю, близькою або рівною нульовій. Нульова швидкість свідчить про наявність «мертвих» зон у корпусі змішувача та недостатню ефективність його роботи.

Для побудови полів швидкостей задані граничні умови: найважчі (частота обертання – 20 хв^{-1} , рухомість розчину – 8 см), найлегші (частота обертання – 60 хв^{-1} , рухомість – 12 см). За результатами моделювання при проміжних значеннях параметрів відповідно до цих вимог можна судити про ефективність змішування.

Графічні залежності визначених полів швидкостей зображені на рис. 2 – 5.



**Рисунок 2 – Поля швидкостей: найважчі умови
(рухомість розчину – 8 см, частота обертання – 20 хв^{-1})**

Аналіз варіанта з найважчими умовами (частота обертання – 20 хв^{-1} , рухомість розчину – 8 см) (рис. 2) показує, що окремі частки будівельного розчину практично всією масою рухаються вздовж корпусу змішувача з невеликим прокручуванням.

При цьому шар розчину в проекції стрічки перерізається витком стрічки та проштовхується під впливом наступного витка. У цілому, результати моделювання при найважчих умовах свідчать про недостатню ефективність роботи стрічково-лопатевого змішувача на малорухомих розчинах та при низькій частоті обертання. Згідно з розрахунком, швидкість переміщення часток розчину по всьому об'єму практично однакова і становить $0,08 - 0,14 \text{ м/с}$.

При зміні напрямку обертання змішувача (рис. 3 а, б) спостерігаються завихрення навколо лопаток, але при цьому розподіл швидкостей практично незмінний.

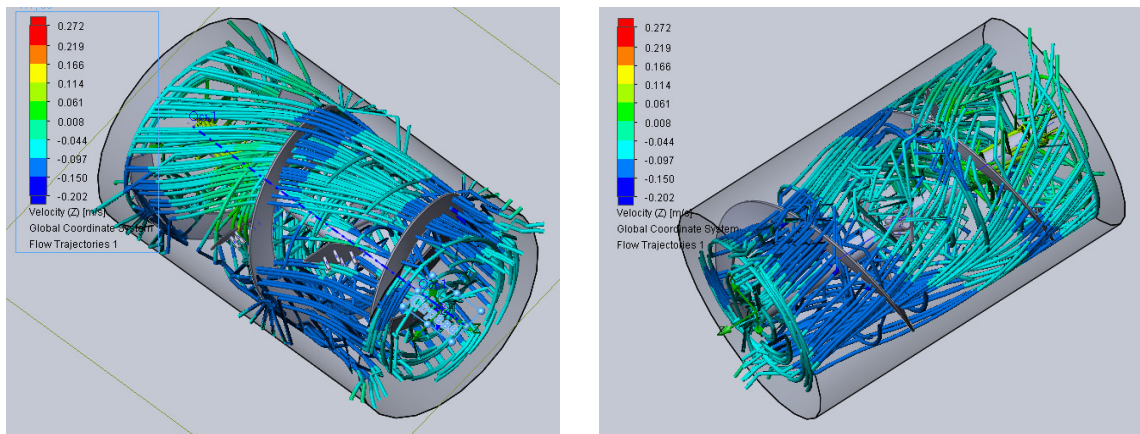


Рисунок 3 – Поля швидкостей, зворотне обертання: найважчі умови (рухомість розчину – 8 см, частота обертання – 20 хв^{-1})

Аналіз варіанта з найлегшими умовами (рис. 4) при частоті обертання 60 хв^{-1} та рухомості 12 см свідчить про те, що у процесі обертання стрічка пронизує прилеглий об'єм розчину, немов проходячи крізь нього. При цьому швидкість часток розчину змінюється лише навколо лопаток. Такий розподіл швидкостей свідчить про недостатню ефективність роботи змішувача, адже працюють лише лопатки.

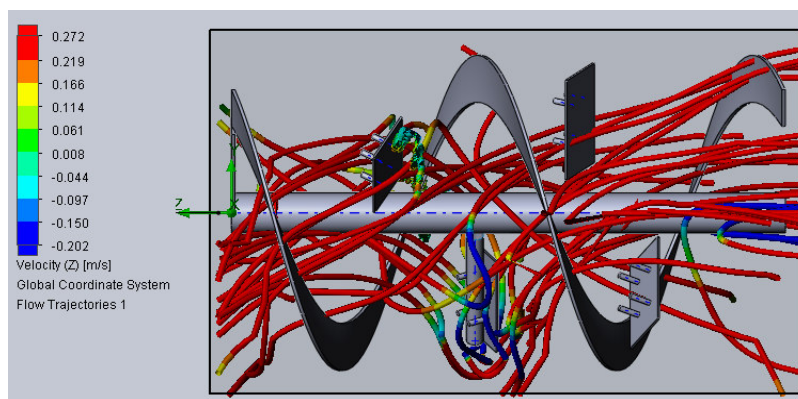


Рисунок 4 – Поля швидкостей: найлегші умови (рухомість розчину – 12 см, частота обертання – 60 хв^{-1})

Аналіз розподілу швидкостей часток розчину в разі моделювання процесу змішування з використанням проміжних умов при частоті обертання 40 хв^{-1} та рухомості 10 см (рис. 5 а, б) показує такі результати: у кожній точці об'єму частка розчину має

свою швидкість, а її траєкторія є складною кривою, що часто змінює напрям свого руху залежно від зустрічі зі стрічкою змішувача або лопаткою. Різниця швидкостей у такому випадку складає від 0,08 до 0,207 м/с. При цьому на рис. 5, б видно, як траєкторія частки розчину спрямовується лопаткою по траєкторіях, що перетинаються.

Складна траєкторія руху часток розчину та діаграма частоті зміни їх швидкості під час руху вздовж траєкторії показує, що при варіанті з проміжними умовами у практично всьому об'ємові змішувача відбувається відносно переміщення часток розчину, що є показником ефективності перемішування компонентів будівельного розчину між собою та відсутності «мертвих» зон.

Таким чином, найкраща картина спостерігається при середній частоті обертання й середній рухомості розчину (рис. 5 а, б), що підтверджує ефективність конструкції стрічково-лопаткового змішувача та визначає діапазон його роботи (частота обертання – близько 40 хв^{-1} , рухомість розчину – 10 см).

У цілому, результати комп'ютерного моделювання свідчать про те, що застосування стрічково-лопаткового змішувача, а саме використання лопаток у конструкції робочого органа, де можливе утворення «мертвих» зон, призводить до виникнення нових полів збудженості швидкостей частинок розчину й у сумі з полем збудженості від стрічки охоплює весь об'єм змішувача, що підтверджує ефективність запропонованої конструкції.

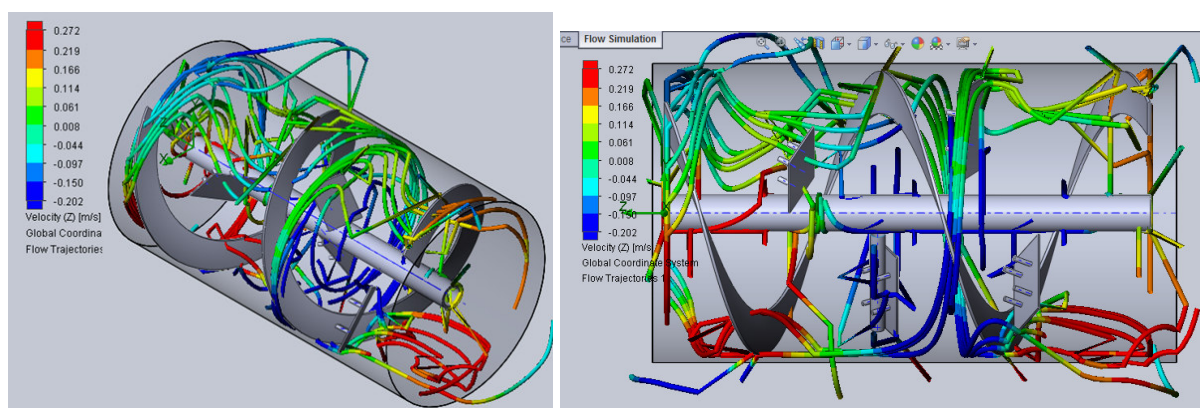


Рисунок 5 – Поля швидкостей: проміжні параметри (рухомість розчину – 10 см, частота обертання – 40 хв^{-1})

Висновки. У результаті проведених досліджень побудовано тривимірну модель робочого органа змішувача та отримано візуалізовані графічні залежності розподілу компонентів розчину по його робочому простору. Побудовані моделі дають змогу зробити висновок про ефективність роботи змішувача на різних режимах, а також визначити раціональні параметри його роботи, при яких розподіл часток розчину забезпечить інтенсивніше перемішування компонентів.

Література

1. Онищенко О. Г. Розроблення конструкції бункера-змішувача на основі аналізу конструктивних особливостей машин для прийому, перемішування і видачі будівельних розчинів / О. Г. Онищенко, К. М. Ващенко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 6 – 11.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
2. Онищенко О. Г. Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача / О. Г. Онищенко, К. М. Ващенко // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип. 1(36). – С. 58 – 63.

3. Онищенко О. Г. Експериментальне дослідження ефективності перемішування будівельних розчинів / О. Г. Онищенко, С. В. Попов, О. С. Філенко // Науковий вісник будівництва Харківськ. держ. техн. ун-т буд. та арх. – Х. : ХДТУБА, 2007. – Вип. 44. – С. 129 – 137.
4. Онищенко О. Г. Малогабаритна розчинозмшувальна установка з гідравлічним приводом / О. Г. Онищенко, А. М. Матвієнко, В. В. Вірченко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 23, Т. 1. – С. 24 – 28.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
5. Вірченко В. В. Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів / В. В. Вірченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КНУ, 2006. – Вип. 1/2011 (66). Ч. 1. – С. 71 – 74.
6. Коробко Б. О. Дослідження якості процесу інтенсивного перемішування сухої будівельної суміші у змішувачі штукатурного агрегату АШГ-4 конструкції ПолтНТУ / Б. О. Коробко, А. М. Павленко, А. М. Матвієнко, В. В. Вірченко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 1 (36) – С. 443 – 450.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
7. Вірченко В. В. Аналіз способів підвищення ергономічності та ефективності роботи малогабаритного штукатурного агрегату АШГ-4 / В. В. Вірченко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. – Полтава: ПолтНТУ; Білгород: НДУ «БілДУ»; Харків: ДП «ХНДІ ТМ», Київ: НТУ; Кіровоград: КЛА НАУ, 2013. – С. 5 – 6.

References

1. Onishchenko O. G. Rozroblennya konstruktivniy bunker-zmishuvacha na osnovi analizu konstruktivnih osoblivostey mashin dlya priyomu, peremishuvannya i vidachi budivelnih rozchiniv / O. G. Onishchenko, K. M. Vashchenko // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – P. : PolNTU, 2004. – Vip. 14. – S. 6 – 11.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
2. Onishchenko O. G. Rozrahunok potuzhnosti ta viznachennya oporiv, shcho vinikayut pri roboti strichkovogo shnekovogo rozchinoxmishuvacha / O. G. Onishchenko, K. M. Vashchenko // Visnik KDPU. – Kremenichuk: KDPU, 2006. – Vip. 1(36). – S. 58 – 63.
3. Onishchenko O. G. Eksperimentalne doslidzhennya efektnosti peremishuvannya budivelnih rozchiniv / O. G. Onishchenko, S. V. Popov, O. S. Filenko // Naukoviy visnik budivnitstva Harkivsk. derzh. tehn. un-t bud. ta arh. – H. : HDTUBA, 2007. – Vip. 44. – S. 129 – 137.
4. Onishchenko O. G. Malogabaritna rozchinoxmishuvalna ustanovka z gidravlichnim privodom / O. G. Onishchenko, A. M. Matvienko, V. V. Virchenko // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – P. : PolNTU, 2009. – Vip. 23, T. 1. – S. 24 – 28.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
5. Virchenko V. V. Prigotuvannya budivelnih rozchinovih sumishey za dopomogoyu effektivnih zmishuvachiv / V. V. Virchenko // Visnik KNU imeni Mihayla Ostrogradskogo. – Kremenichuk: KNU, 2006. – Vip. 1/2011 (66). Ch. 1. – S. 71 – 74.
6. Korobko B. O. Doslidzhennya yakosti protsesu intensivnogo peremishuvannya suhoi budivelnoyi sumishi u zmishuvachi shtukturnogo agregatu AShG-4 konstruktivniy PolNTU / B. O. Korobko, A. M. Pavlenko, A. M. Matvienko, V. V. Virchenko // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – P. : PolNTU, 2013. – Vip. 1 (36) – S. 443 – 450.
<http://znp.pntu.edu.ua/uk/archive>
7. Virchenko V. V. Analiz sposobiv pidvishchennya ergonomichnosti ta efektnosti roboti malogabaritnogo shtukturnogo agregatu AShG-4 / V. V. Virchenko // Suchasni napryami rozviku informatsiyno-komunikatsiynih tehnologiy ta zasobiv upravlinnya: Materiali tretoyi mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi. – Poltava: PNTU; Bilgorod: NDU «BilDU»; Harkiv: DP «HNDI TM», Kiyiv: NTU; Kirovograd: KLA NAU, 2013. – S. 5 – 6.

© Коробко Б. О., Вірченко В.В.
Надійшла до редакції 14.06.2016

Zhyhylii S., PhD, Associate Professor
Reznichenko A., student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

CREATION AND RESEARCH OF MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED MECHANICAL CENTRIFUGAL UNBALANCE VIBRATION EXCITER UVV-04

Kinematics scheme of controlled mechanical centrifugal unbalanced vibration exciter (CMCUVE) UVV-04 is presented and examined. Within using the vector shape of defining the motion elements of sketch model the mathematical model of CMCUVE UVV-04 was received. Construction method of dynamic analysis of unbalance to geometric method was used which is usually used in the theory of balancing of mechanisms. Mathematical model received in such a way determines the mechanical action of vibration machine equipped with CMCUVE UVV-04 on the work environment. An geometrical characteristics of unbalance of CMCUVE UVV-04 and its invariants of unbalance was received in the form. The conclusions were made according to those results: the UVV-04 generates vibration field angular structure and increasing of distance between the planes of symmetry moving unbalance ratably increases the amplitude of angular oscillation.

Keywords: controlled mechanical centrifugal unbalanced vibration exciter (CMCUVE), movable balance, dynamic action, mathematical model, static and dynamic balanced condition, moment unbalance, vibration field of angular structure.

Жигилій С.М., к.т.н., доцент
Резніченко А.О., студентка

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОГО МЕХАНІЧНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО ДЕБАЛАНСНОГО ЗБУДЖУВАЧА КОЛИВАНЬ УВВ-04

Наведено та розглянуто кінематичну схему керованого механічного відцентрового дебалансозбуджувача коливань (КМВДЗК) УВВ-04. Із застосуванням векторної форми визначення руху елементів методом зведення динамічного аналізу незрівноваженості до геометричного, який зазвичай застосовують у теорії зрівноважування механізмів, отримано математичну модель, яка визначає та характеризує механічну дію вібраційної машини, оснащеної КМВДЗК УВВ-04, на оброблюване середовище. У відповідному вигляді отримано геометричні характеристики та інваріанти незрівноваженості, згідно з якими зроблено висновок про те, що УВВ-04 генерує вібраційне поле кутової структури, а збільшення відстані між площинами симетрії рухомих дебалансів призводить до відповідного зростання амплітуд кутових коливань.

Ключові слова: керований механічний відцентровий дебалансний збуджувач коливань, рухомий дебаланс, динамічна дія, математична модель, статична і динамічна зрівноваженості, моментна незрівноваженість, вібраційне поле кутової структури.

Introduction. Over the last thirty years by the department of theoretical mechanics of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University under the direction of professor L.I. Serdyuk made large in terms of volume scientific and research and design work connected with the study of dynamic action on the work environment by *controlled mechanical centrifugal unbalanced vibration exciter* (CMCUVE). The result of this work is highly developed various original designs and design schemes CMCUVE which are used as a drive of vibration machines of different technological purposes. At a certain stage of this activity a question arose to create CMCUVE catalogue with their design schemes, which would have been expressed dynamic and technological capabilities, advantages and some disadvantages of any of them, indicated limits and directions of desired application.

Analysis of last sources of research and publications. General principles of creation, construction and operation of all CMCUVE are the same and repeatedly were mentioned in scientific sources [1, 2]. Their defining design element is movable unbalance (or more movable unbalances), external control of which provides the ability to create vibration fields of necessary structure and manage them. CMCUVE main features are that their application: a) lets immediately to get rid of several significant disadvantages of traditional uncontrolled vibration exciter; b) leads to reduction of energy consumption and cost value per unit of produced technology production; c) provides a great resource of strength and reliability. In research papers [3, 4], which in their essence and content are the first steps toward creating a catalog of CMCUVE, peculiarities of dynamic action vibration exciter UVV-02 and UVV- 03 respectively are considered and detected.

Unsolved aspects of the problem. Construction scheme of CMCUVE UVV-04 differs from vibration exciters schemes UVV-02 and UVV-03. Its main feature and difference from vibration exciter UVV-02 [3], which is essentially a modification of it, is that in UVV-04 is absent motionless unbalance. Of course, that mechanical effect on the work environment and mathematical model that describes and defines this action is also different. This fact led to the necessity of creation and study CMCUVE UVV-04 mathematical model. Additionally, this article and its content is the next step in creating CMCUVE catalogue.

Statement of the problem. Consider in Figure 1 kinematics scheme of CMCUVE UVV-04. In unbalance shaft 1 symmetrically relative to its longitudinal axis are placed two geometrically and material identical controlled moving unbalance of mass m and with eccentricity e . Each unbalance is connected with shaft 1 by two ball dowels 5 (see Fig. 2b), placed symmetrically respectively to the cross-sectional unbalance shaft, each of which is in a hemispherical socket of unbalance 4 and has the ability to roll on the groove 6 unbalance of appropriate cut. All four of these grooves 6 made on the surface unbalance shaft. At each and at any time the position of ball dowels 5 determine the position of both unbalances 4 relatively unbalance shaft 1. Slid fit with needed clearance of both unbalances on shaft 1 allows to move them along unbalance shaft. These moving are rigidly synchronized via motion screw of control mechanism that is not showing Figure 1. At starting time both unbalances are in the middle of the shaft 1 in diametrically opposite positions 4' that provides static balance of vibration exciter. As screw grooves 6' for ball dowels 5' on the left and right sides of the shaft have opposite direction, then while moving unbalances by motion screw of control mechanism in opposite directions from their original positions 4' they will simultaneously return relative of shaft 1 in one direction at an angle θ . This is to determine a time and provides state of vibration exciter UVV-04 when moving unbalances are only in diametrically opposed to each other regulations 4''.

An important possible modification of CMCUVE UVV-04 is vibration exciter, which grooves 6 are parallel to the axis of the unbalance shaft 1 that simplifies the production technology of this shaft. In this case, both unbalances 4 moved from its original position 4' without any rotation relative to the shaft 1.

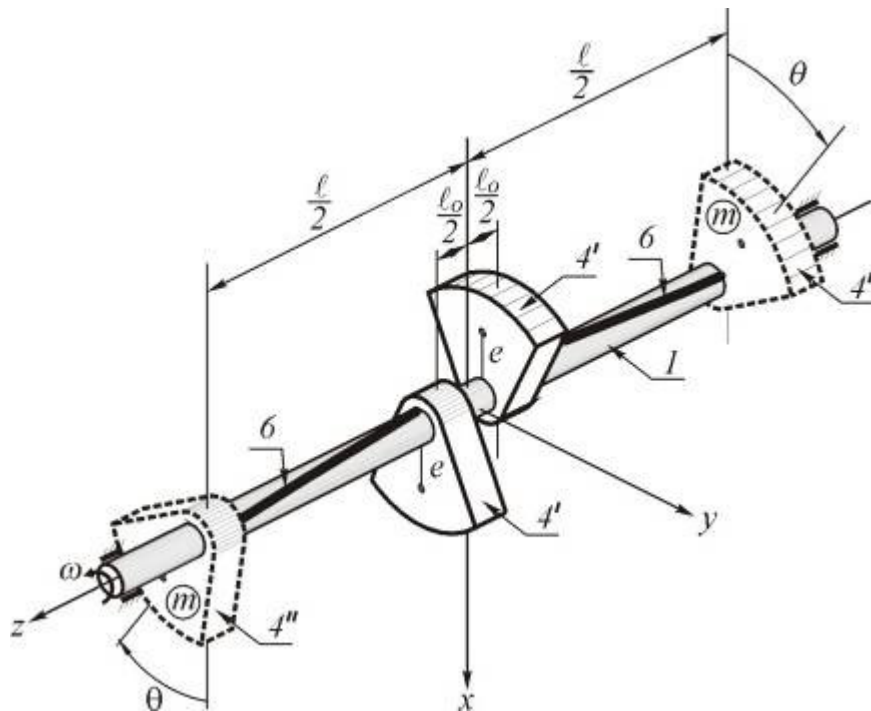


Figure 1 – Kinematics scheme of CMCUVE UVV-04

Consider and explore the dynamics of CMCUVE UVV-04, using the vector form of definition the motion of the objects, use the construction method of dynamic analysis of disbalance to geometric that usually applicable in theory of balanced mechanisms [5]. Thus mathematical model determines the mechanical effect of vibration machine (device, unit) equipped with appropriate vibration exciter on the work environment.

Basic material and results. Consider steady rotational motion debates unbalanced shaft 1, which defines the operating mode of controlled CMCUVE UVV-04. In general, the angular velocity of the shaft is determined by variable value

$$\omega_{work} \approx \omega + \omega_1 \cdot \sin 2\omega t ,$$

but the peak value of the variable ω_1 is less than 0,5% of average value ω . Assume that the shaft 1 rotates regularly with angular velocity

$$\omega_{work} = \omega = const .$$

Combine Cartesian axis z with rotation axis of unbalance shaft, axis x through its center of mass (through point O) and axis y – perpendicular to the axis x and z (see Fig. 2,a).

According to formula (15.7) [6] acceleration $\vec{a}_i$ of arbitrary particle M_i of any of unbalances 4 are

$$\vec{a}_i = \vec{\varepsilon} \times \vec{r}_i + \vec{\omega} \times \vec{v}_i ,$$

where according to formulas (15.7), (15.6) and (15.5) [6] $\vec{\varepsilon} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot \vec{k}$ – vector of angular acceleration of the shaft 1; $\vec{\omega} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \vec{k}$ – its vector of angular velocity and $\vec{v}_i = \vec{\omega} \times \vec{r}_i$ – vector of linear (angular or rotational) velocity of particle M_i respectively, and $\vec{r}_i = \vec{i}x_i + \vec{j}y_i + \vec{k}z_i$ – the radius vector defining the position of this particle relative the coordinate basic origin; $\vec{i}$, $\vec{j}$ and $\vec{k}$ – unit coordinate vector of Cartesian coordinate axes.

Since is assumed that $\omega_{work} = \omega = const$, then $d\varphi/dt = const$, $d^2\varphi/dt^2 = 0$, and the desired acceleration of particle M_i is determined only by centripetal component

$$\vec{a}_i = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i).$$

By marking a mass of particle M_i as m_i , according to §37, p. 275 [7], we write the inertial force $\vec{\Phi}_i$ of this particle (which in this case is the centrifugal force of inertia)

$$\vec{\Phi}_i = -m_i \cdot \vec{a}_i = -m_i \cdot [\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_i)] = m_i \cdot [(\vec{\omega} \times \vec{r}_i) \times \vec{\omega}] = m_i \cdot (\vec{\omega} \times \vec{r}_i) \times \vec{\omega} = (\vec{\omega} \times m_i \cdot \vec{r}_i) \times \vec{\omega}.$$

The main vector particles forces of inertia proposed unbalance (consider moving unbalance that in Fig. 2 is located right side) is determined according to formula (125) [7] as the vector sum of all forces $\vec{\Phi}_i$:

$$\vec{\Phi}_{right} = \sum_{i=1}^{\infty} \vec{\Phi}_i = \sum_{i=1}^{\infty} (\vec{\omega} \times m_i \cdot \vec{r}_i) \times \vec{\omega} = \left(\vec{\omega} \times \sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot \vec{r}_i \right) \times \vec{\omega}.$$

According to formula (70) [7] center of mass of considered unbalance as any other solid body, there is a point C , the position of which in space is defined by the radius vector

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot \vec{r}_i}{m},$$

where m – unbalance mass, then writing this formula in the form of $\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot \vec{r}_i = m \cdot \vec{r}_c$, we will get

$$\vec{\Phi}_{right} = (\vec{\omega} \times m \cdot \vec{r}_c) \times \vec{\omega}$$

and (after obvious transformations taking into account relevant properties of the vector sum)

$$\vec{\Phi}_{right} = m\omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot x_c + \vec{j} \cdot y_c) = \omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot mx_c + \vec{j} \cdot my_c).$$

Taking into account, that according to the formulas (17) and (18) [7] $mx_c = S_y$ and $my_c = S_x$, where S_x and S_y – static moments of considered unbalance regarding the axis x and y respectively (see Fig. 2,b), we will have

$$\vec{\Phi}_{right} = \omega^2 \cdot (\vec{i} \cdot S_y + \vec{j} \cdot S_x).$$

In brackets of last expression is a vector whose projection on axis x is equal to S_y , and on axis y – S_x and that in theory of balancing mechanisms [5] is called vector $\vec{S}$ of static moment of body mass that rotating about an axis of rotation. On this account for proposed to unbalance

$$\vec{S}_{right} = \vec{i} \cdot S_y + \vec{j} \cdot S_x,$$

and its module

$$S_{right} = \sqrt{S_y^2 + S_x^2} = \sqrt{(mx_c)^2 + (my_c)^2} = \sqrt{m^2 \cdot (x_c^2 + y_c^2)} = m \cdot \sqrt{(x_c^2 + y_c^2)} = m \cdot e,$$

where $e = x_c^2 + y_c^2$ –value, which determines the distance from the center of mass of unbalance to the axis of rotation of the unbalance shaft, which of course is the eccentricity of the unbalance.

Then

$$\vec{\Phi}_{right} = \omega^2 \cdot \vec{S}_{right}$$

and

$$\Phi_{right} = \omega^2 \cdot S_{right} = \omega^2 \cdot me.$$

Because of the motion unbalances 4 of vibration exciter UVV-04:

- geometrically and materially are the same, then

$$S_{left} = S_{right} = me \quad \text{and} \quad \Phi_{left} = \Phi_{right} = \omega^2 \cdot me;$$

- at any given time they are diametrically opposed to each other regulations, then

$$\vec{S}_{left} = -\vec{S}_{right} \quad \text{and} \quad \vec{\Phi}_{left} = -\vec{\Phi}_{right}.$$

As mass static moment $\vec{S}$ and the main vector $\vec{\Phi}$ of the particles inertial forces of both unbalances shall be determined by vector sums, in this case,

$$\vec{S} = \vec{S}_{right} + \vec{S}_{left} = \vec{S}_{right} - \vec{S}_{right} = 0, \quad \vec{\Phi} = \vec{\Phi}_{right} + \vec{\Phi}_{left} = \vec{\Phi}_{right} - \vec{\Phi}_{right} = 0$$

and

$$\Phi = S \cdot \omega^2 = 0.$$

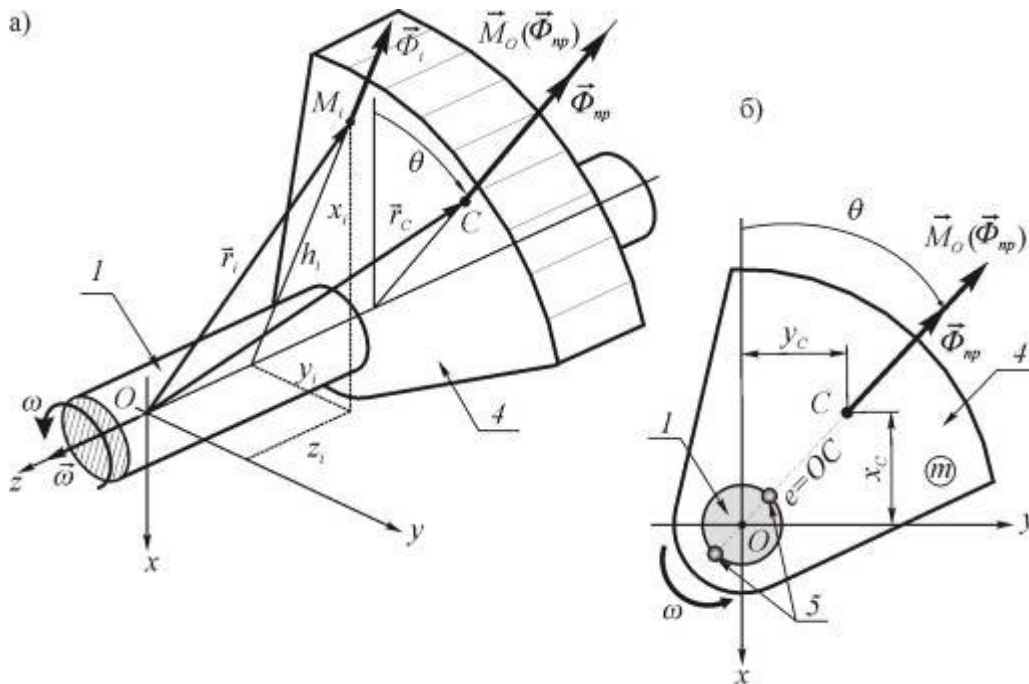


Figure 2 – To determine the mathematical model CMCUVE UVV-04

Now the formula (3.11) [6] define the moment $\vec{M}_O(\vec{\Phi}_i)$ of inertia force $\vec{\Phi}_i$ of particle M_i relative to zero point

$$\vec{M}_O(\vec{\Phi}_i) = \vec{r}_i \times \vec{\Phi}_i = \vec{r}_i \times [(\vec{\omega} \times m_i \cdot \vec{r}_i) \times \vec{\omega}].$$

Geometrically summing-up all the values $\vec{M}_O(\vec{\Phi}_i)$, detects the principal moment of force of inertia particles proposed unbalance relative to zero point

$$\vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right}) = \sum_{i=1}^{\infty} \vec{M}_O(\vec{\Phi}_i) = \sum_{i=1}^{\infty} (\vec{r}_i \times \vec{\Phi}_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ \vec{r}_i \times [(\vec{\omega} \times m_i \cdot \vec{r}_i) \times \vec{\omega}] \}$$

and (after obvious transformations taking into account relevant properties of the vector product)

$$\vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right}) = \omega^2 \cdot \left(\vec{j} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot x_i \cdot z_i - \vec{i} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot y_i \cdot z_i \right).$$

Taking into account that according to the formula (321) [7] $\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot x_i \cdot z_i = J_{xz}$ and $\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot y_i \cdot z_i = J_{yz}$, where J_{xz} – centrifugal moment of inertia of considered unbalance relatively axis x and z , and J_{yz} – its centrifugal moment of inertia relatively axis y and z , then

$$\vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right}) = \omega^2 \cdot (\vec{j} \cdot J_{xz} - \vec{i} \cdot J_{yz}).$$

In brackets of last expression was vector whose projection on the axis x is equal J_{yz} (apparently from the recording that is mentioned projection is negative), and on the axis y – J_{xz} ; the theory of balancing mechanisms [5] it is called generalized vector $\vec{J}_{Oz}$ centrifugal moment of inertia of body mass that is rotating, relatively axis of rotation. With all this for the proposed unbalance

$$\vec{J}_{Oz|np} = (\vec{j} \cdot J_{xz} - \vec{i} \cdot J_{yz}),$$

and its module

$$J_{Oz|np} = \sqrt{(J_{xz})^2 + (J_{yz})^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot x_i \cdot z_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{\infty} m_i \cdot y_i \cdot z_i\right)^2}.$$

Then

$$\vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right}) = \omega^2 \cdot \vec{J}_{Oz|right}.$$

This formula shows that the vector of principal moment $\vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right})$ of inertia forces $\vec{\Phi}_i$ of particles of proposed unbalance relative to zero point and generalized vector $\vec{J}_{Oz|right}$ centrifugal moment of inertia mass of the proposed unbalance relatively the rotating axis of unbalance shaft are in a plane perpendicular to that axis.

According to the design features vibration exciter UVV-04 is easy to prove and clear that:

$$\begin{aligned} J_{Oz|left} &= J_{Oz|right} & \text{and} & & M_O(\vec{\Phi}_{left}) &= M_O(\vec{\Phi}_{right}); \\ \vec{J}_{Oz|left} &= \vec{J}_{Oz|right} & \text{and} & & \vec{M}_O(\vec{\Phi}_{left}) &= \vec{M}_O(\vec{\Phi}_{right}). \end{aligned}$$

As generalized vector $\vec{J}_{Oz}$ of centrifugal moment of mass of inertia and vector of the principal moment $\vec{M}_O$ of inertia forces $\vec{\Phi}_i$ of particles of both unbalances are determined by respective vector sums, in this case, after appropriate additions and legitimate necessary changes we come to the expressions:

$$\begin{aligned} \vec{J}_{Oz} &= \vec{i} \cdot mel \cdot \cos \theta + \vec{j} \cdot mel \cdot \sin \theta = mel \cdot (\vec{i} \cdot \cos \theta + \vec{j} \cdot \sin \theta); & J_{Oz} &= mel; \\ \vec{M}_O &= \omega^2 \cdot \vec{J}_{Oz}; & M_O &= \omega^2 \cdot J_{Oz} = me\omega^2 \ell, \end{aligned}$$

where $\ell = \frac{\ell}{2} + \frac{\ell}{2}$ – linear parameter, which determines arm of couple $(\vec{\Phi}_{right}, \vec{\Phi}_{left})$.

Then according to work [8] dimensionless geometric characteristics of controlled mechanical centrifugal oscillation vibration exciter UVV-04

$$S^* = 0, \quad J^* = 1,$$

and its invariants of disbalance

$$in1 = \vec{S} = 0, \quad in2 = \vec{S} \cdot \vec{J}_{Oz} = 0, \quad \text{but} \quad J^* \neq 0.$$

It is easy to see that in this case the value J_{oz} is independent of the choice on the axis of the shaft of center construction (zero point). Generalized centrifugal moment of inertia for such kinematics scheme is invariant of vibration exciter unbalance.

Start of vibration exciter UVV-04 are performed in statically balanced state with minimum moment disbalance, which is defined by initial distance ℓ_0 between the plane of symmetry of unbalances (see Fig. 1). After switching unbalance shaft I in to kinematics state of steady uniform rotation with angular velocity ω_{work} specified distance is increased by control mechanism of move able unbalance by moving them from their original position, which leads to the increase of moment disbalance to necessary given value.

An important feature is that in a balanced state unbalances are in the middle of the shaft, while increasing disbalance they move to the bearings, which are the pillars of the shaft I , which determines and optimizes its bend.

With equally-spaced location of unbalances relative bearings the value of centrifugal moment of inertia is determined by dependence $J_{oz} = S_1 \cdot \ell / 2$, where S_1 – static moment of unbalancemass. The axis of rotation of vibration exciter UVV-04 in working conditions carries angular oscillation movements and describe the surface in space, called the second-order cone (Fig. 3).

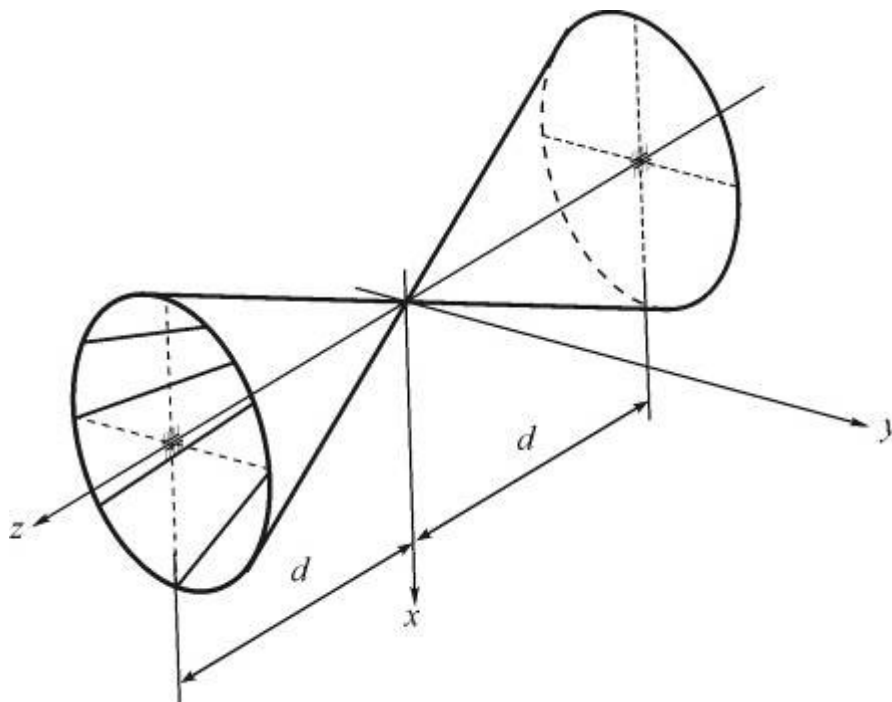


Figure 3 – Surface (second-order cone) that creates rotational axis UVV-04

Conclusions. CMCUVE UVV-04 generates vibration field of angle structure. Increasing the distance ℓ leads to increase of value J_{oz} , which leads to an adequate increase of the amplitude of angular oscillation. From Figure 3 it is clear that the amplitude of the points of longitudinal axis of unbalance shaft is different. This can be seen as a disadvantage of UVV-04, but that allows in the case of a technological need to use different amplitudes of oscillations for different intensity of vibration action along the axis of rotation of the unbalance shaft. As CMCUVE UVV-04 is a modification of vibration exciter UVV-02, the disadvantages of the last one which were identified in work [3], inherent in UVV-04.

References

1. Serdyuk L. *The controlled vibromachines* / L. Serdyuk // *Jubilee scientific conferens. University of architecture, civil engineering and geodezy.* – Sofia, 2007. – P. 43 – 48.
2. Сердюк Л. И. *Повышение надежности и долговечности вибрационной техники с использованием управляемых вибрационных машин* / L. I. Serdyuk, V. A. Onishchenko // *The improvement of the quality, reliability and long usage of technical systems, and technological processes.* – Hurghada, 2007. – P. 47 – 51.
Serdyuk L. I. *Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti vibracionnoy tehniki s ispolzovaniem upravlyaemykh vibracionnykh mashin* / Л. И. Сердюк, В. А. Онищенко // *The improvement of the quality, reliability and long usage of technical systems, and technological processes.* – Hurghada, 2007. – P. 47 – 51.
3. Жигилій С. М. *Динаміка дебалансного вала керованого віброзбуджувача УВВ-02* / С. М. Жигилій, К. С. Дяченко // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 1 (31). – С. 186 – 193.
Zhyhylii S. M. *Dynamika debalansnoho vala kerovanoho vibrozbudzhuvacha UVV-02* / S. M. Zhyhylii, K. S. Diachenko // *Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo.* – Poltava : PoltNTU, 2012. – Vyp. 1 (31). – S. 186 – 193.
<http://znp.pntu.edu.ua>
4. Жигилій С. М. *Дослідження динаміки дебалансного вала керованого віброзбуджувача УВВ-03* / С. М. Жигилій, К. С. Дяченко // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2 (32). – С. 159 – 164.
Zhyhylii S. M. *Doslidzhennia dynamiky debalansnoho vala kerovanoho vibrozbudzhuvacha UVV-03* / S. M. Zhyhylii, K. S. Diachenko // *Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo.* – Poltava : PoltNTU, 2012. – Vyp. 2 (32). – S. 159 – 164.
<http://znp.pntu.edu.ua>
5. Петров Г. Н. *К синтезу колеблющихся систем балансировочных устройств.* В кн.: *Уравновешивание машин и приборов* / Г. Н. Петров. – М. : Машиностроение, 1965. – С. 17 – 45.
Petrov G. N. *K sintezu koleblyuschihsya sistem balansirovochnykh ustroystv.* V kn.: *Uravnoveshivanie mashin i priborov* / G. N. Petrov. – М. : Mashinostroenie, 1965. – S. 17 – 45.
6. *Vector mechanics for engineers: statics and dynamics, tenth edition* / F. Beer, E. Russell Johnston, D. Mazurek, P. Cornwell. – New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2013. – 1360 p.
7. *Timoshenko S. Engineering mechanics, fourth edition* / S. Timoshenko, D. Young. – New York: McGraw-Hill book Company, Inc, 1960. – 508 p.
8. Жигилій С. М. *Управляемая вибрационная машина для подготовки металлической фибры: автореф. дис. канд. техн. наук* / С. М. Жигилій / *Полтавский государственный технический университет.* – Полтава, 1997. – 16 с.
Zhigilyi S. M. *Upravlyayemaya vibracionnaya mashina dlya podgotovki metallicheskoj fibry: avtoref. dis. kand. tehn. nauk* / S. M. Zhigilyi / *Poltavskiy gosudarstvennyy tehniceskij universitet.* – Poltava, 1997. – 16 s.

© Жигилій С.М., Резніченко А.О.
Надійшла до редакції 31.03.2016

Ковальчук Р.А., к.т.н.
Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ З ТРИПОРШНЕВИМ НАСОСОМ

Розглянуто результати математичного моделювання нестационарних процесів у насосному агрегаті з трипоршневим буровим насосом. Проаналізовано модель, що містить рівняння руху елементів системи, які враховують несталість зведеного моменту інерції кривошипно-повзунного механізму насоса, особливості роботи оперативної фрикційної муфти, а також електромагнітні явища в асинхронному двигуні. Розв'язання одержаної системи диференціальних рівнянь виконано шляхом комп'ютерного числового інтегрування. Як об'єкт досліджень використано насосний агрегат з трипоршневим буровим насосом односторонньої дії НБТ-600, що приводиться в дію асинхронним двигуном. Наведено результати числової реалізації побудованої моделі, зокрема, визначено момент у пружній ланці насосного агрегату за різних значень тиску рідини на викиді насоса. Обґрунтовано раціональні значення часу наповнення шинно-пневматичної муфти повітрям, на основі чого зроблено висновки щодо зниження динамічних навантажень на елементи насоса під час пуску.

Ключові слова: буріння, насосний агрегат, нестационарні процеси, динаміка машин.

Ковальчук Р.А., к.т.н.
Национальная академия сухопутных войск
имени гетмана Петра Сагайдачного

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПУСКА НАСОСНОГО АГРЕГАТА С ТРИПОРШНЕВЫМ НАСОСОМ

Рассмотрены результаты математического моделирования нестационарных процессов в насосном агрегате с трипоршневым буровым насосом. Проанализировано модель, которая содержит уравнения движения элементов системы, учитывающие непостоянство приведенного момента инерции кривошипно-ползунного механизма насоса, особенности работы оперативной фрикционной муфты, а также электромагнитные явления в асинхронном двигателе. Решение полученной системы дифференциальных уравнений выполнено путем компьютерного численного интегрирования. В качестве объекта исследований использованы насосный агрегат с трипоршневым буровым насосом одностороннего действия НБТ-600, который приводится в действие асинхронным двигателем. Приводятся результаты числовой реализации построенной модели, в частности определен момент в упругом звене насосного агрегата при различных значениях давления жидкости на выбросе насоса. Обоснованы рациональные значения времени наполнения шинно-пневматичной муфты воздухом, сделаны выводы по снижению динамических нагрузок на элементы насоса при пуске.

Ключевые слова: бурение, насосный агрегат, нестационарные процессы, динамика машин.

RESEARCH PROCESS OF STARTING THE PUMP UNIT WITH THREE-PISTON PUMP

Work drilling piston pump is characterized by periodic changes of pressures on the piston, which are transmitted to a central system, and periodic changes in the consolidated moment of inertia of crank-slide mechanism. Thereby, oscillatory phenomena occur in the pump unit during its operation, which significantly affect the workload of system elements, fluidity and drive shaft vibration activity of the technical object as a whole. Special meaning gets improving the methodology for the analysis of non-stationary modes of pumping units, due to the need for high performance simultaneous circulation of drilling rigs as well as the strength and reliability of structural elements.

The results of mathematical modeling of unsteady processes in pumping unit with three-piston pump are considered in this paper. The model contains the elements of the equations of motion of mechanical systems with four degrees of freedom, made under the scheme Lagrange equations of the second kind. The equations are based on volatility consolidated moment of inertia crank-slide mechanism pump operational features of friction clutches and electromagnetic phenomena in the induction motor.

In general the mathematical model provides an opportunity to consider any number of pistons pump as unilateral and bilateral actions. Solving the resulting system of differential equations by computer numerical integration is done. Joint integration of differential equations of motion of a mechanical system of variable structure and equations of the electromagnetic phenomena in asynchronous motor allows a detailed analysis of the processes occurring during start-up and steady-state mode of drilling pump.

The pump unit with three-piston pump unilateral action NBT-600 powered induction motor is used as the object of research. The results of numerical realization of the constructed model are given. In particular, the moment of the resilient link pump unit at different fluid pressure in the release pump is determined. The rational measurement of time filling pneumatic tire couplings air is justified. Conclusions to reduce dynamic loads on the elements of the pump during start-up are done.

According to the research was established the increase in friction torque in clutch causes growth electromagnetic torque and moment in indigenous shaft pump mechanism. Particularly important is the filling coupling air, which significantly affects the growth points in the links mechanism. Small points of friction in clutch in different time filling the air electromagnetic torque and moment in indigenous shaft are not significantly different. A large amplitude points is explained features of crank-slider mechanism pump. In subsequent trials mathematical modeling of dynamic processes during operation of the pump unit with three piston pump with account of air compensator will be scheduled.

The results of mathematical modeling can be used in computer-aided design pumping units to ensure proper accuracy of strength and prognostication of the resource structural elements

Keywords: *drilling, pumping unit, transient processes, the dynamics of machines.*

Вступ. Для буріння нафтогазових свердловин у сучасних умовах поряд із двопоршневими насосами частіше почали застосовувати швидкохідні трипоршнєві насоси односторонньої дії. Упровадження трипоршневих насосів у практику буріння глибоких свердловин, особливо на бурових установках, призначених для буріння на морі й у важкодоступних районах, обумовлене рядом техніко-експлуатаційних переваг порівняно з двопоршневими насосами. Головні з них (при однакових потужностях насосів): менші маса і габарити приблизно у 1,4 – 1,5 раза; удвічі менша нерівномірність подачі й тиску в 5 – 6 разів; зменшення змінних деталей у 1,3 – 1,4 раза і їх маси у 2 – 3 рази. Важливим є також, що ефективність використання зворотного ходу поршня у двопоршневих насосах двосторонньої дії за високих тисків знижується через збільшення площі штока. Усебічне вивчення динаміки насосних агрегатів бурових установок з поршневими насосами є необхідною умовою їх раціонального проектування й ефективної експлуатації.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Основи теорії та будова бурових поршневих насосів детально висвітлені у працях [2, 3], а дослідження з кінематики й динаміки механізмів зі змінними інерційними характеристиками, зокрема насосних агрегатів, описані у роботах [4 – 6, 9]. Загальна методологія моделювання електропровідних систем з достатньою повнотою викладена у працях [1, 7, 8]. Оскільки конструкція насосного агрегату передбачає застосування муфт, то питання особливостей конструкції та експлуатації спеціальних фрикційних муфт розглянуто у монографії [3]. Приклади математичного моделювання перехідних режимів роботи двопоршневих насосів двосторонньої дії викладено у статтях [5, 6]. Однак динамічні процеси під час пуску трипоршневих насосів вивчено недостатньо.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У статті запропоновано аналіз процесів пуску трипоршневих насосів із застосуванням методики, яка ґрунтується на сучасному підході до математичного моделювання динамічних процесів у поршневих насосах і детально описана у праці [6]. Моделювання процесів пуску трипоршневих насосів є актуальними завданням з динаміки насосних агрегатів, розв'язання якого має важливе науково-практичне значення.

Мета роботи полягає в аналізі динамічних процесів шляхом математичного моделювання у насосному агрегаті з трипоршневим буровим насосом та обґрунтуванні раціональних експлуатаційних параметрів насоса. Дослідження ґрунтуються на застосуванні теорії коливань нелінійних пружних систем з обмеженим числом степенів вільності. Рівняння руху механічної системи, що включають елементи зі сталими та змінними характеристиками, побудовані за схемою рівняння Лагранжа другого роду.

Основний матеріал і результати. Насосний агрегат подано у вигляді механічної системи, що складається з асинхронного двигуна, шинно-пневматичної муфти, пасової передачі, редуктора та поршневого насоса (рис. 1). На схемі прийняті позначення: J_1 – зведений момент інерції ротора електричного двигуна з ведучою частиною шинно-пневматичної муфти; J_2 – зведений момент інерції веденої частини шинно-пневматичної муфти з валом і ведучим шківом пасової передачі; J_3 – зведений момент інерції трансмісійного вала із шестірнею та веденим шківом пасової передачі; J_4 – зведений момент інерції кривошипно-повзунного механізму насоса; c_1 – зведена жорсткість клинових пасів; v_1 – зведений коефіцієнт демпфування пасів; c_2 – зведена жорсткість зубчастої передачі редуктора; v_2 – зведений коефіцієнт демпфування зубчастої передачі; M_E – зведений електромагнітний момент двигуна; M_O – момент сил опору рухові, що діє на корінний вал насоса; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – зведені кутові координати. Інерційні та пружно-дисипативні параметри механічної системи зводимо до корінного вала насоса.

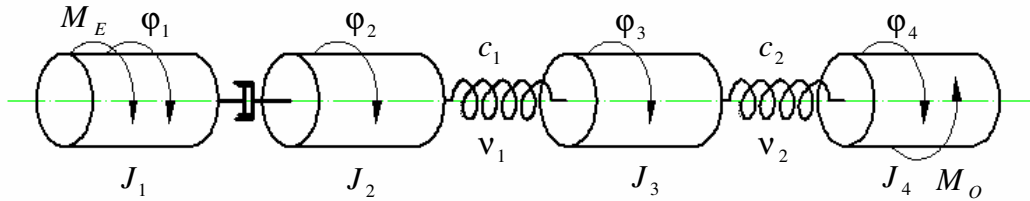


Рисунок 1 – Розрахункова схема механічної системи насосного агрегату

Рівняння руху елементів агрегату складаємо за схемою рівняння Лагранжа II роду. За узагальнені координати приймаємо такі величини:

$$q_1 = \varphi_1; \quad q_2 = \varphi_2; \quad q_3 = \varphi_3; \quad q_4 = \varphi_4, \quad (1)$$

тоді

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1, \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2, \quad \frac{d\varphi_3}{dt} = \omega_3, \quad \frac{d\varphi_4}{dt} = \omega_4, \quad (2)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – зведені до корінного вала кутова швидкість ротора електричного двигуна, кутова швидкість півмуфти, з'єднаної з ведучим шківом пасової передачі, кутова швидкість швидкохідного вала редуктора, з'єднаного з веденим шківом пасової передачі, та дійсна кутова швидкість корінного вала насоса.

Записавши вирази для кінетичної енергії, потенціальної енергії, дисипативної функції Релея з урахуванням залежностей (1), (2) та взявши відповідні похідні, підставимо їх у рівняння Лагранжа другого роду. Для режиму, коли відбувається проковзування в шинно-пневматичній муфті, одержуємо рівняння руху у вигляді

$$\begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_{E3} - M_T; & J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_T - c_1(\varphi_2 - \varphi_3) - v_1(\omega_2 - \omega_3); \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= c_1(\varphi_2 - \varphi_3) + v_1(\omega_2 - \omega_3) - c_2(\varphi_3 - \varphi_4) - v_2(\omega_3 - \omega_4); \\ J_4 \frac{d\omega_4}{dt} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial J_4}{\partial \varphi_4} \omega_4^2 + c_2(\varphi_3 - \varphi_4) + v_2(\omega_3 - \omega_4) - M_o, \end{aligned} \quad (3)$$

де M_T – зведений до корінного вала момент тертя у шинно-пневматичній муфті. Зведений момент двигуна знаходимо за формулою

$$M_E = M_{E0} \cdot u, \quad (4)$$

де M_{E0} – дійсний електромагнітний момент двигуна;

u – передавальне відношення привода.

За умови відсутності проковзування в шинно-пневматичній муфті, ланки з моментами інерції J_1 і J_2 виконують сумісний рух. Рівняння руху системи при $\varphi_1 = \varphi_2$ буде мати вигляд

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_2; & \varphi_1 &= \varphi_1(t_1) + \varphi_2(t) - \varphi_2(t_1); \\ (J_1 + J_2) \frac{d\omega_2}{dt} &= M_E - c_1(\varphi_2 - \varphi_3) - v_1(\omega_2 - \omega_3); \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= c_1(\varphi_2 - \varphi_3) + v_1(\omega_2 - \omega_3) - c_2(\varphi_3 - \varphi_4) - v_2(\omega_3 - \omega_4); \\ J_4 \frac{d\omega_4}{dt} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial J_4}{\partial \varphi_4} \omega_4^2 + c_2(\varphi_3 - \varphi_4) + v_2(\omega_3 - \omega_4) - M_o. \end{aligned} \quad (5)$$

Перехід від режиму руху з проковзуванням до режиму без нього відбувається, якщо виконуються такі умови:

$$\omega_2 = \omega_1 \text{ і } M_E - J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \leq M_T. \quad (6)$$

Початкові умови інтегрування рівнянь (2), (3) запишемо у вигляді

$$\varphi_1(0) = 0; \quad \varphi_2(0) = 0; \quad \omega_1(0) = 0; \quad \omega_2(0) = 0. \quad (7)$$

Для числового інтегрування диференціальних рівнянь (2), (3) та (2), (5) необхідно визначати похідну функції J_4 за координатою φ_4 і електромагнітний момент двигуна M_E , а для інтегрування диференціальних рівнянь (2), (3) – електромагнітний момент двигуна M_E та похідну функції J_2 за координатою φ_2 .

Щоб визначити момент асинхронного двигуна, скористаємося рівнянням електромагнітного стану машини [4, 7]:

$$\frac{dI}{dt} = Z \cdot U, \quad (8)$$

тут

$$I = \text{col}(I_{Sx}, I_{Sy}, I_{Rx}, I_{Ry});$$

$$Z = \begin{bmatrix} \eta_S & 0 & \nu & 0 \\ 0 & \eta_S & 0 & \nu \\ \nu & 0 & \eta_S & 0 \\ 0 & \nu & 0 & \eta_S \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_m + p_0 \omega_0 (\chi_y + I_{Sy} L_S) - R_S I_{Sx} \\ -p_0 \omega_0 (\chi_x + I_{Sx} L_S) - R_S I_{Sy} \\ p_0 (\omega_0 - \omega) (\chi_y + I_{Ry} L_R) - R_R I_{Rx} \\ p_0 (\omega - \omega_0) (\chi_x + I_{Rx} L_R) - R_R I_{Ry} \end{bmatrix},$$

де $I_{Sx}, I_{Sy}, I_{Rx}, I_{Ry}$ – проекції струмів на координатні осі x, y (індекси S і R указують на приналежність величин до статора і ротора відповідно);

U_m – амплітуда напруги мережі живлення;

R_S, R_R – активні опори обмоток;

L_R, L_S, L_m – індуктивності розсіювання обмоток і робоча індуктивність двигуна;

ω_0 і ω – синхронне та поточне значення кутової швидкості ротора;

p_0 – число пар магнітних полюсів;

$$\eta_S = \alpha_S \left(1 - \frac{\alpha_S}{\alpha_S + \alpha_R + \alpha_m} \right);$$

$$\eta_R = \alpha_R \left(1 - \frac{\alpha_R}{\alpha_S + \alpha_R + \alpha_m} \right);$$

$$\nu = - \frac{\alpha_S \alpha_R}{\alpha_S + \alpha_R + \alpha_m};$$

$$\chi_x = (I_{Sx} + I_{Rx}) L_m; \quad \chi_y = (I_{Sy} + I_{Ry}) L_m,$$

причому $\alpha_S, \alpha_R, \alpha_m$ – величини, обернені до відповідних індуктивностей розсіювання. Електромагнітний момент знаходимо за формулою

$$M_E = \frac{3}{2} p_0 L_m (I_{Rx} I_{Sy} - I_{Ry} I_{Sx}). \quad (9)$$

Проекції струмів на координатні осі в момент початку пуску двигуна дорівнюють нулеві, тобто

$$I_{Sx}(0) = 0; \quad I_{Sy}(0) = 0; \quad I_{Rx}(0) = 0; \quad I_{Ry}(0) = 0. \quad (10)$$

Трипоршневий буровий насос включає три простих кривошипно-повзунних механізми, що мають спільний корінний вал. Площини, що проходять через вісь обертання корінного вала й осі шийок для під'єднання шатунів, повернуті одна відносно одної на певний кут. Схема окремого кривошипно-повзунного механізму зображена на рис. 2. Центри мас відповідних ланок розміщені в точках S_1 , S_2 і B . Позначаємо кутову координату ланки OA окремо взятого механізму як φ_i , маси ланок OA , AB і поршня – як m_1 , m_2 , m_3 ; центральні моменти інерції кривошипа і шатуна механізму насоса – як J_{S1} і J_{S2} ; лінійні розміри – як $OS_1=a_1$, $AS_2=a_2$, $OA=l_1$, $AB=l_2$.

Зведений момент інерції механізму насоса, який включає три кривошипно-повзунних механізми, визначимо за формулою [5]

$$J_{3B}(\varphi) = \sum_{i=1}^n \left[J_{S1} + m_1 a_1^2 + m_2 u_i \frac{l_1^2 (\cos \varphi_i)^2}{h_i} + J_{S2} \frac{l_1^2 (\cos \varphi_i)^2}{h_i} + m_3 \left(-l_1 \left(\sin \varphi_i + \frac{l_1 \sin 2\varphi_i}{2\sqrt{h_i}} \right) \right)^2 \right], \quad (11)$$

де

$$h_i = l_2^2 - l_1^2 (\sin \varphi_i)^2, \quad u_i = \frac{h_i}{(\cos \varphi_i)^2} + a_2^2 - 2a_2 \frac{h_i}{l_2} + 2a_2 \frac{l_1 (\sin \varphi_i)^2 \cdot \sqrt{h_i}}{\cos \varphi_i \cdot l_2}. \quad (12)$$

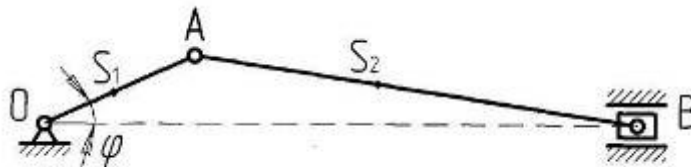


Рисунок 2 – Схема кривошипно-повзунного механізму насоса

Кути повороту ведучих ланок кривошипно-повзунних механізмів насоса φ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) зв'язані з кутом повороту φ корінного вала трипоршневого насоса односторонньої дії так:

$$\varphi_1 = \varphi; \quad \varphi_2 = \varphi + \frac{2}{3}\pi; \quad \varphi_3 = \varphi + \frac{4}{3}\pi.$$

Момент опору рухові знаходимо за формулою

$$M_O = \sum_{i=1}^n M_{O_i}, \quad (13)$$

де M_{O_i} – момент опору, який створює тиск рідини на i -ий поршень,

$$M_{O_i} = P_i l_i \Theta_i, \quad (14)$$

де P_i – сила тиску на поршень;

Θ_i – тригонометрична функція кута повороту кривошипа.

Для насоса односторонньої дії P_i буде визначатися такою залежністю:

$$P_i = -p F_n, \text{ якщо } v_i > 0; \quad P_i = 0, \text{ якщо } v_i = 0, \quad (15)$$

де F_n – площа поперечного перерізу поршня,

p – тиск рідини на поршень;

v_i – швидкість поршня,

$$v_i = -\omega_2 l_i \Theta_i. \quad (16)$$

Тригонометрична функція кута повороту кривошипа Θ_i , що фігурує в залежностях (14), (16), має вигляд

$$\Theta_i = \sin \varphi_i - \frac{\sin \varphi_i \cos \varphi_i}{\sqrt{\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 - (\sin \varphi_i)^2}}. \quad (17)$$

Розглянемо агрегат, котрий включає буровий насос типу НБТ-600, який приводиться в дію електричним асинхронним двигуном АКЗ-15-41-8Б. Буровий насос НБТ-600 є трипоршневим насосом односторонньої дії та складається з привідної і гідравлічної частин, що змонтовані на одній рамі. Кут між привідними ланками кривошипно-повзунних механізмів насоса становить 120° ($\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = \varphi + 2\pi/3$, $\varphi_3 = \varphi + 3\pi/4$). Маса ланок: $m_1 = 2800$ кг, $m_2 = 300$ кг, $m_3 = 150$ кг; геометричні розміри ланок: $l_1 = 0,125$ м, $a_1 = 0,05$ м, $l_2 = 1,19$ м, $a_2 = 0,25$ м; центральні моменти інерції кривошипа та шатуна відповідно $J_{S1} = 35$ кг·м², $J_{S2} = 95$ кг·м². Параметри двигуна: амплітуда напруги мережі живлення $u_m = 4,9$ кВ; активні опори фаз $r_S = 0,38$ Ом, $r_R = 0,318$ Ом; індуктивності розсіяння $L_S = 1,048 \cdot 10^{-2}$ Г, $L_R = 1,112 \cdot 10^{-2}$ Г; робоча індуктивність $L_m = 0,505$ Г; число пар магнітних полюсів $p_0 = 4$; момент інерції ротора $J_1 = 55$ кг·м².

Після сумісного інтегрування диференціальних рівнянь руху механічної системи (2), (3) або (2), (5) і рівнянь, що описують електромагнітні явища в асинхронному двигуні (8), отримуємо часову залежність електромагнітного моменту M_E (9) та крутного моменту M_K в корінному валі насоса

$$M_{2c} = c_2(\varphi_3 - \varphi_4) + v_2(\omega_3 - \omega_4). \quad (18)$$

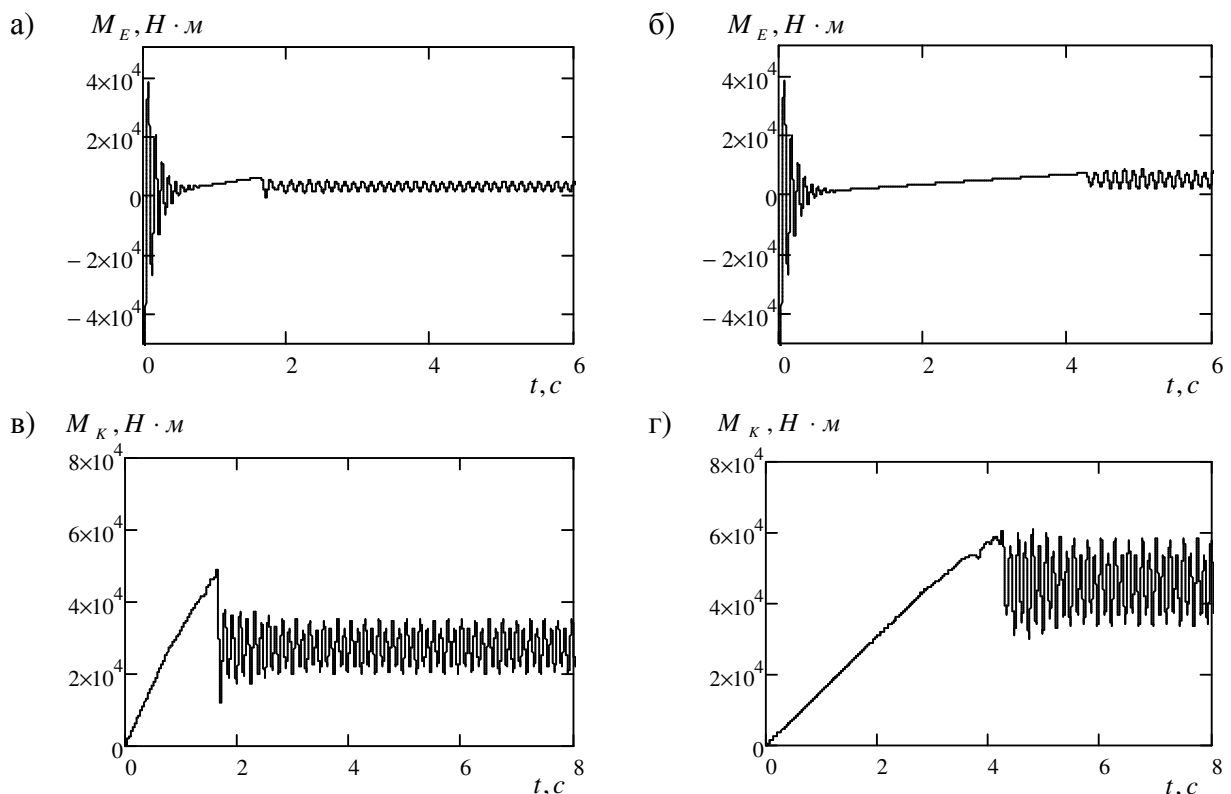


Рисунок 3 – Графіки зміни в часі електромагнітного моменту двигуна (а, б) та моменту в корінному валі насоса (в, г)

На рис. 3, а, в наведено часові залежності електромагнітного моменту в асинхронному двигуні та моменту в корінному валі насоса за час наповнення муфти повітрям 4 с, моменту тертя у муфті 12 кН·м і тиску на поршні насоса 15 МПа. На рис. 3, б, г наведено часові залежності електромагнітного моменту в асинхронному двигуні та моменту в корінному валі насоса за часу наповнення муфти повітрям 6 с, моменту тертя у муфті 10 кН·м і тиску на поршні насоса 25 МПа. Одержані результати використовуємо для обґрунтування раціональних параметрів пуску насоса. Як бачимо, зростання моменту тертя у муфті спричиняє збільшення електромагнітного моменту та моменту у корінному валі механізму насоса. Особливо важливим є час наповнення муфти повітрям, що суттєво впливає на зростання моментів у ланках механізму. Для малих моментів тертя у муфті за різного часу наповнення муфти повітрям електромагнітний момент та момент у корінному валі суттєво не відрізняються.

Висновки. Час розгону трипоршневого бурового насоса безпосередньо залежить від роботи оперативної фрикційної муфти. Тривалість проковзування робочих поверхонь шинно-пневматичної муфти визначається законом зміни моменту тертя у муфті, що у свою чергу залежить від часу наповнення муфти повітрям. Значна амплітуда коливань моментів пояснюється особливостями роботи кривошипно-повзунних механізмів насоса. У процесі подальших досліджень планується провести математичне моделювання динамічних процесів під час експлуатації насосного агрегату з трипоршневим насосом з урахуванням дії пневмокомпенсатора.

Література

1. Вейц В. Л. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями / В. Л. Вейц, А. Ф. Вербовой, А. Е. Кочура. – К. : В. школа, 1988. – 295 с.
2. Верзилин О. И. Современные буровые насосы / О. И. Верзилин. – М.: Машиностроение, 1971. – 225 с.
3. Ильский А. П. Расчет и конструирование бурового оборудования / А. П. Ильский, Ю. В. Миронов, А. Г. Чернобыльский. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
4. Харченко Е. В. Динамические процессы буровых установок / Е. В. Харченко. – Львов: Свит, 1991. – 176 с.
5. Харченко Є. В. Визначення зведених моментів інерції поршневих насосів бурових установок / Є. В. Харченко, Р. А. Ковальчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. – № 535. – С. 89 – 95.
<http://vlp.com.ua/periodicals/bulletins/engineering>
6. Харченко Є. В. Розрахунок процесу пуску насосного агрегату бурової установки з фрикційною оперативною муфтою / Є. В. Харченко, Р. А. Ковальчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. – № 556. – С. 69 – 78.
<http://vlp.com.ua/periodicals/bulletins/engineeringcad>
7. Чабан В. Й. Методы анализа электромеханических систем / В. Й. Чабан. – Львов: «Вища школа», 1985. – 189 с.
8. Mudrik I. Measurement of dynamic properties of machine aggregate with variable parameters and asynchronous motor / I. Mudrik // J. Theor. and Appl. Mech. – 1992. – № 1 (23). – P. 40 – 41 s.
9. Goudas I. Dynamik of slider-crank mechanisms with flexible supports and non-ideal forcing / I. Goudas, I. Stavrakis, S. Natsiavas // Nonlinear Dyn. – 2004. – № 3 (35). – S. 205 – 207.

References

1. Veyc V. L. *Dinamika upravlyaemogo elektromehanicheskogo privoda s asinhronnymi dvigatelyami* / V. L. Veyc, A. F. Verbovoy, A. E. Kochura. – K. : V. shkola, 1988. – 295 s.
2. Verzilin O. I. *Sovremennye burovye nasosy* / O. I. Verzilin. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 225 s.
3. Il'skiy A. P. *Raschet i konstruirovaniye burovogo oborudovaniya* / A. P. Il'skiy, Yu. V. Mironov, A. G. Chernobyl'skiy. – M.: Nedra, 1985. – 452 s.
4. Harchenko E. V. *Dinamicheskie processy burovyyh ustanovok* / E. V. Harchenko. – Lvov: Svit, 1991. – 176 s.
5. Kharchenko Ye. V. *Vyznachennia zvedenykh momentiv inertsii porshnevnykh nasosiv burovyykh ustanovok* / Ye. V. Kharchenko, R. A. Kovalchuk // *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Seriya: Optymizatsiia vyrobnychyykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni i prykladobuduvanni.* – Lviv: NU «Lvivska politekhnika», 2005. – № 535. – S. 89 – 95.
<http://vlp.com.ua/periodicals/bulletins/engineering>
6. Kharchenko Ye. V. *Rozrakhunok protsesu pusku nasosnoho ahrehatu burovoy ustanovky z fryktsiinoiu operatyvnoiu muftoiu* / Ye. V. Kharchenko, R. A. Kovalchuk // *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Seriya: Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i prykladiv.* – Lviv: NU «Lvivska politekhnika», 2006. – № 556. – S. 69 – 78.
<http://vlp.com.ua/periodicals/bulletins/engineeringcad>
7. Chaban V. Y. *Metody analiza elektromehanicheskikh sistem* / V. Y. Chaban. – Lvov: «Vischa shkola», 1985. – 189 s.
8. Mudrik I. *Measurement of dynamic properties of machine aggregate with variable parameters and asynchronous motor* / I. Mudrik // *J. Theor. and Appl. Mech.* – 1992. – № 1 (23). – P. 40 – 41 s.
9. Goudas I. *Dynamik of slider-crank mechanisms with flexible supports and non-ideal forcing* / I. Goudas, I. Stavrakis, S. Natsiavas // *Nonlinter Dyn.* – 2004. – № 3 (35). – S. 205 – 207.

© Ковальчук Р.А.
Надійшла до редакції 28.04.2016

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ НОРМАТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЛЬМІВНОЇ ДИНАМІЧНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Зазначено, що нормативні вимоги до гальмівних властивостей автотранспортних засобів повинні розвиватися відповідно до розвитку вимог суспільства. Доведено необхідність прогнозування вимог суспільства, що дозволить удосконалювати відповідні стандарти. Показано, що в ідеальному випадку зміна нормативних вимог має відбуватися безперервно, синхронно зміні вимог суспільства.

Подано метод визначення граничних показників гальмівної динамічності, які регламентовані нормативними документами. Визначено, що при досягненні граничних показників гальмівної динамічності ресурс відомих способів гальмування можна вважати вичерпаним, і потрібний пошук та розроблення принципово нових способів гальмування і конструкцій гальмівного управління автотранспортних засобів. Отримані результати можуть бути рекомендовані фахівцям для використання при проектуванні, виробництві, сертифікації та експлуатації автотранспортних засобів.

Ключові слова: гальмівна динаміка, гальмівні випробування, ентропія, уповільнення автотранспортних засобів, гальмівний шлях, абсолютна похибка вимірювання.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОРМОЗНОЙ ДИНАМИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Показано, что нормативные требования к тормозным свойствам автотранспортных средств должны развиваться в соответствии с развитием требований общества. Доказана необходимость прогнозирования требований общества, что позволит совершенствовать соответствующие стандарты. Показано, что в идеальном случае изменение нормативных требований должно происходить непрерывно, синхронно изменению требований общества.

Представлен метод определения предельных показателей тормозной динамичности, регламентируемых нормативными документами. Определено, что при достижении предельных показателей тормозной динамичности ресурс известных способов торможения можно считать исчерпанным, и требуются поиск и разработка принципиально новых способов торможения и конструкций тормозного управления автотранспортных средств. Полученные результаты могут быть рекомендованы специалистам для использования при проектировании, производстве, сертификации и эксплуатации автотранспортных средств.

Ключевые слова: тормозная динамика, тормозные испытания, энтропия, замедление автотранспортных средств, тормозной путь, абсолютная погрешность измерения.

DETERMINATION OF LIMITING NORMATIVE PARAMETERS OF VEHICLE BRAKE DYNAMICS

Increase of requirements to vehicle braking properties is an objective and continuous process. The formalization of these claims is carried out according to the legislation at every stage of motor vehicle design development. At each stage the normative values brake properties indices are assumed to be constant. At some point the normative requirements correspond to the requirements of the society, and later – fall behind. Any design, including the design of the brake control of motor vehicles, has a limit as for its technical capabilities. This should be considered when planning the standard indicators of prospective legislation documents – standards.

It should be noted that formation of braking properties of vehicles – it is a process of interaction between producers, consumers and legislators, developing over time. This is also true for the formation of any operational properties of vehicles.

The performance properties are evaluated by comparing their performance with specific values adopted as the basic ones. Some indicators have GOST normalized values, for the rest – experimentally or by means of calculation they determine the average or extreme operational values of car-counterparts indices.

As the system of a higher level, including a subsystem «driver-vehicle-road environment» is under development, the requirements to braking characteristics of vehicles must constantly evolve. Here one must distinguish between the requirements of the society and the regulatory requirements to the braking characteristics of vehicles.

Regulatory requirements to the braking characteristics of motor vehicles must be developed in accordance with the requirements of the society development. To do this, forecasting of the society demands is necessary that will make it possible to improve the relevant standards.

Ideally, the change of regulatory requirements must continuously take place and be synchronized according to the changing demands of the society. One needs to know the law of variation of the society's requirements, which is not known in advance, but exists objectively. It is not possible to determine exactly the specified law, but to carry out its assessment is possible, using a retrospective analysis of the regulatory requirements to vehicle slowing, adopted in different years.

In this paper on example of normalization of vehicle brake properties they proposed a method for determining the thresholds indices of brake dynamics, regulated by the normative documents.

In this paper it is specified that when the limit values of brake dynamics are obtained, the resource of known methods of braking can be considered exhausted, and the search and development of new methods of braking and brake control structures of vehicles are required.

The results obtained can be recommended for use by professionals in the design, production, certification and operation of vehicles.

Keywords: *braking, braking tests, entropy, slowing of vehicles, braking distance, absolute error of measurement.*

Введение. Возрастание требований к тормозным свойствам автотранспортных средств является объективным и непрерывным процессом. Формализация этих требований осуществляется законодательно на каждом этапе развития конструкций автотранспортных средств. На каждом этапе нормативные значения показателей тормозных свойств принимаются постоянными. В какой-то момент времени нормативные значения соответствуют требованиям общества, а в последующем – начинают отставать. Любая конструкция, в том числе и конструкция тормозного управления автотранспортных средств, имеет ограничения по своим техническим возможностям. Это надо учитывать при планировании нормативных показателей перспективных законодательных документов – стандартов.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Вопросы динамики изменения требований к тормозным свойствам автотранспортных средств (АТС) рассмотрены в работах [1 – 16]. В этих работах на основании ретроспективного анализа динамических изменений требований к эффективности торможения АТС получен закон изменения нормативного значения замедления при различных видах испытаний. Следует отметить, что формирование тормозных свойств АТС – процесс взаимодействия производителей, потребителей продукции и законодателей, развивающийся во времени [6]. Это справедливо так же и для формирования любых эксплуатационных свойств автомобилей. Поскольку система более высокого уровня, в которую входит подсистема «водитель – автомобиль – дорожная среда», развивается, то должны постоянно развиваться и требования к тормозным свойствам АТС. Здесь следует различать требования общества и нормативные требования к тормозным свойствам АТС. Требования общества формируются в результате его развития и развития конструкции АТС. Однако в указанных работах [1 – 16] такое различие не учитывается.

Нормативные требования к тормозным свойствам АТС должны совершенствоваться в соответствии с развитием требований общества. Для этого необходимо прогнозирование требований общества, что позволит совершенствовать соответствующие стандарты. Кибернетический подход к формированию требуемого уровня тормозных свойств АТС предложен в работах [5, 6, 13, 14].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Как уже отмечалось ранее, существующие нормативные требования к тормозным свойствам АТС должны совершенствоваться в соответствии с развитием требований общества.

В идеальном случае [6, 17] изменение нормативных требований должно происходить непрерывно, синхронно изменению требований общества. Для этого необходимо знать закон изменения требований общества, который заранее не известен, но существует объективно. Определить точно указанный закон невозможно, но сделать его оценку позволяет ретроспективный анализ нормативных требований к замедлению автомобиля, принятых в разные годы [1, 2]. Оценка закона изменения требований общества имеет следующий вид [1, 2]:

$$j_{x\min} = \varphi \cdot g [1 - \exp(-B\lambda)] , \quad (1)$$

где φ – коэффициент сцепления колес с дорогой;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

λ – относительное время [1, 2],

$$\lambda = \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{\Gamma_3 - \Gamma_2} , \quad (2)$$

где Γ_1 – рассматриваемый год (текущее время);

Γ_2 – год, от которого условно ведется отсчет времени, в работах [1, 2] $\Gamma_2 = 1900$;
 Γ_3 – год, от которого в работах [1, 2] проводился ретроспективный анализ,
 $\Gamma_3 = 2000$;

B – коэффициент пропорциональности, зависящий от категории транспортного средства и типа тормозных испытаний [1 – 12]; представляет собой величину, обратную постоянной времени λ_0 при экспоненциальном законе изменения рассматриваемой величины,

$$B = \frac{1}{\lambda_0} . \quad (3)$$

Графическая интерпретация выражения (1) имеет вид, представленный на рис. 1.

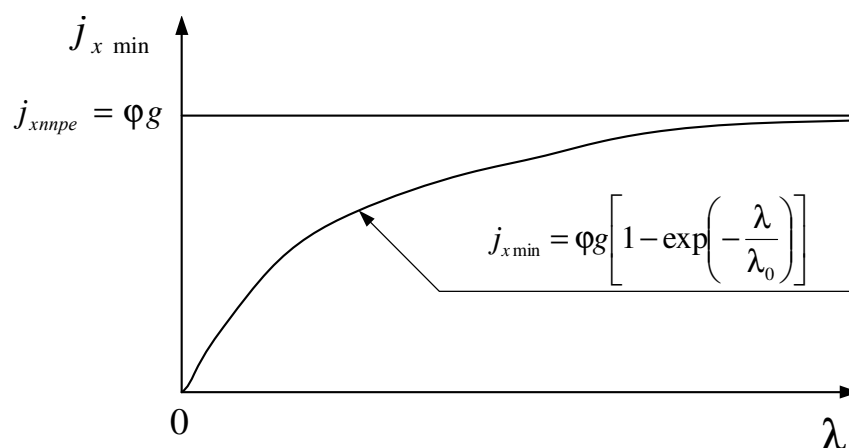


Рисунок 1 – Оценка динамики изменения требований общества к замедлению АТС при торможении

На рисунке 1 замедление АТС будет иметь вид

$$j_{xnpred} = \varphi g . \quad (4)$$

Данный показатель является предельным по сцеплению колес с дорогой. Кривая $j_{x min}(\lambda)$ достигает асимптоты (4) при $\lambda \rightarrow \infty$.

Что же касается последующей оценки динамики изменения требований общества к замедлению АТС при торможении (определение предельных нормативных показателей тормозной динамичности транспортных средств), то вопрос остался открытым. Ниже рассмотрен один из вариантов решения этой задачи.

Теоретически повышать нормативные требования к эффективности торможения можно при условии $\lambda \rightarrow \infty$, но при этом $dj_{x min}(\lambda) / d\lambda \rightarrow 0$. Определено время λ^* , ограниченное j_{xnpred} в соответствии с выражением (4), при котором увеличивать нормативное значение замедления $[j_x]$ не имеет смысла при существующем способе торможения. Предвещанием роста $[j_x]$ могут быть два следующих условия:

1. Возможное увеличение нормативного замедления $[j_x]$ при тормозных испытаниях становится меньше, чем абсолютная погрешность измерения замедления АТС существующими средствами;

2. Изменение предельных возможностей тормозных свойств АТС становится равным или приближается к нулю.

Время λ^* – контрольное и является сигналом для начала качественного совершенствования способов торможения и конструкций тормозного управления АТС.

Постановка задачи. Целью работы является улучшение качества АТС путем разработки метода определения предельных показателей тормозной динамики.

Основной материал и результаты. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить предельные показатели тормозной динамики АТС по абсолютной погрешности измерения замедления; определить предельные показатели тормозной динамики АТС с использованием в качестве критерия дифференциального уравнения.

Определим дифференциал $j_{x\min}$ по уравнению (1)

$$dj_{x\min} = \varphi g B \exp(-B\lambda) d\lambda = \frac{\varphi g}{\lambda_0} \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) d\lambda. \quad (5)$$

Переходя от бесконечно малых приращений к конечным, получим

$$\Delta j_{x\min} = \frac{\varphi g}{\lambda_0} \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \Delta\lambda. \quad (6)$$

Рассматривая $\Delta j_{x\min}$ как увеличение нормативного значения $[j_x]$ при очередном изменении стандарта в момент времени λ и рассчитанном на временной интервал $\Delta\lambda$, необходимо учитывать также и абсолютную погрешность β измерения замедления при тормозных испытаниях АТС. Предположим, что абсолютная погрешность измерения β замедления АТС также изменяется по экспоненциальному закону

$$\beta = \beta_0 e^{\frac{\lambda}{\lambda_\beta}}. \quad (7)$$

где β_0 – значение абсолютной погрешности измерения замедления АТС при $\lambda = 0$; λ_β – постоянная времени.

Нормативное значение замедления $[j_x]$ АТС не следует повышать на величину $\Delta j_{x\min}$ в случае

$$\Delta j_{x\min}(\lambda) \leq \beta(\lambda + \Delta\lambda). \quad (8)$$

После подстановки соотношений (6) и (7) в неравенство (8) выведем зависимость

$$\frac{\varphi g}{\lambda_0} \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \Delta\lambda \leq \beta_0 \exp\left(\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda_\beta}\right). \quad (9)$$

После преобразований получим

$$\lambda \geq \frac{\lambda_0 \Delta\lambda - \lambda_0 \lambda_\beta \ln \left| \frac{\beta_0 \lambda_0}{\varphi g} \right|}{\lambda_\beta - \lambda_0} \quad (10)$$

или

$$\lambda \geq \frac{\Delta\lambda - \lambda_\beta \ln \left| \frac{\beta_0 \lambda_0}{\varphi g} \right|}{\frac{\lambda_\beta}{\lambda_0} - 1}. \quad (11)$$

Таким образом,

$$\lambda^* = \frac{\Delta\lambda - \lambda_\beta \ln \left| \frac{\beta_0 \lambda_0}{\varphi g} \right|}{\frac{\lambda_\beta}{\lambda_0} - 1}. \quad (12)$$

По аналогии с молекулярной физикой [18] для характеристики накопленного потенциала показателей тормозных свойств АТС введем понятие энтропии S тормозных свойств. Дифференциал dS указанной энтропии может быть определен как

$$dS = \frac{dj_{x\min}}{V_{\max}}, \quad (13)$$

где $V_{\max}$ – максимальная конструктивная скорость, достигнутая на определенном этапе развития АТС.

В работе [7] с использованием статических данных, приведенных в исследовании [19], получена зависимость для максимальной конструктивной скорости легковых автомобилей

$$V_{\max} = 582[1,043 - \exp(-0,38\lambda)] \text{ , км/ч .} \quad (14)$$

Между максимальной скоростью автомобиля $V_{\max}$ и замедлением $j_{x\min}$ существует взаимосвязь (для идеального случая торможения)

$$V_{\max} = j_{x\min} T_{\text{торм}}, \quad (15)$$

где $T_{\text{торм}}$ – время торможения (при $j_{x\min} = \text{const}$ в течение всего торможения) от максимально конструктивной скорости $V_{\max}$ до полной остановки автомобиля.

Выражение (13) с учетом уравнений (5) и (14) примет вид

$$dS = \frac{\varphi g}{582\lambda_0} \cdot \frac{\exp(-\frac{\lambda}{\lambda_0}) d\lambda}{1,043 - \exp(-0,38\lambda)}. \quad (16)$$

Выражение (13) с учетом уравнения (15) примет вид

$$dS = \frac{1}{T_{\text{торм}}} \cdot \frac{dj_{x\min}}{j_{x\min}}. \quad (17)$$

Энтропия тормозных свойств АТС из уравнения (17) может быть определена после его интегрирования

$$S = \frac{1}{T_{\text{торм}}} \cdot \int_{j_{x\min}}^{j_{x\min} + \Delta j_{x\min}} \frac{\Delta j_{x\min}}{j_{x\min}} = \frac{1}{T_{\text{торм}}} \cdot \ln \left| \frac{j_{x\min} + \Delta j_{x\min}}{j_{x\min}} \right| = \frac{1}{T_{\text{торм}}} \cdot \ln \left| 1 + \frac{\Delta j_{x\min}}{j_{x\min}} \right|. \quad (18)$$

Переходя от бесконечно малых приращений к конечным в уравнении (16), получим

$$\Delta S = \frac{\varphi g}{582\lambda_0} \cdot \frac{\exp(-\frac{\lambda}{\lambda_0})}{1,043 \cdot \exp(-0,382\lambda)} \Delta\lambda. \quad (19)$$

Тогда увеличение нормативного значения $[j_x]$ по $\Delta\lambda$ составит

$$\begin{aligned}
\Delta j_{x \min} &= \varphi g [1 - \exp[-B(\lambda_0 + \Delta\lambda)]] - \varphi g [1 - \exp[-B\lambda_0]] = \\
&= -\varphi g [\exp[-B(\lambda_0 - \Delta\lambda)]] + \varphi g \exp[-B\lambda_0] = \\
&= \varphi g [\exp(-B\lambda_0) - \exp(-B(\lambda_0 + \Delta\lambda))] = \\
&= \varphi g \cdot \exp(-B\lambda_0) [1 - \exp(-B\Delta\lambda)]
\end{aligned}
\tag{20}$$

После всех преобразований минимальное значение замедления $j_{x \min}$ АТС, на которое следует повышать величину $[j_x]$, равно

$$\Delta j_{x \min} = \varphi g \cdot \frac{1 - \exp(-B\Delta\lambda)}{\exp(-B\lambda_0)}.
\tag{21}$$

При равенстве или стремлении к нулю величины ΔS повышение нормативных требований к АТС при существующих способах торможения не имеет смысла.

Выводы:

1. В результате проведенного исследования предложен метод определения предельных показателей тормозной динамичности, регламентируемых нормативными документами.

2. При достижении предельных показателей тормозной динамичности ресурс известных способов торможения можно считать исчерпанным, и требуются поиск и разработка принципиально новых способов торможения и конструкций тормозного управления АТС.

Литература

1. Прогноз требований к тормозному управлению АСТ / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. М. Ефимчук, В. И. Клименко // *Автомобильная промышленность*. – 2003. – № 5. – С. 35 – 36.
2. Волков В. П. Ретроспективный анализ требований, предъявляемых к эффективности торможения / В. П. Волков // *Автошляховик України*. – 2002. – № 2 (168). – С. 11 – 13.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv
3. Ефимчук В. М. Прогноз изменения нормативных требований к запасным тормозным системам легковых автомобилей / В. М. Ефимчук // *Автомобіле- та тракторобудування*. – Х. : НТУ «ХПИ», 2003. – № 4. – С. 143 – 146.
<http://library.kpi.kharkov.ua/uk/avtomobile>
4. Волков В. П. Оценка перспективы перемещения различных схем отдельных контуров тормозного привода легковых автомобилей / В. П. Волков, В. М. Ефимчук // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Х. : НТУ «ХПИ», 2002. – № 10. – С. 109 – 116.
<http://vestnik.kpi.kharkov.ua/>
5. Волков В. П. Кибернетический подход к формированию тормозных свойств автотранспортных средств / В. П. Волков // *Механіка та машинобудування: науково-технічний журнал*. – Х. : НТУ «ХПИ», 2001. – № 1,2. – С. 84 – 88.
<http://users.kpi.kharkov.ua/mae/>
6. Квалиметрия, стандартизация и унификация тормозного управления колесных машин / М. А. Подригало, В. П. Волков, Д. В. Абрамов, М. В. Байцур, В. А. Павленко, Н. М. Подригало, Ю. В. Тарасов; под ред. М. А. Подригало. – Х. : ХНАДУ, 2007. – 446 с.
7. Манёвренность и тормозные свойства колесных машин / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. И. Кирчатый, А. А. Бобошко; под ред. М. А. Подригало. – Х. : ХНАДУ, 2003. – 403 с.
8. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. А. Корпенко и др.; под ред. М. А. Подригало. – Х. : ХНАДУ, 2003. – 614 с.
9. Волков В. П. Формирование нормативных требований к эффективности торможения грузовых автомобилей / В. П. Волков, М. В. Байцур // *Автомобіле- та тракторобудування*. – Х. : НТУ «ХПИ», 2003. – № 4. – С. 104 – 111.
<http://library.kpi.kharkov.ua/uk/avtomobile>

10. Forkenbrock G. An Assessment of Human Driver Steering Capability [Electronic resource] / G. Forkenbrock, E. Devin // NHTSA Technical Report, DOT HS 809875 (2005). – Access mode: <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov>.
11. Legecuis T. On the extension of the gratzmuuer crirical velocity for locked steering road vehicle to the case of piloted vehicles / T. Legecuis, P. Bourassa, A. Laneville // Vehicle system dynamics. – 1985. – № 14. – P. 23 – 27.
12. Technical Report FEV2005-01. Technical overview of brake performance testing for Original Equipment and Aftermarket industries in the US and European markets / C. Agudelo, E. Ferro. – 2005. – 27 p.
13. Волков В. П. Обобщение стабильности тормозных свойств автотранспортных средств / В. П. Волков. – Х. : ХНАДУ, 2003. – 306 с.
14. Klets D. Accelerometers application in the automobile dynamic testing. Active Processes in Higher Technical Education to Train Specialists for Transportation and Highway Engineering and Automobile Industry: collection of scientific works International Conference / D. Klets, A. Korobko, M. Podrigalo, E. Voronova. – Kharkiv, 2009. – P. 51 – 54.
15. Волков В. П. Методика прогнозирования развития требований стандартов к эффективности торможения легковых автомобилей / В. П. Волков // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 11. – С. 37 – 38.
16. Волков В. П. Системный подход к прогнозу стандартов эффективности торможения легковых автомобилей / В. П. Волков // Вестник ХНАДУ: сборник научных трудов. – Х. : ХНАДУ, 2004. – № 24. – С. 11 – 14.
<http://www.khadi.kharkov.ua/ru/nauka/nauchnaja-rabota/nauchnye-izdaniya/vestnik-kharkovskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universiteta.html>
17. Комаров Д. М. Математические модели, оптимизация требований стандартов / Д. М. Комаров. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 184 с.
18. Ландау Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1969. – 400 с.
19. Яриценко Н. В. Довгострокове прогнозування швидкостей руху на автомобільних дорогах: автореф. дис. на здобуття канд. техн. наук / Н. В. Яриценко. – Харків, 1999. – 16 с.

References

1. Prognoz trebovaniy k tormoznomu upravleniyu AST / M. A. Podrigalo, V. P. Volkov, V. M. Efimchuk, V. I. Klimenko // Avtomobilnaya promyshlennost. – 2003. – № 5. – S. 35 – 36.
2. Volkov V. P. Retrospektivnyy analiz trebovaniy, predyavlyаемых k effektivnosti tormozheniya / V. P. Volkov // Avtoshliakhovyk Ukrainy. – 2002. – № 2 (168). – S. 11 – 13.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv
3. Efimchuk V. M. Prognoz izmeneniya normativnyh trebovaniy k zapasnym tormoznym sistemam legkovykh avtomobiley / V. M. Efimchuk // Avtomobile- ta traktorobuduvannya. – H. : NTU «HPI», 2003. – № 4. – S. 143 – 146.
<http://library.kpi.kharkov.ua/uk/avtomobile>
4. Volkov V. P. Ocenka perspektivy peremescheniya razlichnyh shem razdelnyh konturov tormoznogo privoda legkovykh avtomobiley / V. P. Volkov, V. M. Efimchuk // Vestnik NTU «HPI». – H. : NTU «HPI», 2002. – № 10. – S. 109 – 116.
<http://vestnik.kpi.kharkov.ua/>
5. Volkov V. P. Kiberneticheskiy podhod k formirovaniyu tormoznyh svoystv avtotransportnyh sredstv / V. P. Volkov // Mehanika ta mashinobuduvannya: naukovovo-tehnichniy zhurnal. – H. : NTU «HPI», 2001. – № 1,2. – S. 84 – 88.
<http://users.kpi.kharkov.ua/mae/>
6. Kvalimetriya, standartizaciya i unifikaciya tormoznogo upravleniya kolesnyh mashin / M. A. Podrigalo, V. P. Volkov, D. V. Abramov, M. V. Baycur, V. A. Pavlenko, N. M. Podrigalo, Yu. V. Tarasov; pod. red. M. A. Podrigalo. – H. : HNADU, 2007. – 446 s.
7. Manyovrennost i tormoznye svoystva kolesnyh mashin / M. A. Podrigalo, V. P. Volkov, V. I. Kirchatyy, A. A. Boboshko; pod red. M. A. Podrigalo. – H. : HNADU, 2003. – 403 s.
8. Stabilnost ekspluatatsionnyh svoystv kolesnyh mashin / M. A. Podrigalo, V. P. Volkov, V. A. Korpenko i dr.; pod red. M. A. Podrigalo. – H. : HNADU, 2003. – 614 s.

9. Volkov V. P. *Formirovanie normativnykh trebovaniy k effektivnosti tormozheniya gruzovykh avtomobiley* / V. P. Volkov, M. V. Baycur // *Avtomobile- ta traktorobuduvannya*. – H. : NTU «HPI», 2003. – № 4. – S. 104 – 111.
<http://library.kpi.kharkov.ua/uk/avtomobile>
10. Forkenbrock G. *An Assessment of Human Driver Steering Capability* [Electronic resource] / G. Forkenbrock, E. Devin // *NHTSA Technical Report, DOT HS 809875 (2005)*. – Access mode: <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov>.
11. Legecuis T. *On the extension of the gratzmuuer critical velocity for locked steering road vehicle to the case of piloted vehicles* / T. Legecuis, P. Bourassa, A. Laneville // *Vehicle system dynamics*. – 1985. – № 14. – P. 23 – 27.
12. *Technical Report FEV2005-01. Technical overview of brake performance testing for Original Equipment and Aftermarket industries in the US and European markets* / C. Agudelo, E. Ferro. – 2005. – 27 p.
13. Volkov V. P. *Obobshchenie stabilnosti tormoznykh svoystv avtotransportnykh sredstv* / V. P. Volkov. – H. : HNADU, 2003. – 306 s.
14. Klets D. *Accelerometers application in the automobile dynamic testing. Active Processes in Higher Technical Education to Train Specialists for Transportation and Highway Engineering and Automobile Industry: collection of scientific works International Conference* / D. Klets, A. Korobko, M. Podrigalo, E. Voronova. – Kharkiv, 2009. – P. 51 – 54.
15. Volkov V. P. *Metodika prognozirovaniya razvitiya trebovaniy standartov k effektivnosti tormozheniya legkovykh avtomobiley* / V. P. Volkov // *Avtomobilnaya promyshlennost*. – 2004. – № 11. – S. 37 – 38.
16. Volkov V. P. *Sistemnyy podhod k prognozu standartov effektivnosti tormozheniya legkovykh avtomobiley* / V. P. Volkov // *Vestnik HNADU: sbornik nauchnykh trudov*. – H. : HNADU, 2004. – № 24. – S. 11 – 14.
<http://www.khadi.kharkov.ua/ru/nauka/nauchnaya-rabota/nauchnye-izdaniya/vestnik-kharkovskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universiteta.html>
17. Komarov D. M. *Matematicheskie modeli, optimizatsiya trebovaniy standartov* / D. M. Komarov. – M. : Izd-vo standartov, 1976. – 184 s.
18. Landau L. D. *Kurs obshchey fiziki. Mehanika i molekulyarnaya fizika* / L. D. Landau, A. I. Ahiezer, E. M. Lifshic. – M. : Nauka, 1969. – 400 s.
19. Yaricenکو N. V. *Dovgostrokove prognozuvannya shvidkostey ruhu na avtomobilnih dorogah: avtoref. dis. na zdobuttya kand. tehn. nauk* / N. V. Yaricenکو. – Harkiv, 1999. – 16 s.

© Тарасов Ю.В.
Надійшла до редакції 25.01.2016

Vorontsov O., PhD, Associate Professor
Tulupova L., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
Vorontsova I., PhD
Poltava Petroleum Geological College
of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

GEOMETRIC MODELING OF SPATIAL COVERINGS OF BUILDINGS CONSTRUCTIONS BY CHAINS OF SUCCESSIVE SUPERPOSITIONS

In this article we have studied a drafting of a chain of successive superpositions of some pairs of points for modeling of a curve as a part of the frame of a curvilinear surface. It was shown that a superposition of n points of the discrete analog of a given curve can be replaced by a chain of successive superpositions. Also we have got formulas for calculating superposition coefficients of the chain, which allow determining coordinates of unknown nodal points of the curve without making any system of equations.

Keywords: discrete geometric modeling, covering surface, static-geometric method, geometric apparatus of superpositions, value of recurrent dependence, coefficients of superposition.

Keywords: discrete geometric modeling, covering surface, static-geometric method, geometric apparatus of superpositions, value of recurrent dependence, coefficients of superposition.

Воронцов О.В., к.т.н., доцент
Тулупова Л.О., к.ф.-м.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Воронцова І.В., к.пед.н.
Полтавський коледж нафти і газу
Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПОКРИТТІВ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД ЛАНЦЮГАМИ ПОСЛІДОВНИХ СУПЕРПОЗИЦІЙ

Проведено дослідження організації ланцюга послідовних суперпозицій пар точок для моделювання кривої лінії як складової каркаса кривої поверхні. Показано, що суперпозиція n точок дискретного аналога заданої кривої може бути замінена ланцюгом послідовних суперпозицій із урахуванням величини рекурентної залежності. Виведено формули обчислення величин коефіцієнтів суперпозиції ланцюга, що дозволяють визначати координати шуканих вузлових точок кривої без складання систем рівнянь.

Ключові слова: дискретне геометричне моделювання, поверхні покриттів, статико-геометричний метод, геометричний апарат суперпозицій, величина рекурентної залежності, коефіцієнти суперпозиції.

Introduction. The present-day civil engineering more and more frequently applies covering in the form of complex geometric configuration coats permitting to design unique architectural structures due to the vast variety of shapes. The covering coats' advantages include, firstly, their ability to cover large spans without the intermediate supports, and secondly, ability to cover various plan shaped structures. Calculation of these structures with account of the materials' physical properties, manufacture technology and installation features require information on the object presented in the discrete form. Therefore, it seems reasonable to perform their formation process in the discrete form since the very beginning.

Nowadays, discrete geometrical modeling is the most promising field of the applied geometry development, which can be roughly divided into studies of continuous geometric images discretization and structural morphology (shaping) due to discrete output data.

Surfaces of the coats, having no significant flexion moments, are formed under the impact of their own weight (by gravity). Such surfaces can not be described by an equation. Dead load, being uniformly distributed across the coat's surface, strictly restricts the amount of the surface shape modeling parameters, thus reducing the designer's creative abilities. Therefore, it would be expedient to design curvilinear balanced surfaces using parts of simple surfaces, if they can be joined smoothly.

Staticogeometric method of the discrete geometrical modeling of curved lines and surfaces [3] permits to obtain discrete curvilinear surfaces' frames under the effect of the external formative load and, additionally, is a simple enough and descriptive tool. Using the staticogeometric method permits to obtain discrete curvilinear surfaces' frames with the arbitrary support contour.

A curved line model is easier to study than a surface model. The line model can be transferred to the surface model, which is formed according to the same regulations, if the said line is considered as part of the surface's frame. The discrete surface model's properties can be obtained as a result of generalizing the relevant line model's properties.

Analysis of the latest studies and publication sources. The staticogeometric method's mathematical apparatus is based on solving intricate systems of linear equations, thus complicating the process of computer calculations. The present study is dedicated to the problems of expanding the shape-generating possibilities of the staticogeometric method by means of the mathematical numerical sequences apparatus, permitting, for instance, to avoid making systems of linear equations at discrete images formation [4].

Publications [5, 6] present approaches to determining the discrete analogs of certain functionalities on the basis of the geometrical apparatus of one-dimensional points set superpositions, which also permits formation of discrete images without making and solving intricate systems of equations. Form management of the discretely presented curves (DPC) is performed by means of varying the superposition indexes' values.

A dissertation thesis [7] was devoted to studying the discrete point sets' superpositions, where the possibility of stretched grids' shape management on the functional addition basis was under consideration. Articles [8 – 10] a number of the above superpositions' properties was proved and the conclusion was made about the prospective efficiency of the geometric superpositions apparatus comprehensive astudy. The study [11] demonstrates that superposition of n points can be replaced by a chain of successive superpositions.

Highlighting parts of the general problem that haven't been solved before. The classic method of finite differences, staticogeometric method and mathematical apparatus of numerical sequences have their own advantages and disadvantages in terms of solving specific practical problems. Therefore, their research, enrichment with new efficient algorithms, studying the possibility of their compiling and expanding on this basis the output data sets are topical.

Further development and improvement of the above methods in general are also topical. Using the geometric superpositions apparatus in combination with the said methods permits significant raising the efficiency and expanding the possibilities of the continuous geometric images discrete modeling process.

Studying the methodology of discrete geometrical modeling on the basis of geometric superpositions apparatus, namely, studying possible variants of superpositions chains for the purpose of deducing the analytical correlations of the determined coordinates of the arbitrary curvilinear surface knot as a set knots' coordinates superposition, will permit modeling discrete frames of the curvilinear coatings' balanced surfaces on the complex configuration support contour as well as shape management in the interactive mode without making intricate equations systems and, thus, significant resource saving.

Problem statement. The paper is aimed at studying one of the variants of arranging the point pairs successive superpositions chain for the curved lines discrete modeling, since the curved surface discrete model's properties can just as well be obtained through generalizing of the respected curved line's properties.

Since one of the main principles concerning the staticogeometric fit of curve method is a curved line's shape management by means of changing the external shaping load distribution type [12], it seems reasonable to take into account the load value at forming discrete curves by means of the successive superpositions chains.

At the discrete images formation on the basis of geometric superpositions apparatus, instead of the term "external loading value", it would be more expedient to use the notion of "recurrent dependence value", which will be equal to the external loading value, because the concentrated efforts (the loading value) in the knot points stipulate the balancing efforts in the polygonal line's elements.

Basic material and the results. Formula

$$y_i = k_1 y_{i-1} + k_2 y_{i+1}$$

will be equal to the finite difference three-point dependence [12]

$$2 \cdot y_i = 1 \cdot y_{i-1} + 1 \cdot y_{i+1} ,$$

therefore, the recurrent dependence value, which will be the pre-image of the external shaping loading, for the purpose of forming the discrete analog of the quadric polynomial based on the set knot points superpositions, can be written as follows

$$P_i = y_i - k_1 y_{i-1} - k_2 y_{i+1} ,$$

where P_i is a discrete recurrent dependence value

Provided that $k_1 + k_2 = 1$,

$$P_i = y_i - k_1 y_{i-1} - (1 - k_1) y_{i+1} .$$

Article [11], and article [9] have proved, that superposition of n points can be replaced with the successive superposition chain.

Superposition 2 of the point pair 1 and 3 of the numerical sequence

$$y_i = 0,2i^2 , \tag{1}$$

which is shown in Figure 1, can be presented (article [8]) as

$$u_2 = u_1 \cdot k_2^{13} + u_3 \cdot (1 - k_2^{13}) + P_i^2 , \tag{2}$$

where u is a generalized symbol of the respected coordinate obtained as a result of the 1 and 3 points superposition;

k_2^{13} is the first of the two indexes of 1 and 3 points superposition for point 2;

P_i^2 is the recurrent dependence value, which is the analog to the discrete value of the external shaping loading, applied to knot point 2.

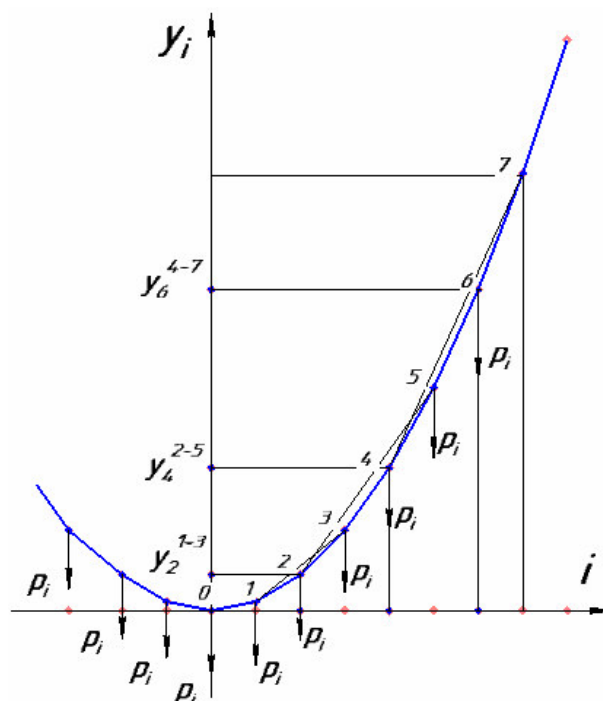


Figure 1 – Discrete analog of the $y_i = 0, 2i^2$ numerical sequence as a successive superpositions chain: 1-3, 2-5, 4-7

Let's consider the superposition of the three-points sequence (1)

$$y_4^{1-3-5} = k_1 y_1 + k_2 y_3 + (1 - k_1 - k_2) y_5. \quad (3)$$

Let's show that at a certain dependence between the indexes, superposition (3) can be obtained as a sequence of two superpositions

$$y_2 = k_2^{1-3} y_1 + (1 - k_2^{1-3}) y_3 + P_i^2, \quad (4)$$

$$y_4 = k_4^{2-5} y_2 + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + P_i^4. \quad (5)$$

Plugging expression (4) into expression (5), we shall obtain

$$y_4 = k_4^{2-5} \left\{ k_2^{1-3} y_1 + (1 - k_2^{1-3}) y_3 + P_i^2 \right\} + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + P_i^4, \quad (6)$$

and further

$$y_4 = k_4^{2-5} k_2^{1-3} y_1 + k_4^{2-5} (1 - k_2^{1-3}) y_3 + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + \left(k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 \right), \quad (7)$$

where $P_4^{2-5} = k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4$ is the recurrent dependence value

Comparing expressions (7) and (3), where the respective superposition indexes must be equal, we can write

$$\begin{cases} k_1 = k_4^{2-5} k_2^{1-3} \\ k_2 = k_4^{2-5} (1 - k_2^{1-3}) \\ k_3 = 1 - k_1 - k_2 = 1 - k_4^{2-5} \end{cases} .$$

Therefore

$$\begin{cases} k_1 = k_4^{2-5} k_2^{1-3} \\ k_2 = k_4^{2-5} - k_4^{2-5} k_2^{1-3} \end{cases} ,$$

$$\begin{cases} k_1 + k_2 = k_4^{2-5} \\ k_1 = (k_1 + k_2) k_2^{1-3} \end{cases} ,$$

$$\begin{cases} k_4^{2-5} = k_1 + k_2 \\ k_2^{1-3} = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \end{cases} . \quad (8)$$

Summarizing the above said, it can be determined that under condition (8) the superpositions pair (4) and (5) is identical to superposition (3).

Superposition of the four points in the sequence (1) is written as

$$y_6^{1-3-5-7} = k_1 y_1 + k_2 y_3 + k_3 y_5 (1 - k_1 - k_2 - k_3) y_7 . \quad (9)$$

Therefore:

$$y_2 = k_2^{1-3} y_1 + (1 - k_2^{1-3}) y_3 + P_i^2 , \quad (10)$$

$$y_4 = k_4^{2-5} y_2 + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + P_i^4 , \quad (11)$$

$$y_6 = k_6^{4-7} y_4 + (1 - k_6^{4-7}) y_7 + P_i^6 . \quad (12)$$

Plugging expression (10) into expression (11) and (11) into (12), we shall obtain

$$y_4 = k_4^{2-5} k_2^{1-3} y_1 + k_4^{2-5} (1 - k_2^{1-3}) y_3 + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + (k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4) , \quad (13)$$

$$y_6 = k_6^{4-7} \left\{ k_4^{2-5} k_2^{1-3} y_1 + k_4^{2-5} (1 - k_2^{1-3}) y_3 + \right. \\ \left. + (1 - k_4^{2-5}) y_5 + (k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4) \right\} + (1 - k_6^{4-7}) y_7 + P_i^6 . \quad (14)$$

On account of formula (14) we can write

$$y_6 = k_2^{1-3} k_4^{2-5} k_6^{4-7} y_1 + k_4^{2-5} (1 - k_2^{1-3}) k_6^{4-7} y_3 + \\ + k_6^{4-7} (1 - k_4^{2-5}) y_5 + (1 - k_6^{4-7}) y_7 + \left[k_6^{4-7} (k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4) + P_i^6 \right] , \quad (15)$$

where $P_6^{4-7} = k_6^{4-7} \left(k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 \right) + P_i^6$ is the recurrent dependence value.

It follows that

$$\begin{cases} k_1 = k_2^{1-3} k_4^{2-5} k_6^{4-7} \\ k_1 + k_2 = k_4^{2-5} k_6^{4-7} \\ k_1 + k_2 + k_3 = k_6^{4-7} \end{cases}.$$

Therefore

$$\begin{cases} k_2^{1-3} = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \\ k_4^{2-5} = \frac{k_1 + k_2}{k_1 + k_2 + k_3} \\ k_6^{4-7} = k_1 + k_2 + k_3 \end{cases} \quad (16)$$

Summarizing the above said, let's consider superposition of n points of the sequence (1) for this structure of the superpositions chain

$$y_{2n}^{1-3-...-(n-2)-n} = k_1 y_1 + k_2 y_3 + k_3 y_5 + \dots + k_n y_{2n-1} + \left(1 - k_1 - k_2 - \dots - k_n \right) y_{2n+1}. \quad (17)$$

Having performed the necessary transformations, we'll obtain:

$$\begin{aligned} k_{2(1)}^{1-3} &= \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \\ k_{4(2)}^{2-5} &= \frac{k_1 + k_2}{k_1 + k_2 + k_3}, \\ k_{6(3)}^{4-7} &= \frac{k_1 + k_2 + k_3}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}, \\ &\dots\dots\dots, \\ k_{2n}^{(2n-2)-(2n+1)} &= \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{\sum_{i=1}^{n+1} k_i}, \end{aligned} \quad (18)$$

where n is the number of the set chain's point, which coordinates are obtained as a superposition of the two points coordinates: those of the set point and the one, determined as a result of the appropriately arranged point chain's superposition.

Let's define the formula for calculating the recurrent dependence value in its general form for such arrangement of a superpositions chain.

$$P_4^{2-5} = k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 ;$$

$$P_6^{4-7} = k_6^{4-7} P_4^{2-5} + P_i^6 = k_6^{4-7} \left(k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 \right) + P_i^6 ;$$

$$P_8^{6-9} = P_6^{4-7} k_8^{6-9} + P_i^8 = \left[\left(k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 \right) k_6^{4-7} + P_i^6 \right] k_8^{6-9} + P_i^8 .$$

Therefore

$$P_4^{2-5} = k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 ;$$

$$P_6^{4-7} = k_6^{4-7} \left(k_4^{2-5} P_i^2 + P_i^4 \right) + P_i^6 = k_4^{2-5} k_6^{4-7} P_i^2 + k_6^{4-7} P_i^4 + P_i^6 ;$$

$$P_8^{6-9} = k_4^{2-5} k_6^{4-7} k_8^{6-9} P_i^2 + k_6^{4-7} k_8^{6-9} P_i^4 + k_8^{6-9} P_i^6 + P_i^8 ;$$

.....;

$$P_{2n}^{(2n-2)-(2n+1)} = \prod_{j=2}^n k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^2 + \prod_{j=3}^n k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^4 + \dots +$$

$$+ k_{2n}^{(2n-2)-(2n+1)} P_i^{(2n-2)} + P_i^{2n} .$$

Or:

$$P_{2n}^{(2n-2)-(2n+1)} = \sum_{s=2}^n \prod_{j=s}^n k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^{2s-2} + P_i^{2n} , \quad (19)$$

where n is the number of the set superpositions chain's point.

Therefore, for instance, if $n=4$, according to the formula (19), we'll obtain

$$P_8^{6-9} = \sum_{s=2}^4 \prod_{j=s}^4 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^{2s-2} + P_i^{2n} = \prod_{j=2}^4 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^2 +$$

$$+ \prod_{j=3}^4 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^4 + \prod_{j=4}^4 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^6 + P_i^8 =$$

$$= k_4^{2-5} k_6^{4-7} k_8^{6-9} P_i^2 + k_6^{4-7} k_8^{6-9} P_i^4 + k_8^{6-9} P_i^6 + P_i^8 .$$

If $n=5$, then

$$P_{10}^{8-11} = \sum_{s=2}^5 \prod_{j=s}^5 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^{2s-2} + P_i^{2n} = \prod_{j=2}^5 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^2 +$$

$$+ \prod_{j=3}^5 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^4 + \prod_{j=4}^5 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^6 + \prod_{j=5}^5 k_{2j}^{(2j-2)-(2j+1)} P_i^8 + P_i^{10} =$$

$$= k_4^{2-5} k_6^{4-7} k_8^{6-9} k_{10}^{8-11} P_i^2 + k_6^{4-7} k_8^{6-9} k_{10}^{8-11} P_i^4 + k_8^{6-9} k_{10}^{8-11} P_i^6 + k_{10}^{8-11} P_i^8 + P_i^{10} .$$

One can check, if the deduced formulas are correct, having substituted specific numerical values, for instance, of the sequence (1).

Conclusions. The study has demonstrated that superposition of n points in the discrete analog of the set curve can be replaced with the successive superpositions chain with account of the recurrent dependence value. One of the approaches to determining an arbitrary balanced grid knot coordinates can be studying possible variants of superpositions chains of the set contour knot coordinates and other variants of superpositions chains structures, which will have other dependences between the indexes.

Further studies results will permit modeling discrete frames of the balanced curvilinear coats' surfaces and managing their shapes in the interactive mode without making intricate equations systems.

References

1. Meek D. Constrained interpolation with rational cubics / D. Meek, B. Ong, D. Walton // *Computer Aided Geometric Design*. – 2003. – Vol. 20, Issue 5. – P. 253 –275.
2. Dietz D. Interpolation with cubic spirals / D. Dietz, B. Piper // *Computer Aided Geometric Design*. – 2004. – Vol. 21, Issue 2. – P. 165 –180.
3. Ковалев С. Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / С. Н. Ковалев – М. : МАИ, 1986. – 348 с.
Kovalev S. N. Formirovanie diskretnykh modeley poverhnostey prostranstvennykh arhitekturnykh konstruktsiy: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.01.01 / S. N. Kovalev – M. : MAI, 1986. – 348 s.
4. Пустюльга С. І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / С. І. Пустюльга. – К. : КНУБА, 2006. – 322 с.
Pustyulga S. I. Diskretne viznachennya geometrichnih ob'ektiv chislovimi poslidovnostyami: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.01.01 / S. I. Pustyulga. – K. : KNUBA, 2006. – 322 s.
5. Воронцов О. В. Визначення дискретного аналогу полінома n -го степеня суперпозиціями точок числової послідовності n -го порядку / О. В. Воронцов // *Прикладна геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць* – К. : КНУБА, 2012. – Вип. 90. – С. 63 – 67.
Voroncov O. V. Viznachennya diskretnogo analogu polinoma n -go stepenya superpoziciyami tochk chislovoi poslidovnosti n -go poryadku / O. V. Voroncov // *Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika: zb. nauk. prac* – K. : KNUBA, 2012. – Vip. 90. – S. 63 – 67.
<http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=26>
6. Воронцов О. В. Дискретна інтерполяція суперпозиціями точок числових послідовностей дробово-лінійних функцій / О. В. Воронцов, Н. О. Махінко // *Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці ТДАТА*. – Мелітополь: ТДАТА, 2013. – Вип. 4. – Т. 57. – С. 62 – 67.
Voroncov O. V. Diskretna interpolyaciya superpoziciyami tochk chislovi poslidovnostey drobovo-liniynih funkciy / O. V. Voroncov, N. O. Mahinko // *Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika: praci TDATA*. – Melitopol: TDATA, 2013. – Vip. 4. – T. 57. – S. 62 – 67.
7. Чан Хонг Хай. Управление формой растянутых систем на основе функционального сложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. / Ч. Х. Хай. – К., 1994. – 124 с.
Chan Hong Hay. Upravlenie formoy rastyanutyh sistem na osnove funktsionalnogo slozheniya: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.01.01. / Ch. H. Hay. – K., 1994. – 124 s.
8. Ковалев С. Н. О суперпозициях / С. Н. Ковалев // *Прикладна геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць*. – К. : КНУБА, 2010. – Вип. 84. – С. 38 – 42.
Kovalev S. N. O superpoziciyah / S. N. Kovalev // *Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika: zb. nauk. prac*. – K. : KNUBA, 2010. – Vip. 84. – S. 38 – 42.
<http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=26>
9. Воронцов О. В. Властивості суперпозицій точкових множин / О. В. Воронцов // *Прикладна геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць* – К. : КНУБА, 2010. – Вип. 86. – С. 345 – 349.
Vorontsov O. V. Vlastyvosti superpozitsii tochkovykh mnozhyn / O. V. Vorontsov // *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika: zb. nauk. prats* – K. : KNUBA, 2010. – Vyp. 86. – S. 345 – 349.
<http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=26>

10. Воронцов О. В. Определение дискретных аналогов классов элементарных функций суперпозициями одномерных точечных множеств [Электронный ресурс] / О. В. Воронцов, Л. О. Тулупова // *Universsum. Серия: Технические науки*. – 2014. – № 3(4). – Режим доступа: <http://7universsum.com/ru/tech/archive/item/1135>.
Vorontsov O. V. Opredelenie diskretnykh analogov klassov elementarnykh funktsiy superpozitsiyami odnomernykh tochechnykh mnozhestv [Electronic resource] / O. V. Vorontsov, L. O. Tulupova // Universsum. Seriya: Tehnicheskie nauki. – 2014. – № 3(4). – Access mode: http://7universsum.com/ru/tech/archive/item/1135.
11. Вязанкин В. А. Замена суперпозиции конечного числа точек цепью последовательных суперпозиций пар точек / В. А. Вязанкин, А. В. Мостовенко // *Прикладна геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць*. – К. : КНУБА, 2010. – Вип. 84. – С. 296 – 300.
Viazankyn V. A. Zamena superpozytsyy konechnoho chysla tochek tsepiu posledovatelnykh superpozytsyi par tochek / V. A. Viazankyn, A. V. Mostovenko // Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika: zb. nauk. prats. – K. : KNUBA, 2010. – Vyp. 84. – S. 296 – 300.
12. Воронцов О. В. Дискретне моделювання геометричних образів об'єктів проектування суперпозиціями одновимірних числових послідовностей з урахуванням функціонального навантаження / О. В. Воронцов // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. 3(45). – С. 28 – 39.
Vorontsov O. V. Dyskretne modeliuvannia heometrychnykh obraziv obektiv proektuvannia superpozytsiiamy odnovymirnykh chyslovykh poslidoynosti z urakhuvanniam funksiionalnoho navantazhennia / O. V. Vorontsov // Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo. – Poltava: PoltNTU, 2015. – Vyp. 3(45). – S. 28 – 39.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=I=&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%96669612

© Vorontsov O., Tulupova L., Vorontsova I.
Received 16.05.2016

Sorokovyi O., PhD, Associate Professor
Shokalo A., student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

REVERSE ENGINEERING OF COMPLEX SHAPED PARTS

Modern automated design of complex shaped parts using CAD/CAM/CAE software faces the task of creating a virtual 3D-model of an existing physical object, without reference to the source documentary producer. This work is dedicated to the practical application of reversible designing of technology elements used in extreme downhill biking. Significant load leads to destruction of some parts of the equipment, but replacement of a unit is economically disadvantageous. Simulation of the idler lower pulley wheel of rear derailleur and creation of attachment to the protective helmet are described in the paper.

The aim of the present research is practical application of the knowledge, obtained in the classroom with computer 3D-design of complex shaped parts, using a modern technology of reverse engineering (modeling) by means of PowerSHAPE 2015 (Delcam Ltd, UK) and Autodesk Fusion 360 (USA) software.

The work will be presented to the international student competition Delcam 2016 and was awarded the second prize of the International 3D Modeling Competition 2016 at Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus.

Keywords: *reverse engineering, hybrid modeling, Delcam, PowerSHAPE, Fusion 360, Autodesk, 3D-print.*

Сороковий О.І., к.т.н., доцент
Шокало А.В., студент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

РЕВЕРСИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ЗА ФОРМОЮ ДЕТАЛЕЙ

Висвітлено хід реверсивного комп'ютерного моделювання (зворотного інжинірингу) складних за формою деталей із використанням сучасного CAD/CAM/CAE програмного забезпечення PowerSHAPE та Fusion 360 на прикладі зубчастого колеса компаньйолу та кріплення камери GoPro до захисного шолома. З'ясувалося, що зубчасте колесо зруйноване в процесі експлуатації, але запропонована заміна цілого блока економічно недоцільна. Задачу розв'язано із застосуванням технології реверсивного моделювання в програмі PowerSHAPE. Дублююче ідентичне зубчасте колесо використано для визначення вихідних параметрів форми і розмірів. У процесі проектування застосовано гібридне твердотільне й поверхневе моделювання. Кріплення камери до захисного шолома має оригінальну конструкцію. Реверсивним моделюванням визначено криволінійну форму поверхні стикування об'єктів та параметри сполучення. Проектування виконано в «хмарній» технології Autodesk Fusion 360. Обидві деталі виготовлено 3D-друкуванням.

Ключові слова: *реверсивне моделювання, зворотний інжиніринг, гібридна технологія моделювання, Delcam, PowerSHAPE, Fusion 360, Autodesk, 3D-друк.*

Introduction. Present day automated design of complex shaped parts using CAD/CAM/CAE software faces the task of creating a virtual 3D-model of an existing physical object, without reference to the source documentary producer. A component part is measured and processed up to the manufacturing stage in the format suitable for the designer. This work is dedicated to the practical application of reversible engineering technology for elements used in extreme downhill biking. Significant load leads to destruction of some parts of the equipment, but replacement of a unit is economically disadvantageous. The paper describes the course of modeling the idler lower pulley wheel of rear derailleur, gear-change mechanism (see Fig. 1) and designing safety helmet added equipment mount.



Figure 1 – Rear derailleur (left) and its idler lower pulley wheel (visualization)

Latest research sources and publications analysis. In the absence of engineering drawings and in the presence of a sound or damaged part, when repair parts supply is impossible, there occurs the necessity to apply «reverse engineering» [1,2]. This term [3] is understood as a possibility of determining 3D parameters of a detail in the absence of the design documentation. It is possible to take measurements of the real dimensions (which has actually been done) or to use 3D scanner for obtaining a «point cloud» [1,2].

Problem definition. The study is aimed at the practical application of knowledge, obtained in the academic process, on computer 3D design of complex shape parts, using the present day reverse modeling technology by means of licensed CAD/CAM/CAE software PowerSHAPE 2015 sold by Delcam Ltd (UK) and Fusion 360 sold by Autodesk (USA).

Basic materials and the results. Nowadays, complicated high-curvature parts are prevalent as a basis for the parts design. Our choice of reverse engineering is explained by the fact that, though one of the idler lower pulley wheels was damaged, the rear derailleur has two identical tooth gear wheels (upper and lower ones), and the upper one (jockey) remained sound; therefore, there was an opportunity to determine the output parameters of the object's dimensions and shape. It should be noted, that we had to apply both solid modeling – two sections rotation (Fig. 2) and surface modeling – for designing curvilinear edges (Fig. 3). For surface modeling the specific command «smart surfer» was applied. Finally, the surface part of the model was converted into a «solid body» and the integrated element was created by means of «Boolean combination process» (Fig. 4).

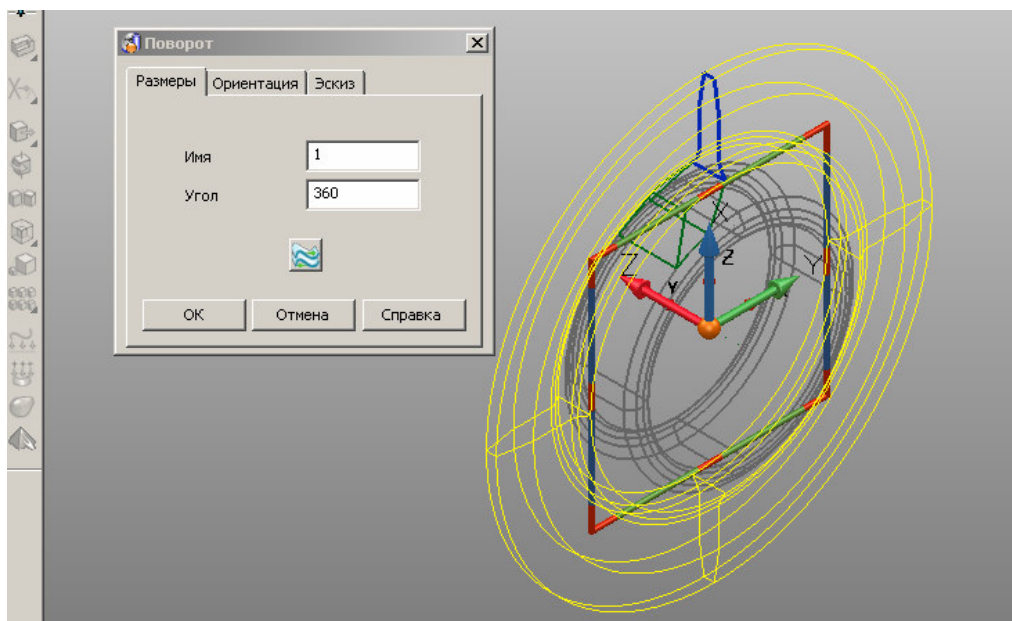


Figure 2 – Solid modeling by means of rotation

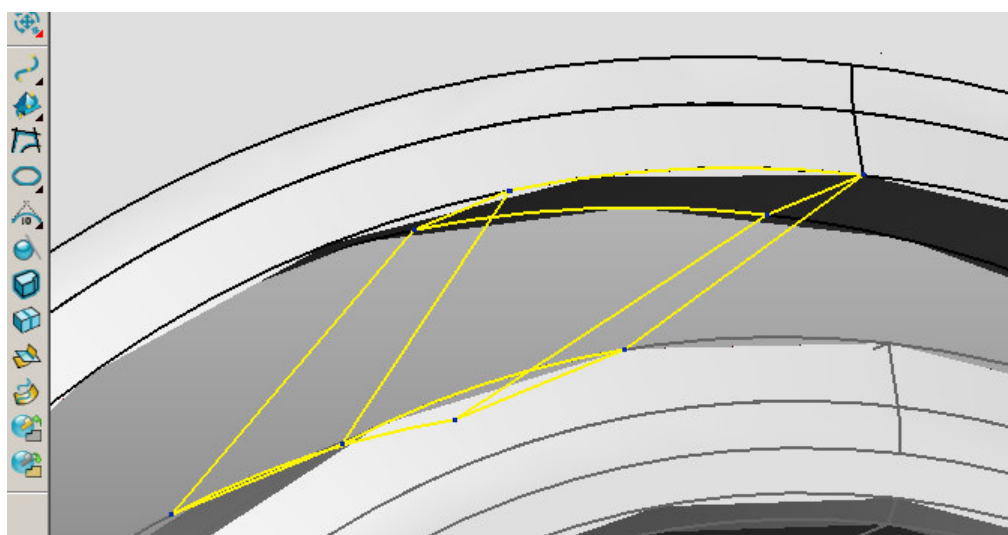


Figure 3 – 3D curves contours as basis for “smart” surface modeling

Combined application of solid and surface (hybrid) modeling is one of important features of designing with PowerSHAPE. Meanwhile, there is a possibility of Tribid modeling, patented concept of Delcam Ltd., if in addition to the above technologies, triangulation elements are used in one and the same design project. Tribid modeling is a technology, including (according to the project designer's needs) not only surface and solid, but Triangle modeling additionally. Combined application of all the available modeling types (having significant differences in their bases) in one and the same program permits to avoid export-import operations on transferring data to unauthorized software, improves the performance quality. The above approach permits obtaining a product's concept by its physical model, not only by simple cloning. A wide range of functions, such as Boolean operations, facet video overlay, morphing and many other features permit obtaining a prototype of an object existing in reality, performing an object editing to improve its design and technological properties

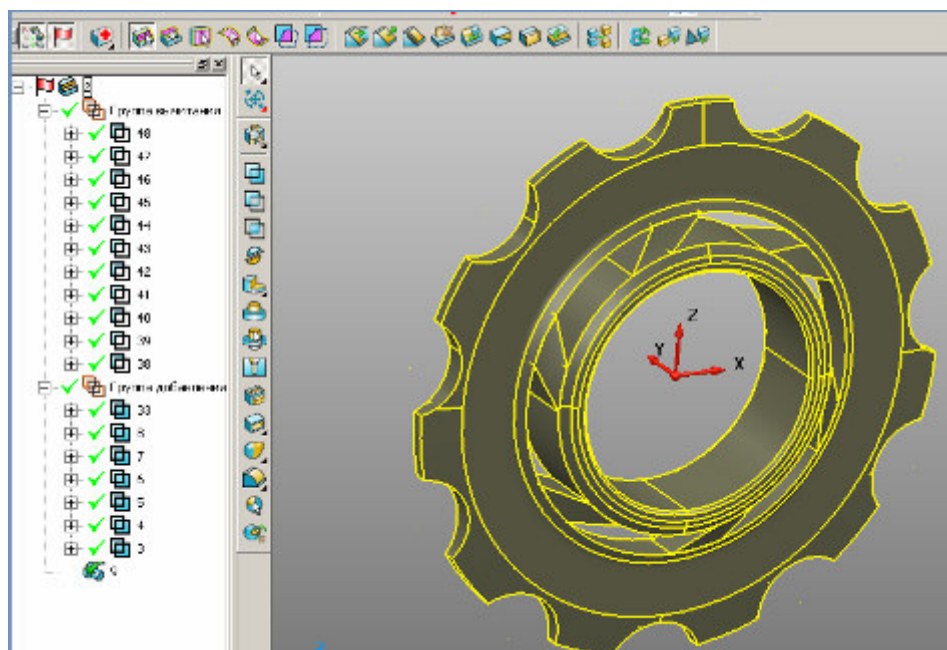


Figure 4 – Complete solid model

To manufacture the part, the operation of the solid element exportation into the triangle format of STL stereolithography was performed (the specialized Delcam Exchange software was applied). For 3D printing PLA plastic was used. The bicycle-type bearing, remained from the damaged part, was inserted into the tooth gear wheel (Fig. 5). The results of the printed tooth gear wheel's exploitation demonstrated that the part's wear was insignificant, the part performed its function successfully.



Figure 5 – Tooth gear wheel: the original (left) and the printed part

Delcam Ltd only permits home use of PowerSHAPE-e, a free version of PowerSHAPE-Pro, which can be used for design ideas assessment, training and research activities. However, file exportation (for instance, for manufacturing) is prohibited except for the «user fees». For designing the other part – safety helmet added equipment mount for a special GoPro camera, used to record race tracking video, another software, Fusion 360, was

used. Information for users: Fusion 360 is a project developed by Autodesk corporation, and Delcam has been its spin-off company since 2015.

Fusion 360 is an innovative software suite by Autodesk (USA) programmed as «cloudy» CAD/CAM/CAE instrument for engineering designing, aimed at small enterprises, engineers-inventors, etc. Autodesk Co (the world largest CAD/CAM/CAE technologies designer) presents Fusion 360 as a sort of a test platform, because that very approach is to be applied in the future versions of this company's flagship programs. In our case, the important factor, having prompted Fusion 360 application in reverse computer modeling, was a proposal made by the rightholders of the free software product use for students and their teachers for the 3-years term. The peculiar feature of the Fusion 360 «cloudy» structure is the possibility of working at a project both from a powerful graphic station and from a notebook, workpad and even smartphone, as all the «difficult» calculations, conversion operations, visualization are performed by the «cloudy» component available through Internet.

Various variants of universal added equipment mounts found in the Internet did not suit our particular case, because these variants used either a double-sided mounting tape or flexible mounts which were too huge or mounted in the wrong place, namely under the safety helmet's brim. Besides, to obtain a fixed joint, the lower surface of the part should duplicate the helmet's shape, fitting it tightly.

Safety helmet has a complicated shape, and it would be reasonable to apply reverse engineering of a 3D point cloud. The absence of such an option prompted to make use of a simple technique, namely: a fragment of expanded polystyrene was tightly pressed to the helmet in the place where a mount will be located. The obtained counterproof was scanned, and the bit map image was transferred to Fusion 360 software, where the picture was calibrated according to its real size (Fig.6). In PowerSHAPE the analogous command is absent.

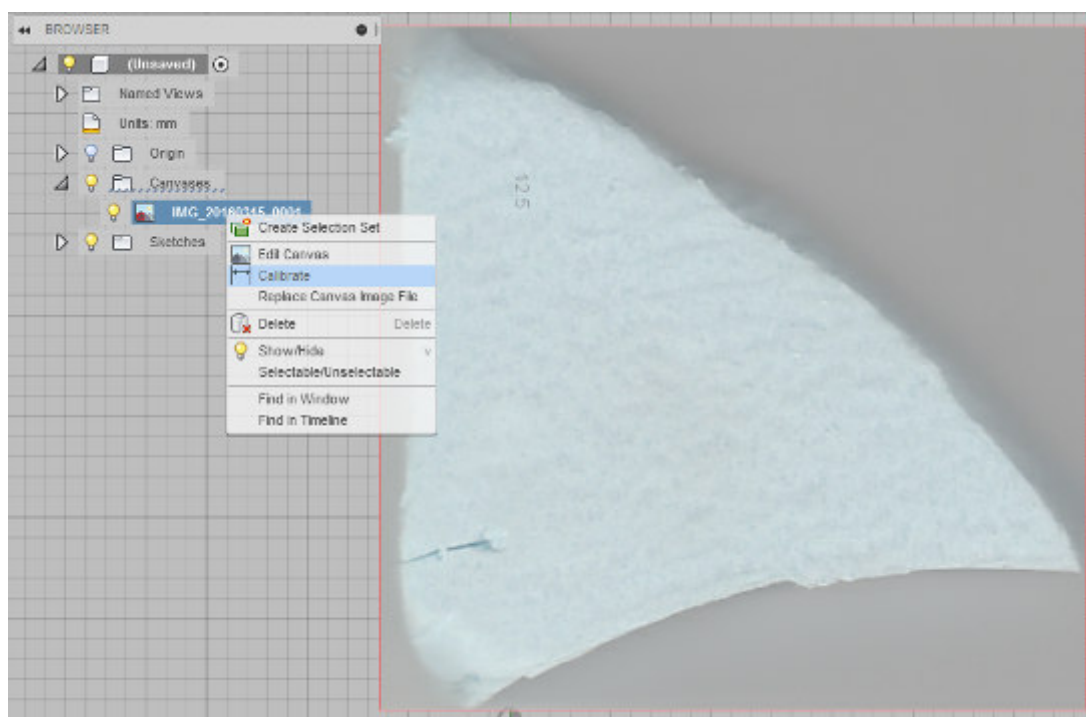


Figure 6 – Counterproof image in the process of calibration

The next stage was mount profile modeling by means of vector primitives (Fig. 7).

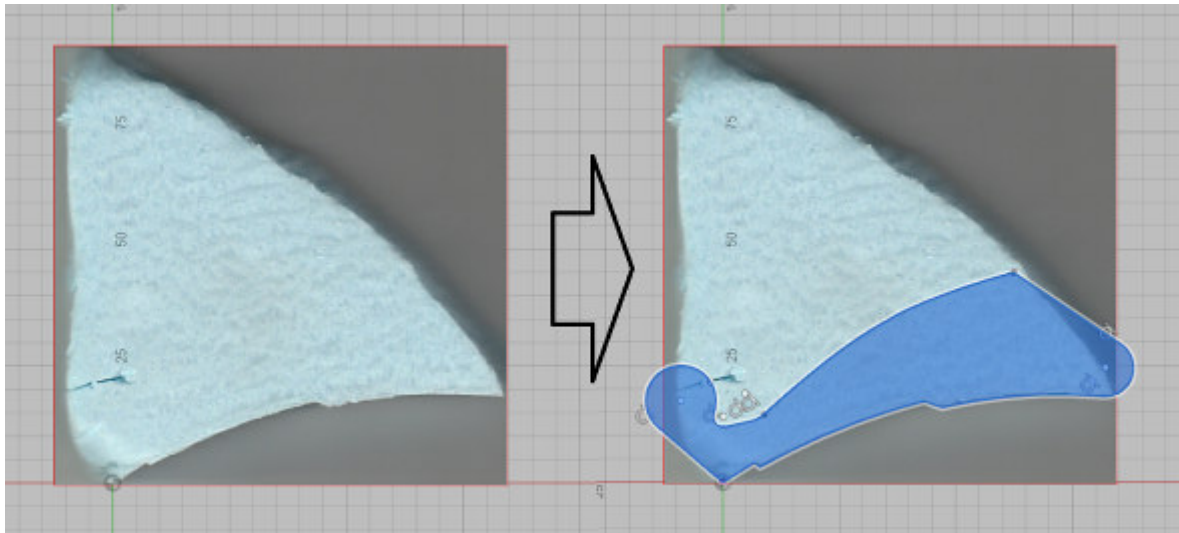


Figure 7 – Mount profile modeling

After comparing the vacant space under the helmet's brim, where a camera would be mounted, and the camera's dimensions, joint endpoint and the designed dimensional specifications of the mount were determined. At the first stage a sketch («Sketch» function) was drafted, and after the «Extrude» function had been used, a 3D part blank was obtained. The second stage was removal of extra volume to reduce the whole mount's weight and for efficient use of the material. The third stage was formation of a mounting site for special disarticulation of the GoPro camera for fixing it by means of a bolt-on junction, without a possibility of screwing the nut (Fig. 8).

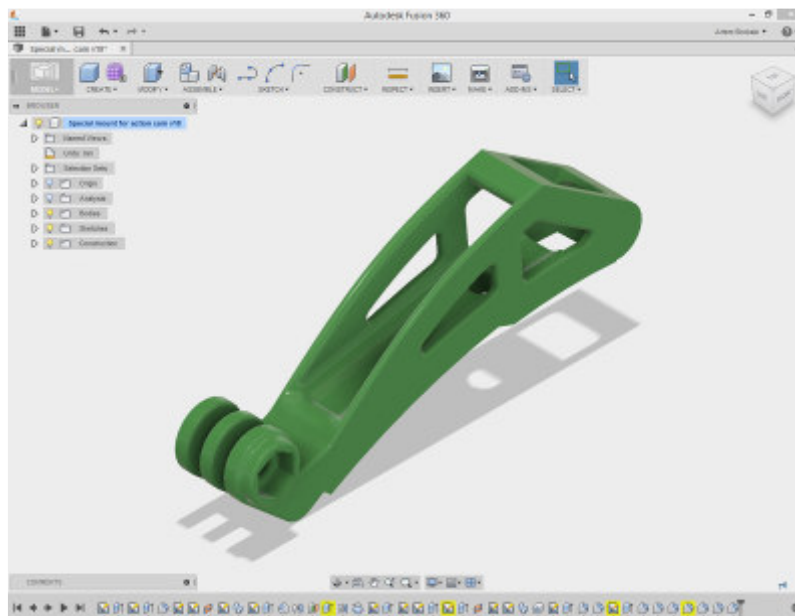


Figure 8 – Mount model in the Fusion 360 “cloud” environment

Version design method permitted to maximally reduce the model's weight, preserving the sufficient hardness and torsional rigidity, which have positively effected the video record.

For the preliminary modeling results assessment, the project visualization was performed (Fig. 9) using the «Render» module. After the full completion of the project, the model was 3D printed (PLA plastic was used again, but this time it was colored green).



Figure 9 – Visualization of the GoPro camera mounting onto the safety helmet

The item translated into reality, due to peculiar features of 3D printing, had a lot of extra supporting material necessary for building the model's fragments. After the above "support" had been removed, the model was immediately tested under the sporting contest conditions. The mount has presented itself well, camera records sustained video. The camera's mounting is simple and easy without any additional tools. Due to a specially designed mount the camera does not stand proud of the helmet, it is compactly located under the helmet's brim, which provides additional protection.

The camera mount is presented in the Autodesk Fusion 360 project gallery (<https://gallery.autodesk.com/fusion360/users/V8U6L4AXRE5P>) and at the International competition on students' 3D modelling in P.Y. Sukhoy State Technical University of Gomel (Belarus) (<https://www.gstu.by>), where the project was announced the winner and awarded the second class winner's certificate.

Conclusions. The implemented models have permitted to study practical application of the today's software, produced by the world leaders of CAD/CAM/CAE technologies, and to master the reverse engineering of complex shaped parts with their further 3D printing.

References

1. *Reverse engineering [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.delcam.com/software/powershape/reverse-engineering>.*
2. *PowerSHAPE-Pro reverse engineering software to feature at TCT Show [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.tctmagazine.com/tct-show-3D-printing-exhibition/delcams-powershape-pro-reverse-engineering-on-show-at-tct>.*
3. *Reverse engineering [Electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering.*

© Sorokovyi O., Shokalo A.,
Received 26.05.2016

Storozhenko L., DSc, Professor
Gasii G., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE RIBBED SLAB AS A PART OF THE SPATIAL GRID-CABLE SUSPENDED STRUCTURE

The nature of deformation and stress distribution in steel-concrete ribbed composite slab that is part of the space module of the steel and concrete grid-cable composite structure with span of 30 m were investigated. The plate was made with 20 mm thick and the size in terms 1.5×1.5 m. The plate has 30 mm height and 50 mm width ribs that giving the plate additional rigidity. Strengthening steel-concrete composite plate is provided with woven nets from steel wire by a diameter of 0.9 mm and a cell size of 12×12 mm. Connections woven reinforcing nets with each other is performed using embedded parts. The ribs were reinforced with rods of class A400C diameter of 6 mm. The design is made from the fine concrete C25/30. Analysis of stress-strain state the design was made with a numerical method. For the modeling of the physical and mechanical properties of the materials of the plates have been reduced characteristics. The main parameters were reduced modulus of elasticity plate and ribs.

Keywords: steel-concrete composite material, plate, modulus of elasticity, stress-strained state.

Стороженко Л.І., д.т.н., професор
Гасій Г.М., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОЦЕМЕНТНОЇ РЕБРИСТОЇ ПЛИТИ, ЯКА Є ЧАСТИНОЮ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Досліджено характер деформування та розподіл напружень в армоцементній ребристій плиті, яка є частиною просторового модуля структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції прольотом 30 м. Плита виконана товщиною 20 мм і розмірами на плані 1,5×1,5 м, має ребра висотою 30 мм і шириною 50 мм, які надають плиті додаткової жорсткості. Зміцнення плити забезпечено плетеними сітками зі сталевих дротів діаметром 0,9 мм і розміром чарунки 12×12 мм. З'єднання плетених армувальних сіток між собою виконано за допомогою закладних деталей. Ребра жорсткості армовано стрижневою арматурою класу А400С діаметром 6 мм. Конструкцію виготовлено з дрібнозернистого бетону марки 300. Аналіз напружено-деформованого стану досліджуваної конструкції виконано за допомогою чисельного методу. Для моделювання фізико-механічних властивостей матеріалів плити було виведено приведені характеристики. Основними параметрами були приведені модулі пружності плити і ребр жорсткості.

Ключові слова: сталезалізобетон, плита, модуль пружності, напружено-деформований стан.

Introduction. The development of the construction industry needs to change and implementation of the latest designs. The obligatory condition for a successful implementation of design concepts into real sector of the construction are their researching and compliance with today's requirements. The design that completely satisfies these requirements is the steel and concrete grid-cable suspended composite (SCGSC) structure this is the rod-plate system that has the modern concept. The originality of this concept lies in combining in a structure of various elements, the effectiveness of which is determined by the terms of their particular location in structure. The SCGC construction consists of three structural elements: a lattice, a top and bottom chords. As the bottom chord, use the steel-concrete composite ribbed (SCCR) slab.

Analysis of recent sources of research and publications has shown that steel and concrete composite is a material that were used very widely in various fields of construction [1 – 3]. There are research papers that described the study of stress-strain state of individual elements of the SCGC structures or small-scale samples and models with experimental and theoretical ways [4] among a number of research papers that aimed at studying the steel and concrete composite constructions [5 – 10].

The method of computer modeling describes in [11] to calculate steel and concrete composite slabs. There is a calculation of the steel and concrete composite slabs with steel belt contour in [12].

Highlight unsolved parts of the general problem. The analysis of previous works has shown that full-size samples of the SCCR slabs for the SCGSC structure have not studied yet. This is the reason and given the importance of the confirmation of the reinforcing efficiency of the invention, the research of the stress-strain state of the SCCR slab is actual subject.

Formulation of the problem. Task consists in study the stress-strain state of the full-size samples SCCR slabs using the results of previous studies and given the features structural concept.

The main material and results. Calculation was made on the example of the SCGSC shell with span 30 m (Fig. 1). The shell consists SCCR slabs with 20 mm thick and the size in terms 1.5×1.5 m (Fig. 2). The plate has 30 mm height and 50 mm width ribs that giving the plate additional rigidity. Strengthening steel-concrete composite plate is provided with woven nets from steel wire by a diameter of 0.9 mm and a cell size of 12×12 mm. Connections woven reinforcing nets with each other is performed using embedded parts. The ribs were reinforced with rods of class A400C diameter of 6 mm. The design is made from the fine concrete C25/30.

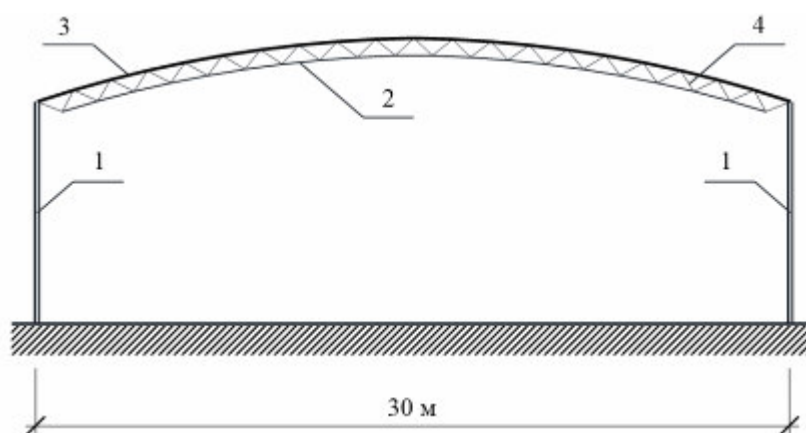


Figure 1 – The steel and concrete grid-cable suspended composite shell:

1 – a column; 2 – a bottom chord;
3 – the steel-concrete composite ribbed (SCCR) slab; 4 – a lattice

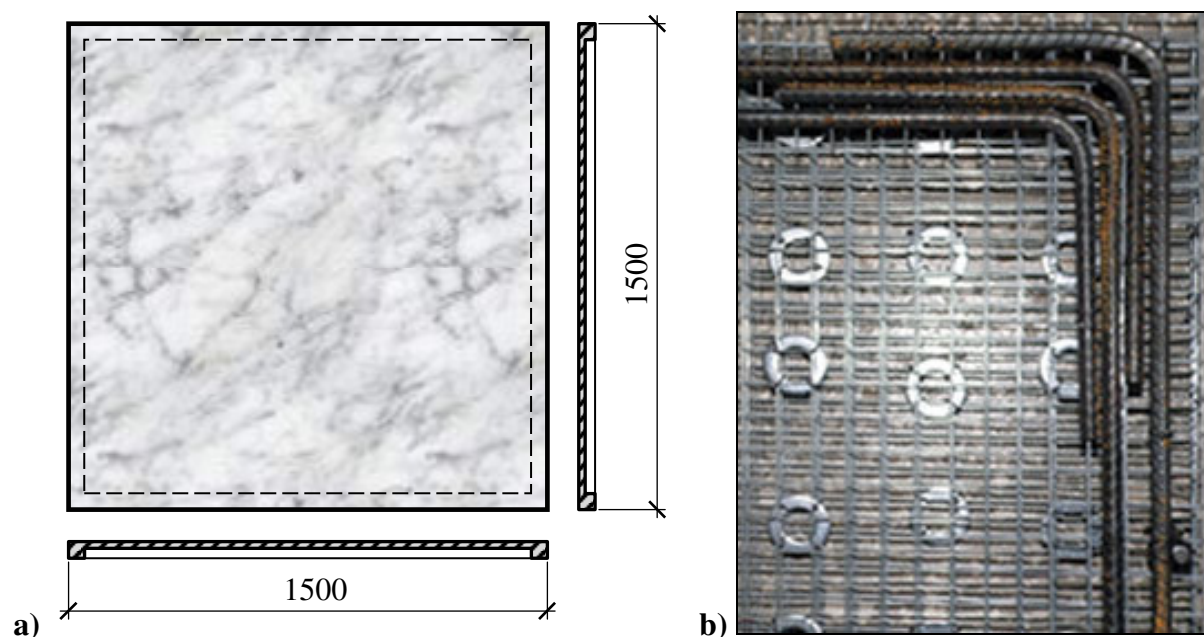
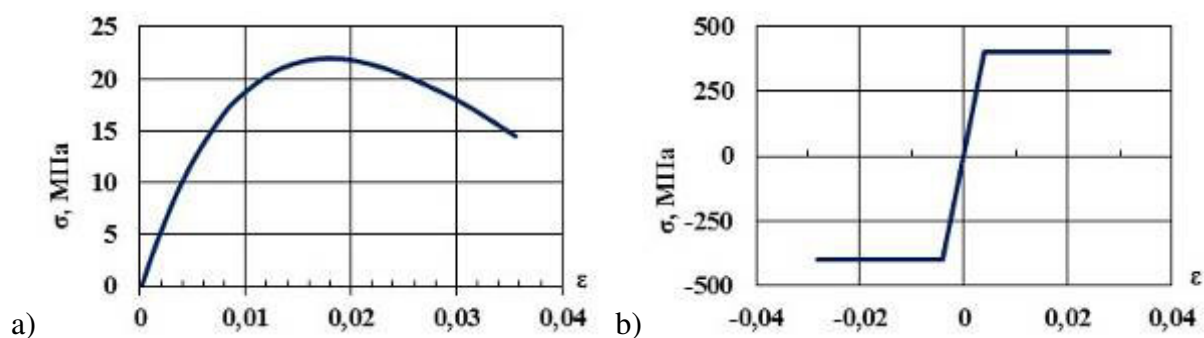


Figure 2 – The steel-concrete composite ribbed (SCCR) slab (a) and the reinforcement of SCCR slab (b)

Analysis of stress-strain state of the SCCR slab has investigated with the FE method. For this had been defined physical and mechanical properties of materials by experimental way (Fig. 3) and the average modulus of elasticity for different parts of the SCCR slab by the method described by E. Lysenko (Fig. 4, a). There is the boundary conditionals on Fig. 4, b. The result of the solving is contours of stresses (Fig. 5 – Fig. 7) of the SCCR slab.



**Figure 3 – The stress-strain curve:
a) concrete C25/30; b) steel reinforcement A400C**

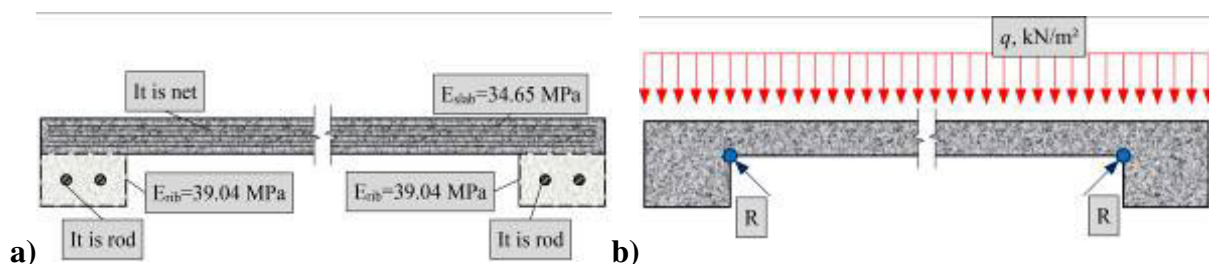


Figure 4 – The average modulus of elasticity for different parts of the SCCR slab (a) and boundary conditionals (b)

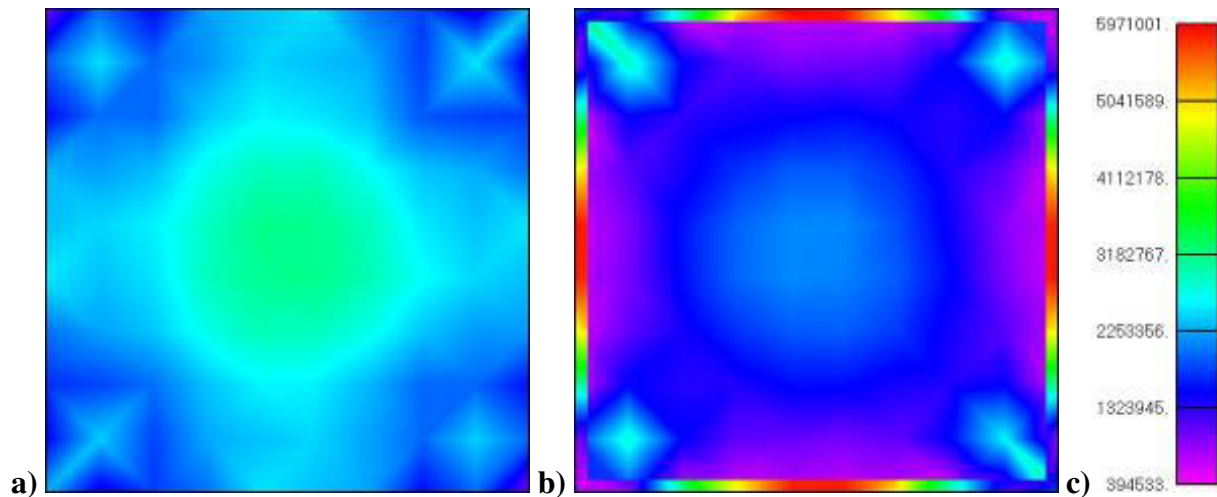


Figure 5 – The solid Von Mises stress contour, N/m²:
a) top of the SCCR slab; b) bottom of the SCCR slab;
c) criteria levels of the stress contour

There is the Solid Von Mises Stress contour on the Fig. 5 shows that maximum stresses have appeared in the ribs. The value of the maximum stresses in the ribs higher than stresses in the middle of slab almost in two times $5.97 \text{ MPa} / 3.18 \text{ MPa} \approx 1.88$. It means ribs were involved in the joint operation together with SCCR slab.

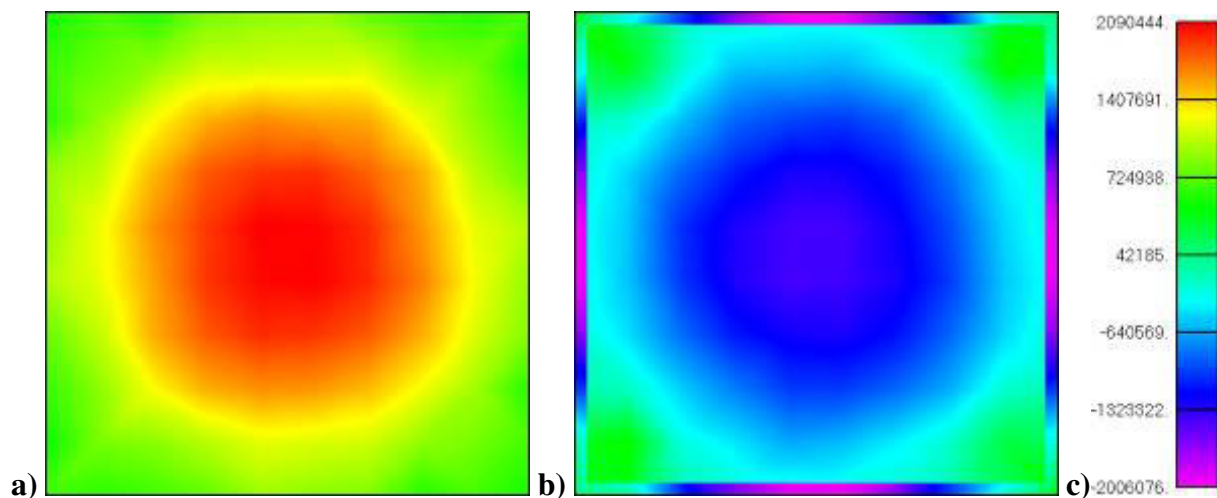


Figure 6 – The solid mean stress contour, N/m²:
a) top of the SCCR slab; b) bottom of the SCCR slab;
c) criteria levels of the stress contour

There is solid mean stress contour on the Fig. 6 shows zones where compressive and tensile stresses have appeared. The compressive and tensile stresses are approximately equal among themselves. There are mean stresses in the ribs have changed sign from «+» at the end to «-» at the middle point of the rib. It means the SCCR slab has been bended. There are mean stresses in the slab have decreased from the middle to the end radially.

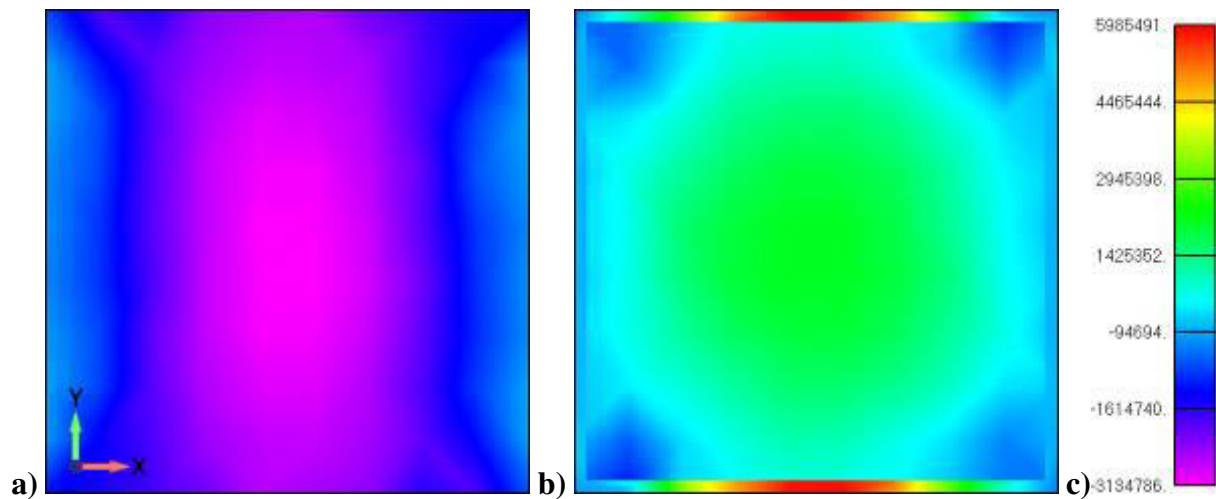


Figure 7 – The solid X normal stress contour, N/m²:

a) top of the SCCR slab; b) bottom of the SCCR slab;
c) criteria levels of the stress contour

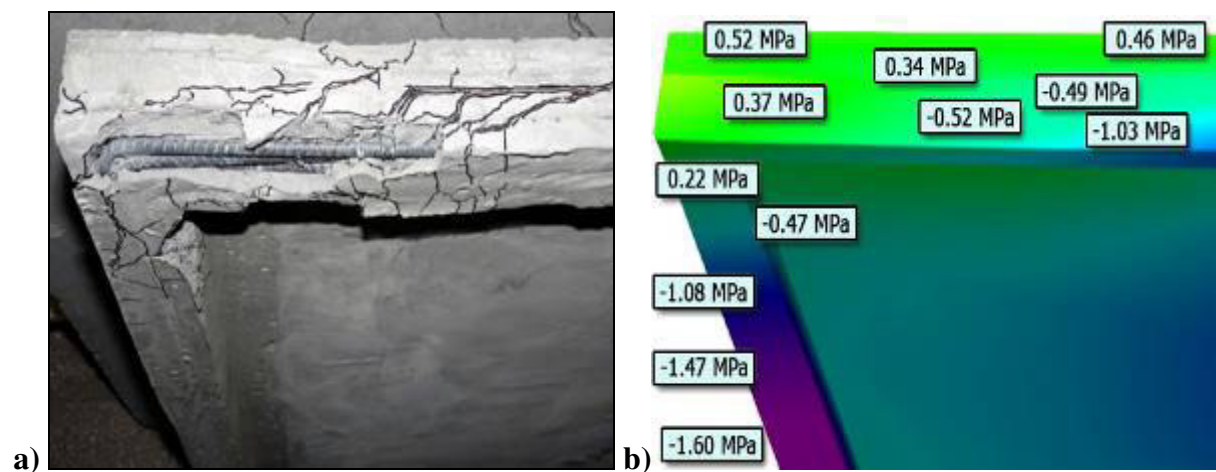


Figure 8 – The comparison of cracks in the experimental model (a) and the numerical model (b)

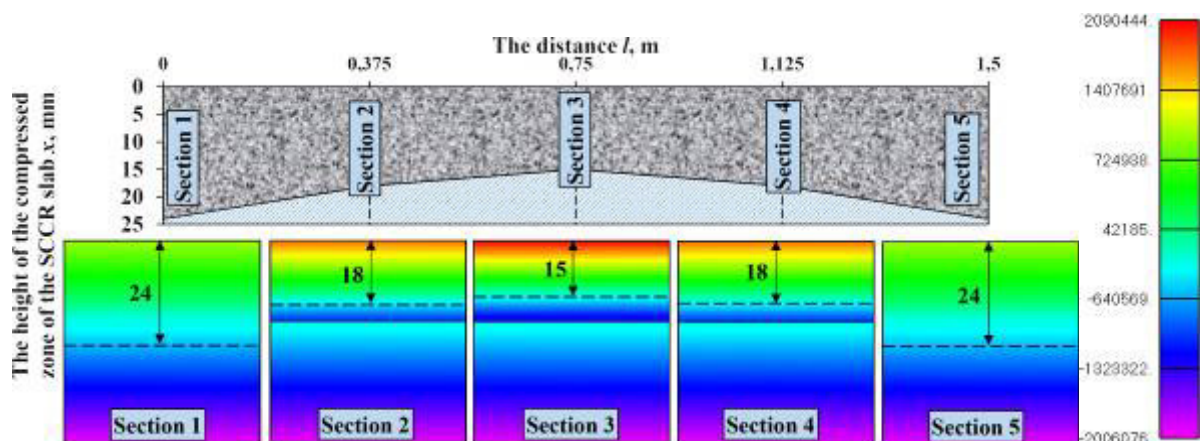


Figure 9 – The height of the compressed zone along the axes X and Y of the SCCR slab

Fig. 8 shows a comparison of cracks in the experimental model with the numerical model. It is evident that the stress-strained state of the experimental model and the numerical model is similar. If we trace an imaginary curve between stresses with different signs, we get direction of cracks formed in the experimental sample. Fig. 9 shows height of the compressed zone along the axes X or Y and obviously that it lower in the middle than at the sides.

Conclusions. The method described by E. Lysenko allows to obtain the average elastic modulus are used for numerical modeling behavior of the SCCR slab under load. Contour of the stresses and displacement were obtained with modeling behavior of the SCCR slab. Analysis of stress-strain state of the SCCR slab showed similarity data with the results that were obtained with experimental way. The stress state the SCCR slab indicates that ribs are behavior compatibility with slab. All this data proves effectiveness of the reinforcement the SCCR slab. It means that the SCCR slab can be designing with the FE method.

References

1. Gasii G. M. *Technological and design features of flat-rod elements with usage of composite reinforced concrete* / G. M. Gasii // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 4 – P. 23 – 25.
2. Storozhenko L. I. *Experimental research of strain-stress state of ferrocement slabs of composite reinforced concrete structure elements* / L. I. Storozhenko, G. M. Gasii // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 6. – P. 40 – 42.
3. *New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab* / C.T.T. Hsu, S. Punurai, W. Punurai, Y. Majdi // *Engineering Structures*. – Elsevier, 2014. – Vol. 71. – P. 187 – 200.
4. Стороженко Л. І. *Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття* / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. – 218 с.
Storozhenko L. I. *Prostorovi stalezalizobetonni strukturno-vantovi pokrittya* / L. I. Storozhenko, G. M. Gasiy, S. A. Gapchenko. – Poltava: TOV «ASMI», 2015. – 218 s.
5. *Behaviour and Design of Composite Steel and Concrete Building Structures* / B. Uy, Z. Tao, D. Lam, L. H. Han. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 400 p.
6. Oehlers D. J. *Composite Steel and Concrete Structures: Fundamental Behavior* / D. J. Oehlers, M. A. Bradford. – Elsevier, 2013. – 588 p.
7. Johnson R.P. *Composite structures of steel and concrete - beams, slabs, columns, and frames for buildings* / R. P. Johnson. – Blackwell: Wiley-Blackwell, 2004. – 252 p.
8. Holomek J. *Experimental and numerical investigation of composite action of steel concrete slab* / J. Holomek, M. Bajer // *Procedia Engineering*. – Elsevier, 2013. – Vol. 40. – P. 143 – 147.
9. Rowe M. *Partial Shear Interaction in Deconstructable Steel-Concrete Composite Beams with Bolted Shear Connectors* / M. Rowe, M. A. Bradford // *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures*. – Berlin Heidelberg; Springer, 2013. – P. 585 – 590.
10. Ranzi G. *State of the art on the time-dependent behaviour of composite steel-concrete structures* / G. Ranzi, G. Leoni, R. Zandonini // *Journal of Constructional Steel Research*. – Elsevier, 2013. – Vol. 80. – P. 252 – 263.
11. Барабаш М. С. *Методи комп'ютерного моделювання для розрахунку сталезалізобетонних плит перекриття* / М. С. Барабаш, О. І. Лапенко // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 3(33). – С. 12 – 17.
Barabash M. S. *Metodi komp'yuternogo modelyuvannya dlya rozrahunku stalezalizobetonnih plit perekrittya* / M. S. Barabash, O. I. Lapenko // *Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo*. – Poltava: PoltNTU, 2012. – Vip. 3(33). – S. 12 – 17.
<http://znp.pntu.edu.ua>
12. Нижник О. В. *Безбалкові та часторебристі сталезалізобетонні перекриття* / О. В. Нижник. – Полтава: Видавець Шевченко Р. В., 2012. – 380 с.
Nizhnik O. V. *Bez balkovi ta chastorebristi stalezalizobetonni perekrittya* / O. V. Nizhnik. – Poltava: Vidavets Shevchenko R. V., 2012. – 380 s.

© Storozhenko L., Gasii G.
Received 25.04.2016

Избаиш М.Ю., д.т.н., профессор
Крутова Н.А., ассистент

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ ШПАНГОУТАМИ

Для выполнения анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, подкрепленных шпангоутами, были взяты за основу цилиндрические тонкостенные оболочки, свободные от закрепления. Цилиндрические оболочки смоделированы в программном комплексе SCAD 11.5. Которые находятся под воздействием внутреннего равномерного давления q . Сравнение проводилось на основании оболочек, построенных по общей теории оболочек и по мембранной теории оболочек. В соответствии с общей теорией оболочек геометрическая неизменяемость расчетной схемы обеспечивалась за счет наложения связей по условиям ее симметрии, а в соответствии с мембранной теорией – с помощью наложения связей на все угловые перемещения во всех узлах расчетной схемы. В результате подкрепления шпангоутами первого и второго вариантов цилиндрических оболочек были получены расчетные схемы с жестко закрепленными шпангоутами.

Ключевые слова: *напряженно-деформированного состояния, цилиндрические оболочки, шпангоуты, моделирование оболочек.*

Избаиш М.Ю., д.т.н., профессор
Крутова Н.О., ассистент

Харківський національний університет будівництва та архітектури

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ, ПІДКРІПЛЕНОЇ ШПАНГОУТАМИ

Для виконання аналізу напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, підкріплених шпангоутами, було взято за основу циліндричні тонкостінні оболонки, вільні від закріплення, які знаходяться під впливом внутрішнього рівномірного тиску q . Циліндричні оболонки змодельовано в програмному комплексі SCAD 11.5. Порівняння проводилося на підставі оболонок, побудованих за загальною теорією оболонок і за мембранною теорією оболонок. Відповідно до загальної теорії оболонок геометричну незмінність розрахункової схеми забезпечено за рахунок накладення зв'язків за умовами симетрії, а відповідно до мембранної теорії – за допомогою накладення зв'язків на всі кутові переміщення в усіх вузлах розрахункової схеми. У результаті підкріплення шпангоутами першого і другого варіантів циліндричних оболонок було отримано розрахункові схеми з жорстко закріпленими шпангоутами.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, циліндричні оболонки, шпангоути, моделювання оболонок.*

THE ANALYSIS OF AN INTENSE DEFORMABLE CONDITION OF THE CYLINDRICAL SHELL SUPPORTED WITH BULKHEADS

Cylindrical thin-walled shells, free from fixing which are under the influence of the internal uniform pressure of q , have been taken as a basis for implementation of the analysis of the intense deformed condition of the cylindrical shells supported with bulkheads. Modeling of cylindrical shells was carried out in the program SCAD 11.5. Comparison was carried out on the basis of the shells constructed according to the general theory of shells and according to the membrane theory of shells.

The task of the analysis of the intense deformed condition of a cylindrical shell is rather difficult both at calculation by means of theories of covers, and by means of finite-element method (FEM). The main problem of the general theory of shells is approximate data of a three-dimensional regional task to two-dimensional. The biggest difficulty in the momentless theory of shells is drawing up conditions of movements interface. The main difficulties on a solution of problems of thin-walled designs deformation are connected with the need of the fulfilment of conditions in convergence. One of such conditions is the need of observance of a continuity of required functions.

For creation of the structural design scheme according to the membrane theory, the system of a general view, shell elements – finite element (FE) of 44 type was used. Geometrical stability of the structural design scheme is provided due to imposing of communications under the terms of its symmetry.

For creation of the structural design scheme according to the membrane theory, the system of a general view, shell elements – FE of 44 type was used. Geometrical stability of the structural design scheme is provided due to imposing of communications under the terms of its symmetry, and also for compliance of work of a cylindrical shell, according to the membrane theory, reached by means of imposing of communications on all angular movements in all knots of the structural design scheme.

In this work the option with a discrete arrangement of reinforcements (bulkheads) for the first and second option of shells is considered. Creation of models and researches were conducted at the following assumptions: the centers of gravity of cross sections of bulkheads lie in a median surface of a covering; axes of bulkheads are inextensible. For modeling of bulkheads the elements FE of 44 type were used. Frames are placed with an equal step and at distance of one meter from low and top edges of shells, joining of a bulkheads with a shell was carried out rigid (restrictions on all directions of communications were imposed). As a result of reinforcement with bulkheads of the first and second options of cylindrical shells, structural design schemes with rigidly fixed bulkheads have been received.

As a result of the executed calculation, data on deformation and tension have been obtained. Comparisons were carried out on radial, meridional and total movements.

Keywords: intense deformed state, cylindrical shells, bulkheads, modeling of shells.

Ведение. В данной работе проводится моделирование в программном комплексе SCAD 11.5 цилиндрических тонкостенных оболочек, подкрепленных шпангоутами. На основании полученных результатов расчета проводится анализ напряженно-деформированного состояния оболочек в зависимости от применяемой теории для моделирования оболочек.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Современная теория оболочек – это обширный раздел механики твердого деформируемого тела, который включает в себя ряд самостоятельных разделов, изучающих различные классы оболочек: однослойных, многослойных, ребристых, сетчатых, мягких и др. В теории оболочек принято выделять два различных типа: теории типа Кирхгофа – Лява и теории типа Тимошенко – Рейсснера[6].

Теории типа Кирхгофа – Лява применимы для исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных однослойных оболочек, в которых жесткость на поперечный сдвиг является бесконечно большой, а вектор деформации поперечного сдвига принимается равным нулю. Это одна из гипотез Кирхгофа – Лява, согласно которой считается, что нормальное к недеформированной срединной поверхности волокно оболочки остается нормальным к ней и после деформации, а также не меняет своей длины [2], но для других типов оболочек этой теории оказывается недостаточно.

Теория оболочек Тимошенко – Рейсснера представляет собой уравнение гиперболического типа десятого порядка. В отличие от теории Кирхгофа – Лява, теория Тимошенко – Рейсснера не является универсальной. В ней не существует однозначного пути для определения жесткости на поперечный сдвиг, и различные задачи требуют различных значений коэффициентов поперечного сдвига [11].

Теории цилиндрических оболочек в разное время разрабатывались В. З. Власовым [3], Л. Доннелом [5], А.А. Уманским [14], С. Н. Каном [7] и др.

В теории цилиндрических оболочек основным вопросом является расчет замкнутых цилиндрических оболочек и незамкнутых цилиндрических оболочек, границы которых – две образующие и две направляющие [10]. Важный вопрос-расчет цилиндрических оболочек, подкрепленных равноотстоящими поперечными ребрами.

Зачастую такие задачи решаются методом двойных или одинарных тригонометрических рядов. Практическую ценность представляет метод одинарных рядов, позволяющий подчинить решение на двух краях оболочки произвольным граничным условиям. Использование этих расчетных методик затрудняли громоздкие дифференциальные уравнения и их высокий порядок. Для их упрощения цилиндрические оболочки стали подразделять: очень длинные, длинные, средней длины, короткие.

Для очень длинных и длинных оболочек В. З. Власов предложил теорию их расчета, которая названа полубезмоментной [9].

Для обеспечения жесткости и местной устойчивости цилиндрических оболочек их зачастую подкрепляют поперечными ребрами. Расчет таких оболочек – задача весьма громоздкая, если к ней подходить с позиции точного удовлетворения условий в местах сопряжения ребер с обшивкой. Разработана упрощенная методика расчета цилиндрических оболочек, подкрепленных равностоящими поперечными ребрами [9].

В решении задач строительной механики и механики деформируемого твердого тела большое значение приобрели численные методы, основанные на вариационных постановках. Особое место среди новых методов решения задач занимает метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время этот метод заложен в основу почти всех систем автоматизированного расчета конструкций во многих отраслях техники: промышленном и гражданском строительстве, судостроении, авиастроении и т.д.

[15, 17, 18]. Теории и решению задач деформирования конструкций методом конечных элементов посвящен целый ряд монографий и учебников. Среди них следует отметить работы Н.А. Алфутова [1], А.В. Перельмутера и В.И. Сливкера [12], О. Зенкевича [15], Э. Митчелла [16], Р. Галлагера [4].

В вышеупомянутых работах рассмотрены вопросы расчета конструкций различных типов: стержневых систем, осесимметричных и трехмерных конструкций, а также отдельные вопросы расчета тонкостенных конструкций (оболочек и пластин). Монография Р. Б. Рикардса [13] полностью посвящена применению метода конечных элементов в расчетах тонкостенных конструкций. При этом рассмотрен целый комплекс проблем: построения основных соотношений теории оболочек, вывода вариационных уравнений различных типов, построения конечных элементов, численная реализация метода конечных элементов и решение практических задач.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Задача анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки является достаточно сложной как при вычислении с помощью теорий оболочек, так и с помощью МКЭ. Основной проблемой моментной теории тонких оболочек является приближенное сведение трехмерной краевой задачи к двумерной. Наиболее сложным в безмоментной теории оболочек является составление условий сопряжения перемещений.

В случае подкрепления поперечными ребрами (шпангоутами) тонкостенных цилиндрических оболочек используют упрощенные методики расчета, считая оболочки ортотропными, распределяют жесткость каждого ребра по всей ширине пролета, поддерживаемого ребром, и суммируют с соответствующими жесткостями оболочки в кольцевом направлении. Подкрепленная оболочка в расчете заменяется эквивалентной, без ребер. При этом эквивалентная оболочка обладает разными упругими свойствами в продольном и кольцевом направлении. Такая методика расчета подкрепленных оболочек приемлема, если ребра поставлены часто и число их достаточно велико. В этом случае погрешность расчетов относительно небольшая. При расчете таких оболочек используют допущение, что ребра обладают жесткостями только в отношении растяжения и изгиба в своей плоскости. Жесткостями ребер при изгибе из плоскости и при кручении пренебрегают.

Основные трудности на пути решения задач деформирования тонкостенных конструкций методом конечных элементов связаны с необходимостью выполнения определенных условий сходимости. Одним из таких условий является необходимость соблюдения непрерывности искомых функций, а иногда и их первых производных на границах смежных элементов.

Постановка задания. Задание состоит в анализе изменения напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, подкрепленной шпангоутами, в зависимости от применяемой теории для построения расчетных схем оболочек в программном комплексе SCAD 11.5.

Основной материал и результаты. Для выполнения сравнения изменений напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек были взяты за основу цилиндрические тонкостенные оболочки, свободные от закрепления, которые находятся под воздействием внутреннего равномерного давления q .

Моделирование цилиндрических оболочек проводилось в программном комплексе SCAD 11.5. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, подбор арматуры железобетонных конструкций, проверку несущей способности стальных конструкций.

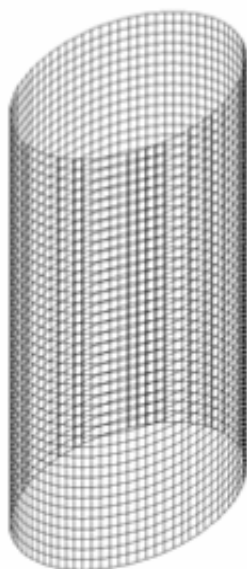
Исходные данные для моделирования цилиндрических тонкостенных оболочек: модуль упругости – $3,001 \cdot 10^8$ кПа; коэффициент Пуассона – 0,2; толщина оболочки – 0,16 м; радиус срединной поверхности оболочки – 1,0 м; длина оболочки – 4,0 м; внутреннее давление – 10,0 кПа.

Сравнение проводилось на основании оболочек, построенных по общей теории оболочек (мелкая сетка) и по мембранной теории оболочек (крупная сетка) (рис. 1).

Для построения расчетной схемы по первому варианту (рис. 1 а) использовалась система 5 (система общего вида), элементы оболочки – конечные элементы (КЭ) типа 44, геометрическая неизменяемость расчетной схемы обеспечивалась за счет наложения связей по условиям ее симметрии.

Для построения расчетной схемы по второму варианту (рис. 1 б) использовалась система общего вида, элементы оболочки – КЭ типа 44, геометрическая неизменяемость расчетной схемы обеспечивалась за счет наложения связей по условиям ее симметрии, а соответствие работы цилиндрической оболочки согласно мембранной теории достиглось с помощью наложения связей на все угловые перемещения во всех узлах расчетной схемы.

а)



б)

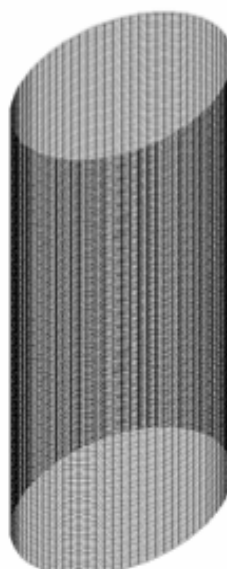


Рисунок 1 – Расчетные схемы:

а – оболочка, построенная по мембранной теории оболочек;
б – оболочка, построенная по общей теории оболочек

Задачу по определению напряженно-деформированного состояния оболочки, подкрепленной шпангоутами, решают в двух основных вариантах: с помощью замены подкрепленной оболочки однородной ортотропной оболочкой (путем «размазывания» жесткостей шпангоутов) или с учетом дискретного расположения подкреплений путем интегрирования уравнений устойчивости гладкой оболочки и выполнения условий стыковки ее со шпангоутами.

В данной работе рассматривается вариант с дискретным расположением подкреплений (шпангоутов) для первого и второго варианта оболочек. Построение моделей и исследования проводились при следующих допущениях: центры тяжести поперечных сечений шпангоутов лежат в срединной поверхности обшивки; оси шпангоутов нерастяжимы.

Для моделирования шпангоутов использовались КЭ типа 44, была задана жесткость пластины со следующими параметрами: модуль упругости $3,00 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$, коэффициент Пуассона 0,2 м, толщина принята 0,2 м. Шпангоуты размещаются с равным шагом и на расстоянии одного метра от нижнего и верхнего краев оболочек, стыковка шпангоута с оболочкой выполнялась жесткой (накладывались ограничения по всем направлениям связей).

В результате стыковки исходных цилиндрических оболочек со шпангоутами были получены новые расчетные схемы (рис. 2).

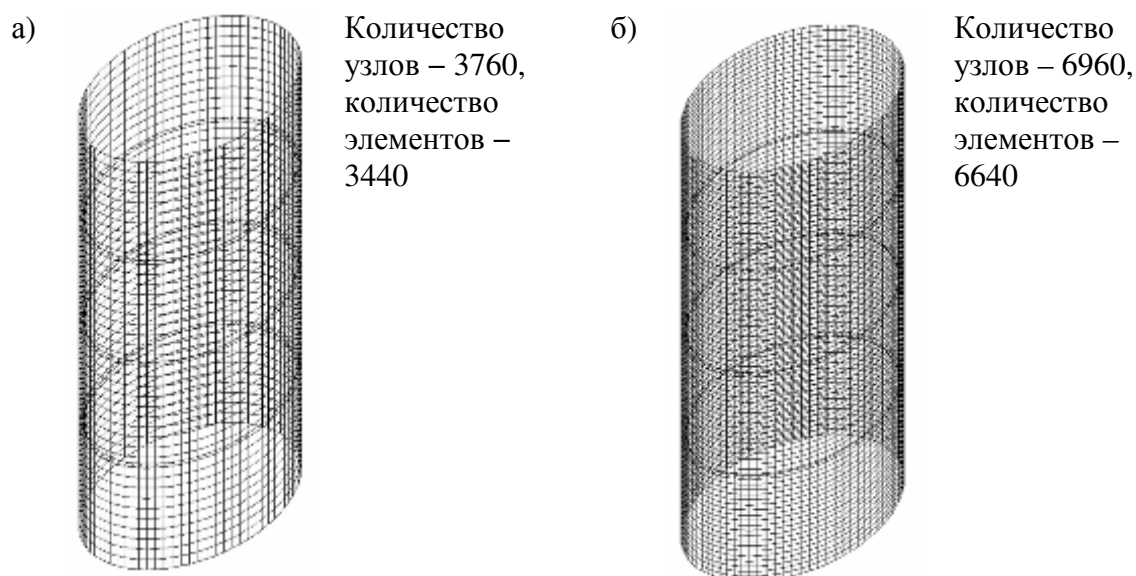


Рисунок 2 – Расчетные схемы цилиндрических оболочек, подкрепленных шпангоутами:

- а – расчетная схема, полученная на основании оболочки, построенной по мембранной теории оболочек;
- б – расчетная схема, полученная на основании оболочки, построенной по общей теории оболочек

Расчет приведенных моделей проводился линейный: режим выполнения расчета – полный расчет; метод решения – мультифронтальный; метод оптимизации матрицы жесткости – автоматический; точность разложения матрицы – $1\text{e-}012$; точность решения собственной проблемы – $1\text{e-}010$.

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде набора тел стандартного типа (оболочка, пластина), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам.

В результате выполненных расчетов были получены данные по деформациям и напряжениям для оболочек, смоделированных по общей теории оболочек и мембранной теории, подкрепленных шпангоутами (рис. 3).

Сравнения проводились по радиальным, меридиональным и суммарным перемещениям, а также для напряжений на нижних и на верхних гранях $S_{x \text{ верх}}$, $S_{x \text{ низ}}$, $S_{y \text{ верх}}$, $S_{y \text{ низ}}$. Результаты сравнения занесены в таблицу 1.

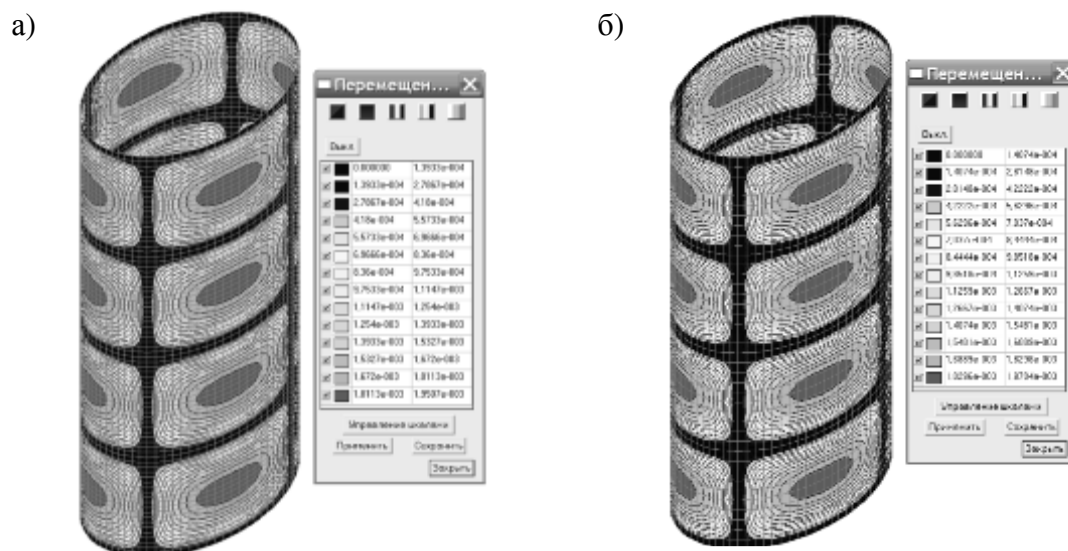


Рисунок 3 – Суммарные перемещения (мм):
а – оболочка, смоделированная по общей теории;
б – оболочка, смоделированная по мембранной теории

Таблица 1 – Сравнение решений расчетных схем оболочек

Параметр	Оболочка, смоделированная по общей теории	Оболочка, смоделированная по мембранной теории	Отклонения, %
Перемещения в радиальном направлении, мм	1,4337e-004	1,4193e-004	1,39
Перемещения в меридиональном направлении, мм	1,9704e-003	1,9507e-003	1,01
Суммарные перемещения, мм	1,9704e-003	1,9507e-003	1,01
Напряжения $S_{x \text{ верх}}$, кН/м ²	51,69	51,18	0,98
Напряжения $S_{x \text{ низ}}$, кН/м ²	40,96	40,55	1,01
Напряжения $S_{y \text{ верх}}$, кН/м ²	232,86	230,53	1,01
Напряжения $S_{y \text{ низ}}$, кН/м ²	211,13	209,02	0,99

Выводы. Для построения расчетных схем оболочек использовались две теории: общая теория оболочек и мембранная. В соответствии с общей теорией оболочек геометрическая неизменяемость расчетной схемы обеспечивалась за счет наложения связей по условиям ее симметрии, а в соответствии с мембранной теорией – с помощью наложения связей на все угловые перемещения во всех узлах расчетной схемы. В результате подкрепления шпангоутами первого и второго вариантов цилиндрических оболочек были получены расчетные схемы с жестко закрепленными шпангоутами. По итогам расчета можно сказать, что характер деформаций и отображение изополей перемещений (табл. 3) и напряжений имеют одинаковый характер, а отклонения в показаниях перемещений (радиальных, меридиональных и суммарных) и напряжений ($S_{x \text{ верх}}$, $S_{x \text{ низ}}$, $S_{y \text{ верх}}$, $S_{y \text{ низ}}$) колеблются от 0,98% до 1,39%.

Литература

1. Алфутов Н. А. *Solid Works / Cosmos Works. Инженерный анализ методом конечных элементов* / Н. А. Алфутов, А. А. Алямовский. – М. : ДМК, 2004. – 432 с.
2. Бейлин Е. А. *Элементы теории кручения тонкостенных стержней произвольного профиля* / Е. А. Бейлин. – С.-Пб. : Изд-во СПбГАСУ, 2003. – 113 с.
3. Власов В. З. *Общая теория оболочек и ее приложения в технике* / В. З. Власов. – М., Л. : Гостехиздат, 1949. – 784 с.
4. Галлагер Р. *Метод конечных элементов. Основы* / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
5. Доннелл Л. Г. *Балки, пластины, оболочки* / Л. Г. Доннелл. – М. : Наука, 1982. – 568 с.
6. Жилин П. А. *Прикладная механика. Основы теории оболочек* / П. А. Жилин. – С.-Пб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 167 с.
7. Кан С. Н. *Строительная механика оболочек* / С. Н. Кан. – М. : Машиностроение, 1966. – 508 с.
8. Карпиловский В. С. *SCADOFFICE. Вычислительный комплекс SCAD* / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов. – М. : Изд-во «SCADSoft», 2012. – 656 с.
9. Карпов В. В. *Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения*. / В. В. Карпов. – М. : Физматлит, 2010.4.1 – 288 с.
10. Новожилов В. В. *Линейная теория тонких оболочек* / В. В. Новожилов, К. Ф. Черных, Е. И. Михайловский. – Л. : Изд-во Политехника, 1991. – 656 с.
11. *Общая нелинейная теория упругих оболочек* / С. А. Кабриц, Е. И. Михайловский, П. Е. Товстик, К. Ф. Черных, и др. – С.-Пб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. – 388 с.
12. Перельмутер А. В. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа* / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : ИАСВ, Изд-во «SCADSoft», 2011. – 732 с.
13. Рикадс Р. Б. *Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин* / Р. Б. Рикадс. – Рига : Зннатне. – 1988. – 284 с.
14. Уманский А. А. *Справочник проектировщика расчетно-теоретический* / А. А. Уманский. – М. : Стройиздат, 1973. – 416 с.
15. Zienkiewicz O. C. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th Edition* / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 752 p.
16. Mitchell A. R. *The Finite Element Method in Partial Differential Equations* / A. R. Mitchell, R. Wait. – London, 1981. – 216 p.
17. Liu G. R. *The Finite Element Method* / G. R. Liu, S. S. Quek. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 464 p.
18. Reddy J. N. *An Introduction to the Finite Element Method* / J. N. Reddy. – McGraw-Hill, 2006. – 761 p.

References

1. Alfutov N. A. *Solid Works / Cosmos Works. Inzhenernyy analiz metodom konechnykh elementov* / N. A. Alfutov, A. A. Alyamovskiy. – M. : DMK, 2004. – 432 s.
2. Beylin E. A. *Elementy teorii krucheniya tonkostennykh sterzhney proizvolnogo profilya* / E. A. Beylin. – S.-Pb. : Izd-vo SPbGASU, 2003. – 113 s.
3. Vlasov V. Z. *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tehnikе* / V. Z. Vlasov. – M., L. : Gostehizdat, 1949. – 784 s.
4. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* / R. Gallager. – M. : Mir, 1984. – 428 s.
5. Donnell L. G. *Balki, plastiny, obolochki* / L. G. Donnell. – M. : Nauka, 1982. – 568 s.
6. Zhilin P. A. *Prikladnaya mehanika. Osnovy teorii obolochek* / P. A. Zhilin. – S.-Pb. : Izd-vo Politehn. un-ta, 2006. – 167 s.
7. Kan S. N. *Stroitel'naya mehanika obolochek* / S. N. Kan. – M. : Mashinostroenie, 1966. – 508 s.
8. Karpilovskiy V. S. *SCADOFFICE. Vychislitel'nyy kompleks SCAD* / V. S. Karpilovskiy, E. Z. Kriksunov. – M. : Izd-vo «SCADSoft», 2012. – 656 s.
9. Karpov V. V. *Prochnost i ustoychivost podkreplennykh obolochek vrashcheniya*. / V. V. Karpov. – M. : Fizmatlit, 2010.4.1 – 288 s.

10. Novozhilov V. V. *Lineynaya teoriya tonkih obolochek* / V. V. Novozhilov, K. F. Chernyh, E. I. Mihaylovskiy. – L. : Izd-vo Politehnika, 1991. – 656 s.
11. *Obshchaya nelineynaya teoriya uprugih obolochek* / S. A. Kabrits, E. I. Mihaylovskiy, P. E. Tovstik, K. F. Chernyh, i dr. – S.-Pb. : Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2002. – 388 s.
12. Perelmuter A. V. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ih analiza* / A. V. Perelmuter, V. I. Slivker. – M. : IASV, Izd-vo «SCADSoft», 2011. – 732 s.
13. Rikads R. B. *Metod konechnyh elementov v teorii obolochek i plastin* / R. B. Rikads. – Riga: Zinatne. – 1988. – 284 s.
14. Umanskiy A. A. *Spravochnik proektirovshchika raschetno-teoreticheskoy* / A. A. Umanskiy. – M. : Stroyizdat, 1973. – 416 s.
15. Zienkiewicz O. C. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th Edition* / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 752 p.
16. Mitchell A. R. *The Finite Element Method in Partial Differential Equations* / A. R. Mitchell, R. Wait. – London, 1981. – 216 p.
17. Liu G. R. *The Finite Element Method* / G. R. Liu, S. S. Quek. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 464 p.
18. Reddy J. N. *An Introduction to the Finite Element Method* / J. N. Reddy. – McGraw-Hill, 2006. – 761 p.

© Избаш М.Ю., Крутова Н.А.
Надійшла до редакції 20.04.2016

*Pavlikov A., DSc, Professor
Pinchuk N., PhD, Associate Professor
Garkava O., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

INDUSTRIAL UNCAPITAL UNGIRDER FRAME STRUCTURE FOR RESIDENTIAL BUILDINGS

Design features of uncapital ungirder frame structure of building are presented: the component elements, the advantages and disadvantages, usage experience.

Problem of affordable housing in Ukraine, which is relevant now successfully solved by the implementation into construction uncapital ungirder frame structure of building. The frame consists of the smallest number of precast concrete structures sizes, which are manufactured at plants.

The component elements of the system that have been tested in the laboratory of the department of reinforced concrete and masonry structures and strength of materials Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University are presented. The examples of buildings, which constructed on this constructive system in Poltava are provided.

Keywords: *Uncapital Ungirder Frame Structure, constructive system, affordable housing.*

*Павліков А.М., д.т.н., професор
Пінчук Н.М., к.т.н., доцент
Гарькава О.В., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ІНДУСТРІАЛЬНА БЕЗКАПІТЕЛЬНО-БЕЗБАЛКОВА КАРКАСНА КОНСТРУКТИВНА СИСТЕМА ДЛЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

Викладено особливості конструкції безкапітельно-безбалкового каркаса будівлі: складові елементи, переваги та недоліки, досвід застосування. Проблему зведення доступного житла на території України, що є актуальною на сьогодні, успішно розв'язано за допомогою впровадження в будівництво індустріальної безкапітельно-безбалкової конструктивної системи, каркас якої складається з найменшої кількості типорозмірів збірних залізобетонних конструкцій, котрі виготовляються на заводах. Наведено складові елементи системи, що були випробувані в лабораторії кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наведено приклади будівель, зведених за цією конструктивною системою в м. Полтава.

Ключові слова: *безкапітельно-безбалковий каркас, конструктивна система, доступне житло.*

Introduction. Modern construction industry in Ukraine is characterized by two equally urgent problems, the first of them – providing affordable housing for the middle level of the material layers of the population, and the second - the creation of structures of high energy efficiency of buildings. After all, industrialists assert themselves that today the cost of housing is on average almost 8 thousand hryvnia per square meter in buildings with common indicators making apartments and not less than 10 thousand hryvnia – with improved, so-called building as an elite type [1 – 4].

There are many reasons for the existence of such urgent problems in the sphere of housing for people. The main among them – still high labor intensity of the buildings construction because of the prevailing usage of imperfect structural systems, low level of mechanization in technological processes of construction, a small number of storeys of residential buildings, as well as considerable consumption of materials.

Analysis of recent sources of research and publications. There are many researches in which in one way or another as described aspects to address these problems. Nevertheless, even a short analysis shows [5 – 11] that it is more expedient to solve them through the introduction of new construction technologies. Among which the first attention should be given direction for further improvement of the well-known even from 1940 the use of offers in the construction Uncapital Ungirder Frame Structure [5 – 7] that is also supported by modern design [8 – 11].

Highlight unsolved parts of the general problem. As the analysis shows to solve the problem, structural systems like Delta, Kazan, Arcos, SARET, Dycore, [12 – 16] can be used. However, these constructive systems have nine floors. To solve this problem it is necessary to: increase speed of buildings construction, realize the ability to construct housing regardless of the climatic conditions and completely industrialized elements of the structural system.

Formulation of the problem. The improvement of the structural system KUB-2.5 in order to increase the number of floors from nine to sixteen and ensuring full industrialization of precast concrete structures of the system.

The main material and results. The solution of the problem of providing the population affordable housing is possible by implementing the technology of residential buildings construction based on the use constructive systems, among which the most preferred is uncapital ungirder frame structure with a minimum number of prefabricated structures (Fig. 1).

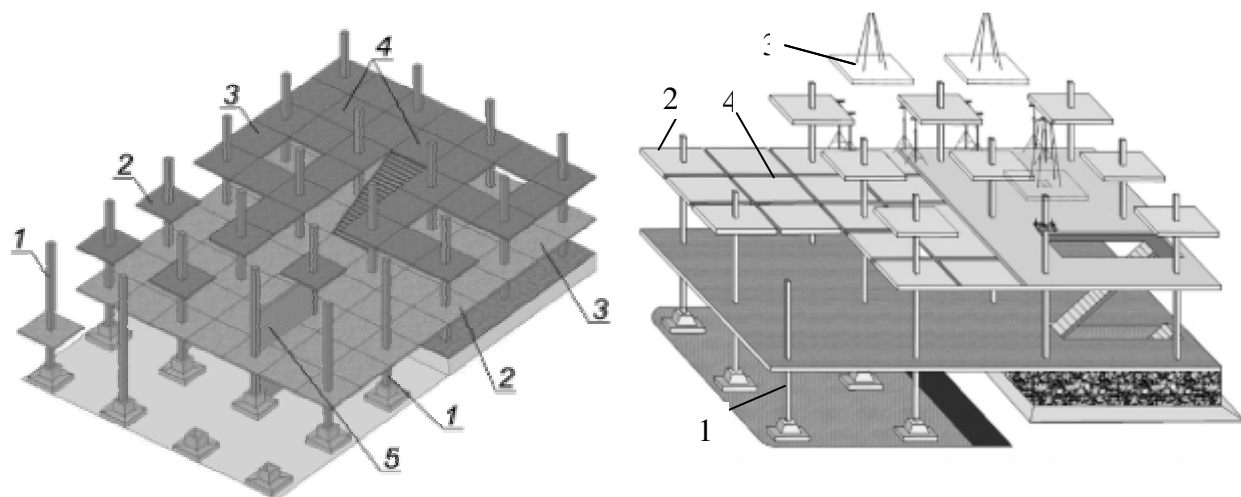


Figure 1 – Schemes of uncapital ungirder frame structure in residential building:

1 – column; 2 – overcolumned slab; 3 – intercolumned slab;
4 – middle slab; 5 – diaphragm

In its essence, this structural system is flat reinforced concrete slab directly connected to the columns by progressive decisions of their joints. In buildings with such frames beams, columns consoles and capitals are absent. It allows the fast transform a space for the new designation, provides automation of heating. And because the individual elements of space frame have a maximum of prefabrication, the use of this structural system is also one of the ways of renewal industrial production for manufacturing of precast reinforced concrete that will significantly save energy.

With the aim of testing the effectiveness of Uncapital Ungirder Frame Structure for the project of the State Design Institute of Urban Planning for the first time in Poltava were constructed buildings of affordable housing (Fig. 2, 3) and buildings for the other uses. Practice has confirmed its significant advantages in architectural planning and design solutions in comparison with buildings that are being built on the basis of other prototypes wall framing and structural systems.

Interfloor overlapping used in buildings with a framework (Fig. 1) consists of three types of precast concrete slabs: overcolumned (pos. 2), intercolumned (pos. 3) and middle (pos. 4). The thickness of the plate – 160 mm, their size in plan, in order to unify the formwork, made the same – 2980 × 2980 mm.



Figure 2 – Residential 16-storey building in Poltava Zhovtneva street, 60 d, during construction and after completion



Figure 3 – A general view of beginning the construction of 16-storey residential buildings in Poltava Bohdan Khmelnytsky street, 21 and their overall look after the completion

Overcolumned slabs (pos. 2) are fixed (Fig. 4) by welding embedded in slab casing (pos. 4) to the reinforcement of columns (pos. 1) and the assembly formed intervals of 20 mm between columns and slab casing and between the slabs are filled with a high-strength fine-grained concrete. In this case, in concreted spaces keys are formed (pos. 3), concrete of which is self-reinforced due to the work in conditions of full compression.

The vertical load-bearing elements of the frame are two-high reinforced concrete columns with cross-section dimensions 400×400 mm, and partially reinforced concrete stiffening diaphragms. Jointing of columns is compulsory due to entering the bar-lock of the bottom end the bottom column.

The frame developed for construction of 16 storey building in areas of seismic activity up to 9 points, fast mounted and has significant ease in the production of separate elements.

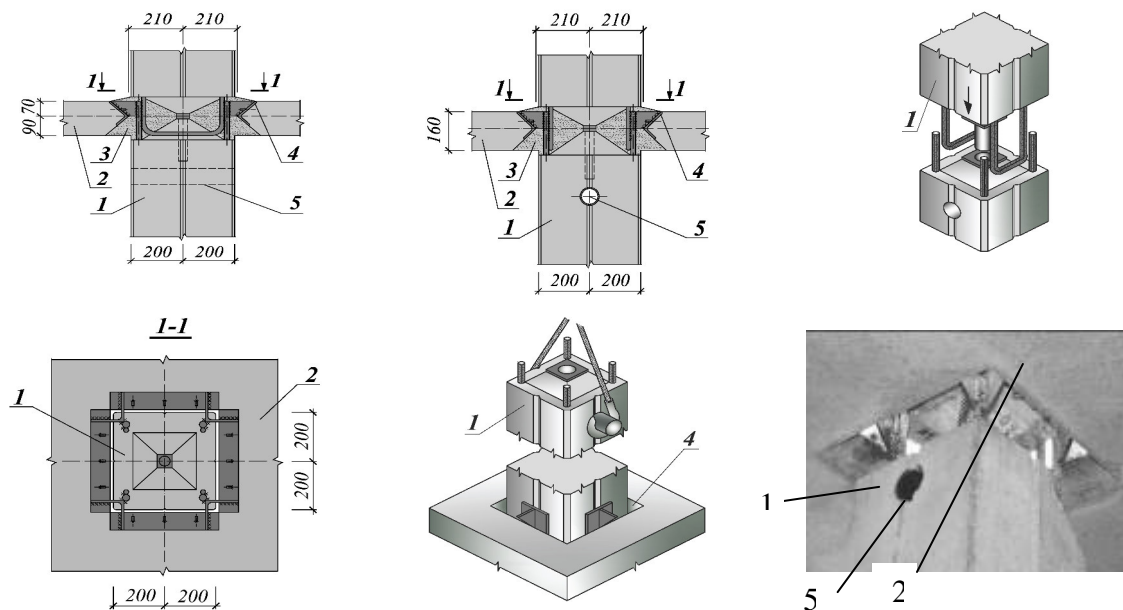


Figure 4 – Schemes of connection overcolumned slab with column

1 – column; 2 – slab (bottom view); 3 – concrete;
4 – steel slab casing; 5 – mounting hole

The linear connections (concrete or metal braces) and continuous concrete stiffening diaphragms mainly provide spatial rigidity and sustainability of the applied frame.

The internal forces in frame elements, from the external loads actions, is easy to calculate on PC using the software complex «SCAD 11.1». On the design diagram of space frame vertical elements are columns, horizontal discs are slabs of the overlapping. Reinforced concrete diaphragms and vertical struts accepted as bracing.

Experimental and theoretical investigations in Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University have shown that efforts in the elements Uncapital Ungirder Frame Structure can be calculated by simple engineering methods. Previously, dividing the space frame on the plane orthogonal frames in the form of crossbars-slabs, which supported by columns. In this case, vertical loads are perceived by columns, conventional crossbars-slabs, and partially by stiffening diaphragms, and the horizontal – only by stiffening elements.

The designed elements had been tested in the laboratory of the department of reinforced concrete and stone structures and strength of materials PolNTU. Moreover, for each element, namely: columns, slabs and staircases, some possible design schemes had been developed and test equipment were produced. For example, for overcolumned slab was implemented design scheme of slab not only as supported along the contour (Fig. 4.), but also as a beam – part of

the crossbar between zero points on the envelope diagram of bending moments (for a flat frame). Testing carried out on the effect of calculated load values. Loading carried out by hydraulic jacks (pos. 9) with capacity 500 kN using a pumping station (pos. 13).

In columns of constructed buildings (Fig. 2) is used bar reinforcement strength class A500 ($4\text{Ø}28 - 6\text{Ø}28$).

Overcolumned slab in zone of tension had two meshes. One of them contains bars in both directions $16\text{Ø}14$ A500, and the other – $12\text{Ø}14$ A500; compressed zone is reinforced wire mesh (strength class Bp-I) $20\text{Ø}4$ in both directions.

In the intercolumned slab in zone of tension had two meshes with reinforcement of strength class A500 laid bars in both directions: on the one $16\text{Ø}14$, on the other – $12\text{Ø}14$; in compressed zone reinforcing mesh made of wire class Bp-I in both directions $20\text{Ø}4$. In the middle slab in zone of tension reinforcing meshes (wire class Bp-I) were $12\text{Ø}8$ and $7\text{Ø}8$ in both directions each.

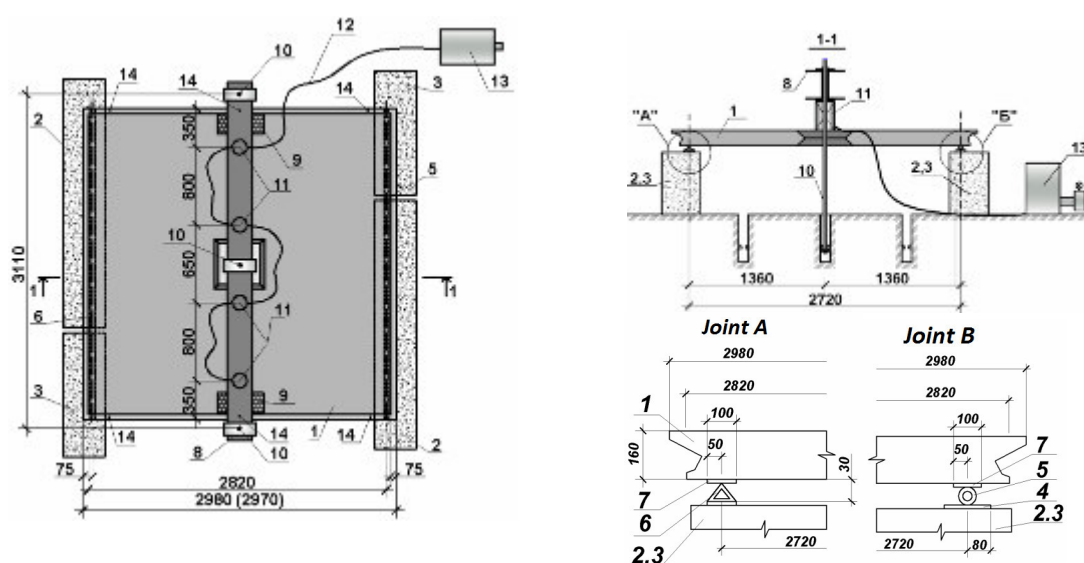


Figure 5 – Stand for testing the overcolumned slab ПН 30.30.1,6–2–1:

- 1 – slab ПН 30.30.1,6–2–1; 2 – block ФС 24.6; 3 – block ФС 12.6; 4 – metal lining;
- 5 – movable support (pipe $\text{Ø} 10,5 \times 4$); 6 – fixed support ($L50 \times 5$; 100×8);
- 7 – metal lining; 8 – traverse, channel bar № 30; 9 – temporary supports;
- 10 – strands of reinforcement $\text{Ø} 30$ A-I; 11 – hydraulic jacks $F=500$ kN;
- 12 – pressure pipelines; 13 – pump station; 14 – indicators: 6ПАО – ЛИСИ

Breaking of overcolumned slabs happened at total load 3.02 kPa, middle slabs – at 2.4 kPa, the intercolumned slabs – at 1.8 kPa.

As shown by researches and implementation on construction [9 – 11, 17 – 20] the frame application Uncapital Ungirder Frame Structure allows to realize in practice their main advantages:

- 1) extension part of overlapping along its perimeter gives each building unique architectural forms, which promoting the establishment of compelling variety of the urban landscape;
- 2) buildings characterized by autonomous in the architectural and planning decisions;
- 3) period of residential buildings construction is significantly reduced;
- 4) the launch of line for production of prefabricated elements is quite simple and is carried out in the shortest time.

Uncapital Ungirder Frame Structure has positively proved itself in the construction of buildings in more than 30 regions of Russia [9 – 11]. The volume of its development are annually increasing.

According to many projects and information sources [8 – 11] Table 1 shows the main indicators Uncapital Ungirder Frame Structure in comparison with the most famous.

Table 1 – The comparison of main indicators of Uncapital Ungirder Frame Structure

Indicator	Constructive systems		
	Monolith	КПБ-135	КУБ
Total mass of steel per m ² of overlapping	27 kg/m ²	48 kg/m ²	18 kg/m ²
Total volume of concrete per m ² of overlapping	0,28 m ³ /m ²	0,8 m ³ /m ²	0,2 m ³ /m ²
The thickness of overlapping	200 mm	160 mm	160 mm
Distance between columns	6,3×6,3 m	6×3 m	6×6 m
Architecture and planning solution	free	fixed	free
Labor costs for the installation of 1 m ² overlapping (supplying concrete by concrete pump)	21 people/hour·m ²	1,1 people/hour·m ²	0,7 people/hour·m ²
Installation period of 12 floors	6 months	3 months	3 months

Conclusions. Implementation of Uncapital Ungirder Frame Structure in construction of multi-storey buildings reduces the cost of 1m² of almost 40% in comparison with traditional wall buildings and frame design systems. Meanwhile the rate of buildings construction increased by 50%, the intensity of the provision of housing increases and its ability in terms of affordability, is greatly enhanced.

In addition, the implementation of developments, aimed at the mass manufacturing application of Uncapital Ungirder Frame Structure in construction of buildings will help to revive work of precast concrete plants.

References

1. Ярошенко Г. Найбільше будуємо соціального житла, бо поки що у нас не так багато людей, які можуть дозволити собі елітне / Г. Ярошенко // Вечірня Полтава. – 2008. – № 22. – С. 4.
Yaroshenko G. Naybilshe buduemo sotsialnogo zhitla, bo poki shcho u nas ne tak bagato lyudey, yaki mozhut dozvoliti sobi elitne / G. Yaroshenko // Vechirnya Poltava. – 2008. – № 22. – S. 4.
2. Цветов О. Будівництво: традиційне чи інноваційне / О. Цветов // Вечірня Полтава. – 2008. – № 27. – С. 6.
Tsvetov O. Budivnitstvo: traditsiyne chi innovatsiyne / O. Tsvetov // Vechirnya Poltava. – 2008. – № 27. – S. 6.
3. Москаленко М. Будинки, побудовані за системою КУБ-2.5, здатні забезпечити споживачів доступним і, головне, якісним житлом / М. Москаленко // Вечірня Полтава. – 2010. – № 49 (929). – С. 2.
Moskalenko M. Budinki, pobudovani za sistemoyu KUB-2.5, zdatni zabezpechiti spozhivachiv dostupnim i, golovne, yakisnim zhitlom / M. Moskalenko // Vechirnya Poltava. – 2010. – № 49 (929). – S. 2.

4. Ключко О. Переживаючи економічну кризу, «Полтавабудінвест» розробляє нові технології, що здешевлюють будівництво на третину, і зводять сейсмостійкі багатоповерхівки / О. Ключко // Вечірня Полтава. – 2009. – № 7 (834). – С. 5.
Klochko O. Perezhivayuchi ekonomichnu krizu, «Poltavabudininvest» rozroblyae novi tehnologiyi, shcho zdeshevlyuyut budivnitstvo na tretinu, i zvydyat seysmostiyki bagatopoverhivki / O. Klochko // Vechirnya Poltava. – 2009. – № 7 (834). – S. 5.
5. Blekey F. A. Towards an Australian structural form – the flat plate / F. A. Blekey // Architecture in Australia. – 1965. – P. 115 – 127.
6. Stasio J. Flat plate rigid frame design of low coshosing project in Newark and Atlantik Citi / J. Stasio, F. Blekey // N. J. Proc. American Concrete Institute. – 1941. – Vol. 37. – P. 309 – 324.
7. Коуэн Г. Дж. Строительная наука XIX – XX вв.: Проектирование сооружений и систем инженерного оборудования / Г. Дж. Коуэн; пер. с англ. В.А. Коссаковского; под ред. Л.Ш. Килимника. – М. : Стройиздат, 1982. – 359 с. ил.
Kouen G. Dzh. Stroitel'naya nauka XIX – XX vv.: Proektirovanie sooruzheniy i sistem inzhener'nogo oborudovaniya / G. Dzh. Kouen; per. s angl. V.A. Kossakovskogo; pod red. L.Sh. Kilimnika. – M. : Stroyizdat, 1982. – 359 s. il.
8. Унифицированная система сборно-монолитного безригельного каркаса. Основные положения по расчету, монтажу и компоновке зданий: рабочий проект: в 9-ти выпусках. / Фирма «КУБ» СП «ИНЭКС», Научно-проектно-строительное объединение монолитного домостроения. – М. : НСПО «МОНОЛИТ», 1990. – (Серия КУБ-2,5).
Unifitsirovannaya sistema sborno-monolitnogo bezrigelnogo karkasa. Osnovnye polozheniya po raschetu, montazhu i komponovke zdaniy: rabochiy projekt: v 9-ti vypuskah. / Firma «KUB» SP «INEKS», Nauchno-proektno-stroitelnoe obedinenie monolitnogo domostroeniya. – M. : NSPO «MONOLIT», 1990. – (Seriya KUB-2,5).
9. Что такое «КУБ-2,5» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavod-zhbi.com.ua/tehnologiya-kub-2-5/chto-eto>.
Chto takoe «KUB-2,5» [Electronic resource]. – Access mode: <http://zavod-zhbi.com.ua/tehnologiya-kub-2-5/chto-eto>.
10. Научно-проектное объединение «КУБ» ООО («НПО КУБ») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kub-25.ru>.
Nauchno-proektnoe obedinenie «KUB» ООО («NPO KUB») [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.kub-25.ru>.
11. Описание системы по информации НПО «КУБ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kub-invest.ru/sist.html>.
Opisanie sistemy po informatsii NPO «KUB» [Electronic resource]. – Access mode: <http://kub-invest.ru/sist.html>.
12. Deltabeam. Composite beam : designer manual [Electronic resource]. – Access mode: <http://materials.crasman.fi/materials/extloader/?fid=3962&org=2&chk=1b9c49ab>.
13. Патент на изобретение РФ. № 45415. Сборно-монолитный железобетонный каркас многоэтажного здания «КАЗАНЬ-XXI в.» / И. И. Мустафин; дата приоритета от 27 декабря 2004 г.; зарегистр. 10.08.2006.
Patent na izobretenie RF. № 45415. Sbornno-monolitnyy zhelezobetonnyy karkas mnogoetazhnogo zdaniya «KAZAN-XXI v.» / I. I. Mustafin; data prioriteta ot 27 dekabrya 2004 g.; zaregistr. 10.08.2006.
14. Унифицированная открытая каркасная система зданий с плоскими перекрытиями. Серия Б1.020.1-7 / А. И. Мордич, Р. И. Вигдорчик, В. Н. Белевич, Ю. А. Иващенко / Архитектура и строительство. – 1999. – № 6. – С. 24 – 26.
Unifitsirovannaya otkrytaya karkasnaya sistema zdaniy s ploskimi perekrytiyami. Seriya B1.020.1-7 / A. I. Mordich, R. I. Vigdorchik, V. N. Belevich, Yu. A. Ivashchenko / Arhitektura i stroitelstvo. – 1999. – № 6. – S. 24 – 26.
15. Сборно-монолитный каркас SARET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://promresurs-nsk.ru/sbornno-monolitnyj...saret.html>.
Sbornno-monolitnyy karkas SARET [Electronic resource]. – Access mode: <http://promresurs-nsk.ru/sbornno-monolitnyj...saret.html>.

16. Гуров Е.П. Сборное домостроение. Стратегия развития / Е.П. Гуров // СтройПРОФИль. – СПб., 2010. – №5 (83). – С. 10 – 15.
Gurov E.P. Sbornoe domostroenie. Strategiya razvitiya / E.P. Gurov // StroyPROFIL. – SPb., 2010. – №5 (83). – S. 10 – 15.
17. Патент на корисну модель № 98285 : МПК (2006.01) E04B 1 / 04. Спосіб з'єднання залізобетонних плит перекриття в будівлях безкапітельно-безбалкової конструктивної системи / А. М. Павліков, Т. Ю. Качан, Д. К. Балясний, Д. Ф. Федоров : власник патенту – ПолтНТУ. – Опубл. 27.04.2015. – Бюл. № 8.
Patent na korisnu model № 98285 : MPK (2006.01) E04B 1 / 04. Sposib z'ednannya zalizobetonnih plit perekrittya v budivlyah bezkapitelno-bezbalkovoyi konstruktivnoyi sistemi / A. M. Pavlikov, T. Yu. Kachan, D. K. Balyasniy, D. F. Fedorov : vlasnik patentu – PoltNTU. – Opubl. 27.04.2015. – Byul. № 8.
18. Патент на корисну модель № 102290 : МПК (2006.01) E04B 1 / 04. Спосіб з'єднання надколонної плити перекриття з колоною в будівлях безкапітельно-безбалкової конструктивної системи / А. М. Павліков, Д. Ф. Федоров, Т. Ю. Качан : власник патенту – ПолтНТУ. – Опубл. 26.10.2015. – Бюл. № 20.
Patent na korisnu model № 102290 : MPK (2006.01) E04B 1 / 04. Sposib z'ednannya nadkolonnoyi pliti perekrittya z kolonoyu v budivlyah bezkapitelno-bezbalkovoyi konstruktivnoyi sistemi / A. M. Pavlikov, D. F. Fedorov, T. Yu. Kachan : vlasnik patentu – PoltNTU. – Opubl. 26.10.2015. – Byul. № 20.
19. Патент на корисну модель № 91267 : МПК (2006.01) E04B 1 / 04. Спосіб з'єднання залізобетонних панелей діафрагм жорсткості в будівлях безкапітельно-безбалкової конструктивної системи / А. М. Павліков, Д. Ф. Федоров, Т. Ю. Качан : власник патенту – ПолтНТУ. – Опубл. 25.06.2014. – Бюл. № 12.
Patent na korisnu model № 91267 : MPK (2006.01) E04B 1 / 04. Sposib z'ednannya zalizobetonnih paneley diafragm zhorstkosti v budivlyah bezkapitelno-bezbalkovoyi konstruktivnoyi sistemi / A. M. Pavlikov, D. F. Fedorov, T. Yu. Kachan : vlasnik patentu – PoltNTU. – Opubl. 25.06.2014. – Byul. № 12.
20. Патент на корисну модель № 93195 : МПК (2006.01) E04B 1 / 18. Індустріальний безкапітельно-безбалковий каркас будівлі доступного житла / А. М. Павліков, О. В. Гарькава, Д. Ф. Федоров, Г. Г. Фаренюк, Б. М. Петтер, Ж. М. Бовкун : власник патенту – ПолтНТУ. – Опубл. 25.09.2014. – Бюл. № 18.
Patent na korisnu model № 93195 : MPK (2006.01) E04B 1 / 18. Industrialniy bezkapitelno-bezbalkoviy karkas budivli dostupnogo zhitla / A. M. Pavlikov, O. V. Garkava, D. F. Fedorov, G. G. Farenjuk, B. M. Petter, Zh. M. Bovkun : vlasnik patentu – PoltNTU. – Opubl. 25.09.2014. – Byul. № 18.

© Pavlikov A., Pinchuk N., Garkava O.
Received 25.04.2016

Semko O., DSc, Professor
Dmytrenko T., PhD, Associate Professor
Dmytrenko A., PhD, Associate Professor
Derkach T., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

SOFTWARE FOR CALCULATING NODE CONNECTIONS MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BEAMLESS NON-CAPITAL OVERLAP WITH THE COMPOSITE REINFORCED CONCRETE COLUMN

The article touches upon the calculation procedure issue of connection nodes between beamless non-capital monolithic concrete slab and reinforced concrete column to provide bearing capacity in junctions between the slab and the column during design using software

The article deals with general calculation principles of connection nodes between beamless non-capital monolithic concrete slab and reinforced concrete column. On the basis of the algorithm to automate the calculation computer program was created in the programming language of Visual Basic for Applications (VBA). The language used for developing applications designed to manipulate databases and to customize the user interface. VBA a structured high-level programming language. In the language of VBA implemented the general principles of object-oriented programming.

Keywords: computer technologies, beamless monolithic slab, composite reinforced concrete, shear, algorithm, software.

Семко О.В., д.т.н., професор
Дмитренко Т.А., к.т.н., доцент
Дмитренко А.О., к.т.н., доцент
Деркач Т.М., к.т.н., доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВУЗЛІВ З'ЄДНАННЯ МОНОЛІТНОГО ЗАЛІЗОБЕТОННОГО БЕЗБАЛКОВОГО БЕЗКАПІТЕЛЬНОГО ПЕРЕКРИТТЯ ЗІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЮ КОЛОНОЮ

Розглянуто загальні принципи розрахунку вузлів з'єднання монолітного залізобетонного безбалкового безкапітельного перекриття зі сталезалізобетонною колоною. Надано алгоритми автоматизації розрахунку вузлів з'єднання монолітного безбалкового перекриття зі сталезалізобетонною колоною на зріз при продавлюванні за Eurocode та за розробленою методикою. Наведено структурно-логічну схему досліджень роботи вузлів з'єднання, виконано розрахунок монолітної плити на продавлювання за допомогою комп'ютерної програми за побудованим алгоритмом.

Ключові слова: комп'ютерні технології, монолітне безбалкове перекриття, сталезалізобетон, зріз, алгоритм, програмне забезпечення.

Introduction. Nowadays reinforced columns using is widely spread among native builders.

Developing computing and software systems that take into account the physical and mechanical properties of concrete and steel, allow significantly facilitate the design of reinforced concrete frame buildings. It gives opportunity to analyze the work of the building frame in general, and its elements both taking into consideration graphs of concrete deformation even in stress-strain state.

The article provides the calculation procedure of connection between concrete reinforced columns and monolithic reinforced slab. A software has been developed according to the algorithm.

Publications and recent sources analysis. Issues of the slabs desing has been discovered by Azizov T. [8], Vatyn N. [9], Ivanov A. [14], Yagofarov H. [19], Taerve L. [6] fnd other scientists. Connection nodes between beamless monolithic slabs and columns has been learned by Dofman A. [12], Loleit A. [15], Storozhenk L., Nyzhnyk O. [17] and others. This issue is also deeply investigated by foreign scientists [7, 1, 2].

Unsolved aspects of the problem statement. One of the main problems in beamless monolithic slab and reinforced concrete column desing is providing carrying capacity is connections between slab and column, that are the most important elements. That is why a stress-state estimate is important in the connection nodes.

Issue formulation. During the design process a software development for calculation procedure of connection nodes between beamless monolithic slab and reinforced concrete column is required.

Main topic and results. A research flowchart of stess-stain state of connection nodes between monolithic reinforced beamless non-capital overlap and reinforced column has been created according to the analysis (Fig. 1).

Nowadays, it is important to meet the requirements of the protection of buildings from progressive damage in the event of the destruction of local supporting structures as a result of accidents.

Resistance against the demolition of buildings should be checked by calculation and provided by constructive measures. Calculation of stability of frame buildings must be performed in the most dangerous scheme of local destruction. This is the destruction of the column or columns with walls that abut on one area of the local damage.

During the problem solving a concrete column in a two channels steel cage was investigated. The load applied to the core and the cage. Disclosure of contact between the concrete core and steel cage makes possible evaluating the stress-strain state of crossing column [18]. To determine the intensity of the interaction forces of the core and the cage $q_z(x, y)$ the next equation is used [18]

$$q_z(x, y)(\delta_s - \delta_b) - (u_s - u_b) = 0, \quad (1)$$

where u_s, u_b – moving on the brink of a contract from the vertical load in a concrete core and a cage, made from welded channels.

δ_s, δ_b – moving of the points on the brink of the core and the cage from the single load:

$$\bar{q}(x, y) = 1 \quad \text{at} \quad x, y = \pm \frac{a_b}{2}, \quad (2)$$

$$\bar{q}(x, y) = \frac{1}{x^2} \quad (1)$$

in other brink points.

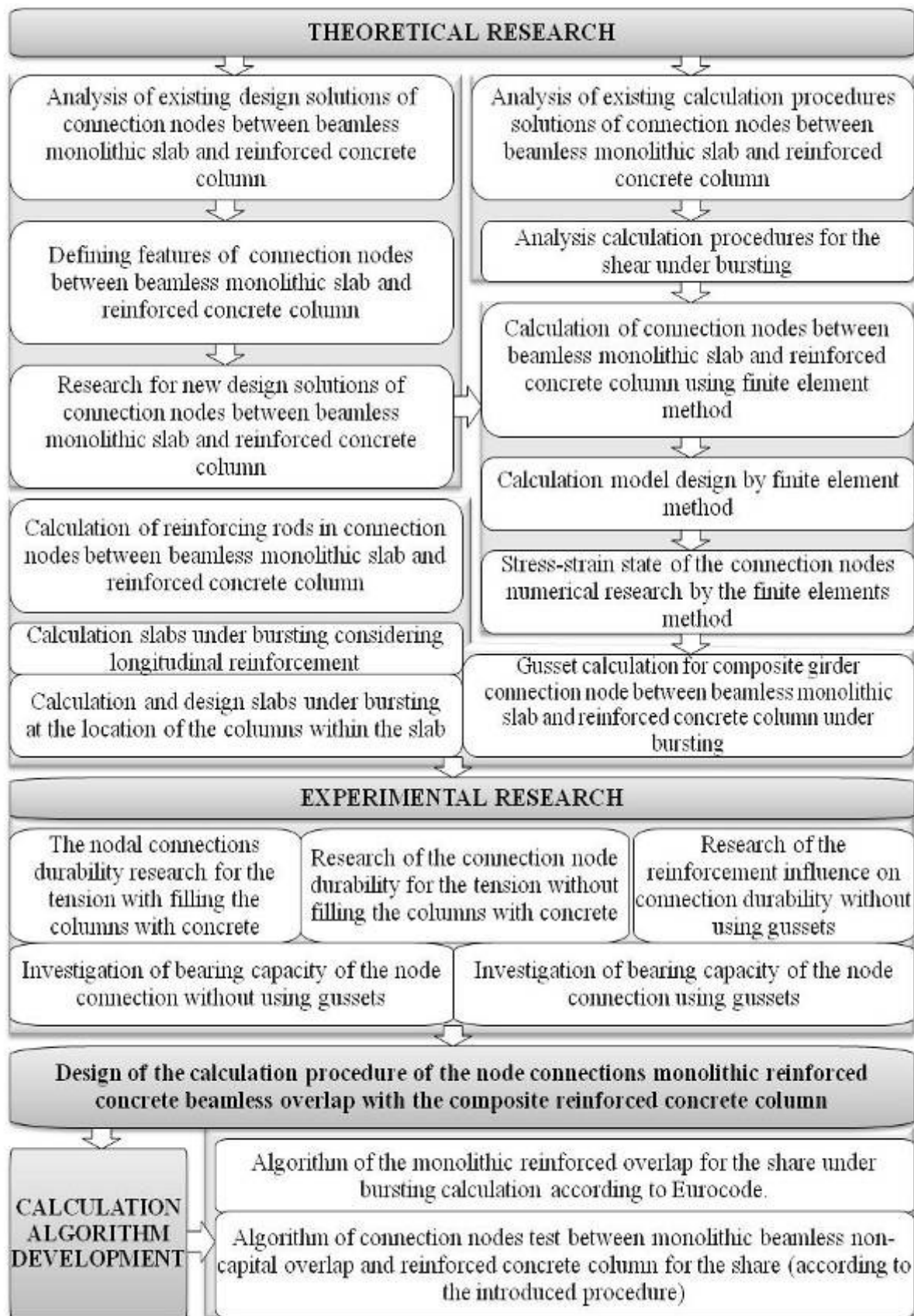


Figure 1 – Flowchart of connection nodes between monolithic reinforced beamless non-capital overlap and reinforced column

The equation of equilibrium in the intersection of the column is the next:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0, \quad (6)$$

where X, Y, Z – elements of the bulk power.

Tangent tensions τ_{xz} , τ_{yz} are not included [18]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda + 2G) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right] = Z \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + 2G) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[G \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] = X \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + 2G) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[G \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] = Y \quad (9)$$

Since the research takes into account the work of a single reinforced column and it's combination with a beamless non-capital monolithic slab, it's necessary to include into the evaluation equality conditions on the brink of connection between the column and the slab (electis analogies method by Lame):

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + G \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial x} &= 0; \\ (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial x} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

So, the problem of elasticity plane (plane strain) in the movements is solved. This equation shows that the action of concentrated load on the concrete slab intersection of main transverse forces arising stretching stress that is bigger than concrete tensile resistance. Calculation of the stability of the building must be executed on a special combination of loads, including permanent and long loads at the most dangerous scheme of local destruction. Resistance against the progressive destruction of the building will be provided, if the next condition will be met for each element:

$$F \leq S \quad (11)$$

where F – efforts in structural elements;

S – the estimated carrying capacity.

In calculating the stability of steel buildings for the most dangerous pattern of local destruction of estimated moments and transverse forces increase by 10 – 20%.

To solve the problems discovered in the paper, the calculation model of a building with beamless monolithic reinforced. was additionally created. Columns step is - 6 m (Fig. 2).

For the calculations the next systems are used: Ansys, Cosmos, Robot Millennium, Monomah and others. The most popular and reliable are Lira-Windows and SCAD (ProductGUID=EA03D845-6AB9-4E9E-B5CD-45B755E42C46) [10], that were used to solve the problem (Fig. 3).

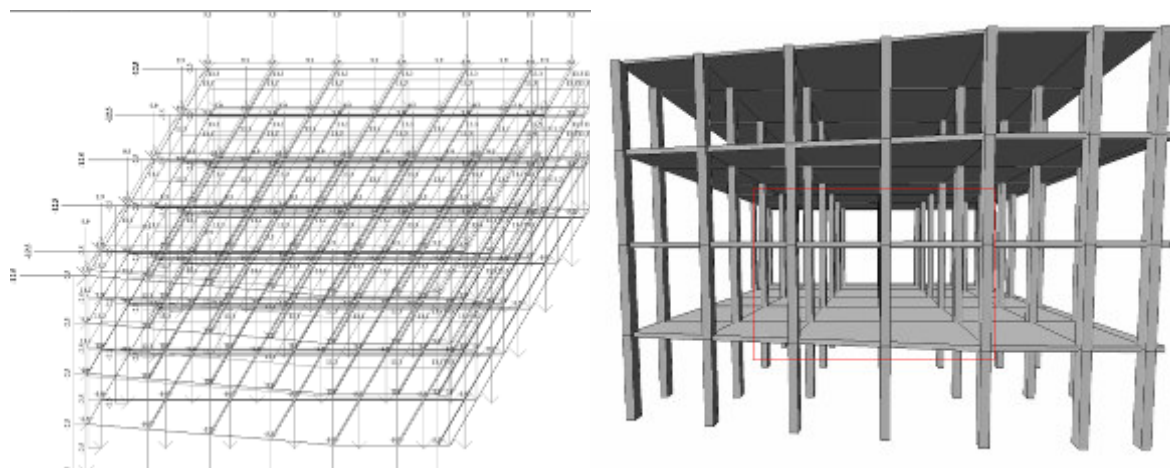


Figure 2 – The design model of the three-story building with beamless reinforced concrete overlap

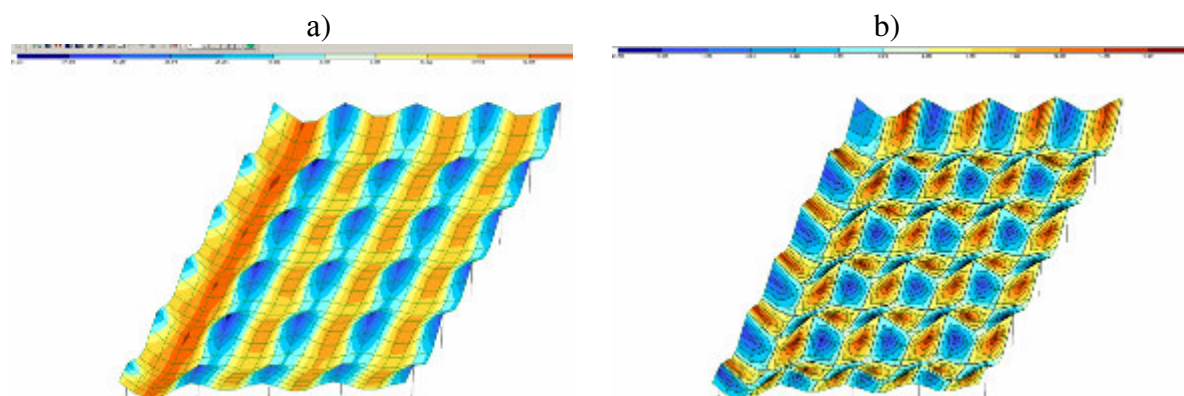


Figure 3 – The frame calculation results in «Lira-Windows»:
a) isosurface of efforts on M_x ; b) isosurface of efforts on M_y

The next calculation steps were introduced:

- static calculation of building according to design and resistance of materials for the 1st and 2nd groups limit state. Stiffness characteristics of materials - conventional, accepted separately for slabs and columns;
- determining of reinforced slab by static calculation, adjusting zone of the slabs reinforcing at maximum span moments and the principle of its continuity and symmetry in stretched areas while preserving the estimated reinforcing over-slab zones;
- implementing of three-linear deformation diagrams for concrete and two-line diagram for reinforcements according to [5] and regulations [11].

The design is considered as a system of frames with rigid nodes located in two mutually perpendicular directions [16, 4].

In the monolithic structure each frame consists of columns and slabs stripe, which width equals to the distance between the midpoints of the two spans adjacent to the appropriate number of columns.

Problem of plates system bending was solved by finite elements method.

Efforts for calculating the upper reinforcement over the supports are determined by the width of leaning plates (Fig. 4).

Internal efforts that are obtained from the static calculation, include torque M_{xy} . Determination of the design points is done according to normative document [3].

If the $M_y < M_x$, torque calculation is similar to ($x \leftrightarrow y$).



Figure 4 – Considering width of the leaning in determining torques

The beamless building should be calculated under loading, evenly distributed throughout the slab or it's part.

The load acting on the slabs may be reduced to approximately equivalent uniformly distributed load on bending moments, transverse forces or deformations depending on the boundary conditions used for the calculation. The actual nature of the load should be taken into account during calculating the individual parts of buildings (for example, shear).

Buildings are calculated for strength, deformation and crack opening under the action of static load. Dynamic analysis and calculation of endurance are performed if needed.

Strength (carrying capacity) of the frame elements is determined based on the calculation of frames taking into account redistribution efforts.

Algorithm for determining the torque is written as (Fig. 5):

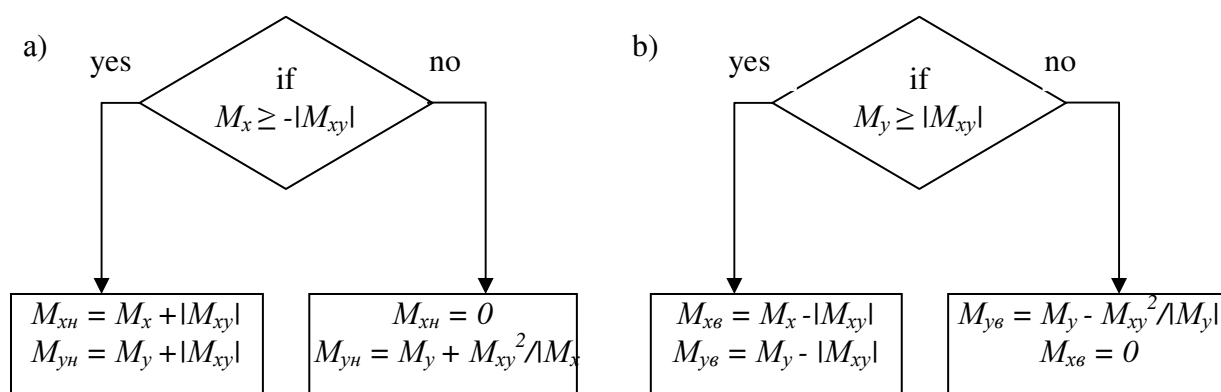


Figure 5 – Determining torques M_{xy} (case $M_y > M_x$):

a – bottom reinforcement (M_{xH} , M_{yH}); b – bottom reinforcement (M_{xB} , M_{yB})

In addition, the calculation of the strength of boards should include:

- the calculation of bursting;
- calculation for scrapping a panel along or across the slab, where panel is a part of the slab bounded by grid lines columns frame;
- calculation for simultaneous scrapping of the adjacent panels of different rows.

Calculation for scrapping a single panel is not required. Calculation for scrapping a single transverse or longitudinal slab stripes is mandatory.

The introduced procedure for connection nodes between monolithic beamless slab and reinforced column calculation includes two stages:

1. To check work of the connection node between monolithic reinforced beamless non-capital slab and reinforced columns for the shear the calculation algorithm improvement has been introduced according to the current regulations on the basis of the formula (12) [11, 13].

$$F \leq 1,125 \cdot R_{bt} \cdot u_m \cdot h_o \sqrt{1,1 + 0,7\mu} \quad (12)$$

2. Calculation of the connection node between monolithic beams non-capital slab and reinforced columns for the shear along the column body (according to the procedure).

To check work of the connection node for the shear under bursting it is necessary to determine a length of the calculated perimeter using the next formula:

$$u_i = 2(a + b) + 4\pi \cdot h_o. \quad (13)$$

If the applied load is uneven, then a plate bending moment occurs, which applies in formulas for determining the eccentricity in Y and Z:

$$\left. \begin{aligned} e_y &= \frac{M_{edy}}{V_{ed}} \\ e_z &= \frac{M_{edz}}{V_{ed}} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

where e_y and e_z – eccentricity on the axis y and z;

M_{edy} – bending moment acting on the plate in the Y-axis;

M_{edz} – bending moment acting on the plate in the Z-axis;

V_{ed} – the total lateral force acting on the estimated length of the perimeter.

To determine the geometric parameters of the perimeter of the bursting pyramid the next formulas can be used:

$$\left. \begin{aligned} b_x &= a + 4 \cdot h_o \\ b_y &= b + 4 \cdot h_o \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

where a, b – geometric parameters of a reinforced column;

h_o – working plate height.

Load eccentricity to the rectangular column is the following:

$$\beta = 1 + 1,8 \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_x}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2}. \quad (16)$$

If load eccentricity is less than 1.15, the 1.15 is taken and the total lateral force acting on the length of the critical perimeter is determined,

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}^2}{u_i d}. \quad (17)$$

To determine the reinforcement coefficient the next coefficients is used:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}. \quad (18)$$

The coefficient should be less or equal 2.

Reinforced coefficient is the following:

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} + \rho_{ly}} \leq 0,02. \quad (19)$$

The strength of plates without transverse reinforcement under bursting is determined: on reinforcement (according to the proposed formula)

$$V_{Rd,s} \leq 1,125 \cdot f_{ctd} \cdot u \cdot h \sqrt{1 + 0,7 \rho}; \quad (20)$$

on concrete

$$V_{Rd,c} = 0,4 \cdot f_{ctd}.$$

To automate the process of testing the connections between monolithic beams non-capital slab and reinforced columns for the bursting (according to the procedure) a software has been developed. The software development includes steps shown on Fig. 6 – 8.

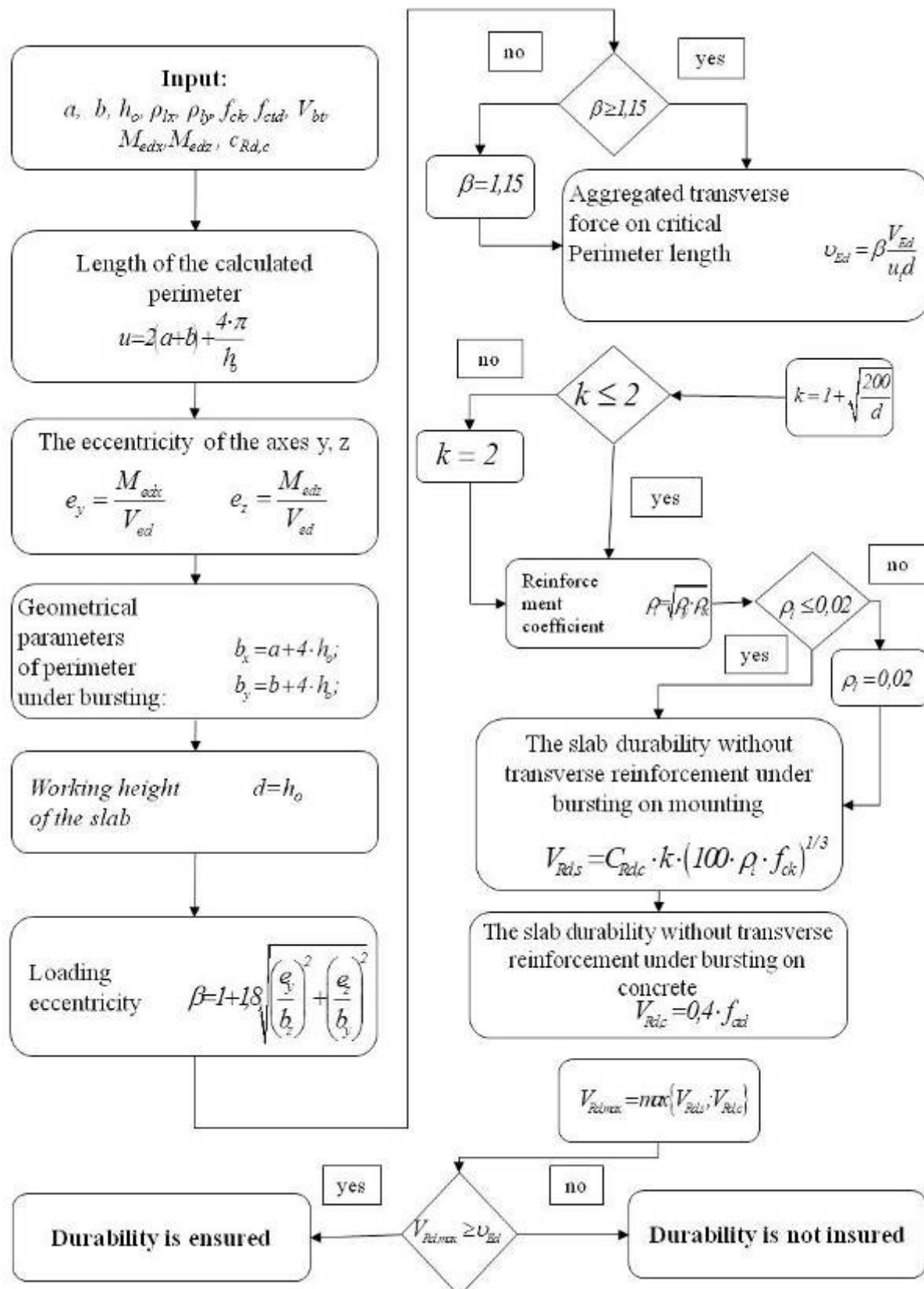


Figure 6 – Calculation algorithm of monolithic reinforced overlap under bursting according to Eurocode No. 2: EN 1992-1-1: 2001 (Final Draft, April, 2002) Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building

Issue statement	• The purpose of the software is to check the connection between monolithic beamless non-capital overlap and reinforced columns for the shear using the proposed formula.
Issue analysis and design	• At this step inputs and results were determined, revealed constraints on their values, made a formal description of the problem and the mathematical model suitable for solving the problem using computer.
Development and the algorithm selection	• Based on the mathematical description of the problem the solving algorithm was created (picture. 8).
Design if the general program structure	• The solving model was created with further specification and division into subprograms, defined the software architecture and the way of data storage
Coding	• According to the algorithm a software was developed using Visual Basic for Applications (VBA) (picture 9). This programming language is used for applications development, used for interacting with data bases and adjusting the user's interface. VBA is a structured high level programming language. In the VBA language the general principles of object-oriented programming are implemented.
Software adjustment and testing	• Performed a verification check of the calculation of connection nodes between monolithic beamless non-capital overlap and reinforced columns for the shear
Results analysis	• Actual results meet the experiment data results

Figure 7 – Steps of the software development

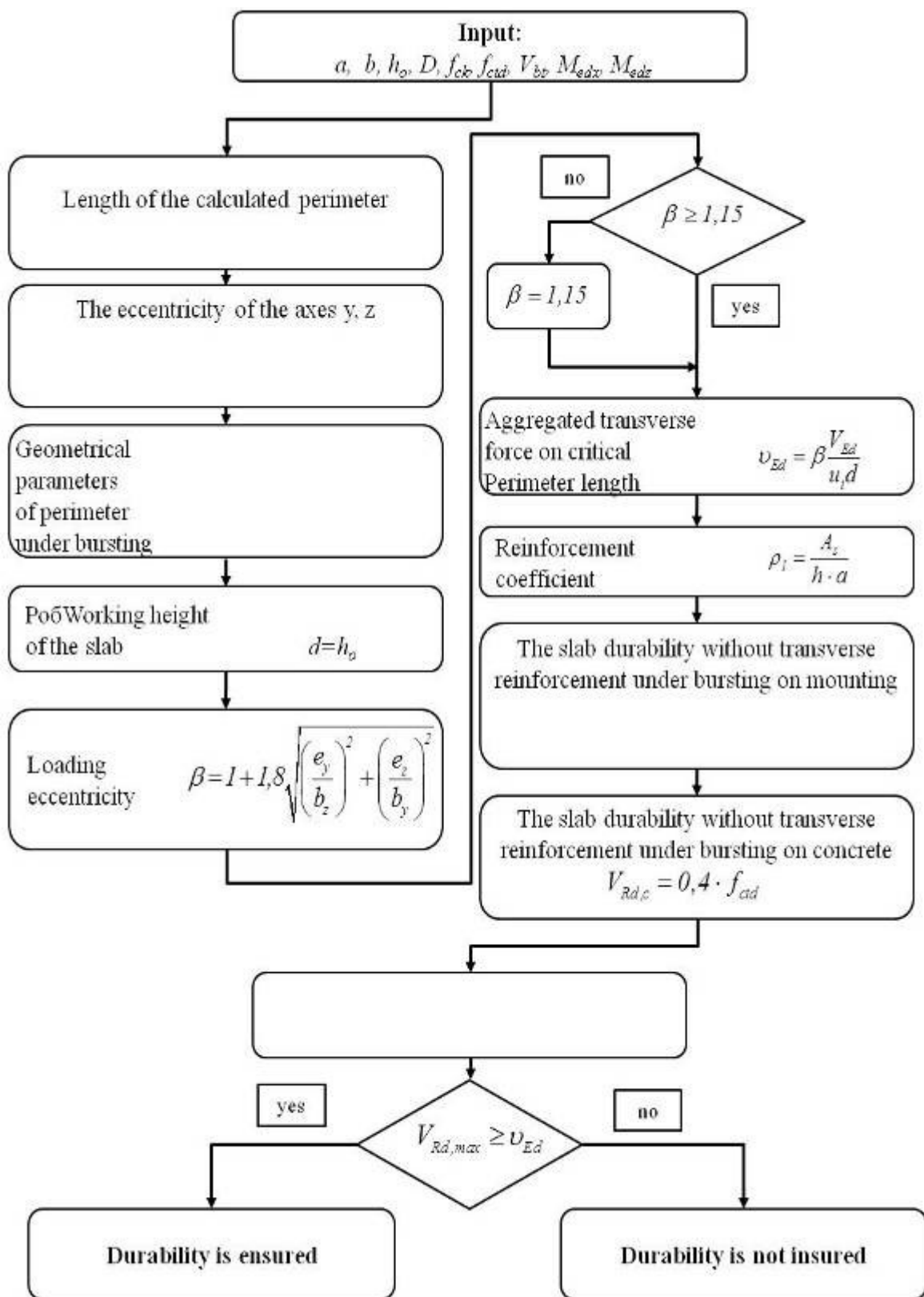


Figure 8 – Testing algorithm of connection between beamless non-capital monolithic slab and reinforced concrete column under bursting according to the introduced procedure

Summary:

1. Calculation methodology of the connections includes calculation for the shear under bursting and for the shear along the column.

2. Calculation of stress-strain state of the connections showed the convergence of theoretical and experimental investigation within 10%.

3. The introduced engineering calculation procedure of the connection nodes between beamless monolithic slab and reinforced concrete column including features of stress-strain state takes into account work of monolithic reinforced slab for the shear under bursting and calculation of the reinforcing rods for the shear along the column increasing the carrying capacity of connections by 10%. The difference between the results of the calculation of the existing and proposed method is 5%.

4. For the introduced connection nodes under bursting calculation procedure the automatization of the calculation is provided within Visual Basic for Applications environment (Fig. 9).

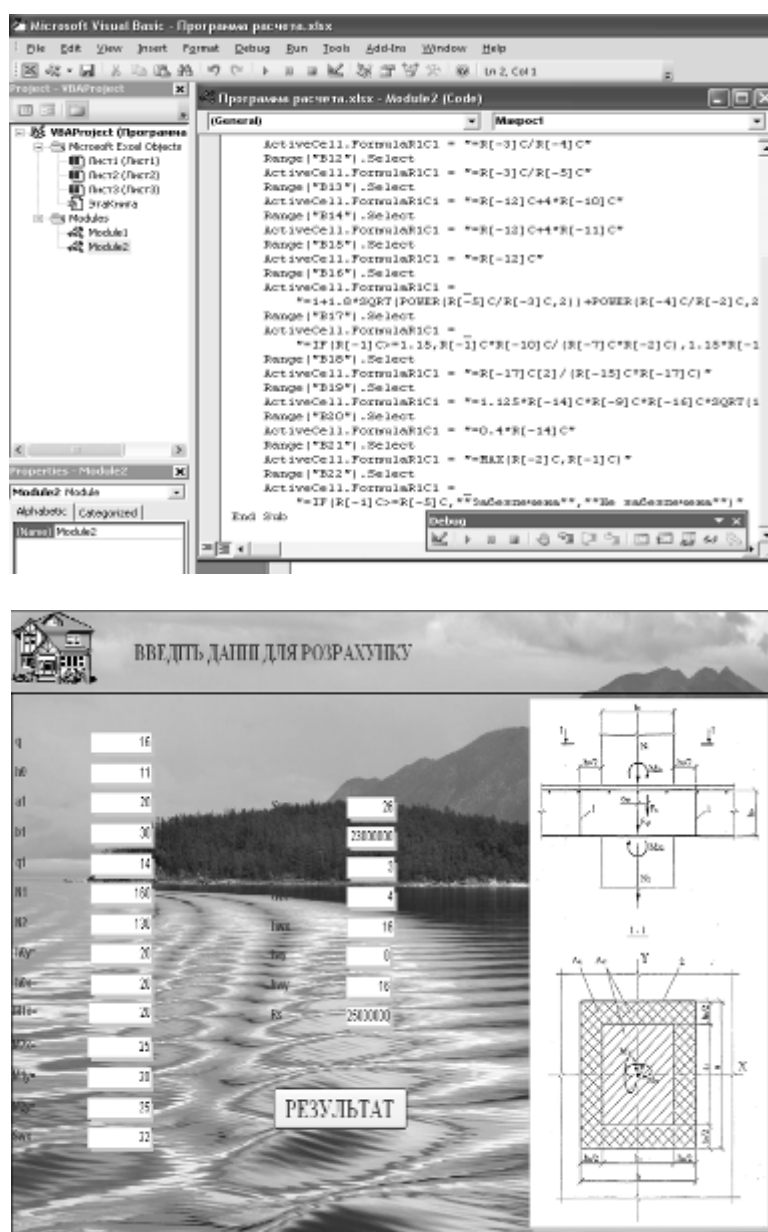


Figure 9 – Software environment Visual Basic for Applications

References

1. Araujo D. L. *Strength of shear connection in composite bridges with precast decks using high performance concrete and shear-keys* / D. L. Araujo, M. K. Debs // *Materials and Structures*. – 2005. – Vol 38. – P. 173 – 181.
2. Catherine Croft *Concrete construction*. – Laurence King Publishing, 2004. – 240 p.
3. EN 1992-1:2001 (Final Draft, April, 2002) *Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building*. – Brussels, 2002. – 230 p.
4. *European standard Design of composite steel and concrete structures Part 2 / Bridges Central Secretariat: rue de Stassart 36*. – Brussels, 2001. – 103 p.
5. Aliawdin P. *Behaviour of reinforced concrete elements under restrained flexure* / P. Aliawdin, V. Simbirkin // *Problemy budownictwa* / red. Naukowa R. Świtka. – Zielona Góra: Zielonogórski, 2003. – P. 97 – 110.
6. Taerve L. *Codes and Regulations Utilisation of High Strength* / L. Taerve // *High Performance Concrete; 4-th Int. Sump.* – Paris, 1996. – P. 93 – 100.
7. HäußZur U. *Theorie der Stabwerkmodelle im Stahlbetonbau* / U. HäußZur // *Bauingenieur*. – 2008. – S. 186 – 197.
8. Азизов Т. Н. *Метод линейных конечных элементов для расчета строительных конструкций* / Т. Н. Азизов // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. – Полтава: Полт НТУ, 2006. – Вип. 17. – С. 105 – 108.
Azizov T. N. *Metod lineynyh konechnyh elementov dlya rascheta stroitelnyh konstruktсий* / T. N. Azizov // *Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo*. – Poltava: Polt NTU, 2006. – Vip. 17. – S. 105 – 108.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=I=&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%96669612
9. Ватин Н. И. *Сопряжение колонны и безребристой бескапитальной плиты перекрытия монолитного железобетонного каркасного здания* / Н. И. Ватин, А. Д. Иванов. – Санкт-Петербург, 2006. – 82 с.
Vatin N. I. *Sopryazhenie kolonny i bezrebristoy beskapitelnoy plity perekrytiya monolitnogo zhelezobetonnoho karkasnogo zdaniya* / N. I. Vatin, A. D. Ivanov. – Sankt-Peterburg, 2006. – 82 s.
10. Городецкий А. С. *Компьютерные модели конструкций* / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2006. – 344 с.
Gorodetskiy A. S. *Kompyuternye modeli konstruktсий* / A. S. Gorodetskiy, I. D. Evzerov. – K. : Fakt, 2006. – 344 s.
11. ДБН В.2.6-98:2009. *Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення*. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с.
DBN V.2.6-98:2009. *Betonni ta zalizobetonni konstruktсийi. Osnovni polozhennya*. – K. : Minregionbud Ukraini, 2011. – 73 s.
12. Дорфман А. Э. *Проектирование безбалочных бескапитальных перекрытий* / А. Э. Дорфман, Л. Н. Левонтин. – М. : Стройиздат, 1975. – 124 с.
Dorfman A. E. *Proektirovanie bezbalochnyh beskapitelnyh perekrytiy* / A. E. Dorfman, L. N. Levontin. – M. : Stroyizdat, 1975. – 124 s.
13. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. *Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування*. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с.
DSTU B V.2.6-156:2010. *Konstruktсийi budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktсийi z vazhkoogo betonu. Pravila proektuvannya*. – K. : Minregionbud Ukraini, 2011. – 73 s.
14. Иванов А. *Расчёт прочности монолитных плоских плит перекрытий на продавливание* / А. Иванов // *Железобетонные конструкции зданий большой этажности: материалы научно-практической конференции*. – М. : МГСУ, 2004. – С. 15 – 27.
Ivanov A. *Raschet prochnosti monolitnyh ploskih plit perekrytiy na prodavlivanie* / A. Ivanov // *Zhelezobetonnye konstruktсийi zdaniy bolshoy etazhnosti: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. – M. : MGSU, 2004. – S. 15 – 27.

15. Лолейт А. Ф. О необходимых запасах прочности безбалочных перекрытий / А. Ф. Лолейт // *Строительная промышленность*. – 1926. – № 11. – С. 825 – 828.
Loleyt A. F. O neobkhodimyyh zapasah prochnosti bezbalochnyh perekrytiy / A. F. Loleyt // Stroitel'naya promyshlennost. – 1926. – № 11. – S. 825 – 828.
16. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 595 с.
Perelmuter A. V. Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ih analiza / A. V. Perelmuter, V. I. Slivker. – M. : DMK Press, 2007. – 595 s.
17. Дослідження і проектування сталезалізобетонних структурних конструкцій: монографія / Л. І. Стороженко, В. М. Тимошенко, О. В. Нижник та ін. – Полтава: АСМІ, 2008. – 262 с.
Doslidzhennya i proektuvannya stalezalizobetonnih strukturnih konstruktсий: monografiya / L. I. Storozhenko, V. M. Timoshenko, O. V. Nizhnik ta in. – Poltava: ASMI, 2008. – 262 s.
18. Чихладзе Э. Д. Несущая способность сталебетонной квадратной колонны при осевом сжатии / Э. Д. Чихладзе, М. А. Веревичева, Л. Б. Кравцов // *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Д. : ПГАСА, 2009. – Вып. 50. – С. 601 – 604.*
Chihladze E. D. Nesushchaya sposobnost stalebetonnoy kvadratnoy kolonny pri osevom szhatii / E. D. Chihladze, M. A. Verevicheva, L. B. Kravtsov // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: sb. nauch. trudov. – D. : PGASA, 2009. – Vyp. 50. – S. 601 – 604.
19. Ягофаров Х. Предлагаемая конструкция плоской плиты перекрытия из монолитного железобетона / Х. Ягофаров, А. Ягофаров // *Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов. – Москва, 2009. – Вып. 8. – С. 418 – 427.*
Yagofarov H. Predlagaemaya konstruktsiya ploskoy plity perekrytiya iz monolitnogo zhelezobetona / H. Yagofarov, A. Yagofarov // Predotvrashchenie avariyy zdaniy i sooruzheniy: sb. nauch. trudov. – Moskva, 2009. – Vyp. 8. – S. 418 – 427.

© Semko O., Dmytrenko T., Dmytrenko A., Derkach T.
 Received 26.05.2016

Бондар В.О., д.тн., професор

Бондар Л.В., к.т.н., доцент

Горшеніна А.О., студент

Гвоздь А.В., студент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

УЛАШТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ ІЗ ЗБІРНИХ РЕБРИСТИХ ПЛИТ

Запропоновано систему та розрахунок системи електрохімічного (катодного) захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів із ребристих плит вітчизняного виробництва. Електрохімічний захист арматури передбачено від зовнішнього джерела постійного струму. Арматуру (катод) приєднано до негативного полюса джерела живлення струму, анод – до позитивного полюса джерела струму. З'ясовано, що особливістю конструктивного рішення системи даного захисту є використання поздовжніх монтажних швів між суміжними плитами для розміщення лінійних анодів, що дозволяє знизити трудомісткість робіт з улаштування захисту. Розроблено метод розрахунку електрохімічного (катодного) захисту робочої арматури.

Ключові слова: залізобетонна плита, арматура, катодний захист.

Бондарь В.А., д.т.н., профессор

Бондарь Л.В., к.т.н., доцент

Горшенина А.А., студент

Гвоздь А.В., студент

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ЕЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ИЗ СБОРНЫХ РЕБРИСТЫХ ПЛИТ

Предложена система и расчет системы электрохимической (катодной) защиты от коррозии арматуры железобетонных перекрытий из ребристых плит отечественного производства. Электрохимическая (катодная) защита предусматривается от внешнего источника постоянного тока. Арматура (катод) присоединена к отрицательному полюсу источника тока, анод – к положительному полюсу источника тока. Выяснено, что особенностью конструктивного решения системы данной защиты является использование продольных монтажных швов между смежными плитами для размещения линейных анодов, что позволяет снизить трудозатраты работ по устройству защиты. Разработан метод расчета электрохимической (катодной) защиты рабочей арматуры.

Ключевые слова: железобетонная плита, арматура, катодная защита.

Bondar V., DSc, Professor
Bondar L., PhD, Associate Professor
Gorshenina A., student
Gvozdenko A., student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

DESIGN AND CALCULATION OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF REINFORCEMENT CORROSION FOR PREFABRICATED REINFORCED CONCRETE OVERLAP CONSISTING OF RIBBED PLATES

Increased incidence of corrosion damages of reinforced concrete structures requires the introduction of advanced technologies to protect them from corrosion. One of fundamental methods in solving this problem is electrochemical protection for reinforcement. It is the most effective according to data foreign specialists.

The developed system of electrochemical (cathodic) protection of reinforcement in the foreign practice adapted for use in monolithic over ground concrete structures. In these conditions complicated questions anodes fixing to the structure. In addition, cathodic protection systems, calculations are approximate.

The paper deals with a constructive solution and calculation systems of electrochemical cathodic corrosion protection reinforcement prefabricated concrete overlap consisting of ribbed plates. The electrochemical (cathodic) protection is provided by an external power source.

Reinforcement (cathode) is connected to negative pole of power source. The anode is connected to positive pole of power source. Working reinforcement ribs of reinforced concrete plates should be protected as a basic element, which provides load capacity plate.

Using the longitudinal mounting joints between adjacent plates to accommodate the linear anodes (wires) is a feature of a constructive solution of this system of protection. The joint is released from solution to depth of laying line anode. The anode is covered with a protective coating after fixing in the joint.

This solution allows reducing the volume of work involved with the protection device.

The calculation method of electrochemical (cathodic) protection of the working reinforcement is designed. The problem of determining parameters of electrochemical (cathodic) protection can be formulated as follows: find location of the anode scheme, find electric current capacity of power source on surface of reinforcement of the protective potential within the prescribed limits.

The main parameters for the calculation of potential the shear are: the power supply current, the cathodic polarization of reinforcement below the concrete cover, the electric conductivity of concrete and location of reinforcement relative to the anode.

To calculate the power source used special parameters - spreading resistance of the anode and transfer resistance reinforcement.

An example of calculating system working cathodic protection of reinforcement in longitudinal ribs of reinforced concrete plates. Conclusions are formulated and the use of literary sources are listed.

Keywords: reinforced concrete plate, reinforcement, cathodic protection.

Вступ. Останнім часом збільшуються випадки уражень залізобетонних конструкцій у результаті виникнення і розвитку в них процесів корозії арматури. Це вимагає більш інтенсивного впровадження прогресивних технологій захисту від корозії арматури залізобетонних конструкцій.

Одним із кардинальних методів у розв'язанні цієї задачі є електрохімічний захист. За даними закордонних спеціалістів [1] електрохімічний (катодний) захист визнаний найбільш дієвим методом запобігання корозії арматури в залізобетонних конструкціях.

В останні 30 років захист широко використовується в закордонній практиці для запобігання корозії арматури залізобетонних конструкцій будівель та споруд [2].

Серед перших розробників катодного захисту арматури залізобетонних конструкцій називають ім'я американця Річарда Стратфула, який створив основні стандарти з катодного захисту. Відомий закордонний спеціаліст Берkeley [3] представляє катодний захист як практично єдиний засіб припинення корозії арматури залізобетонних конструкцій у процесі експлуатації.

Актуальність упровадження електрохімічного захисту обумовлена його позитивними характеристиками. До них відносять: високу ефективність, доступність, простоту у використанні, безпеку для навколишнього середовища та ін.

Для вітчизняної практики електрохімічний захист арматури надземних залізобетонних конструкцій, у тому числі й перекриттів, є новим. Для впровадження електрохімічного захисту необхідні конструктивні опрацювання та розрахунок таких систем для вітчизняних умов будівництва й експлуатації залізобетонних конструкцій.

Аналіз основних джерел досліджень і публікацій. Для катодного захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів у закордонній практиці розроблені різні конструктивні системи та улаштування. Наведемо декілька характерних рішень катодного захисту арматури, близьких до розробленого авторами цієї статті.

Запропоновано катодний захист арматури залізобетонного перекриття, в якому поряд зі сталевую арматурою влаштовуються спеціальні канали для розміщення анодів [4]. Після монтажу лінійних анодів канали заповнюють пінобетоном.

Подібне рішення запатентовано в США, воно вирізняється довговічними лінійними анодами з ніобієвого дроту [5].

Катодний захист арматури залізобетонних перекриттів знайшов використання в будівництві багатоярусних автостоянок у Чехії [6].

Спеціалісти з Норвегії розробили ряд систем для катодного захисту арматури при ремонті залізобетонних конструкцій [7]. Гнучкий полімерний анод монтується на арматурі за допомогою ізолюючого пластикового затискача.

Значну роботу з виконання антикорозійного захисту арматури було виконано при реконструкції залізобетонного перехресно-ребристого монолітного перекриття підземного гаража в м. Колумбус (штат Огайо), де після 23-х років експлуатації виявлена значна корозія робочої арматури полиць плит і їх ребер [8].

Установленню анодів передувало очищення бетонної поверхні струменем води під великим тиском з метою видалення фарби. Аноди діаметром біля 8 мм, довжиною 90 м були виготовлені у вигляді пасма з мідних дротинок.

Аноди закріплювали у затискачах із пластмаси, які не проводять електричний струм. Між затискачами й нижніми гранями ребер надопірних ділянок розташовували прокладки товщиною 1 см з акрилату.

Кріплення затискачів і прокладок до ребер плити виконувалося за допомогою спеціальних штирів із пластмаси, які установлювались у заздалегідь заготовлені отвори. Знизу аноди покривали шаром полімер-розчину.

Загальним недоліком улаштування систем катодного захисту арматури в наведених прикладах залишається досить висока трудомісткість. З'являється необхідність

використання спеціальних затискачів для вкладання анодів, кріплення самих затискачів на бетонній поверхні конструкцій та ін.

При всьому різноманітті систем катодного захисту кожна з них пристосована до умов захисту, хоча всі будуються на загальних принципах.

Одним із важливих принципів при створенні систем катодного захисту є забезпечення розподілу захисного потенціалу на арматурі.

Для розрахунку захисних потенціалів при електрохімічному захисті металевих елементів від корозії використовують різні методи. Їх можливо розділити на дві групи.

До першої групи відносять методи, які полягають у заміні задачі розрахунку поля електричного струму в деякому електричному ланцюгові [9].

До іншої групи відносять методи, що ґрунтуються на заміні крайової задачі теорії поля в кусково-однорідному середовищі еквівалентною задачею для однорідного середовища [10]. У цих методах наближено враховуються властивості середовища, у якому виконується захист.

У строгій постановці задача розрахунку електрохімічного захисту від корозії металів, як крайова задача математичної фізики, запропонована в працях інших авторів [11]. Але такий підхід не реалізований для розрахунку електрохімічного захисту від корозії арматури перекриттів із збірного залізобетону. Механізм утворення захисного поля в цих конструкціях є досить специфічним.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Відомі системи електрохімічного (катодного) захисту надземних залізобетонних конструкцій, що використовуються, головним чином, у зарубіжній практиці, не пристосовані для використання в збірних залізобетонних конструкціях. Урахування ж конструктивних рішень таких систем дозволять знизити трудовитрати на їх катодний захист. Є необхідність також у розробленні методів розрахунку такого захисту з урахуванням особливостей вітчизняних збірних залізобетонних конструкцій.

Метою роботи є розроблення системи та методу розрахунку катодного захисту арматури залізобетонних перекриттів із збірних ребристих плит.

Основний матеріал і результати. Найбільш доцільним конструктивним рішенням улаштування електрохімічного захисту арматури в перекриттях із залізобетонних ребристих плит є рішення, коли в поздовжні шви між плитами паралельно арматурі вкладаються лінійні аноди у вигляді, наприклад, металевого дроту (рис. 1).

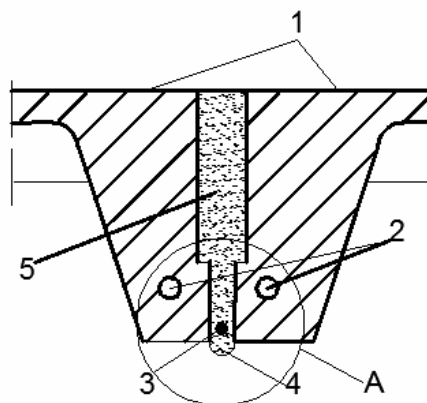


Рисунок 1 – Фрагмент поздовжнього шва між ребрами залізобетонних плит з катодним захистом робочої арматури:

- 1 – залізобетонна плита; 2 – робоча арматура; 3 – анод;
- 4 – захисне покриття; 5 – монтажний шов між плитами

Анод приєднується до позитивного полюса джерела струму, а арматура – до негативного джерела струму. Утворене електричне поле між анодом і катодом (арматурою) створює необхідну для зрушення потенціалу щільність струму на арматурі й гальмує корозійні процеси на ній.

Метою розрахунку стаціонарних полів при проектуванні систем катодного захисту є установлення залежності зсуву потенціалу на поверхні, що захищається, від розташування анодів при відомих геометричних і електрохімічних параметрах конструкцій, а також заданій силі струму.

У закордонній практиці для розрахунків катодного захисту арматури надземних конструкцій більше використовують емпіричні залежності, а необхідну силу захисного струму визначають пробними включеннями систем захисту.

У вітчизняній практиці відсутні методики для розрахунків катодного захисту арматури таких конструкцій.

Сучасна математика дозволяє перейти до розроблення методів розрахунку захисного потенціалу, які базуються на строгій постановці задач електрохімічного захисту як крайових задач математичної фізики. Такий підхід у розв'язанні подібних задач пропонує ряд авторів [11, 12]. На їх основі з урахуванням умов використання і було розроблено метод, що пропонується.

Задача зведена до інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу електричного поля

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

з граничними умовами, які мають вигляд

$$(U - \kappa \frac{\partial U}{\partial n})_s = 0, \quad (2)$$

де U – зсув захисного потенціалу від значень стаціонарного потенціалу металу арматури в умовах експлуатації, В;

$\kappa = \epsilon_\kappa \times \gamma$ – параметр поляризації;

ϵ_κ – катодна поляризація металу арматури, Ом·м²;

γ – питома електропровідність бетону плити, Ом⁻¹·м⁻¹;

s – поверхня арматури, що захищається, м²;

n – зовнішня нормаль до поверхні s .

Потенціал електрополя представлений виразом [13]

$$U = I \cdot \kappa B_3 / 4\pi\gamma, \quad (3)$$

$$\text{де } B_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{nQ \cdot \cos \Theta}{r + kn} \left(\frac{z}{p}\right)^n; \quad z = \frac{r^2}{R};$$

R – координата точки розташування джерела струму;

I – сила захисного струму, А/пог. м;

P, θ – полярні координати;

Q – поліном Лежандра другого роду [14].

Після розрахунку B_3 отримано залежність для розрахунку зсуву потенціалу при катодному захисті арматури

$$U = \frac{I \cdot kz}{2\pi\gamma(r + k)} - \left(\cos \Theta - \frac{z}{r} \cdot \frac{r + k}{r + 2k}\right). \quad (4)$$

Зсув поляризаційного потенціалу тільки на 100 мВ зменшує швидкість корозії арматури на 80 – 90%.

Для розрахунку потужності джерела живлення та його напруги необхідно оцінити опір зовнішнього ланцюга «анод – катодна поверхня».

Опір розтікання лінійного анода круглого перерізу, укладеного у поздовжні шви паралельно робочій арматурі на деякій глибині від поверхні покриття, може бути розрахований за формулою

$$R_a = \frac{\rho_b}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}, \quad (5)$$

де ρ_b – питомий електричний опір бетону, Ом·м;

l – довжина анода, м;

d – діаметр анода, м;

t – глибина закладання анода у поздовжньому шві, м.

Перехідний опір катода (арматури) залежить від поляризаційного опору ϕ_k і площі катодної поверхні s

$$R_k = \frac{\phi_k}{s}. \quad (6)$$

Розрахувавши повний опір зовнішнього ланцюга (R – опір розтікання анода і перехідний опір катода), знаходять напругу на клеммах джерела живлення

$$V = I \cdot R, \text{ В.} \quad (7)$$

Потужність джерела живлення

$$W = I \cdot V, \text{ Вт.} \quad (8)$$

Приклад розрахунку захисного струму. На рисунку 2 наведено розрахункову схему системи катодного захисту робочої арматури плит.

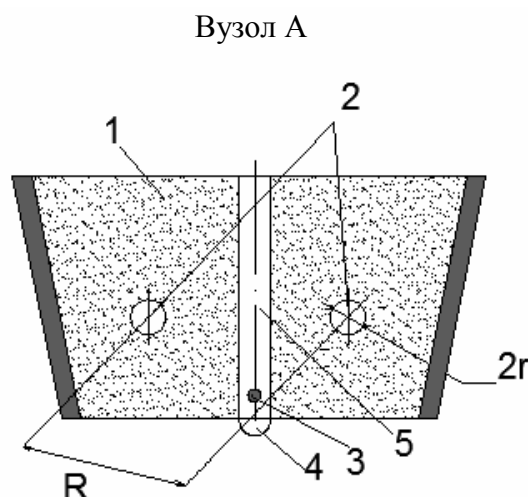


Рисунок 2 – Розрахункова схема катодного захисту:

1 – залізобетонна плита; 2 – робоча арматура; 3 – анод;

4 – захисне покриття; 5 – монтажний шов між плитами

Вихідні дані: $r = 0,016 \text{ м}$; $\epsilon_k = 4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; $R = 0,05 \text{ м}$; $\gamma = 0.00025 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

$$\kappa = b_k \times \gamma = 4 \times 0,00025 = 0,001 ;$$

$$Z = \frac{z^2}{R} = \frac{0,016^2}{0,05} = 0,005 ;$$

$$U = 0,1 \text{ В.}$$

Із залежності (1) може бути розрахований необхідний струм для зсуву потенціалу на 0,1 В

$$\frac{U}{I} = \frac{0,001 \times 0,005 \times 2}{2 \times 3,14 \times 0,00025 \times 0,016 (0,016 + 0,001)} \times \left(1 - \frac{0,005}{0,016} \times \frac{0,016 + 0,01}{0,016 + 2 \times 0,01}\right) = 16,36 ,$$

тоді необхідний струм

$$I = \frac{0,1}{16,36} = 0,006 \text{ А/м.}$$

Висновки. Запропоновано систему катодного захисту робочої арматури в ребристих залізобетонних перекриттях, яка враховує конструктивні особливості такого перекриття та зменшує трудозатрати при її влаштуванні. Отримано залежність, яка дозволяє розрахувати розподіл захисного потенціалу на поверхні поперечного перерізу арматурного стрижня, виявити вплив параметрів, що входять до залежності. Наведено формули для розрахунків напруги джерела живлення та його потужності.

Література

1. Menning D. G. Corrosion of metals in concrete / D. G. Menning // J. of the American concrete institute. – 1985. – Vol. 82, № 1. – P. 3 – 32.
2. Tighe M. R. Cathodic protection leads charge in corrosion battle / M. R. Tighe // Rublic Works. – 1990. – Vol. 120, № 8. – С. 56 – 58.
3. Berkeley K. G. Catodik protection of Reinforcement steel in concrete / K. G. Berkeley // Butterwarth. – 158 p.
4. Патент Данія 101493, МКИ С 23 f, 13/00, заявл. 1964 г.
5. Патент США 4255241, МКИ С 23 f, 13/00, заявл. 1979 г.
6. Simecek V. Katodova ochrana zelesobetonavych konatrucki vicepoolaznich parkovist / V. Simecek // Inz.Stavby. – 1991. – Vol. 39, № 2. – С. 53 – 55.
7. Berthagen L. Katodiskit skydd av armering i betongkonstruktioner / L. Berthagen // Nerdisk Betong. – 1989. – № 5. – С. 31 – 39.
8. Cathodik protection for overhead construction // Concrete censtruktion. – 1987. – Vol. 32. – № 2. – P. 193 – 195.
9. Лорткипанидзе Б. Г. Защита подземных металлических сооружений от коррозии / Б. Г. Лорткипанидзе. – М. : Гостехиздат, 1957.
10. Стрижевский И. В. Защита подземных сооружений от коррозии / И. В. Стрижевский. – М. : Гостехиздат, 1966.
11. Иоссель В. А. Электрические поля постоянных токов / В. А. Иоссель. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.
12. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите металлических сооружений от коррозии / В. Н. Остапенко, Ф. Н. Жапакова, В. В. Лукович и др. – К. : Наукова думка, 1980. – 294 с.
13. Иоссель Ю. Я. Исследование метода отображений для расчета стационарных электрических полей / Ю. Я. Иоссель, Е. А. Свядош. – Л. : Электричество, 1981. – № 4. – С. 67 – 68.
14. Прудников А. П. Интегральные ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Бричков, О. Н. Марычев. – М. : Наука, 1983. – 750 с.

References

1. Menning D. G. *Corrosion of metals in concrete* / D. G. Menning // *J. of the American concrete institute*. – 1985. – Vol. 82, № 1. – P. 3 – 32.
2. Tighe M. R. *Cathodic protection leads charge in corrosion battle* / M. R. Tighe // *Rublic Works*. – 1990. – Vol. 120, № 8. – C.56 – 58.
3. Berkeley K. G. *Catodik protection of Reinforcement steel in concrete* / K. G. Berkeley // *Butterwarth*. – 158 p.
4. Patent Daniya 101493, MKI S 23 f, 13/00, zayavl. 1964 g.
5. Patent SShA 4255241, MKI S 23 f, 13/00, zayavl. 1979 g.
6. Simecek V. *Katodova ochrana zelesobetonavych konatrucki vicepoolaznich parkovist* / V. Simecek // *Inz.Stavby*. – 1991. – Vol. 39, № 2. – C. 53 – 55.
7. Berthagen L. *Katodiskt skydd av armering i betongkonstruktioner* / L. Berthagen // *Nerdisk Betong*. – 1989. – № 5. – S.31 – 39.
8. *Cathodik protection for overhead construction* // *Concrete censtruktion*. – 1987. – Vol. 32. – № 2. – P. 193 – 195.
9. Lortkipanidze B. G. *Zashchita podzemnyh metallicheskih sooruzheniy ot korrozii* / B. G. Lortkipanidze. – M. : Gostehizdat, 1957.
10. Strizhevskiy I. V. *Zashchita podzemnyh sooruzheniy ot korrozii* / I. V. Strizhevskiy. – M. : Gostehizdat, 1966.
11. Iossel V. A. *Elektricheskie polya postoyannyh tokov* / V. A. Iossel. – L. : Energoatomizdat, 1986. – 160 s.
12. *Metody rascheta elektricheskih poley pri elektrohimicheskoy zashchite metallicheskih sooruzheniy ot korrozii* / V. N. Ostapenko, F. N. Zhapakova, V. V. Lukovich i dr. – K. : Naukova dumka, 1980. – 294 s.
13. Iossel Yu. Ya. *Issledovanie metoda otobrazheniy dlya rascheta statsionarnykh elektricheskih poley* / Yu. Ya. Iossel, E. A. Svyadosh. – L. : Elektrichestvo, 1981. – № 4. – S. 67 – 68.
14. Prudnikov A. P. *Integralnye ryady. Spetsialnye funktsii* / A. P. Prudnikov, Yu. A. Brichkov, O. N. Marychev. – M. : Nauka, 1983. – 750 s.

© Бондар В.О., Бондар Л.В., Горшеніна А.О., Гвоздь А.В.
Надійшла до редакції 17.05.2016

Kolchunov V., DSc, Professor
Yakovenko I., PhD, Associate Professor, Doctoral Candidate
Dmytrenko Ye., post-graduate
National Aviation University, Kiev

THE ANALYTICAL CORE MODEL FORMATION OF THE NONLINEAR PROBLEM BOND ARMATURE WITH CONCRETE

It is proposed a nonlinear analytical model of the pivotal bond between the reinforcement and the concrete. It is established, that at the design of this process it is important to reach the level of engineering visibility of the used dependences, dropping not essential features, while at the same time to get a reasonably accurate solution. In such search authors were stopped for the analytical model of nonlinear task of bond armature with a concrete, allowing to take into account elastic-plastic work of concrete, and also non-linearity of contact armature with a concrete. It is revealed that analytically the rod model of bond reinforced concrete bar is designed by the system, consisting of four equalizations, two from which are differential equalizations of first order. Nonlinear contact interaction of two materials is approximately examined as mutual relative displacements of armature and concrete. It is shown that the proposed model undoubtedly requires experimental confirmation by testing and numeral design more high level and degrees of working out in detail.

Keywords: analytical model, bond armature with concrete, reinforced concrete constructions, physical nonlinearity, mutual relative displacement of reinforcement and concrete.

Колчунов В.І., д.т.н., професор
Яковенко І.А., к.т.н., доцент, докторант
Дмитренко Є.А., аспірант
Національний авіаційний університет, м. Київ

ПОБУДОВА АНАЛІТИЧНОЇ СТРИЖНЕВОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

Запропоновано нелінійну аналітичну стрижневу модель зчеплення між арматурою та бетоном. Доведено, що при моделюванні цього процесу важливо вийти на рівень інженерної видимості використаних залежностей, відкинувши несуттєві ознаки, й у той же час отримати досить точне рішення. З'ясовано, що у такому випадку, треба зупинитися на аналітичній моделі нелінійної задачі зчеплення арматури з бетоном, що дозволила враховувати пружно-пластичну роботу бетону, а також нелінійність контакту арматури з бетоном. Виявлено, що аналітично стрижнева модель зчеплення залізобетонного стрижня формується системою, яка складається із чотирьох рівнянь, два з яких є диференціальними рівняннями першого порядку. З'ясовано, що така модель потребує експериментального підтвердження шляхом проведення випробувань і реалізації чисельного моделювання задач зчеплення більш високого рівня та ступеня деталізації.

Ключові слова: аналітична модель, зчеплення арматури з бетоном, залізобетонні конструкції, фізична нелінійність, взаємні відносні зміщення арматури і бетону.

Introduction. The problem of bond armature with concrete is fundamental in the resistance of reinforced concrete constructions.

Analysis of recent sources of research and publications. In order to solve the various problems associated with the bond armature and concrete in Ukraine and abroad conducted extensive experimental and theoretical studies [1, 3, 4, etc], including such eminent scientists as V.M. Bondarenko, A.B. Golyshev, A.A. Oatul, M. M. Kholmyanskii, G.N. Shorshnev, N.I. Karpenko, V.I. Kolchunov, G.N. Sudakova, E.M. Babich, B.A. Broms, L.I. Storozhenko, H. Goto, Y.A. Ivanchenko, V.A. Kuukosk, S.M. Mirza, Y. Haud, P.P. Nazarenko, G. Rem, S.M. Skorobogatov and A.V. Trofimov. However, analysis of research in the field of bond armature with concrete evidence of the ambiguity of approaches to solving this problem, and the lack of a unified theory-based calculation method [1, 3 – 6].

A good bond-strength between any reinforcement type and concrete is one of the main prerequisites for a reliable static function of steel-concrete constructions. The bond-strength is affected by many factors [7]: the adhesive forces between concrete and reinforcement, the friction forces caused by the surface inhomogeneities of the flat parts of the reinforcement, the surface geometry (ribs, imprints and corrugations), the composition and mechanical properties of the used concrete, its processing, curing time and also the position of the reinforcement in the concrete.

The development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method is represented in [8]. It should be noted work [9] on the finite element modelling of reinforcement with bond.

Reducing the bond armature with concrete leads disclosure to excessive cracking, reduced rigidity of and reduced bearing capacity of construction [1]. Detection of regularities contact concrete and reinforcement is one of the most important reinforced concrete tasks [3, 4] in the transmission of tensile forces through the armature in cracking conditions.

Identification of general problem parts unsolved before. The regularities contact concrete and reinforcement are shown in the study of the problem pulling reinforcement bar from the concrete block (prism), which is put in recent years by the majority of researchers in the framework of formation estimated bond model [5].

The estimation of resistance reinforced concrete structural elements can be made in the presence of macro-cracks [5, 6] on the basis of solving this problem. The case of one of the central reinforcing rod deserves special attention when pulling it out of the concrete matrix and more due to the fact that to it exactly or approximately reduced most types of reinforcement prismatic elements of longitudinal rods system [3, 4].

Formulation of the problem. The process of connections destruction bond armature with a concrete is a difficult sequential process at pulling up an armature bar from the concrete matrix. It is accompanied by the presence of multistage process of a heterogeneous and inelastic deformation, violation of adhesive bonds, emergence and development of cracks which have different form and orientation, by the presence of changing areas of contact and unstudied phenomena. For the correct decision of this task, it is necessary to use analytical models, describing the interaction concrete with armature which is characterized by bond forces [3, 4, 5].

Basic material and results. The analytical cored model of nonlinear problem of bond armature with concrete is worked out and analyzed in this article by authors.

1. Creation of an analytical model.

Analytically rod bond reinforced concrete model is simulated by calculation scheme (fig. 1 and 4), and by the system consisting of the four equations, two of which are differential equations (DE) of first order (the boundary value problem Cauchy).

The model examines the reinforced concrete element with a single central reinforcement. The left end is rigidly fixed element of any movement, the right end – free.

By reinforcing bar tensile force $N_s(x)$ is applied, the armature is pulled out of the concrete matrix. This effort causes a displacement and deformation of concrete reinforcement bar $\varepsilon_s(x)$ and concrete of reinforced concrete element $\varepsilon_c(x)$ over the entire length of of the squared beam. In the concrete matrix occurs due to force $N_c(x)$ interaction with armature in concrete beam contact region and the relative displacements of mutual reinforcement and concrete $\varepsilon_g(x)$. The contact interaction of the two materials is approximately regarded as a mutual relative displacement of reinforcement and concrete. The force $\tau(x)$ per unit length is acting on the direction of the current load in concrete along the entire length of contact shear, but in an armature, – oppositely directed (Fig. 1).

The dependence of the tangential bond stress τ_{bond} from mutual relative displacement of reinforcement and concrete $\varepsilon_g(x)$, characterizes the bond of material is a bi-linear in nature (Fig. 2) and is presented below:

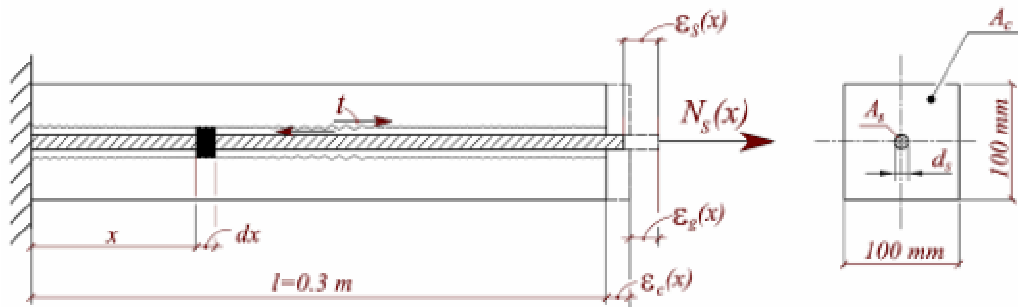


Figure 1 – The calculation scheme of the reinforced concrete element

$$\tau_{bond} = k \cdot \varepsilon_g(x) = 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)]; \quad (1)$$

$$\text{if } \varepsilon_g(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}};$$

$$\tau_{bond} = 0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}, \quad (2)$$

$$\text{if } \varepsilon_g(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}},$$

where $\varepsilon_g^*(x)$ – the boundary relative mutual displacement of the concrete and reinforcement, corresponding to the end point of the first section bond diagram (Fig. 2);

f_{ctm} – the average tensile strength of concrete in tension, Table 1 and Norms [2];

E_{cm} – the average initial modulus of elasticity of concrete, Table 1 and Norms [2];

The bilinear diagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ is shown on Fig. 3. It also describes the concrete work on this model. The expressions for each of the sections of the diagram included in the system of equations. It describes the deformation of concrete by next equations:

$$\varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{if } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm} \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{if } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}. \end{cases} \quad (3)$$

Using the equilibrium condition of the concrete and armature rods get the following two differential equations that relate the forces in the rods and shear bond stresses (Fig. 4):

– for armature (reinforcement):

$$-N_s + N_s + dN_s - t \cdot dx = 0; \quad (4)$$

– for concrete:

$$-N_c + N_c + dN_c + t \cdot dx = 0. \quad (5)$$

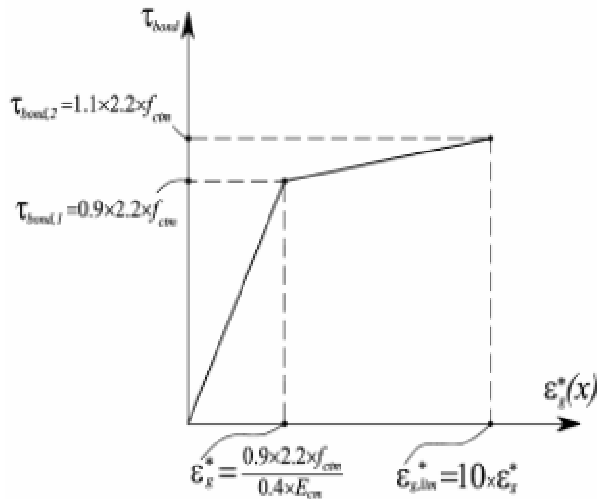


Figure 2 – The dependence of bond stress τ_{bond} on the relative mutual displacement $\varepsilon_g^*(x)$

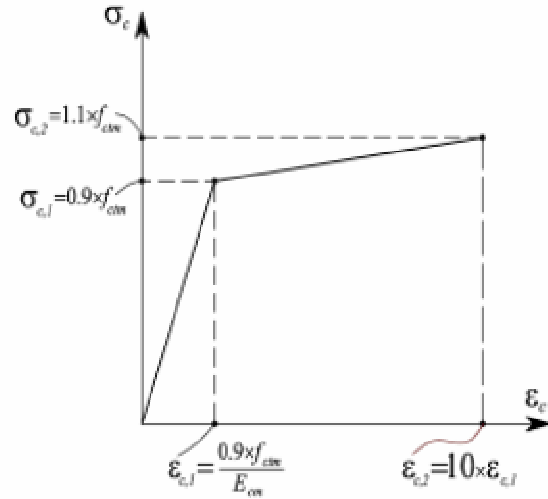


Figure 3 – The concrete deformation diagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ in the analytical model

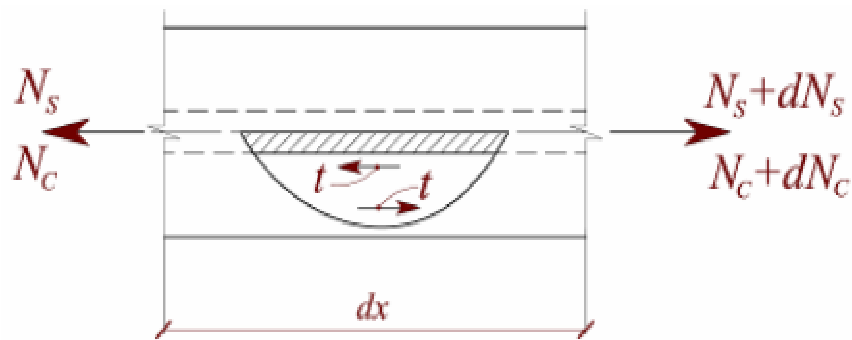


Figure 4 – Working reinforcement in concrete

After appropriate algebraic transformations, we have:

– for armature (reinforcement):

$$\frac{dN_s}{dx} = \tau_{bond} \cdot \pi d_s ; \quad (6)$$

– for concrete:

$$\frac{dN_c}{dx} = -\tau_{bond} \cdot \pi d_s . \quad (7)$$

In the equations (4) and (5), $t = \tau_{bond} \cdot \pi \cdot d_s$, N_s – efforts in reinforcement, N_c – efforts in concrete.

For armature Hooke's law is valid.

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s ; \Rightarrow \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{N_s(x)}{E_s \cdot A_s} . \quad (8)$$

Thus, a nonlinear boundary value problem is received. It consists of four equations, two of which control the first order, which is as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s(x) = \frac{1}{E_s \cdot A_s} \cdot N_s(x); \\ \varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{if } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{if } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \\ \frac{dN_s(x)}{dx} = \begin{cases} \pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{if } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ \pi \cdot d_s \cdot \{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{if } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}; \end{cases} \\ \frac{dN_c(x)}{dx} = \begin{cases} -\pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{if } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ -\{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{if } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}. \end{cases} \end{array} \right. \quad (9)$$

The boundary conditions of the problem:

$$N_c(x=1)=0, \quad N_s(x=1)=C. \quad (10)$$

This problem is solved with the use of numerical methods in the application of computer algebra package Wolfram Mathematica system.

2. Analysis of the results of the analytical model of the bond.

Varying the values efforts N_s at the end of a reinforcing bar distribution graphs were obtained of the desired functions $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ along the length of the rod (Fig. 5, 6).

The initial data are presented at the Table. 1.

Table 1 – The initial data for the dependency formation of the unknown functions with the effort at the end of the rod

The main materials characteristic	Value
E_s	$2,04 \cdot 10^5$ MPa
A_s	$7,854 \cdot 10^{-5}$ m ²
E_{cm}	$2,7 \cdot 10^4$ MPa
A_c	10^{-2} m ²
d_s (armature class A400C)	10^{-2} m
f_{ctm} (concrete class C16/20)	1,9 MPa

The limiting factors in this case were:

- tensile strength reinforcement in tension f_t ;
- the average tensile strength of concrete in tension f_{ctm} , which is determined by the stage of the work of the concrete section of the element;
- limiting the relative displacement of the armature with respect to the concrete at the end $\varepsilon_{g,lim} = 10 \times \varepsilon_g^*$, in which there is a failure of reinforcement with concrete ties, according to the adopted work depending reinforcement contact with concrete (Fig. 2);

– ultimate tensile strain of concrete in tension $\varepsilon_{c,2} = 10 \times \varepsilon_{c,1}$, according to the accepted depending on the concrete deformation (Fig. 3).

It is observed a proportional increase in the length of the rod according to the current force values of the unknown functions with increasing efforts at the end of reinforcement bar in displayed graphs. The value of efforts N_s at the input corresponds to the force in the valve output (Fig. 5, a), which is one of the criteria for the correctness of the building model. The effort N_c in the concrete on the right side is zero (Fig. 6, a), which fully corresponds to the initial conditions and the physical side of the problem. For values $N_s = 0.025 \dots 0.03$ MN of stresses in the concrete exceed the tensile strength of concrete in tension $0.9 \cdot f_{ctm}$ and concrete starts to work on the second branch of the stress-strain diagram. The tensile load application area there is a sharp, abrupt increase N_s and U_s and decrease N_c and U_c (begins at a distance of 0,3 m from the left edge and extends to the right edge).

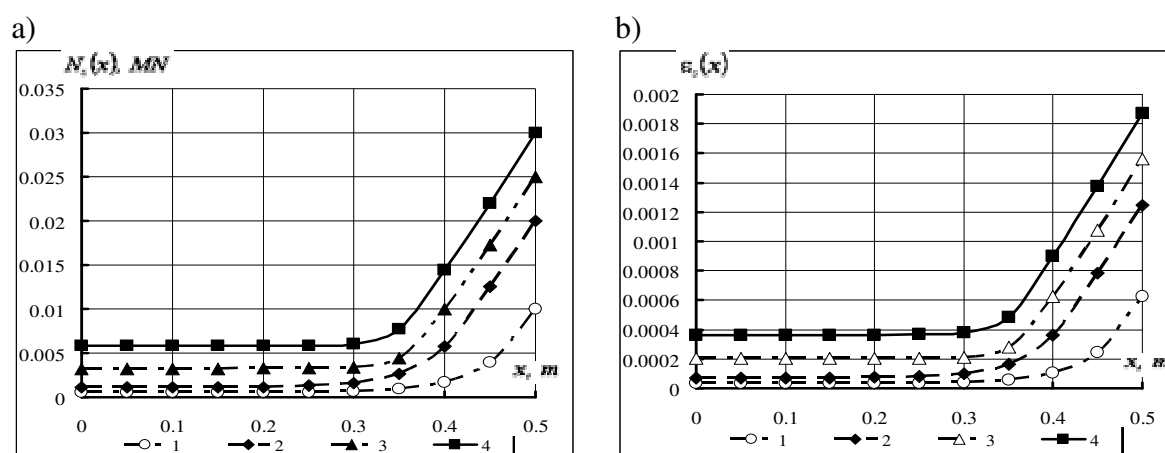


Figure 5 – The distribution graph of the longitudinal effort in the armature $N_s(x)$ (a) and relative longitudinal strains in the reinforcement $\varepsilon_s(x)$ (b) along the length of the rod, depending on the efforts acting on the end:
 1 – for tensile effort at the end equal to 0.01 MN; 2 – the same, equal to 0.02 MN;
 3 – the same, equal to 0.025 MN; 4 – the same, equal to 0.03 MN

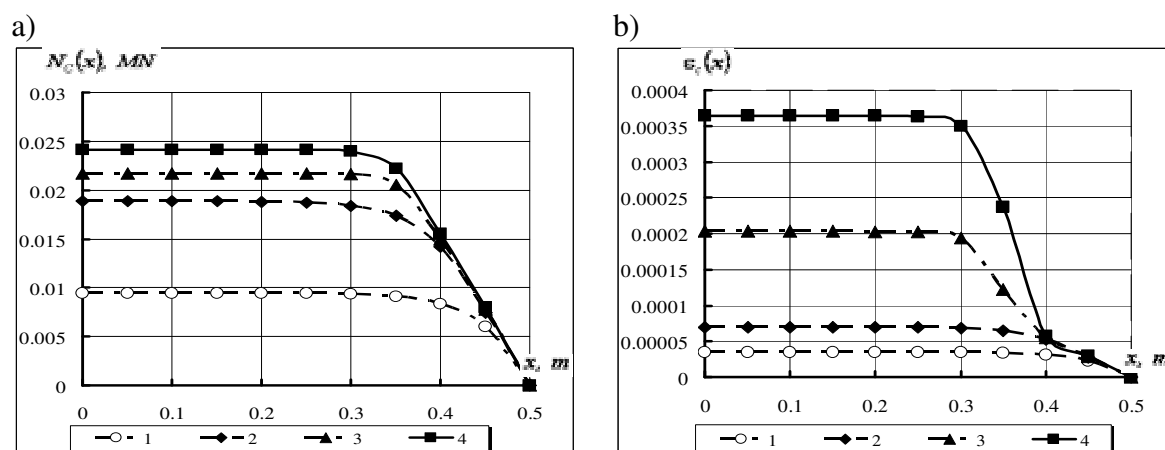


Figure 6 – The distribution graph of the longitudinal effort in the concrete $N_c(x)$ (a) and longitudinal strains in concrete $\varepsilon_c(x)$ (b) along the length of the rod, depending on the efforts acting on the end:
 1 – for tensile effort at the end equal to 0.01 MN; 2 – the same, equal to 0.02 MN;
 3 – the same, equal to 0.025 MN; 4 – the same, equal to 0.03 MN

Also, the results of the calculation of the analytical models were built unknown functions $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ distribution graphs for different diameters of rebar from the concrete to pull out (Fig. 7, 8). The initial data are presented at the Table 2.

Table 2 – The initial data for the dependency formation of the unknown functions along the length of the rod for the different diameters of armature

The main materials characteristic	Value
E_s	$2,04 \cdot 10^5$ MPa
E_{cm}	$2,7 \cdot 10^5$ m ²
A_c	10^{-2} m ²
f_{cm} (concrete class C16/20)	1,9 MPa
N_s	0.022 MPa
d_s (armature class A400C)	Ø10; Ø12; Ø16 (10^{-2} m, $1,2 \cdot 10^{-2}$ m, $1,6 \cdot 10^{-2}$ m)

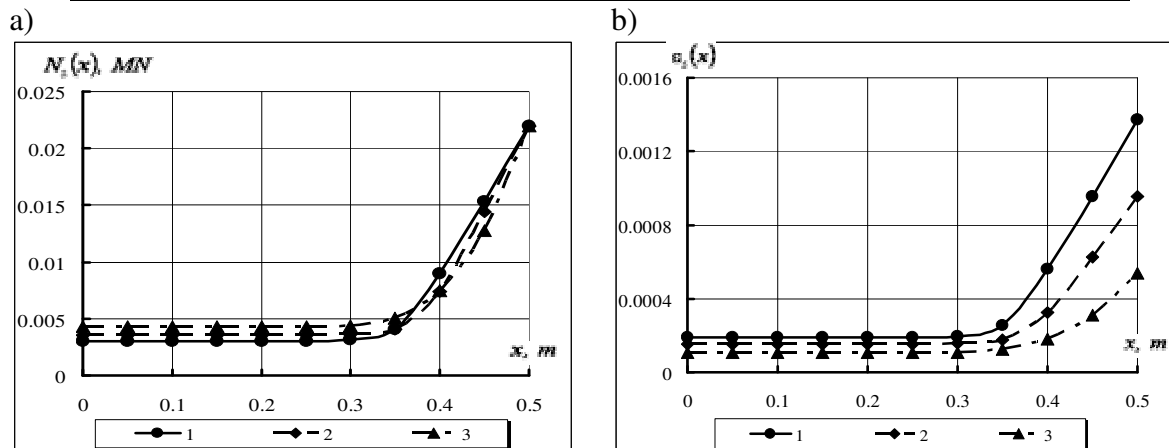


Figure 7 – The distribution graph of the longitudinal effort in the armature $N_s(x)$ (a) and relative longitudinal strains in the reinforcement $\varepsilon_s(x)$ (b) along the length of the rod, depending on the diameter of armature: 1 – armature Ø 10 mm; 2 – armature Ø 12 mm; 3 – armature Ø 16 mm

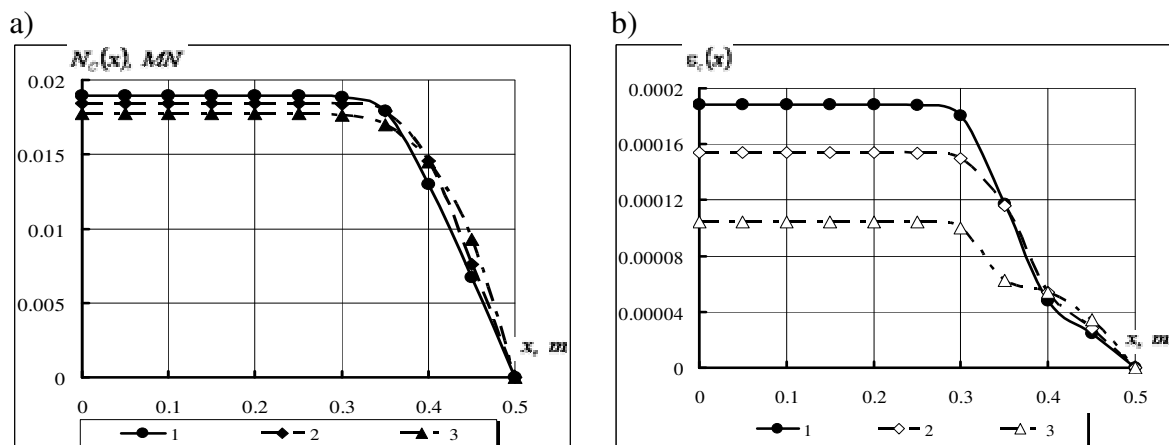


Figure 8 – The distribution graph of the longitudinal effort in concrete $N_c(x)$ (a) and relative longitudinal strains in concrete in the reinforcement $\varepsilon_c(x)$ (b) along the length of the rod, depending on the diameter of armature: 1 – armature Ø 10 mm; 2 – armature Ø 12 mm; 3 – armature Ø 16 mm

There is a slight increase in the acting force at increasing the armature diameter (Fig. 7, a) in the graph depending $N_s(x)$ on the length of the rod; plots $\varepsilon_s(x)$, $\varepsilon_c(x)$, $N_s(x)$, $N_c(x)$ show an increase in the values of these functions while reducing the diameter of armature (Fig. 7, 8), which also corresponds to the physical picture of the phenomenon.

Conclusions. Analytical model of bond armature with concrete is a fairly accurate and informative model. This model takes into account the elastic-plastic concrete work, as well as the non-linearity of armature in contact with the concrete, and allows you to efforts distribution of graphics and concrete strains and reinforcement along the length of the rod.

The proposed model is relatively simple, although it is not without drawbacks, and therefore requires experimental confirmation by testing and implementation of numerical simulation bond problems and a higher level of granularity.

References

1. Белов В. В. Диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов с трещинами / В. В. Белов, С. Е. Никитин // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №4. – С. 18 – 25.
Belov V. V. Diahronnaya model deformirovaniya korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov s treshchinami / V. V. Belov, S. E. Nikitin // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2011. – №4. – S. 18 – 25.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний з 2011-07-01]. – К. : Мінгеріонбуд України, ДП «Укранхбудінформ», 2011. – 71 с.
DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennya. [Chinniy z 2011-07-01]. – K. : Mingerionbud Ukrayini, DP «Ukrarhbudininform», 2011. – 71 s.
3. Бондаренко В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.
Bondarenko V. M. Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona: monografiya / V. M. Bondarenko, V. I. Kolchunov. – M. : Izd-vo ASV, 2004. – 472 s.
4. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.
Karpenko N. I. Obshchie modeli mehaniki zhelezobetona / N. I. Karpenko. – M. : Stroyizdat, 1996. – 416 s.
5. Левин В. М. Математическое моделирование совместного деформирования арматурного стержня и бетона в окрестности изолированной трещины (применительно к модели дискретных трещин) / В. М. Левин, Н. Ю. Рогожин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2015. – № 3(113). – С. 5 – 7.
Levin V. M. Matematicheskoe modelirovanie sovместnogo deformirovaniya armaturnogo sterzhnya i betona v okrestnosti izolirovannoy treshchiny (primenitelno k modeli diskretnykh treshchin) / V. M. Levin, N. Yu. Rogozhin // Vestnik Donbasskoy natsionalnoy akademii stroitelstva i arhitektury. – 2015. – № 3(113). – S. 5 – 7.
6. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.
Holmyanskiy M. M. Kontakt armatury s betonom / M. M. Holmyanskiy. – M. : Stroyizdat, 1981. – 184 s.
7. Problems and normative evaluation of bond-strength tests for coated reinforcement and concrete / P. Pokorný, M. Kouřil, J. Stoutil, P. Bouška, P. Simon, P. Juránek // Materials and technology. – 2015. – № 49(6). – P. 847 – 856.
8. Dai J. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method / J. Dai, T. Ueda, Y. Sato // J. of Composites for Construction. – 2005. – № 9(1). – P. 52 – 62.
9. Jendele L. Finite element modelling of reinforcement with bond / L. Jendele, J. Cervenka // Computers and Structures. – 2006. – № 84(28). – P. 1780 – 1791.

© Kolchunov V., Yakovenko I., Dmytrenko Ye.
Received 17.05.2016

*Dovzhenko O., PhD, Professor
Pogribnyi V., PhD, senior research fellow
Chursa Yu., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

VARIATIONAL METHOD APPLIED IN CALCULATION OF KEY JOINT'S STRENGTH IN THE CURRENT CONSTRUCTION SYSTEMS

The article deals with construction precast and precast with cast-in-place frame buildings, which elements' combined action is provided by key joints, are widely used. The paper is devoted to the key joints, taking up considerable transverse forces. Standard methods of their calculation are imperfect, they do not take into account all factors of influence and cause significant underestimation of the joint's strength. At Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University a calculation methodology has been developed, which, being generic enough, takes into account the destruction's character and a set of influence factors. Three- and five-key joints of multi-storey building's reinforced concrete frame's elements have been considered. An example is given of determining the strength of the capillary's joint with the column of the precast flat slab floor by means of the variational method in the concrete plasticity theory. The obtained results are compared to the standard calculations.

Keywords: joint, key, strength, plasticity, shear, concrete.

*Довженко О.О., к.т.н., професор
Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с.
Чурса Ю.В., аспірант*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ЗАСТОСУВАННЯ ВАРІАЦІЙНОГО МЕТОДУ ПРИ РОЗРАХУНКАХ МІЦНОСТІ ШПОНКОВИХ СТИКІВ СУЧАСНИХ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ

Висвітлено роль стиків, котрі використовуються для забезпечення спільної роботи окремих елементів збірних і збірно-монолітних каркасних будівель. Особливу увагу присвячено шпонковим з'єднанням, які сприймають значні поперечні сили. З'ясовано, що нормативні методики їх розрахунку не досконалі, не враховують всіх факторів впливу і призводять до суттєвої недооцінки міцності стиків. У Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка розроблено методику розрахунку, яка є досить загальною: розглядає характер руйнування та комплекс чинників впливу. Розглянуто три- і п'ятишпонкове з'єднання залізобетонних елементів каркасів багатоповерхових будівель. Наведено приклад визначення міцності стику капітелі з колоною збірного безбалкового перекриття варіаційним методом на основі теорії пластичності бетону. Отримані результати порівняно з нормативними розрахунками.

Ключові слова: стик, шпонка, міцність, пластичність, зріз, бетон.

Introduction. Joints are important elements of the present-day construction systems (CS) of multi-storey buildings. Hollow core slabs in them rest on girders through concrete keys, formed by means of embedding hollow sites of the slab ends (CS Arcos). Precast and precast with cast-in-place girders and column slabs are also connected with the column by means of keys (CS MITEP, Saret, Kazan-XXI century, CUBE-2.5, etc.). However, such joints are used carefully enough [1], which indicates the necessity of their further studies.

Analysis of the latest research sources and publications. Reliability and economic feasibility of joints is determined by their design method's quality. Currently, we have analyzed over 50 proprietary and standard methods of defining the key joint's bearing capacity [1 – 6]. Most of them are empiric, thus causing definite drawbacks, first of all, special character of the data obtained.

Normally, among the factors, determining the above joint's strength, we should distinguish the both concrete properties f_{cd} and f_{ctd} ; key parameters l_k (depth), h_k (height), b_k (width) and their ratio l_k / h_k ; the key profile form, the underlay's deflection angle ψ (rectangular, trapezoidal and triangular keys); prestressing force σ / f_{cd} ; reinforcement $\rho_{sw} = A_s / b_k h_k$; the joint's width t_j number of keys n_k [7 – 11].

Among the known methods, only standards [12, 13] are, to some extent, taking into account most of the above factors, however, they significantly underscore the theoretic strength when compared to the empirically obtained data.

At Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University a design methodology has been developed for design key joint's strength [14], which is based on the common foundation: the variational method in the concrete plasticity theory [15], considers their destruction type and takes into account the whole totality of the strength determining factors. The method is tried and tested enough, and it has demonstrated proper coincidence with the experimental data.

Singling unsolved aspects of the problem. Number of keys is one of the factors influence the key joint's strength, which is poorly understood. Standard norms [16] suggest calculations for maximum three, and [17] – that for five keys. There is no consensus on the maximum number of keys, which is introduced in the design. There is, therefore, the matter requires further study.

The aim of the present paper is testing the method of key joint's strength design in the context of solving tasks to improve strength of splined joints in the precast and precast with cast-in-place systems of multi-storey buildings.

Basic material and the results. The essence of the suggested design method lies in the fact that basing on the assumed kinematic scheme of the single-key joints (Fig. 1), the normal and tangent velocity jumps are determined in relation to the destruction surface, its contour is defined. Then, the method's functional is recorded and, proceeding from the fact that it equals zero, the ultimate load q_u is determined at the unknown angles α, β and the speed ratio V_x / V_y . As additional conditions, equilibrium equations are assumed. Solutions have been obtained for single-key joints at «key» and «joint» destructions [14].

Three-key joints undergo the following destruction cases (under the condition that the height of keys equals to the distance between them): at $t_j / h_k \leq 0,3$ (t_j – the joint's width): in the case, when $0,25 \leq l_k / h_k \leq 0,35$ – the «key» destruction (Fig. 2, a); if the condition $0,3 < t_j / h_k < 3$ and $0,25 \leq l_k / h_k \leq 0,5$ is fulfilled – a combined variant of «key» and «joint» destruction occurs (Fig. 2, b – c) (the calculation value is assumed to be the minimal ultimate load's value), when $t_j / h_k \geq 3$ – the joint is destroyed.

Five-key joints undergo the relevant destruction schemes.

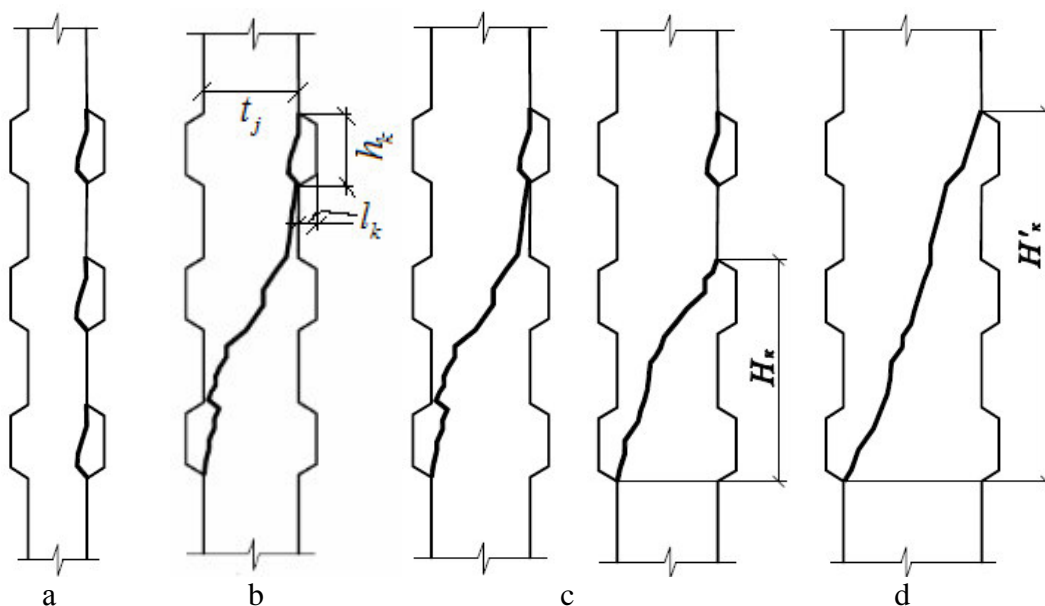


Figure 2 – Possible forms of three-key joints destruction

As an example, let us consider the results of calculation for a key joint of a column with the cap of precast flat slab floor's drop (Fig. 3) by means of the variational method based on the concrete plasticity theory, and let's compare them with the standard design [12] and [15].

The initial data for the calculation are the joint's geometry: $h = 600$ mm; $d = 556$ mm; $b_{cap} = 830$ mm; $b_{st} = 150$ mm; $b = 450$ mm; $h_k = 130$ mm; $b_k = 450$ mm; $l_k = 30$ mm and the strength properties of the embedment concrete C16/20, for which $f_{cd} = 11,5$ MPa, $f_{ctd} = 1,3$ MPa.

The drop-with-column joint is designed to be rigid, able to take up bending moments and shear forces. At designs, one should take into account that the moments, acting in the joint, cause the prestressing the embedment concrete, in our case the prestressing level is $\sigma = 8,02$ MPa. The positive effect on the joint's operation is made by the restraining influence of the cap, heightwise of which three keys are designed.

For the considered dimensions $l_k / h_k = 30 / 130 = 0,25$, and the joint's relative width makes $t_j / h_k = 95 / 130 = 0,73$, which means, that the combined «key» and «joint» destruction variant can occur (Fig. 2, a – c). The minimal load value is observed in the destruction case described in Fig. 2, b: for two keys and seam within the third.

In this case, the keys joint's strength is determined depending on:

$$\frac{q_u^2}{m} = 2 \left(\frac{B \tan \alpha (tg^2 \beta + 1)}{(tg \alpha + tg \beta)} + \frac{f_{ctd} tg \beta}{m} + \sigma \frac{tg \beta}{m} \right) \frac{1}{\gamma (\cos \theta - k \sin \theta)} +$$

$$+ \left(\left[\frac{2B \sqrt{(k - tg \beta_1)^2 + 0,25 (ktg \beta_1 + 1)^2} - (k - tg \beta_1)}{(tg \alpha_1 + tg \beta_1)} \right] \frac{(tg \alpha_1 - t_j)}{(tg \alpha_1 + tg \beta_1)} + \right. \quad (1)$$

$$\left. \frac{f_{ctd}}{m} (k + tg \alpha_1) \frac{(tg \beta_1 + t_j)}{(tg \alpha_1 + tg \beta_1)} + \sigma \frac{k}{m} \right) \frac{1}{\gamma (\cos \theta - k \sin \theta)},$$

where $\gamma = l_k / h_k$; $B = \sqrt{(1 + \chi / (1 - \chi)^2) / 3}$, $\chi = f_{ctd} / f_{cd}$; $m = f_{cd} - f_{ctd}$; $k = V_x / V_y$ – the speed ratio; angles α, β – geometric parameters of the failure surface ABC (Fig. 1, a); θ – load deflection angle from the vertical.

The results of determining the ultimate load, which can be taken up by a two-key butt joint, are the following: for [18] – $V_u = 500,2$ kN; for [12] – $V_u = 214,7$ kN, using the variational method [15] – $V_u = 271,6$ kN. As it can be clearly seen, the standard methods [12, 18] demonstrate significant (by 2,5-fold) divergence of results. The value of, obtained on the plasticity theory, falls within the above limits and is closer to the design result [12] as such, taking into account the specificity of considered joint's constructive solution.

Conclusions. The suggested method of key joints strength design is illustrated on the example of the strength design for the drop-with-column joint of the precast flat slab floor. Compared to the standard one, the above method is more accurate due to taking into account all factors of influence. The method is recommended for extensive application.

References

1. Гуров Е. П. Сборное домостроение. Стратегия развития / Е. П. Гуров // *СтройПРОФИЛЬ*. – 2010. – № 5 (83). – С. 10 – 15.
Gurov E. P. Sbornoe domostroenie. Strategiya razvitiya / E. P. Gurov // *StroyPROFIL*. – 2010. – № 5 (83). – S. 10 – 15.
2. Довженко О. О. Порівняльний аналіз розрахунку міцності бетонних шпонок за існуючими методиками / О. О. Довженко, Л. В. Карабаш, Ю. В. Чурса // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. – Рівне: НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 201 – 210.
Dovzhenko O. O. Porivnyalnyi analiz rozrahunku mitsnosti betonnih shponok za isnuyuchimi metodikami / O. O. Dovzhenko, L. V. Karabash, Yu. V. Chursa // *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudi: zb. nauk. prats.* – Rivne: NUVGP, 2012. – Vip. 23. – S. 201 – 210.
3. Довженко О. О. Порівняльний аналіз розрахунку міцності залізобетонних шпонок за існуючими методиками (на прикладі контактної шви) / О. О. Довженко, І. А. Юрко, А. Г. Гриценко // *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 5 (38). – С. 72 – 84.
Dovzhenko O. O. Porivnyalnyi analiz rozrahunku mitsnosti zalizobetonnih shponok za isnuyuchimi metodikami (na prikladi kontaktного shva) / O. O. Dovzhenko, I. A. Yurko, A. G. Gritsenko // *Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo*. – Poltava: PoltNTU, 2012. – Vip. 5 (38). – S. 72 – 84.
<http://znp.pntu.edu.ua>
4. Довженко О. О. Порівняльний аналіз розрахунку міцності обтиснутих бетонних шпонок за існуючими методиками / О. О. Довженко, Л. В. Карабаш, Є. О. Ржаних // *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. – Київ, ДП НДІБК, 2013. – Вип. 78: у 2-х кн. Книга 1. – С. 527 – 533.
Dovzhenko O. O. Porivnyalnyi analiz rozrahunku mitsnosti obtisnutih betonnih shponok za isnuyuchimi metodikami / O. O. Dovzhenko, L. V. Karabash, E. O. Rzhanih // *Budivelni konstruktsiyi: mizhvidomchiy nauково-tehničniy zbirnik naukovih prats.* – Kiyiv, DP NDIBK, 2013. – Vip. 78: u 2-h kn. Kniga 1. – S. 527 – 533.
5. Порівняльний аналіз розрахунку міцності багатощпонкових контактних стиків за існуючими методиками / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, Ю. В. Чурса, Я. В. Черненко // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 31. – С. 158 – 162.
Porivnyalnyi analiz rozrahunku mitsnosti bagatoshpunkovih kontaktnih stikiv za isnuyuchimi metodikami / O. O. Dovzhenko, V. V. Pogribniy, Yu. V. Chursa, Ya. V. Chernenko // *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudi: zb. nauk. prats.* – Rivne: NUVGP, 2015. – Vip. 31. – S. 158 – 162.
6. Прочность одношпоночных стыков, разрушающихся по шву [Электронный ресурс] / О. А. Довженко, В. В. Погребной, И. А. Юрко, Ю. В. Чурса. – Режим доступа: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2416>.
Prochnost odnoshponochnykh stykov, razrushayushchih-sya po shvu [Electronic resource Access mode] / O. A. Dovzhenko, V. V. Pogrebnoy, I. A. Yurko, Yu. V. Chursa. – Access mode: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2416>.

7. Cholewicki A. Loadbearing Capacity and Deformability of Vertical Joints in Structural Walls of Large Panel Buildings / A. Cholewicki // *Build. Sci.* – 1971. – № 6 (9). – P. 163 – 184.
8. Chakrabarti S. C. Joints in reinforced concrete wall assembly-material model / S. C. Chakrabarti, G. C. Nayak, D. K. Paul // *The Indian Concrete Journal.* – 1988. – Vol. 62. – № 5. – P. 249 – 259.
9. Multiple shear key connections for precast shear wall panels / S. H. Rizkalla, R. L. Serette, J. S. Heuvel, E. K. Attiogbe // *PCI Journal.* – 1989. – № 3 – 4. – P. 104 – 120.
10. Zhou X. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges / X. Zhou, N. Mickleborough, Z. Li // *Structural Journal.* – 2005. – Vol. 102. – №1. – P. 3 – 11.
11. Svejgaard J. Test and analysis of keyed shear joints between precast concrete walls - influence of indent area on the load bearing capacity. Master's thesis, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. – 2015. – P. 186 – 193.
12. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Основні положення: ДСТУ Б В.2.6. – К.: НДІБК, 2010. – 156 с. (Державний стандарт України).
Betoni ta zalizobetonni konstruktsiyi z vazhkogo betonu. Osnovni polozhennya: DSTU B V.2.6. – K.: NDIBK, 2010. – 156 s. (Derzhavnyi standart Ukrayini).
13. Eurocode 2, Part 1: Design of concrete structures: EN 1990:1992. – [Publication Date 1992-11-23]. – 1992. – 292 p. – (European standard).
14. Довженко О. О. Методика розрахунку шпонкових з'єднань залізобетонних елементів / О. О. Довженко, В. В. Погрибний, Ю. В. Чурса // *Вісник НУ «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва».* – Л., 2013. – № 755. – С. 111 – 117.
Dovzhenko O. O. Metodika rozrahunku shponkovih z'ednan zalizobetonnih elementiv / O. O. Dovzhenko, V. V. Pogribniy, Yu. V. Chursa // *Visnik NU «Lvivska politehnika» «Teoriya i praktika budivnitstva».* – L., 2013. – № 755. – S. 111 – 117.
15. Митрофанов В. П. Вариационный метод в теории идеальной пластичности бетона / В. П. Митрофанов // *Строительная механика и расчет сооружений.* – 1990. – № 6. – С. 23 – 28.
Mitrofanov V. P. Variatsionnyy metod v teorii idealnoy plastichnosti betona / V. P. Mitrofanov // *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy.* – 1990. – № 6. – S. 23 – 28.
16. Пособие по проектированию жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). – М., 1989. – Вып. 3. – 304 с.
Posobie po proektirovaniyu zhilyh zdaniy (k SNiP 2.08.01-85). – M., 1989. – V. 3. – 304 s.
17. Коровин Н. Н. Экспериментальное исследование шпоночных сопряжений ригелей с колонной / Н. Н. Коровин, В. С. Еськов // *Бетон и железобетон.* – 1965. – № 3. – С. 40 – 43.
Korovin N. N. Eksperimentalnoe issledovanie shponochnykh sopryazheniy rigeley s kolonnoy / N. N. Korovin, V. S. Eskov // *Beton i zhelezobeton.* – 1965. – № 3. – S. 40 – 43.
18. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с безбалочными перекрытиями. – М.: Стройиздат, 1979. – 54 с.
Rukovodstvo po proektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy s bezbalochnymi perekrytiyami. – M.: Stroyizdat, 1979. – 54 s.
19. Патент RU 2272108: МПК 2006.01 E04B 23/00. Каркас многоэтажного здания / В. А. Большаков, А. В. Дурнев: владелец патента – ОАО НИПИ БИОТИН. – Опубл. 27.10.2005. – Бюл. № 8.
Patent RU 2272108: MPK 2006.01 E04B 23/00. Karkas mnogoetazhnogo zdaniya / V. A. Bolshakov, A. V. Durnev: vladelets patenta – ОАО NIPI BIOTIN. – Opubl. 27.10.2005. – Byul. № 8.
20. Универсальная несущая сборно-монолитная каркасная система «КАЗАНЬ-XXI век» / И. И. Мустафин, ООО «Проектно-конструкторская фирма «Каркас». – Казань, 2005. – 21 с.
Universal'naya nesushchaya sborno-monolitnaya karkasnaya sistema «KAZAN-XXI vek» / I. I. Mustafin, ООО «Proektno-konstruktorskaya firma «Karkas». – Kazan, 2005. – 21 s.
21. Патент на изобретение RU 2000398: МПК-8 E04B 1/18. Каркасно-панельное здание «РАМПА» / В. С. Шмуклер: владелец патента – В. С. Шмуклер. – Опубл. 15.10.1999. – Бюл. № 22.
Patent na izobretenie RU 2000398: MPK-8 E04B 1/18. Karkasno-panelnoe zdanie «RAMPA» / V. S. Shmukler: vladelets patenta – V. S. Shmukler. – Opubl. 15.10.1999. – Byul. № 22.

© Dovzhenko O., Pogribnyi V., Chursa Yu.
Received 10.05.2016

МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ КЛЕЄНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРНОЮ СІТКОЮ

Наведено результати експериментальних досліджень армованих дерев'яних дощато-клеєних згинальних елементів прямокутного перерізу. Як армування застосовано полімерну сітку заводського виготовлення. Описано процес визначення фізико-механічних та геометричних характеристик вихідних матеріалів, а також процес виготовлення дослідних зразків із застосуванням інвентарного обладнання науково-дослідницької лабораторії. У процесі експериментальних досліджень виміряно деформації за тензометричною методикою та переміщення точок осі за фотограмметричною методикою. Представлено графіки розвитку прогинів та поздовжніх деформацій для середнього перерізу залежно від величини зовнішнього моменту. За результатами досліджень встановлено, що введення армування у вигляді полімерної сітки збільшує несучу здатність та знижує деформативність дерев'яних дощато-клеєних згинальних елементів.

Ключові слова: дерев'яні конструкції, клеєно-дощаті елементи, міцність, деформативність, прогини, деформації.

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНОЙ СЕТКОЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований армированных деревянных дощато-клееных изгибаемых элементов прямоугольного сечения. В качестве армирования применена полимерная сетка заводского изготовления. Описано процесс определения физико-механических и геометрических характеристик исходных материалов, а также процесс изготовления опытных образцов с применением инвентарного оборудования научно-исследовательской лаборатории. В процессе экспериментальных исследований измерялись деформации по тензометрической методике и перемещения точек оси по фотограмметрической методике. Представлены графики развития прогибов и продольных деформаций для среднего сечения в зависимости от величины внешнего момента. По результатам исследований установлено, что введение армирования в виде полимерной сетки увеличивает несущую способность и снижает деформативность деревянных клеено-дощатых изгибаемых элементов.

Ключевые слова: деревянные конструкции, дощато-клееные элементы, прочность, деформативность, прогибы, деформации.

THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF GLUED LAMINATED WOODEN BEAMS WITH FABRIC REINFORCEMENT

The article presents the results of experimental studies of reinforced wooden glued laminated bendable elements with rectangular cross section. A polymer fabric is applied as a reinforcement. The authors describe the process of determination of physical-mechanical and geometrical characteristics of composite materials. The process of determining relevant characteristics of working strands in the polymer fabric is described in detail. A photogrammetric technique is applied to establish an estimated cross-sectional area of working strands. It is described a creating process of experimental model and equipment of the research laboratory. Attention is paid to the process of creating of pre-stress in working strands of polymer fabric. During the experimental studies, deformations and displacements are measured. Deformations are measured according to tensometric method using strain-gauge station, БНП-8. Measurement and recording of relative deformations are carried out automatically at every startup stage.

Electro-strain gage are located in the middle section. Displacement of point of the axis is measured according to photogrammetric method. This technique allows observing deflections in the middle section and the displacements in supporting sections of the experimental samples at the same time. The article presents graphs of the deflections and longitudinal strains for the middle section depending on the magnitude of the external moment. Deflections mean vertical displacement of the middle the most stressed section. In samples with fabric reinforcement the amount of deflection is less than the amount of deflection in unreinforced samples at the same level of external load. Longitudinal strains are measured at the height of the middle section. From the above graphic, you can see that the neutral line moves to the most extended fibers of the cross section of experimental models at the previous strained of polymer reinforcement.

Experimental researches have made possible to establish deformation features of wooden glued laminated beams of rectangular cross section depending on the value of pre-stressing polymer fabric reinforcement. It should be stated that polymer fabric reinforcement increases the load carrying capacity of wooden glued laminated beams of rectangular cross section by 33% and the pre-stressing of polymer reinforcement increases carrying capacity by 20%. In addition, it should be noted that fabric reinforcement has led to a change the position of the neutral axis in a strained cross section of the studied bendable elements. The deflections of test samples with fabric reinforcement are 15-20% less compared with samples without reinforcement.

Keywords: *wooden structures, glued laminated elements, strength, deformability, deflection, deformation.*

Вступ. Високі темпи й рівень сучасного будівництва висувають якісно нові вимоги до будівельних матеріалів і конструкцій. При цьому значна увага приділяється виробництву клеєних дерев'яних конструкцій. Такі конструкції по ряду техніко-економічних показників перевершують металеві та залізобетонні: мають малу вагу, відносно високу міцність і жорсткість при достатній надійності й довговічності. У той же час негативні властивості деревини (анізотропія механічних властивостей, вартість якісного пиломатеріалу, масивність перерізів, повзучість тощо) обмежують сферу застосування та погіршують показники клеєних дерев'яних конструкцій.

Висока міцність і жорсткість у поєднанні з малою вагою та спроможність опиратися впливу агресивного середовища роблять ці конструкції незамінними в сільськогосподарському будівництві. Крім того, для великопрольотних конструкцій у важкодоступних та віддалених від магістральних шляхів районах застосування клеєних дерев'яних конструкцій дозволяє виконувати укрупнене збирання. Легкі несучі клеєні армовані конструкції застосовуються в найрізноманітніших галузях будівництва: при зведенні видовищно-спортивних, сільськогосподарських та складських будівель, пролітних будов мостів і естакад, будівель хімічних виробництв тощо. З іншого боку, це висуває до них вельми високі вимоги, оскільки в процесі експлуатації можливі впливи перепадів температури та вологості, агресивних середовищ, повторних короточасних і тривалих навантажень. Розроблення і дослідження клеєних армованих дерев'яних конструкцій для будівництва є важливим завданням зі створення нових видів ефективних несучих конструкцій на основі деревини.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Ідея використання в конструкціях спільної роботи деревини та металу знайшла подальший розвиток в армованих дерев'яних конструкціях і елементах. У 1921 р. А. Клайт (США) запропонував використовувати в конструкціях аеропланів та дирижаблів несучий дерев'яний елемент коробчастого перетину із запресованим сталевим дротом у полки [1].

Цей елемент можна вважати прообразом сучасних армованих дерев'яних конструкцій. Однак труднощі, пов'язані з виготовленням таких конструкцій, і відсутність надійних засобів з'єднання сталевих дротів з деревиною не дозволили реалізувати цю пропозицію.

Армувати сталевими прутами дерев'яні брущаті балки й колони в несучих будівельних конструкціях уперше запропонував А. Фішер (Німеччина) в 1926 р. [1]. Сталеві прутки повинні були укладатися в пази квадратного перетину і заливатися спеціальною мастикою, склад якої автор не наводить.

Застосування армування дозволяє абсолютно по-новому й більш ефективно вирішувати вузлові з'єднання і стики дерев'яних конструкцій, що підвищує їх збірність, полегшує транспортування та монтаж [2 – 7], а також питання ремонту й реконструкції діючих підприємств [6, 8].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Застосування як армування дерев'яних конструкцій у вигляді окремих стрижнів потребує використання спеціальних анкеруючих засобів або виконання додаткових підготовчих технологічних операцій, зокрема виготовлення пазів у підготовлених дерев'яних матеріалах тощо. Арматурні стрижні з полімерних матеріалів не допускають перегинів та різного роду механічних пошкоджень під час виготовлення. Це значно знижує їх механічні властивості. Крім того, залежно від способу анкерування можливе розшарування таких стрижнів. Застосування як армуючого елемента полімерної сітки з робочими нитками дозволяє позбутися недоліків полімерних стрижнів.

Постановка завдання. Використання армування з полімерного матеріалу дощато-клеєних дерев'яних елементів потребує вивчення особливостей їх роботи під навантаженням. Для цього потрібно розробити методику експериментальних досліджень несучої здатності та деформованого стану дощато-клеєних дерев'яних елементів з армуванням полімерною сіткою й провести самі дослідження.

Основний матеріал і результати. Програма експериментальних досліджень передбачає: вивчення механічних властивостей вихідних матеріалів; розроблення конструкції дослідних зразків; розташування та закріплення вимірювальних засобів; випробування дослідних зразків і аналіз результатів.

Матеріали

Для виготовлення експериментальних зразків використовувалися соснові дошки 2-го сорту, розмірами 27,5×70×2200 мм. Модуль пружності деревини визначався за стандартними зразками. Застосовувалися тензометри Гугенберґера (рис. 1). Величина модуля пружності деревини склала $E = 13560$ кПа.

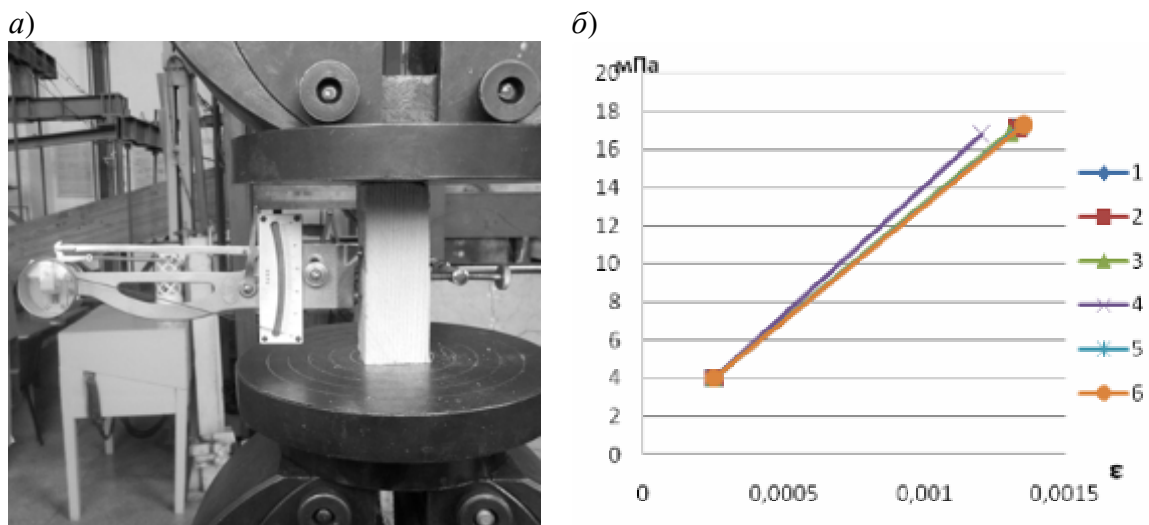


Рисунок 1 – Визначення механічних характеристик деревини:

а – випробовування на стиск; б – визначення модуля деформації деревини

Як армуючий матеріал застосовано полімерну сітку із чарунками 11×11 мм. Окрема нитка складається з двох джгутів. Площа нитки визначалася за фотознімками (рис. 2) з накладанням сіток (площа чарунок відома).

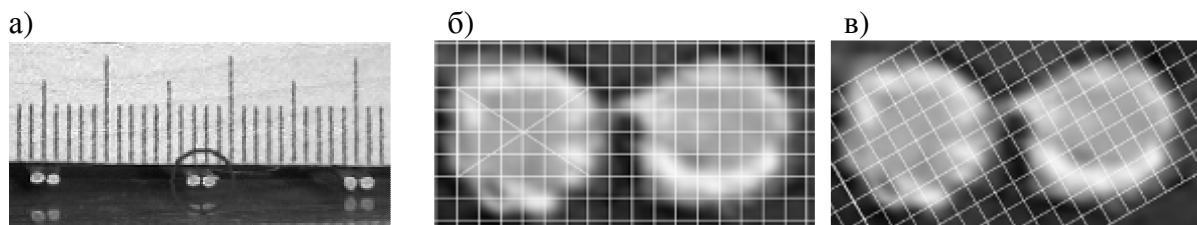


Рисунок 2 – Вимірювання площі перерізу полімерної сітки:

а – зображення перерізу нитки сітки; б, в – сітка із чарунками з відомою площею

Механічні властивості сітки визначались за результатами випробовувань на розтяг. Зразки були двох типів: смуга сітки із шести робочих ниток (рис. 3, а); окремі нитки (рис. 3, б). Площа перерізу однієї нитки – 0,008 см². Діаграму роботи матеріалу полімерної сітки наведено на рисунку 3, в.

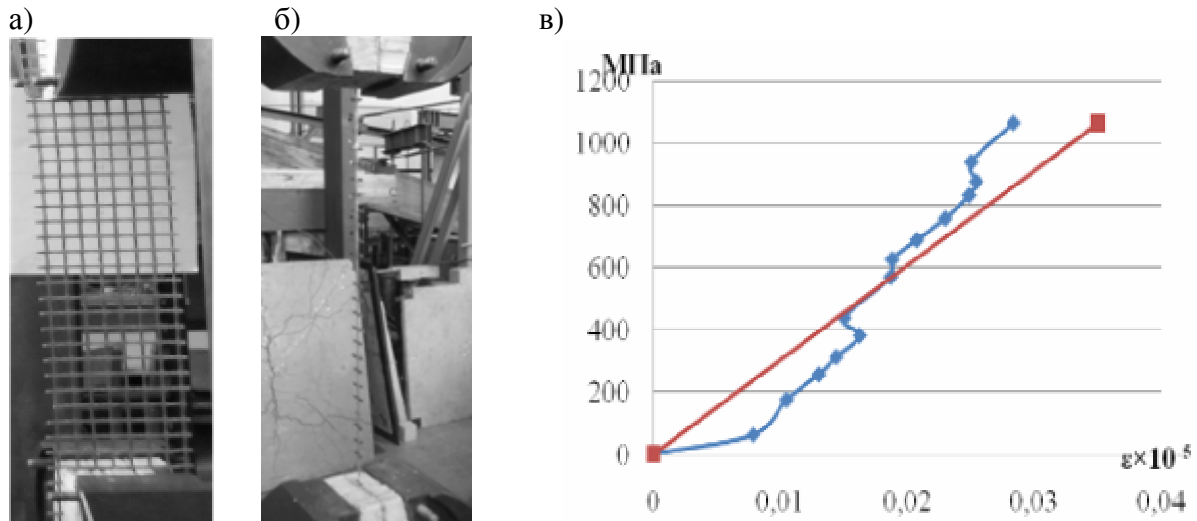


Рисунок 3 – Діаграма роботи полімерної сітки:

а – розтяг фрагменту сітки; б – розтяг нитки; в – діаграма роботи на розтяг

Величина модуля пружності сітки склала $E = 53571$ кПа. Максимальне подовження до розриву 2,8%.

Конструкція та технологія виготовлення дослідних зразків.

Згідно з прийнятою програмою експериментальних досліджень було виготовлено три серії дослідних зразків: ДКБ – дощато-клеєна балка; ДКБА1 – дощато-клеєна балка, армована полімерною сіткою; ДКБА2 – дощато-клеєна балка, армована попередньо напруженою полімерною сіткою. Усі дослідні зразки мали габаритні розміри $2200 \times 220 \times 70$ мм. Пакет складався з восьми соснових дощок 2-го сорту. Армування полімерною сіткою розташовувалося між першою та другою дошкою від нижньої грані перерізу (кількість армування – $0,096 \text{ см}^2$).

Склеювання пакетів виконувалося на інвентарному стенді у лабораторії кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас (рис. 4, а). Пакет зразків серії ДКБ формувався за один раз. Пакети зразків з армуванням формувались у декілька етапів. Так зразки серії ДКБА1 виготовлялись у такій послідовності: склеювався пакет із семи дощок; у шар клею на епоксидному в'язучому втоплювалась полімерна сітка і накладалася восьма дошка.

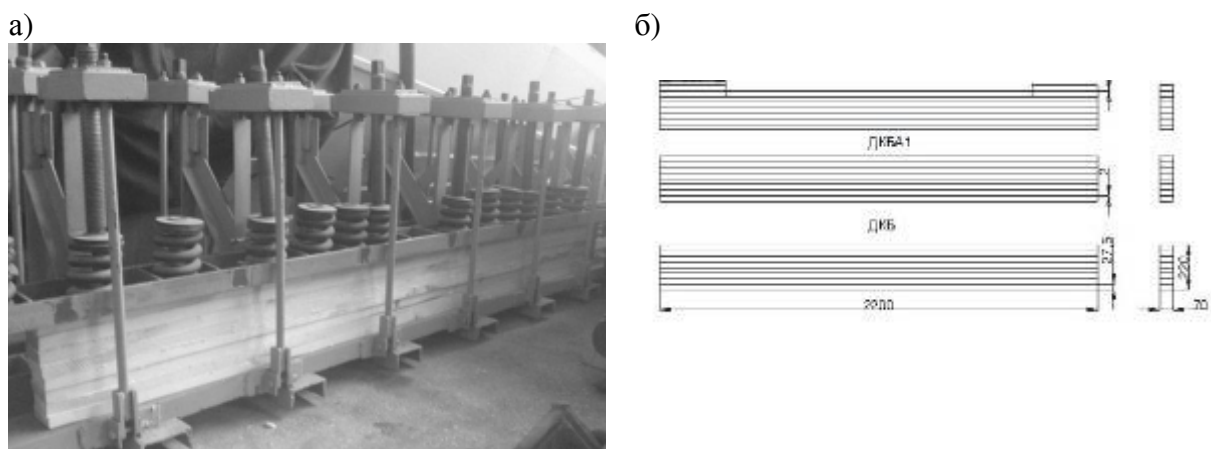


Рисунок 4 – Дослідні зразки під час склеювання:

а – серії ДКБ; б – серії ДКБА2

Зразок ДКБА2 спочатку виготовляли із шести дощок. Потім виконувалось анкерування полімерної сітки у два шари розмірами 2200×70 мм і одна сторона анкерування склеювалася з балкою. Анкерування виконувалося між дошками розмірами 330×70×27,5 мм (рис. 5, а). Після склеювання анкерування (48 годин) між закріпленням проклеювалися дві дошки і за допомогою клинців виконувалося попереднє напруження на 20% (рис. 5, б).

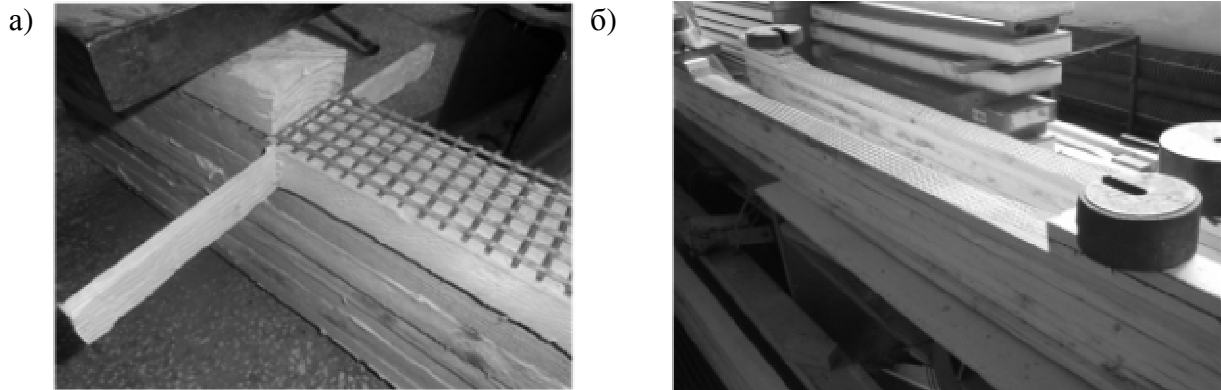


Рисунок 5 – Виготовлення зразків серії ДКБА2:

а – анкерування полімерної сітки; б – попереднє напруження полімерної сітки

Сітка склеювалася з дошками епоксидним клеєм, наповненим піском, просіяним через сито (1 мм). Частка смоли – 100, затверджувача – 12, піску – 200.

Методика проведення експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження армованих дощато-клеєних елементів проводилися в лабораторії кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Випробування виконували на гідравлічному пресі УИМ-50. Зусилля передавалися через шарніри (рис. 6, а).

Завантаження здійснювалося ступенями по 0,05÷0,1 від передбачуваного теоретичним розрахунком руйнівного навантаження N . На всіх ступенях вимірювалися деформації середнього перерізу та зміна геометрії поздовжньої осі. Деформації матеріалу вимірювалися тензометричним способом із застосуванням ВНП-8 (рис. 6, б). Переміщення точок поздовжньої вісі вимірювалися фотограмметричним методом [10].



Рисунок 6 – Дослідний зразок під час випробування:

а – в установці; б – розташування електротензорезисторів; в – фотограмметрична марка

Зразок ДБК зруйнувався при навантаженні в 9,6 кН·м. ДБКА1 за рахунок армування полімерною сіткою остаточно зруйнувався при навантаженні в 12,8 кН·м. ДБКА2 зруйнувався при навантаженні в 13,8 кН·м.

У момент руйнування зразок серії ДБК мав дуже викривлену вісь.

На рисунку 7 наведено графіки розвитку прогинів середнього перерізу дослідних зразків усіх серій залежно від величини зовнішнього згинального моменту.

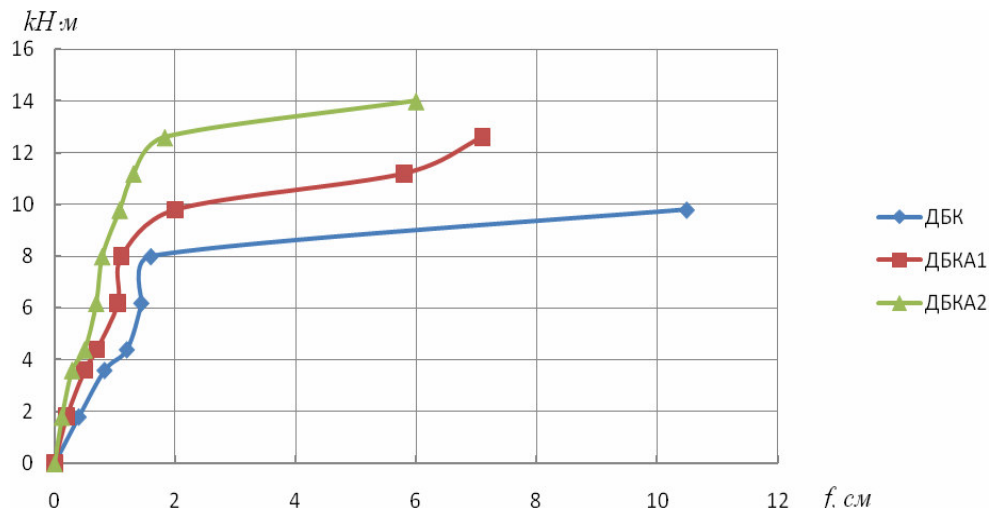


Рисунок 7 – Прогини дослідних зразків

На рис. 8 наведено графіки розподілу поздовжніх деформацій по висоті середнього перерізу дослідних зразків різних серій залежно від величини зовнішнього зусилля.

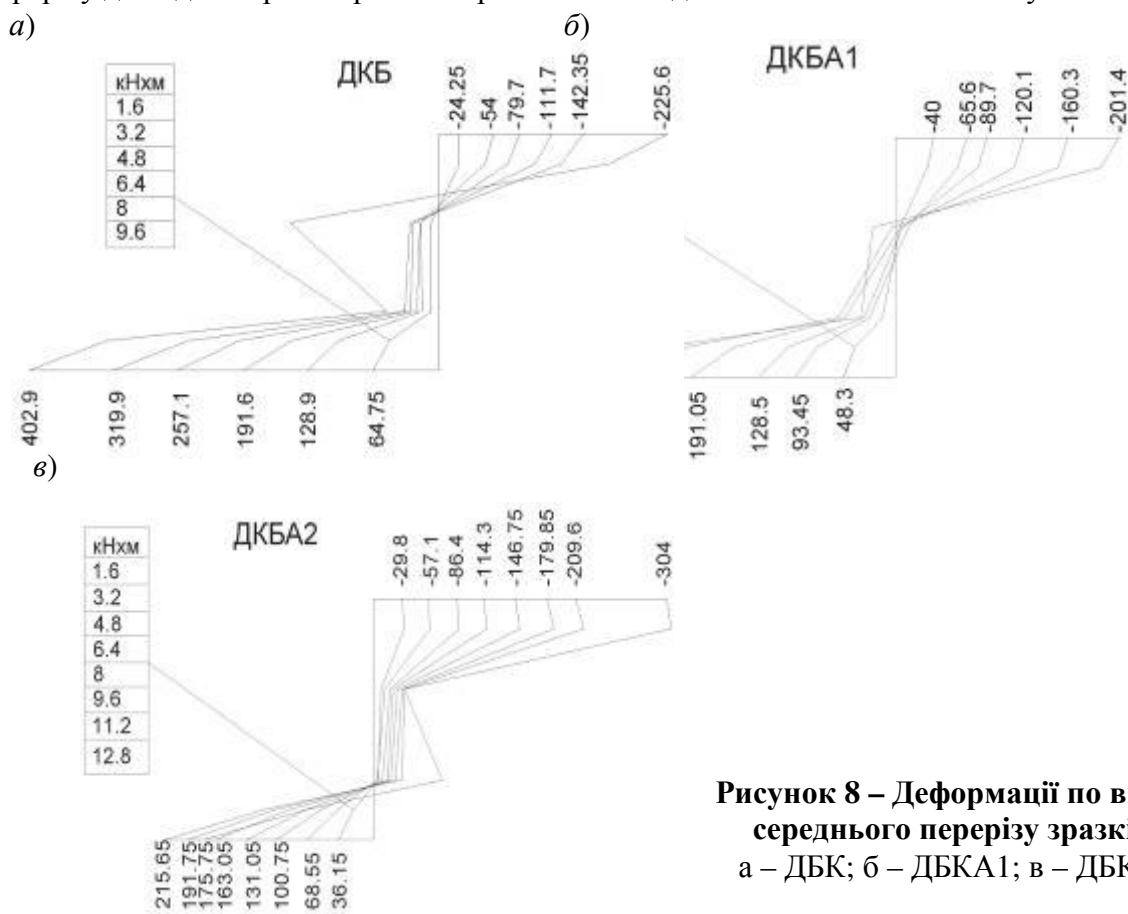


Рисунок 8 – Деформації по висоті середнього перерізу зразків:
а – ДБК; б – ДБКА1; в – ДБКА2

Висновки. Експериментальні дослідження дозволили встановити, що армування полімерною сіткою підвищує несучу здатність дерев'яних дощато-клеєних балок прямокутного перерізу на 33%, а попереднє напруження полімерного армування на 20% підвищує додатково несучу здатність ще на 10%.

Крім того, слід відмітити, що введення армування у вигляді полімерної сітки призвело до змінення положення нейтральної осі у більш напруженому поперечному перерізі досліджуваних згинальних елементів. Прогини дослідних зразків з армуванням полімерною сіткою на 15 – 20 % менші порівняно із зразками без армування.

Література

1. Чихаев Н. А. Деревянные конструкции / Н. А. Чихаев. – М., 1947. – 54 с.
2. Пособие по проектированию деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
3. ДБН В.2.6-161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 106 с.
4. Соротокін В. М. О прочности и деформативности клевого соединения арматуры с древесиной / В. М. Соротокін, А. Б. Шолохова, А. С. Фрейдин // Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций: труды ЦНИИСК. – М., 1972. – Вып. 24. – С. 40 – 46.
5. Турковский С. Б. Опыт применения клееных деревянных конструкций в Московской области / С. Б. Турковский и др. – М.: Стройиздат, 1987. – Вып. 2. – 54 с.
6. Щуко В. Ю. Оптимальное проектирование армированных деревянных конструкций / В. Ю. Щуко, С. Л. Молотовицков, С. И. Роцина // Расчет и оптимальное проектирование строительных конструкций: материалы междунар. симпозиума. – Владимир, 1996. – С. 26 – 29.
7. Щуко С. А. Технично-економічна оцінка ефективності клеєних армірованих дерев'яних конструкцій / С. А. Щуко, А. Н. Козулін // Известия вузов. – 1972. – № 11. – С. 124 – 126.
8. Роцина С. И. Длительная прочность и деформативность треугольных арок с клееным армированным верхним поясом / С. И. Роцина // Материалы обл. конф. – Владимир, 1999. – С. 35 – 37.
9. Єрмоленко Д. А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів: монографія // Д. А. Єрмоленко. – Полтава: Видавець Шевченко Р.В., 2012. – 316 с.

References

1. Chihaev N. A. Derevyannye konstruksii / N. A. Chihaev. – M., 1947. – 54 s.
2. Posobie po proektirovanii derevyannyh konstruksiy. – M.: Stroyizdat, 1986. – 216 s.
3. DBN V.2.6-161:2010. Konstruksiyi budinkiv i sporud. Derev'yani konstruksiyi. – K.: DP «Ukrarhbudinform», 2011. – 106 s.
4. Sorotokin V. M. O prochnosti i deformativnosti klevogo soedineniya armatury s drevesinoy / V. M. Sorotokin, A. B. Sholohova, A. S. Freydin // Razrabotka i issledovanie kleenyh derevyannyh i fanerlyh armirovannyh konstruksiy: trudy TsNIISK. – M., 1972. – Vyp. 24. – S. 40 – 46.
5. Turkovskiy S. B. Opyt primeneniya kleenyh derevyannyh konstruksiy v Moskovskoy oblasti / S. B. Turkovskiy i dr. – M.: Stroyizdat, 1987. – Vyp. 2. – 54 s.
6. Shchuko V. Yu. Optimalnoe proektirovanie armirovannyh derevyannyh konstruksiy / V. Yu. Shchuko, S. L. Molotovshchikov, S. I. Roshchina // Raschet i optimalnoe proektirovanie stroitelnyh konstruksiy: materialy mezhdunar. simpoziuma. – Vladimir, 1996. – S. 26 – 29.
7. Shchuko S. A. Tehniko-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti kleenyh armirovannyh derevyannyh konstruksiy / S. A. Shchuko, A. N. Kozulin // Izvestiya vuzov. – 1972. – № 11. – S. 124 – 126.
8. Roshchina S. I. Dlitelnaya prochnost i deformativnost treugolnyh arok s kleenym armirovannym verhnim pojasom / S. I. Roshchina // Materialy obl. konf. – Vladimir, 1999. – S. 35 – 37.
9. Ermolenko D. A. Ob'emnyy napruzhenno-deformovaniy stan trubobetonnih elementiv: monografiya // D. A. Ermolenko. – Poltava: Vidavets Shevchenko R.V., 2012. – 316 s.

© Єрмоленко Д.А., Іщенко М.С.
Надійшла до редакції 30.05.2016

Bondar V., DSc, Professor
Akhmednabiyev R.M., Associate Professor
Akhmednabiyev R.R., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

INFLUENCE OF FLY ASH AND SLAGS OF BOILER WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED ON PROPERTIES OF CONCRETE

The properties of fly ash and slag of boilers with circulating fluidized bed are under consideration. In the Donetsk region several new generations of boilers are operating, permitting to burn the poor fossil fuels, including coal tailings. The ash and slag produced in this case are having somewhat different properties in contrast to the conventional waste TPP.

In the study of fly ash and slag's properties, the up-to-date methods are applied, based on X-ray phase (XRD), DT and spectral analyses.

The question of the allocation of a large area of land for the storage of waste at thermal power plants. It was found that in windy weather wastes soar into the air, creating a cloud of dust and chemicals dissolved in rainwater and contaminate groundwater

The aim of the present study is to identify the influence of fly ash on the strength properties of heavy concrete and on its resistance to water saturation and drying.

The research strength of concrete based on mathematical experiment planning

Keywords: Fly ash, ash and slag, boilers with a circulating fluidized bed, strength, concrete.

Бондар В.О., д.т.н., професор
Ахмеднабієв Р. М., к.т.н., доцент
Ахмеднабієв Р.Р., аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВПЛИВ ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ТА ЗОЛОШЛАКІВ КОТЛІВ ІЗ ЦИРКУЛЯЦІЙНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

Досліджено властивості золи-винесення та золошлакових мас котлів із циркуляційним киплячим шаром. Зазначено, що у Донецькій області експлуатуються кілька котлів нового покоління, які дозволяють спалювати бідне кам'яне вугілля, в тому числі й відходи збагачення вугілля: золи і шлаки, що утворюються при цьому, мають децю інші властивості, на відміну від традиційних відходів ТЕС. Розглянуто питання виділення значної площі землі під складування відходів на території ТЕС. З'ясовано, що у вітряну погоду відходи здіймаються у повітря, утворюючи хмари пилу, а хімічні сполуки розчиняються у дощовій воді та забруднюють ґрунтові води. Дослідження властивостей зол і золошлаків проведено сучасними методами, заснованими на рентгенофазових (РФА), спектральних та диференційно-термічних аналізах. Виконано дослідження міцності бетонів на основі математичного планування експерименту.

Ключові слова: зола-винесення, золошлаки, котли із циркуляційним киплячим шаром, міцність при стиску, бетони.

Introduction: Humanity needs energy, living space, natural and artificial materials, however, these needs, as a rule, cause wastes.

Some wastes are formed in the process of energy production, for example, at burning coal in the heat power stations' boilers. Up to the present moment, at heat power stations of many world countries, coal is burnt in ordinary boilers, which efficiency is rather poor. For the latest 15 – 20 years, there have been produced boilers with a circulating fluidized bed, where coal is being burnt for a longer time than in traditional ones, therefore coal is burnt completely. The similar boilers have been operated in Ukraine since 2001 at one of the largest heat power stations in Europe – Starobeshivska HPS.

Latest study sources and publications review. Ashes and slags are divided into high-calcium ($\text{CaO} > 20 \text{ \% wt}$) and low-calcium ($\text{CaO} < 20 \text{ \% wt}$). The first category contains mostly crystalline slag, and the other one – glass and amorphous clay intrusions. High-calcium ashes are divided into low-sulfate ($\text{SO}_3 < 5 \text{ \% wt}$), obtained at coal and turfs burning, and sulfate ($\text{SO}_3 > 5 \text{ \% wt}$), obtained at burning slags [2].

There exists no unified classification of ash-slugs wastes. The first classification was made in 1953 at development of the ASTM Standard. In 1960 it was suggested to consider ashes as a puzzolanic admixture, and in 1968 natural puzzolans and ashes were combined into the common ASTM C 618 Standard with a generic name of “mineral admixtures” [3].

Fly ashes do not require any further processing being added to Portland cement or concrete. It must answer the standards requirements [1].

At manufacture of heavy-weight concrete, precast and cast (solid) concrete structures, fly ashes can replace part of sand or cement or it can be used as a separate component: active micro-filler. Slags and ash-slugs can replace sand partly or completely. At using ashes, the properties of concrete improve. Therefore, ashes have acquired a wide application and are very popular among manufacturers.

Fly-ashes and ash-slugs are normally colored in grey or light grey, close to the cement's colour, and ashes and ash-slugs, obtained after coal burning in boilers with a circulating fluidized bed, possess reddish colour tinge. This colouring is determined by transformation of ferric oxide in clay minerals at coal burning, resulting in the terracotta colour.

Products of Portland cement minerals hydration (C-S-H, hydrosilicates, ettringite, etc.) in the cement paste are calculated by means of the stoichiometric model, suggested in J.Ronald's paper [5]. Another two clinker phases (aluminates and ferrites) react with water, too, and formulate hydration products in the form of calcium hydro-aluminates and calcium hydro-ferroaluminates. As a result of aluminate's reaction with gypsum, ettringite is formed in cement paste. Later it transforms into monosulfate as a result of its reaction with carbon dioxide.

The degree of clinker materials hydration with slags depends upon many factors, such as W/C (water-cement) ratio, temperature, slag's reactive capacity and fineness of cement components, therefore, it is difficult to predict it. To model slag hydration with clinker minerals it is necessary to mix cement with various amounts of slag and study it at certain age [7].

Problem statement. The assignment of the present paper is studying the properties of fly-ashes and ash slags of boilers with a circulating fluidized bed and their influence on the concrete strength properties.

Basic materials and results. The true density of fly-ash and ash slags was determined by the traditional method, it equals $2,47 \text{ g/cm}^3$. The bulk density of fly-ashes makes 800 kg/m^3 , and that of ash slags – 1320 kg/m^3 . Analysis of the ash slags granulometric composition answers the fineness modulus requirements: $M_f = 1,1$. The fly-ash granulometric composition was studied by means of the laser particle analyzer Cilas 990 and it made $0,2 - 500 \mu\text{m}$. Fly-ashes mostly contain particles sizing less than $82 \mu\text{m}$.

For the more detailed study of fly-ashes and ash slags properties the technology of X-ray diffraction analysis (XRD), spectroscopy and differential thermal analysis (DTA) were used.

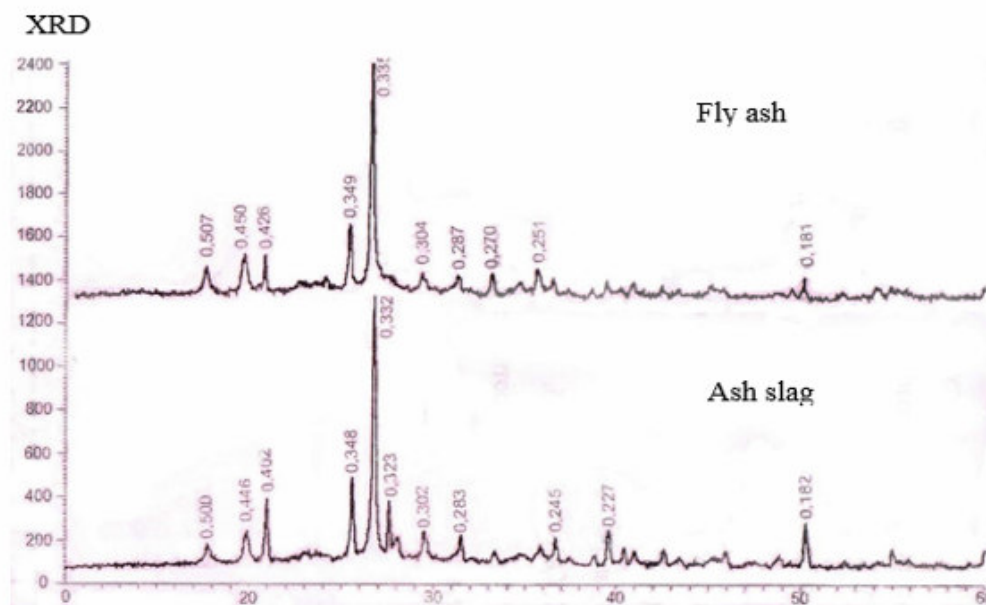


Figure 1 – X-ray diffraction pattern of fly ash and ash slag

Table 1 – Chemical composition of fly-ash and ash slag of boilers with a circulating fluidized bed at Starobeshivska HPS

Composition	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	ZnO	In ₂ O ₃
Fly-ash	26,89	48,95	7,36	3,90	5,17	0,81	6,12	0,04	0,76
Ash slag	5,03	16,07	5,32	1,62	68,64	0	3,32	0	0

As to the amount of CaO, fly-ash belongs to low-calcium (CaO <20 % wt), i.e. to acidic ashes; as to the content of SO₃ - to sulfate (SO₃ > 5 % wt) ashes. Ash slags belong to high-calcium (CaO > 20 % wt), i.e. to basic ashes; as to as to the content of SO₃ - to sulfate (SO₃ > 5 % wt) ashes.

As it is shown in Table 1, fly-ash and ash slag do not contain the unburnt coal part, thus eliminating restrictions for their application in heavy weight concretes. The most detrimental component is sulfur gas which can be combined with other oxides as anhydride CaSO₄ or ferrous sulfate FeSO₄. In the both cases, sulfur compounds can induce delayed ettringite formation, which can cause destruction of the set cement structure.

In the course of the present research the influence of fly-ash on heavy weight concretes' water saturation and drying resistance was studied. The mathematical experiment planning method was applied for the study. The following factors were considered variables: X₁ – cement content; X₂ – fly-ash content, which varied from 0 to 1; X₃ – content of superplasticizer «Fluid Premia 196» based on modified polycarboxylates. The study was performed on the test cubes with the edge length of 100 mm. To manufacture the test cubes, small fraction granite crushed stones of 5 – 10 mm, gravel sand with the fineness modulus M_f = 1.1, mark 500 cement of Balakliya plant, Kharkov region, and fly-ash of boilers with a circulating fluidized bed were applied. The samples were manufactured in the metal forms and stored in the laboratory conditions for the 28 days period.

After setting, the basic samples were tested for strength at compression. The results of the test were processed by the «STATISTICS – 10» program and are presented in Fig. 2.

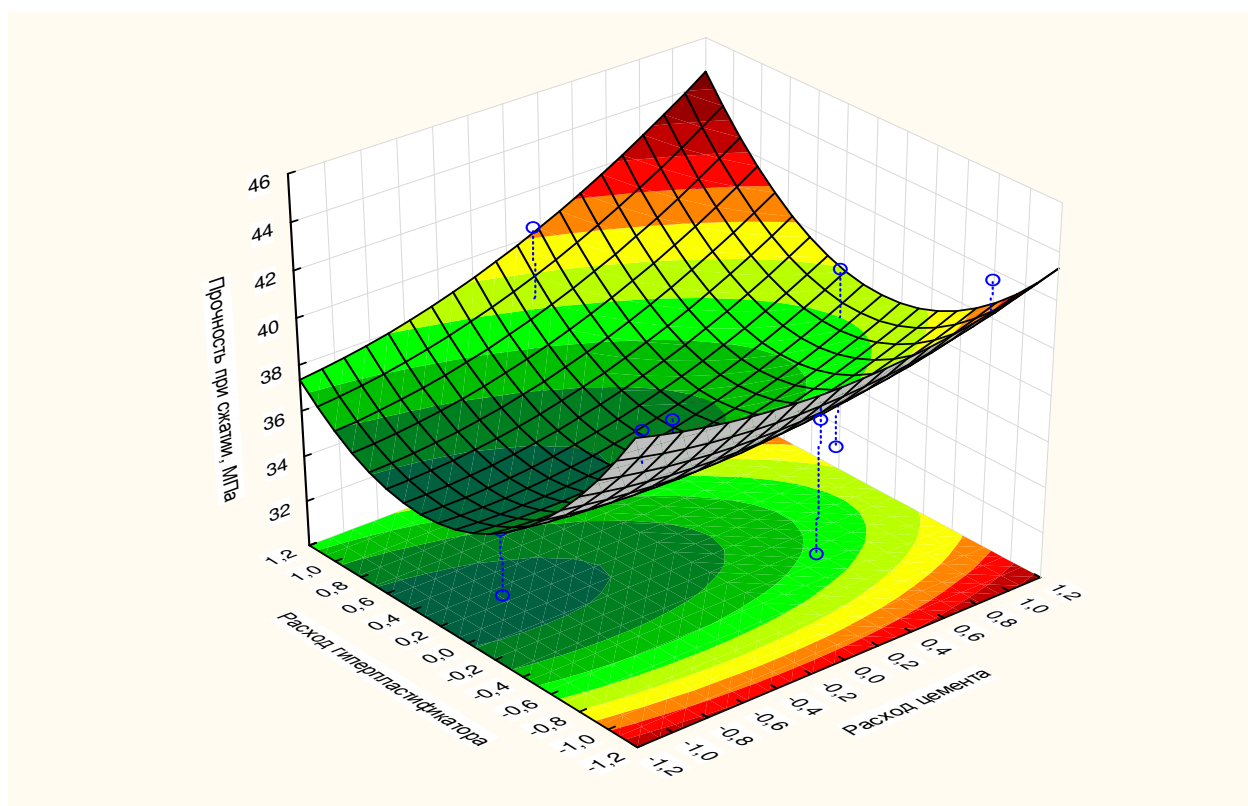
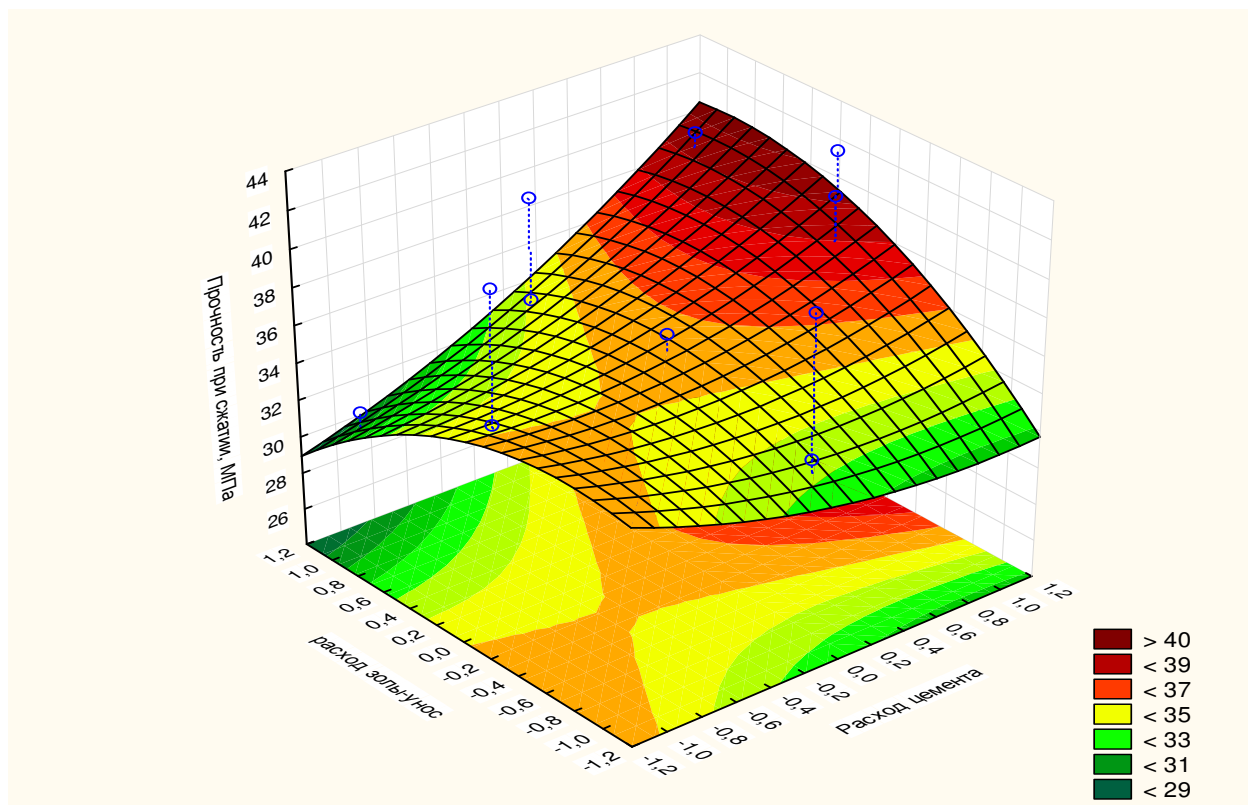


Figure 2 – Surfaces of the variable parameters influence on strength at compression

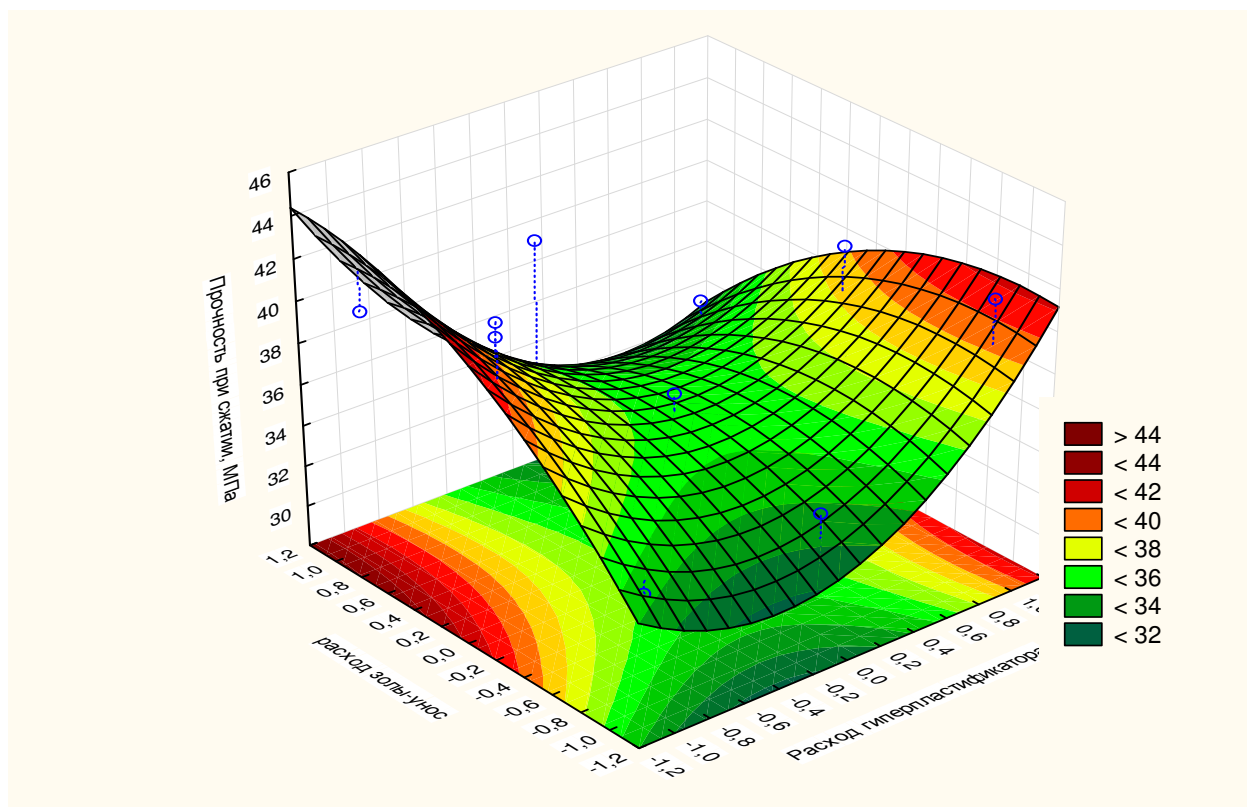


Figure 2 (continued) – Surfaces of the variable parameters influence on strength at compression

Three series of samples, where the fly-ash part was of the maximum, minimum and medium value, were tested for water saturation and drying resistance. The basic samples were submerged into water for the 24 hours period, and the control ones remained stored in the laboratory. Then the samples were drawn out of the water, dried during the 24 hours period at the temperature of 110 °C. After 50 cycles they were tested for strength at compression. The test results are presented in Fig. 3.

The diagrams demonstrate that with increase of the cement content the concrete strength grows at compression, just as it was expected. However, the influence of fly-ash on the concrete strength at compression is different. Thus, at the minimum and maximum values of fly-ash content, the concrete strength at compression is lower, and at the medium fly-ash content values the concrete strength at compression insufficiently grows. Obviously, at the medium values, concrete acquires the maximum consolidation, due to which concrete strength at compression grows.

The presence of plasticizer contributes to the concrete strength growth at compression. With increase of the plasticizer content within the experiment, the concrete strength at compression is ratably growing. At analyzing the common influence of the fly-ash and plasticizer content, one can allocate the range of their best content (the medium fly-ash and plasticizer content) which makes 1.0% of the cement weight.

The diagram shows that after testing for water saturation and drying resistance the basic samples demonstrated reduction of strength at compression by 4,5 – 11,5%. It must be noted that concrete acquires high density at using fly-ash, which contributes to lower water saturation.

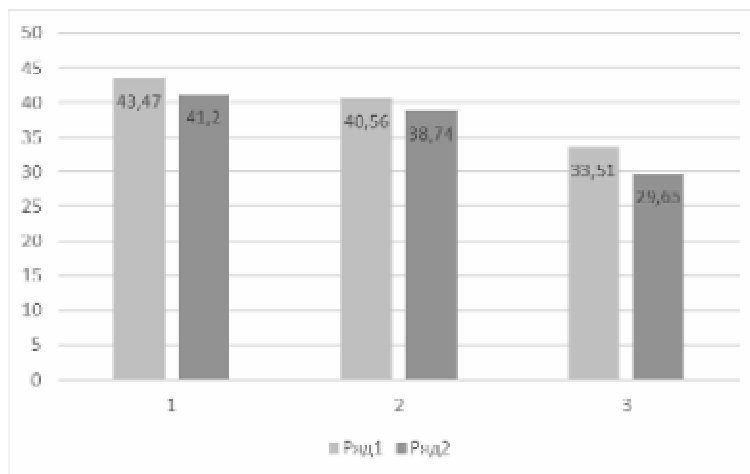


Figure 3 – Comparative analysis of strength at heavy weight concretes compression after 50 cycles of moisturizing and drying:

1 – fly-ash free samples; 2 – samples containing ash and sand 1:1;

3 – samples where sand is completely replaced with fly-ash.

Column 1 – control samples; Column 2 – basic samples

Thus, it was determined that heavy weight concrete strength reduced by 23% with sand completely replaced with fly-ash at the age of three months. Obviously, at the above age, microsilica suspension is still inert to the Portland cement hydration products.

Some ashes and ash slag oxides are known to react with Portland cement clinker minerals or with their hydration products [7]. Portland cement acquires strength at setting mainly due to calcium silicates (C_3S i C_2S) hydration. Hydration results in the formation of calcium silicate hydrates of the C-S-H type and calcium hydroxide CH. The latter is able to react with silicon oxide, contained in ashes and ash-slags of heat power stations, and to form low-basic calcium silicate hydrates [5].

Thus, the more ashes and ash slags of silicon oxide are in the amorphous state, the more low-basic calcium silicate hydrates are formed. However, the above reaction is running slowly at ordinary temperatures, and before reaching the brand age of concrete setting, ashes and ash slags remain in concrete as an inert filler [7]. This fact can explain reduction of concrete strength in the diagrams.

Superplasticizer «Fluid Premia 196» helps to concrete strength increase at compression, and its best content makes 1.0 – 1.2% of the cement weight. The similar effect is described in V. M. Malhotra's article [4].

When sand is replaced with fly-ash of boilers with a circulating fluidized bed, heavy weight concretes' water saturation and drying resistance does not reduce [6]. In the course of the experiment no cracks in the samples was found, thus testifying to the absence of the internal stress. It is fair to assume that mineral ettringite had already been formed in the process of concrete setting, however, this hypothesis requires further verification by the respective research.

Conclusions. It was determined that ashes and ash slags of boilers with a circulating fluidized bed do not contain unburnt coal particles. As to their chemical composition, it is similar to that of clay, however, they have a high water demand. Concrete strength, when sand is replaced with fly-ash, is reducing at the initial setting terms, though the concrete density is growing. Concrete water resistance does not reduce with introducing of ashes and ash slags if compared to traditional sand.

References

1. ДСТУ Б В.2.7-205:2009. Зола-винесення теплових електростанцій для бетонів. – К., 2009.
DSTU B V.2.7-205:2009. Zola-vinesennya teplovihi elektrostantsiy dlya betoniv. – K., 2009.
2. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков / П. В. Кривенко, Е. К. Пушкарева, В. И. Гоц, Г. Ю. Ковальчук. – К. : КНУБА. – С. 19–29.
Tsementy i betony na osnove toplivnyh zol i shlakov / P. V. Krivenko, E. K. Pushkareva, V. I. Gots, G. Yu. Kovalchuk. – K. : KNUBA. – S. 19–29.
3. *Characterisation of Solid Wastes from Circulating Fluidised Bed Combustion* / E. I. Antone, G. G. Ross, E. E. Berry, R. T. Hemmings, R. K. Kissel. – 1995. – V. 18. – P. 180–190.
4. *Malhotra V. M. Innovate applications of superplasticizers in concrete – a review* / V. M. Malhotra // *Proc. Of the Mario Collepari Symposium on Advances in Concrete Science and Technology.* – Rome, Italy, 1997. – P. 271–314.
5. *Ronald J. E. Hydration of cement mixtures containing contaminants* / J. E. Ronald // *Design and application of the solidified product.* – University of Twente, 2001. – P. 26–36.
6. *Swamy R. Designs of Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete* / R. Swamy // *Proc. Of the Mario Collepari Symposium on Advances in Concrete Science and Technology.* – Rome, Italy, 1997. – P. 127–134.
7. *Chen W. Hydration of slag cement. Theory, modelling and application* / W. Chen. – *Dissertation to obtain the doctor's degree.* – University of Twente, 2007. – P. 65–70.

© Bondar V., Akhmednabiyev R.M., Akhmednabiyev R.R.
Received 10.05.2016

Fenko O., PhD, Associate Professor
Krupchenko O., PhD, Associate Professor
Yurko I., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

THE INFLUENCE OF ITS OWN STRESSES ON CONCRETE STRENGTH UNDER COMPRESSING

The results of experimental studies of the impact own stress unevenly distributed over the cross section, for strength of brittle materials were presented. Changes in the distribution of stresses in own cross-section caused by uneven shrinkage of concrete samples were analyzed. The reasons for own impact stresses are unevenly distributed over the cross-sectional sample for strength of concrete compressive were justified.

Also the effects of stress on its own strength of concrete at its moisture were considered. Described impact on own stress compressive strength is confirmed by experimental results obtained by other authors. Shows the distribution of stresses in its own cross section at its water saturation and drying is not only concrete and also other porous materials.

Keywords: own stresses, strength of concrete, water saturated concrete, shrinkage, creep.

Фенко О.Г., к.т.н., доцент
Крупченко О.А., к.т.н., доцент
Юрко І.А., к.т.н., доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВПЛИВ ВЛАСНИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ПРИ СТИСКУ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу власних напружень, нерівномірно розподілених по перерізу, на міцність крихких матеріалів. Проаналізовано зміни розподілу власних напружень у поперечному перерізі, викликані нерівномірною усадкою бетонних зразків. Обґрунтовано причини впливу власних напружень, нерівномірно розподілених по поперечному перерізу, на міцність бетонних зразків при стиску.

Також розглянуто результати впливу власних напружень на міцність бетону при його зволоженні. Описаний вплив власних напружень на міцність при стиску підтверджується результатами експериментальних досліджень, отриманими іншими авторами. Наведений розподіл власних напружень по поперечному перерізу при водонасиченні та висушуванні стосується не лише бетонів, а й інших пористих матеріалів.

Ключові слова: власні напруження, міцність бетону, водонасичення бетону, усадка, повзучість.

Introduction. The strength of the concrete varies over time and depends on the storage conditions, moisture, drying and from their own stress caused by shrinkage, swelling, creep during prolonged load.

The influence own structural stresses on the strength of concrete, caused by long compression or tension continued, was investigated in many experiments. The influence unevenly distributed over the cross-section of own stresses on the strength of concrete hasn't been studied, although it is advisable to consider a factor that determines the strength of concrete.

Review of recent sources of research and publications. The strength of concrete depends on many factors, which primarily include the composition of concrete and conditions of its hardening [1, 2], the age of concrete [3], the temperature and moisture of the environment [4 - 8], and therefore identify separately impact their own stress on the strength of concrete is difficult. To identify impact of their stresses that are distributed unevenly over the cross-section of the strength of the material, is logical to do experiments on ageless and nonporous material. Metal can be regarded as such material. [9].

Commonly known sequence of destruction metallic (fragile) samples. Destruction compressive samples begins with external layers, while a tensile - with internal. This sequence can be explained by the destruction of their own stresses that appear during casting (rolling) metal. During hardening metal samples when they are casting, cooling starts from external layers, so their temperature lower than internal. The external layers are compressed and the internal layers are stretched when aligning temperature. During the testing such samples by compression stresses in their external layers and stress from external loads (one sign) will be added, so the destruction of the sample will start with external layers. Destruction will start from the middle of the sample when tested in tension and internal layers are overwhelmed.

To confirm the given conclusions, it is expedient to make and test samples from the field opposite in field of sign their stress compared with the tension that arises when «natural» cooling. So that external layers are stretched and d internal layers are compressed.

These experiments were conducted on samples of fragile (silica) aluminum. Samples with a diameter of 30 mm and height 60 mm within the limits each party were cast of one melt. Samples of "natural" production were cast as steel cylinders and cooled with external layers. Other samples are spilled in the same cylindrical form with steel installed in the center of steel tubes.

Forms were installed in the electric heating device. Before bottling duralumin forms is heated to the melting temperature of duralumin, and the tube was served water at room temperature. Therefore, cooling the sample passed starting from the internal layers during its solidification. This created its own tensions field opposite in sign to the previous.

The test results confirmed previous conclusions about the impact own stress on strength: samples with opposite "natural" field of its own tensions were stronger than samples "natural" production on average by 20% [9], that impact own stress unevenly distributed over the cross-section in an average of 10%.

Parts of the common problems that earlier unsolved. Bold still unsolved aspects of the problem. The influence stress on own compressive strength of concrete and other porous materials were remained unexplored.

Problem statement. Determining the impact unevenly distributed over the own section stresses on strength of concrete in compression.

Main material and results. Difficulty its own experiments on the impact of stresses caused by shrinkage, on strength of concrete consists in that the intensity and distribution of shrinkage in cross section depends on the concrete storage conditions of samples.

Shrinkage begins and proceeds more intensively on surface of the sample and gradually passes to the internal layers during storage samples in air-dry environment. On the surface of

the sample occur shrinkage stretching stress during reducing its size (due to shrinkage). They will compress the concrete in the nucleus (center) of the sample, namely they create conditions for the appearance of cracks on the surface of the sample. At the beginning of sample loading force compression external layers are not compressed to the load that can compensate them own stretching tension.

The interior of the sample which is compressed own stresses to the application of external force under load compression force will have larger (total) strain than external layers, and therefore should determine the strength of the entire sample. However, internal part, though overloaded, but is in the holder, which was created under loaded outer layers. As a result of this sample as a whole has to withstand the external load more than the sample without its own tensions.

Is well known and the effect of increasing the strength of concrete on drying (it is confirmed by numerous experiments). Continuing analysis of the impact of shrinkage (unevenly distributed over the section) stress we can predict possible reduction of concrete strength in time.

In the above state of stress creep of concrete in the outer layers arises from a tensile, and in internal - from compression. Parallel to this shrinkage is moving to the internal layers and eventually reaches the center of the sample. During this period, the intensity of the shrinkage in the outer layers decreased concrete has increased size due to a tensile creep his own stresses.

Internal layers (core sample) being reduced from shrinking in size, compress external layers themselves being in stretched condition. Characteristically, this process amplifies reduction obtained by an internal part of the creep of compressive shrinkage in the initial period.

When you load such a sample will be overwhelmed by the force of the compression outer layers, which are without a holder, and, of course, like the be destroyed at a lower load than the sample without its own tensions. Based on the above it can be concluded about the possible reduction of the strength of concrete in time. This conclusion is confirmed by the change in time diagrams of concrete strength in Fig. 1.

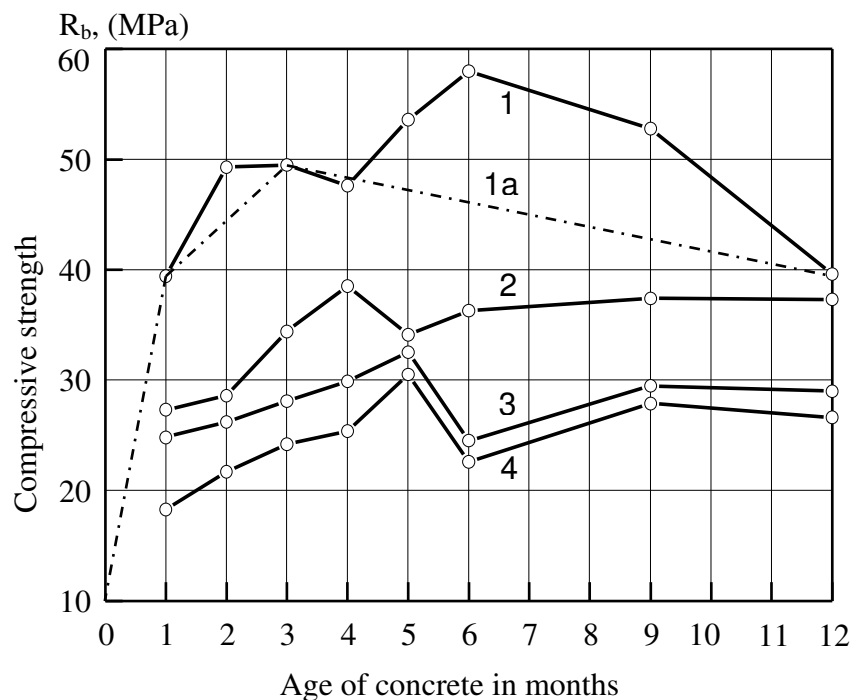


Figure 1 – Diagram of changes over time concrete strength (by S. Mironov)

There is a temporary reduction in the strength of concrete in the experiments carried by S. Mironov [1] out in all concretes (and natural hardening, and steaming).

After a while shrinkage of concrete attenuated, appears relaxation of its own tensile stresses in the middle (core) sample and stress compression in external layers, that reduces difference stress in the external and internal layers, and thus decreasing their negative impact on strength of concrete in compression. There is a kind of "recovery" (increase) the strength of concrete.

In Figure 1 shows the diagram changes cube compressive strength of concrete some samples. Repeated reducing its strength can be further structural relaxation caused its own stress [3]. This reduction can't be based on concrete properties (size gravel, water-cement ratio, hardening conditions, etc.) and storage conditions.

Summarizing the analysis of the impact of shrinkage stress (unevenly distributed over the cross section) on strength concrete in compression, it can be concluded that the strength of the concrete should first increase, then there may be a temporary decrease in strength, and then again an increase in compressive strength. These conclusions are fully confirmed experiments conducted by S. Mironov and others.

Diagrams would be different depending on the method of conducting experiments. For example, if you construct diagrams by three points, the second increase concrete strength will not happen (Fig. 1). These results were obtained in experiments of V. Sytnyk and Y. Ivanov [2], where the strength of concrete determined in four stages (Fig. 2, Fig. 1), and not eight as in experiments S. Mironov.

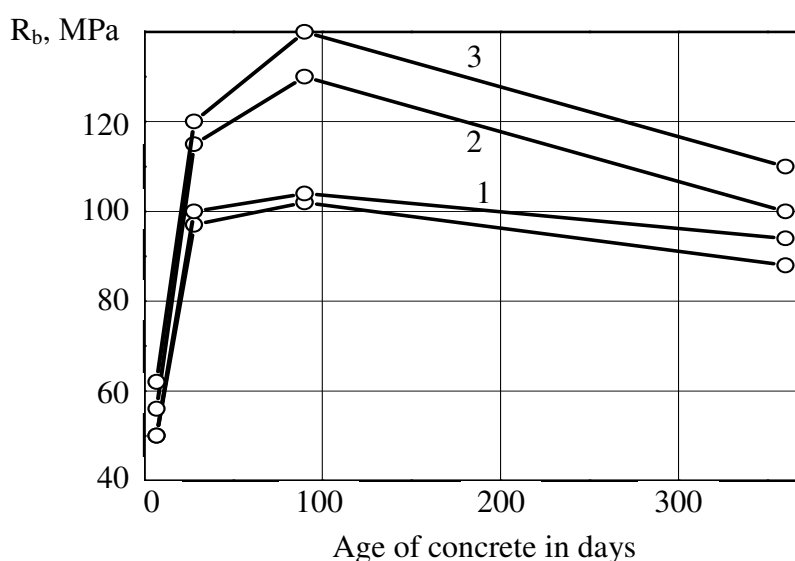


Figure 2 – Chart changing concrete strength (1), mortar (2) and cement (3) in time (based on the results of experiments V. Sytnyk, Yu. Ivanova)

In the water saturation of concrete samples will be shown the opposite effect. The process begins with moistening external layers. Concrete swells (increase in size), cause the own stress in the outer layers of compression and stretching in internal (central). When compression of the sample overwhelmed are external layers, but they are in a holder (intrinsic) because the sample begins with destruction of external layers, and as a result, the strength of sample will be less than the strength of the same sample without its own tensions caused by swelling.

In such a state of stress appears in concrete creep compressed and stretched external layers in the interior of the sample, this leads to a partial relaxation its own stresses. Reducing own stress reduces their negative influence and strength of concrete after a temporary recession increased.

Further swelling the central process (internal) of the sample field creates own stresses opposite to described previously. The emergence of the field own stress due to the fact what concrete creep at the beginning of water saturation led to reducing the size of compressed concrete in the outer layers and to increase its size in an internal part the sample.

Swelling of the internal layers sample (which is later on external) continues to increase its size by stretching at the same time reduced in size outer layers. This leads to more increase the strength of concrete.

Creep of concrete (compressed in the core section and stretched in the outer layers) and the stress relaxation reduces own positive effect, because the strength of concrete will gradually decrease. Depending on the technology production and storage conditions of samples reducing the strength can occur in very different terms. Reproduced character changes compressive strength of concrete in his water saturation confirmed by experiments of various authors [4, 5] analyzed Z. Tsilosani [6].

Invokes the interest that describes the impact of water saturation on compressive strength is not only concrete and other porous materials. In Figure 3 shows the results of experiments Russellya [7]. He studied the effect moistening gypsum on its compressive strength.

As shown in Figure 3 sequence of changes in strength gypsum while water saturation by compression coincides with the rationale described own impact stresses. Similar results were obtained in experiments of E. Shchukin, M. Dukarevycha and others [10], who studied the changes in strength magnesium hydroxide at saturation with water and ethyl alcohol (Fig. 4).

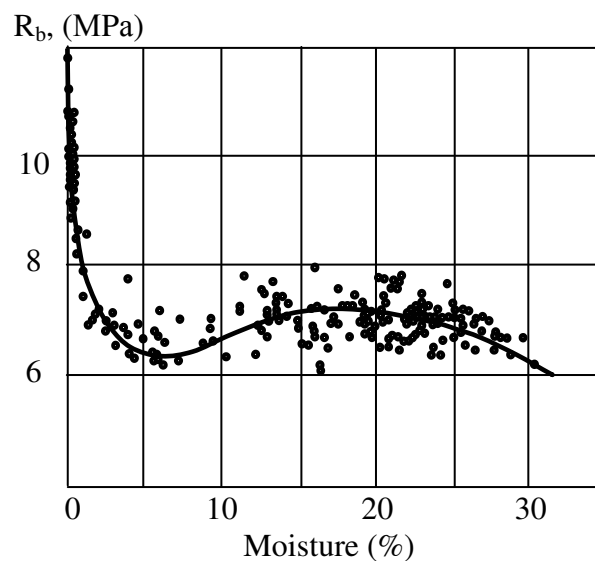


Figure 3 – Diagram of changing strength gypsum sample compression depending on moisture (based on experiments Russellya [7])

Reasons water saturation influence on strength porous materials using experimental results of various researchers [6] analyzed in the research Z. Tsilosani. Reasons impact were limited mainly to adsorption and capillary compression, but such factors influence on strength of water does not exhaust all possible cases of its action on concrete.

It is no accident in the 60 - 70s of XX century in the press there were conclusions of some researchers (V. Gorokhov, M. Elbakidze and others) about own involvement to stress the impact of water saturation and drying on strength of concrete in compression. It is also necessary to note research S. Shestoperova and T. Lyubimov [11] about the impact of water saturation and drying of concrete on his compressive strength. The authors have concluded experiments «change strength and drying moisture samples infinitely negotiable», which excludes the effect of additional hydration of cement.

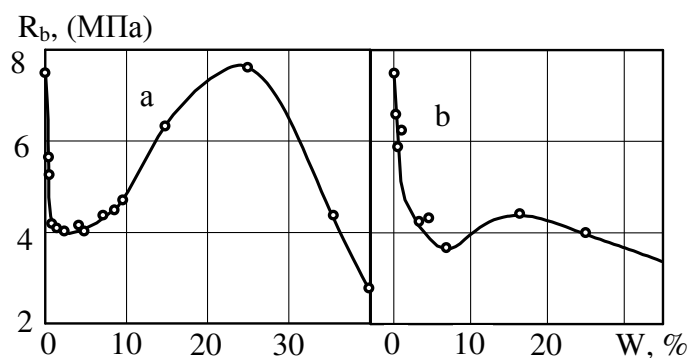


Figure 4 – Diagram of impact of water saturation (a) and ethyl alcohol (b) magnesium hydroxide on its compressive strength

Similar results were obtained in experiments of K. Mileykovskoyi [12], who investigated the «moistening effect on the strength of concrete air-dry hardening».

The influence moistening on the strength of concrete author relates with the development of strains swelling. It is noted also that with the termination of volume decrease swelling strains concrete strength is terminated, and prolonged water saturation strength is fully restored.

From this, we can conclude that the recovery of compressive concrete strength is own relaxation after the stress (as discussed earlier).

It is necessary to also be noted that in experiments of various authors own physical mechanical impact stresses on the strength of concrete is not provided, and for the final solution of this issue required as an experimental and further theoretical research.

Conclusions. The above analysis own stresses in the concrete, unevenly distributed over the cross section (caused by shrinkage or swelling), confirms and justifies their impact on the strength of concrete in compression. Described distribution of own stress in cross-section while water saturation and drying does not concern only concrete but also other porous materials.

References

1. Миронов С. А. Расчет прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов, И. М. Френкель и др. – М. : Стройиздат, 1973. – 94 с.
Mironov S. A. Raschet prochnosti betona pri proparivanii i posleduyushchem tverdenii / S. A. Mironov, I. M. Frenkel i dr. – M. : Stroyizdat, 1973. – 94 s.
2. Сытник В. И. Экспериментальные исследования прочности и деформативности высокопрочных бетонов / В. И. Сытник, Ю. А. Иванов // Высокопрочные бетоны / НИИСК Госстроя СССР. – К. : Будівельник, 1967. – 122 с.
Sytnik V. I. Eksperimentalnye issledovaniya prochnosti i deformativnosti vysokoprochnykh betonov / V. I. Sytnik, Yu. A. Ivanov // Vysokoprochnye betony / NIISK Gosstroya SSSR. – K. : Budivelnik, 1967. – 122 s.
3. Фенко Г. А. Влияние структурных напряжений на изменение прочности бетона во времени / Г. А. Фенко, А. Г. Фенко // Бетон и железобетон в Украине. – 2002. – № 3. – С. 2 – 6.
Fenko G. A. Vliyanie strukturnykh napryazheniy na izmenenie prochnosti betona vo vremeni / G. A. Fenko, A. G. Fenko // Beton i zhelezobeton v Ukraine. – 2002. – № 3. – S. 2 – 6.
4. Glucklich J. Effect of Moisture Content on Strength and Strain Energy Release Rate of Cement Mortar / J. Glucklich, U. Korin // J. Amer. Ceram. Soc. – London. – 1975. – Vol. 58. – №11 – 12. – P. 517 – 521.
5. Pihlajavaara S. E. Festigkeitserhung bei Austrocknung und Festigkeitsverminderung bei Durchfeuchtung des Betons / S. E. Pihlajavaara // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17. – 1968. – S. 1572 – 1974.

6. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона / З. Н. Цилосани. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 230.
Tsilosani Z. N. Usadka i polzuchest betona / Z. N. Tsilosani. – Tbilisi: Metsniereba, 1979. – S. 230.
7. Russell J. J. Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Druckfestigkeit Kleiner Gipswürfel / J. J. Russell. – Berlin: Zement-Kalk-Gips. – 1960. – № 8. – P. 345.
8. Chen X. Effect of moisture content on compressive and split tensile strength of concrete / X. Chen, W. Huang, J. Zhou // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. – 2012. – Vol. 19. – P. 427 – 435.
9. Фенко О. Г. Вплив власних напружень на міцність матеріалів / О. Г. Фенко, Г. О. Фенко // *Ресурсно-економічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць*. – Рівне: НУБГП, 2013. – Вип. 25. – С. 466 – 471.
Fenko O. G. Vpliv vlasnih napruzhen na mitsnist materialiv / O. G. Fenko, G. O. Fenko // *Resursnoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudi: zbirnik naukovih prats*. – Rivne : NUVGP, 2013. – Vip. 25. – S. 466 – 471.
10. Об адсорбционном понижении прочности высокодисперсных пористых структур / Е. Д. Шукин, М. В. Дукаревич, С. И. Конторович, П. А. Ребиндер // *Докл. АН СССР*. – 1966. – Т. 167. – № 5. – С. 1109 – 1111.
Ob adsorbtsionnom ponizhenii prochnosti vysokodispersnyh poristyh struktur / E. D. Shchukin, M. V. Dukarevich, S. I. Kontorovich, P. A. Rebinder // *Dokl. AN SSSR*. – 1966. – T. 167. – № 5. – S. 1109 – 1111.
11. Шестоперов С. В. Зависимость механических свойств мономинерального вяжущего трехкальцевого алюмината от влажности образцов / С. В. Шестоперов, Т. Ю. Любимова // *Докл. АН СССР*. – 1952. – Т. 86. – № 6. – С. 1187 – 1190.
Shestoperov S. V. Zavisimost mehanicheskikh svoystv monomineralnogo vyazhushchego trehkaltsievogo alyuminata ot vlazhnosti obraztsov / S. V. Shestoperov, T. Yu. Lyubimova // *Dokl. AN SSSR*. – 1952. – T. 86. – № 6. – S. 1187 – 1190.
12. Милейковская К. М. Влияние водонасыщения бетона на его прочность и деформации / К. М. Милейковская // *Гидротехническое строительство*. – 1960. – № 4. – С. 28 – 34.
Mileykovskaya K. M. Vliyanie vodonasyshcheniya betona na ego prochnost i deformatsii / K. M. Mileykovskaya // *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo*. – 1960. – № 4. – S. 28 – 34.

Fenko O.G., Krupchenko O.A., Yurko I.A.
Received 12.05.2016

Nyzhnyk O., ScD, Senior Research Fellow
Dryzhyruk Yu., PhD, Associate Professor
Boyko A., student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

ORGANIZATION AND TECHNOLOGICAL STUDIES ON BUILDING RECONSTRUCTION USING CONVENTIONAL AND MODERN METHODS

This article represents a short organization and technological analysis of finalizing the construction, using both conventional work materials and modern lightweight structures of fast assembling. The studies are done on the basis of «L» teaching block, which is in Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Results of the study showed that it needs reconstruction. All-inclusive organization and technological and economical comparison of these two variants of the buildup proved that it is more advanced to carry out building works using modern technologies, even though they need more manpower effort and are more expensive. Nowadays we can observe a tendency to widely use fast mounting structures and it will only become more wide-spread in the future, which will inevitably result in both technologies and engineer construction equipment cheapening.

Keywords: *reconstruction, erecting, conventional work materials, light gauge steel framing, thermal modernization.*

Нижник О.В., д.т.н., с.н.с.
Дрижирук Ю.В., к.т.н., доцент
Бойко А.В., студентка

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАДИЦІЙНИХ ТА НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ

Подано короткий організаційно-технологічний порівняльний аналіз добудови об'єкта з використанням традиційних матеріалів та сучасних легких конструкцій швидкого зведення. Дослідження виконано на прикладі навчального корпусу «Л» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, який на основі результатів обстеження потребує реконструкції. Комплексне організаційно-технологічне та економічне порівняння двох варіантів надбудови довело, що, незважаючи на більшу трудомісткість та вартість, перспективним є варіант зведення будівлі за сучасними технологіями, оскільки вже зараз складається тенденція до широкого застосування конструкцій швидкого монтажу, й у майбутньому їх масовість лише зростатиме, що неминуче призведе до здешевлення технологій та засобів механізації.

Ключові слова: *реконструкція, зведення, традиційні матеріали, легкі конструкції, термомодернізація.*

Preface. Nowadays reconstruction of building is becoming more and more essential. At present there are plenty of edifices, erected at the times when low energy prices made it possible to hasten the construction, lower the prime cost, and reduce specific consumption of materials and manpower effort. For this reason a great body of buildings bears the signs of extremely low degree of heat insulation which results in significant heat loss needed to maintain necessary microclimate parameters. Again, defects are multiplying themselves during years of exploitation which leads to early amortization of constructions.

The only way to prolong the useful life of such buildings is to reconstruct them. This supposes thermal modernization of external protective grates, building up more floors, and replacement of certain worn-out parts of the construction with the new ones. At the preparation level the most important task is to choose proper organization and technological scheme, which should be developed with account for existing building condition, the most productive sequence of work, and materials used. At this stage it becomes possible to use such advanced modern materials as light gauge steel framing, cast reinforced concrete and gas-concrete blocks along with conventional materials such as brick and precast concrete. It is rational and thorough choice of materials and method of building activity that allows not only to cheapen and accelerate building reconstruction, but to grant its safety during whole useful life.

Survey of the latest studies and publications. The subject of the building reconstruction technology is studied in the works of great number of scientists [1, 2]. They tend to reduce the use of building cranes, especially if there is an existing erection [3]. The researchers also actively work on improving light gauge steel framing by filling hollows with light concretes in order to reinforce their firmness and strength [4]. Technology of erecting buildings with the help of light gauge steel framing is extensively developed abroad. [6, 10, 11, 12].

Focus on the unsolved parts of the major problem. Although restoration process nowadays implies using both conventional and latest materials, thorough comparative organization and technological analysis of these two methods hasn't been carried out. Consequently, building contractors, designers and customers don't have an opportunity to quickly judge about costs and efficiency of the chosen method themselves. This has a negative effect on the constructing process as a whole and prevents from introducing innovative methods into building industry.

Problem formulation. Taking into account the fact that building sector urges to receive intrinsic data on how efficient these two restoring methods are, a need in integral assessment of conventional and modern ways of constructing arises.

Baseline and results. To carry out comparative analysis we chose «L» teaching block, which is in Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Inspection results have shown that the edifice demands full and complete renovation [7, 8]. This also involves adding another storey to the existing building (Fig. 1).

At present the «L» teaching block is represented by a two-storeyed Γ -shaped building with the measurements of 45,8x66,8 in the outer axles. The edifice has a basement storey and an apparatus floor with an overflow section at 9,675 m.. The structural diagram of the building is non-carass with spine walls, foundation is in the shape of dimension stone footing, walls are made of loam bricks, bonded by mortar and are 510mm thick, the outer face is decorated with the ceramic wall tile. Flooring is made from the hollow core slabs of different shapes and sizes; roofing is assembled of jointed ribbed slabs, sized 1,5x6 m. It bears against reinforced concrete double T-rails 2B012-5 with a beam span of 12m and a step of 6 m. and is located above the laboratory (axes B-Д). The pitch makes 7°. Roofing is soft, made from coarse-grit ruberoid; canalization is external, unstructured.

Height from the finished floor level to the bottom of the baseplate is 8,25 along E axis and 9,76 along B axis. The laboratory is equipped with a travelling crane with the capacity of 10 te and an overhead-track hoist with the capacity of 1 te.

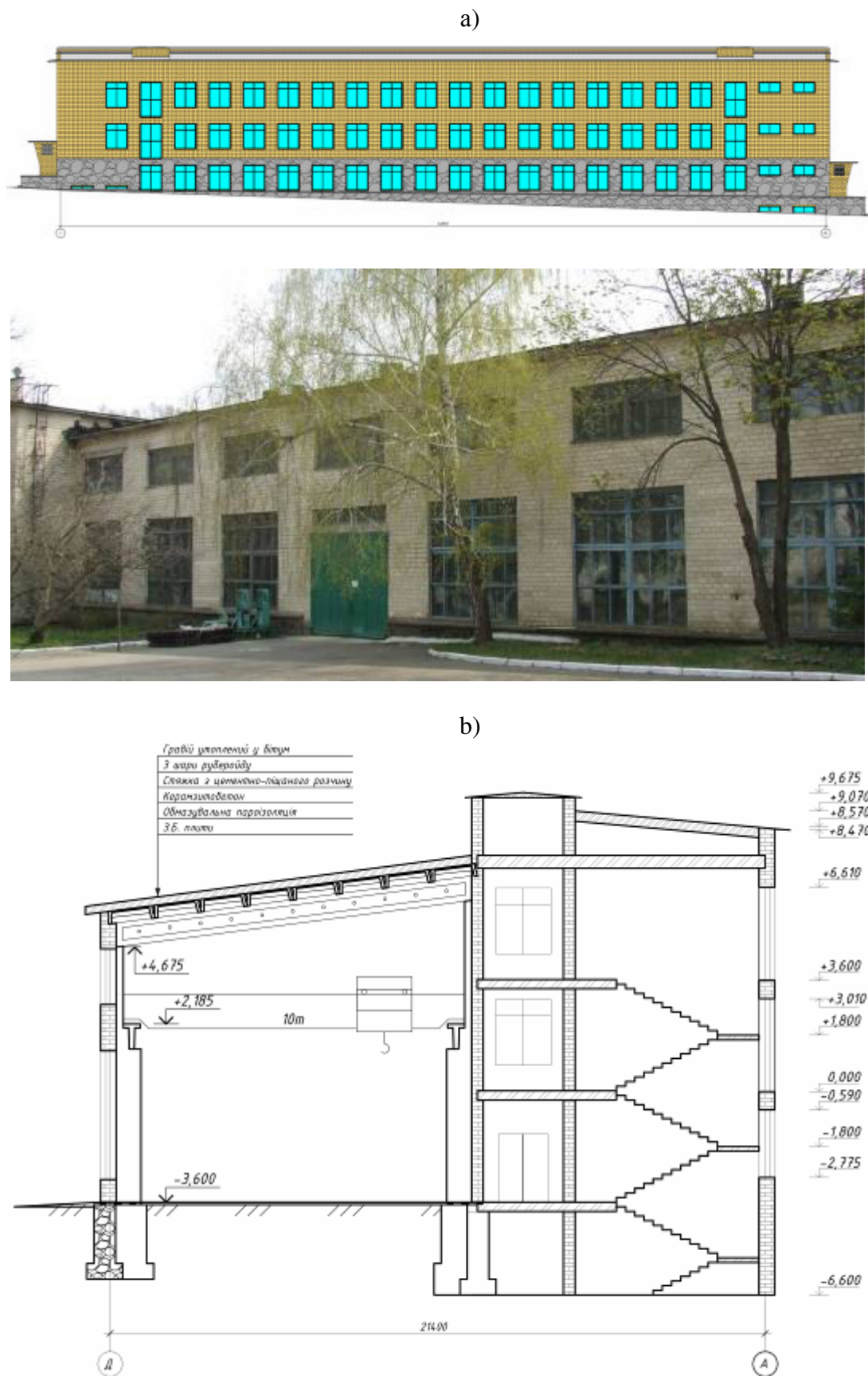


Figure1 – Front elevation and overall view (a) and sectional elevation (b) of «L» teaching block before reconstruction

The teaching block restoration should result in building up the third floor with a conference hall and a showroom right above the laboratory. While developing the trial design we considered two types of buildup, executed with the help of conventional materials and modern lightweight structures (Table 1). However, there was a common thing for both schemes – thermal modernization of the building, which could be fulfilled by mounting ventilated face using profiled sheeting.

Table 1 – Comparative analysis of two building reconstruction modes

№	Structural member of a building	Defined materials and constructions	
		1 st variant (use of conventional technology)	2-й варіант (use of modern technology)
1	Flooring above the laboratory	Existing reinforced concrete beams, prestressed concrete building units and armoured concrete slabs	Existing reinforced concrete beams, site-cast reinforced concrete flooring 15 mm thick
2	External and inside walls, partitions	Ceramic brick 380mm, 510 mm thick; gypsum plasterboard	Gas-concrete block 500 mm, 400 mm thick; gypsum plasterboard
3	Attic floor	Precast floor slabs	Light gauge steel framing application
4	Roofing	Metal tile roofing resting on lightweight trusses	Metal tile roofing resting on lightweight trusses

We also planned to carry out interior decoration, which was identical for both methods.

Apart from reconstruction it was essential to make a full organization-technological comparative analysis. This involved following steps::

- to analyse methods of how the buildup could be implemented, to develop flow diagrams;
- to analyse organization peculiarities of the building process;
- to calculate and contrast expenditures for both variants;
- to justify the most efficient method of constructing a buildup above «L» teaching block.

It should be noted that we tried to preserve the existing structural members of the building to the uttermost. Consequently both cases expected roofing above the laboratory to be taken down, existing reinforced-concrete double T-rails to be mounted horizontally and the new flooring to be fixed on them. We carried out checking calculation for these rails considering new loads.

During process engineering we paid great attention to developing flow diagrams for blockwork using gas-concrete blocks and assembling a floor using light gauge steel framing (Fig. 2). The peculiarity of such blockwork is that it supposes applying of the all-round reinforce belt, which will be able to redistribute loads while in operation. The standard flow diagrams appeared to be non-existing, as in Ukraine such design was introduced not so long ago.

It is also important to give a thorough consideration to the organizational peculiarities of the construction process. Application of the conventional work materials, namely brick and pre-cast reinforced concrete involves using of tracked lifting crane. Erecting the construction using light gauge steel framing, on the other hand, allows to use such means of mechanization as a mobile grout injection pump, tower hoist and trans palette. It is much more favourable to use them, as they all are of small size and rather convenient to be used in the existing buildings. However, erecting the building from modern work materials demands bigger amount of technological operations and considerable costs of manual labour. More specifically, settling

the timbering, connecting reinforced frames, establishing the all-round reinforce belt and mounting of light gauge steel framing are all the processes that need little use of machines. Moreover, level and standards of workers' skills and industrial practices ought to be substantially higher, then when constructing a building from conventional work materials.

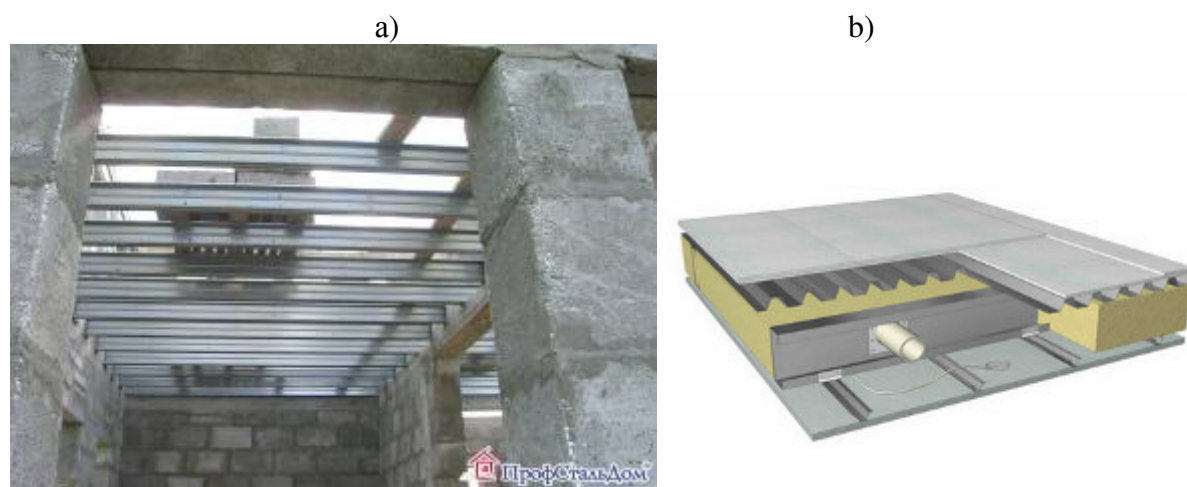


Figure 2 – Overall view (a) and light gauge steel framing flooring make-up (b)

Another important problem is expensiveness of the modern work materials and necessary equipment together with the growth of building period. The latter is the consequence of the fact that it takes quite a long time for the cast reinforced concrete to gain its designed strength. Organizational peculiarities of buildup constructing methods [5] are shown on designed master plans for the first (Fig.3) and the second (Fig.4) variants.

Values of the most critical organization-technological data appeared to be predictable. They are shown in table 2.

Table 2 – Values received in the comparative analysis of reconstructing methods

№	Subject and unit of measurement	Values	
		1 st method	2 nd method
1	General labour intensity, man-day	3741	4593
2	Constructing period, day	144	134
3	Maximum/average number of workers, person	40/27	50/34
4	Construction budget, thousands of hrn.	9919,5	11908
5	Overall production costs, thousands of hrn.	733,7	778,7

In order to specify given values we developed and improved construction calendar progress charts and calculated the cost sheet with the aid of software application AKB-5. It is natural that using conventional work materials in constructing is less labour-consuming nowadays (by 23 %) and more profitable (by 20%), though it needs more time for implementing (by 7% or 10 days more)

Front and sectional elevation after building restoration using modern technologies (including thermal modernization) are illustrated on Fig.5. For the front face decoration steel profiled sheeting was used. It was mounted along steel galvanized siding. Highly-efficient mineral wool insulation is put directly on the external walls by means of expansion anchor studs and glueing. Such method of finishing is up-to-date and energy-saving and is widely used worldwide.

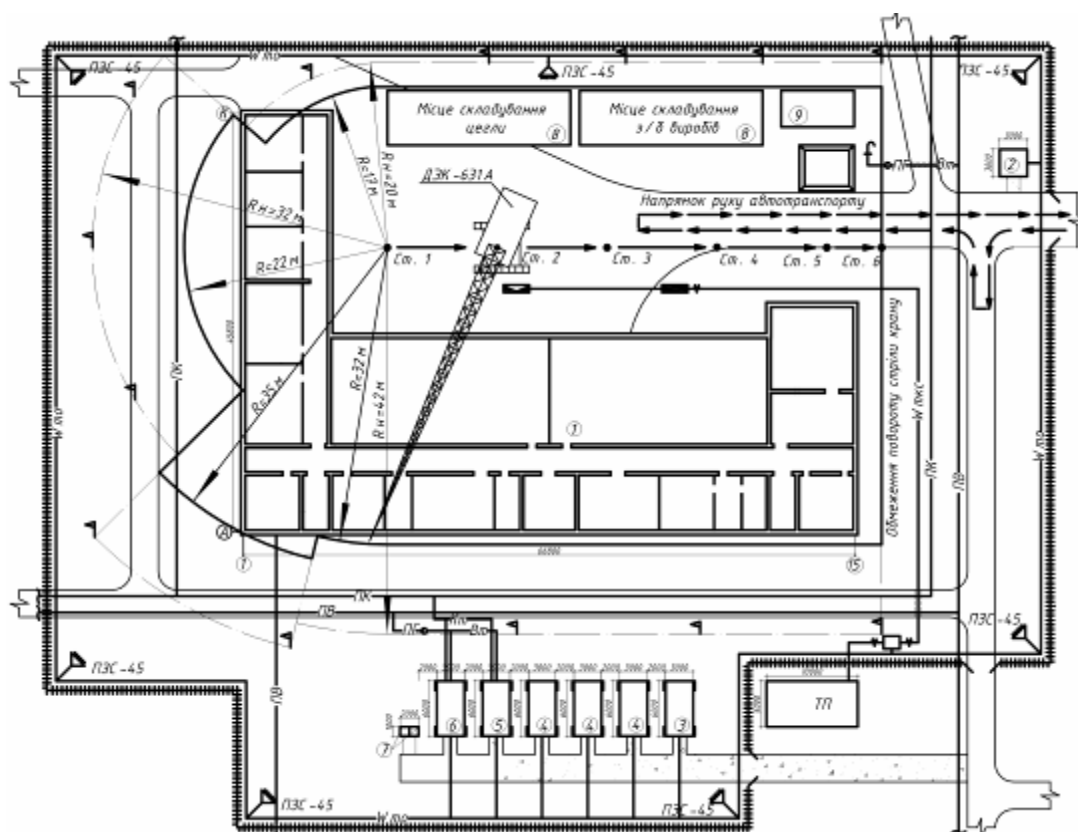


Figure 3 – Project of the overall lay-out when conventional methods are applied

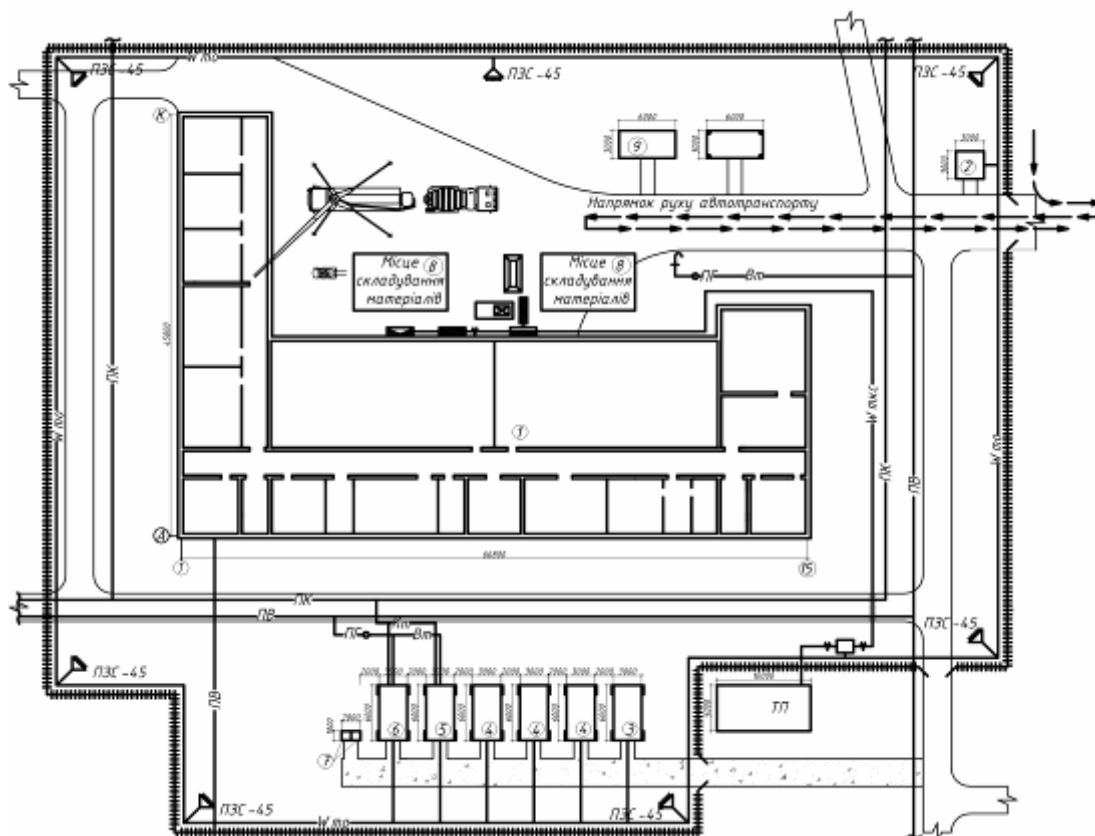


Figure 4 – Project of the overall lay-out when modern lightweight structures are applied

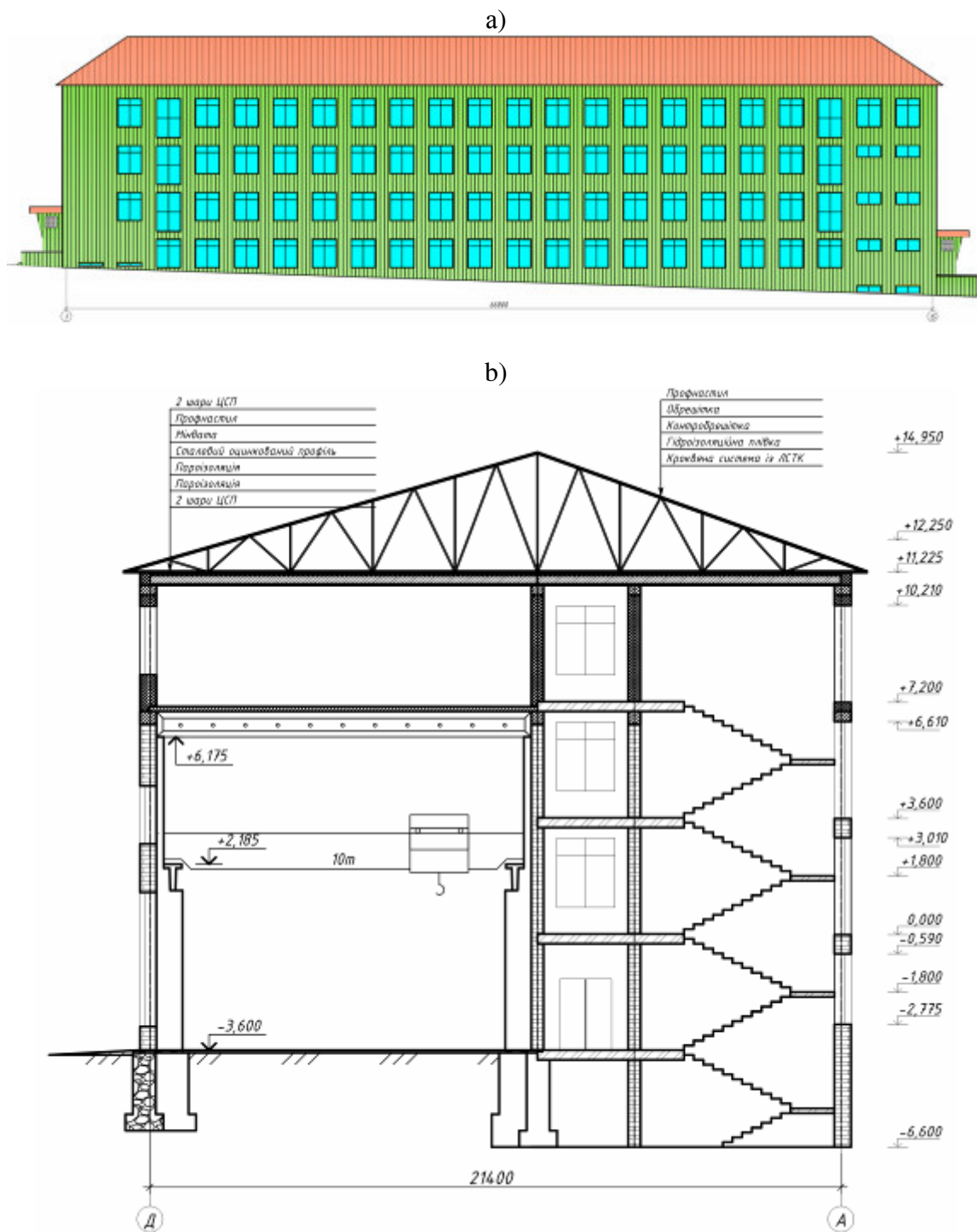


Figure 5 – Front (a) and sectional elevation (b) of «L» teaching block after applying restoration using modern technologies in restoration process

Conclusion. All-inclusive organization and technological and economical comparison of these two variants of the buildup on «L» teaching block, which is located in Poltava National Technical University proves that at present the method of using conventional work materials is less labour consuming, less costly and needs fewer workers on the site. However this method of reconstructing dictates longer constructing period. Despite all above-mentioned we can claim that erecting the building using modern technologies is more desirable and promising, as even now we can observe a tendency to widely use fast mounting structures and it will only become

more wide-spread in the future. Along with advancement and expansion of the technologies their prime cost will decrease. Taking into account the fact that comparative analysis was done for the single object, we should add more buildings to the comparison in our future studies in order to revise received data.

References

1. *Технічна експлуатація, реконструкція і модернізація будівель : навчальний посібник / І. Гаврилюк та ін. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2006. – 540 с.*
Tekhnichna ekspluatatsiya, rekonstruktsiya i modernizatsiya budivel : navchalnyi posibnik / I. Gavrilyuk ta in. – Lviv : NU «Lvivska politehnika», 2006. – 540 s.
2. *Технология возведения зданий и сооружений: учеб. для строит. вузов / В. И. Теличенко, О. М. Терентьев, А. А. Липиду. – М. : Высш. шк., 2004. – 446 с.*
Tehnologiya vozvedeniya zdaniy i sooruzheniy: ucheb. dlya stroit. vuzov / V. I. Telichenko, O. M. Terentev, A. A. Lapidu. – M. : Vyssh. shk., 2004. – 446 s.
3. *Щербінін Л. Г. Зведення каркасних монолітних багатопверхових житлових і громадських будівель в обмежених умовах забудови без використання будівельних кранів / Л. Г. Щербінін // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 4(2). – С. 276 – 282.*
Shcherbinin L. G. Zvedennya karkasnih monolitnih bagatopoverhovih zhitlovih i gromadskih budivel v obmezhenih umovah zabudovi bez vikoristannya budivelnih kraniv / L. G. Shcherbinin // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava : PoltNTU, 2013. – Vip. 4(2). – S. 276 – 282.
<http://znp.pntu.edu.ua>
4. *Порівняльна характеристика легких бетонів, які використовуються для підвищення несучої здатності ЛСТК / С. А. Гудзь, Ю. О. Авраменко, В. О. Сіробаба // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Вип. 1. – С. 202 – 207.*
Porivnyalna harakteristika legkih betoniv, yaki vikoristovuyutsya dlya pidvishchennya nesuchoyi zdatnosti LSTK / S. A. Gudz, Yu. O. Avramenko, V. O. Sirobaba // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava : PoltNTU, 2014. – Vip. 1. – S. 202 – 207.
<http://znp.pntu.edu.ua>
5. *ДБН А.3.1-5-2009. Організація будівельного виробництва. – К., 2011. – 61 с.*
DBN A.3.1-5-2009. Organizatsiya budivelnogo virobnitstva. – K., 2011. – 61 s.
6. *Waite T.J. Steel-frame House Construction / T. J. Waite. – Craftsman Book Company, 2010. – 318 p.*
7. *Савйовский В. В. Техническая диагностика строительных конструкций зданий / В. В. Савйовский. – Х.: Форт, 2008. – 560 с.*
Savyovskiy V. V. Tehnicheskaya diagnostika stroitelnyh konstruktsiy zdaniy / V. V. Savyovskiy. – H.: Fort, 2008. – 560 s.
8. *Савйовский В. В. Ремонт и реконструкция гражданских зданий / В. В. Савйовский, О. Н. Болотских. – Х.: Ватерпас, 1999. – 288 с.*
Savyovskiy V. V. Remont i rekonstruktsiya grazhdanskih zdaniy / V. V. Savyovskiy, O. N. Bolotskih. – H. : Vaterpas, 1999. – 288 s.
9. *ДБН В.1.2-12-2008. Будівництво в умовах ущільненої забудови. – К., 2008. – 36 с.*
DBN V.1.2-12-2008. Budivnitstvo v umovah ushchilnenoyi zabudovi. – K., 2008. – 36 s.
10. *Clarke J. L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / J. L. Clarke – Taylor & Francis E-Libory, 2005. – 128 p.*
11. *Vogdt F. Conceptual and structural design of building made of lightweight and infralightweight concrete / F. Vogdt, M. Schlaich, B. Hillemeir. – Berlin, 2010. – 105 p.*
12. *Yu W.-W. Cold-Formed Steel Design: third edition / W.-W. Yu. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. – 645 p.*

© Nyzhnyk O., Dryzhyruk Yu., Boyko A.
Received 22.05.2016

Самедов А.М., д.т.н., профессор
Сницарь М.А., аспирант
НТУУ «Киевский политехнический институт»

МНОГОСЛОЙНАЯ ТЕПЛО- И ГИДРОЗАЩИТА ОСНОВАНИЙ ИЗ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Предложена конструкция многослойной тепло- и гидрозащиты оснований, состоящих из набухающих глинистых грунтов (бентониты, монтмориллониты, каолиниты и сарматские глины) при увлажнении в гидротермальных условиях.

Взятые образцы из монтмориллонитовых глин испытаны в лабораторных условиях, и определены все технические характеристики при увлажнении водой $T=20^{\circ}\text{C}$ и $T=60^{\circ}\text{C}$. Выяснено, что источником гидротермального увлажнения является высокая температура, которая просачивается через фундаменты промышленных печей ($+300...+500^{\circ}\text{C}$ под подошвой фундамента), тепловых агрегатов ($+120...+180^{\circ}\text{C}$ под подошвой фундамента), теплотрассы ($+90...+96^{\circ}\text{C}$ под подошвой фундамента) и при длительном режиме работы этого оборудования проникает на большую глубину грунтового слоя (до 30 м и более); высокая температура нагревает грунтовую воду до кипения, в куполообразном виде поднимается в виде пара через капилляры грунта и просачивается в активную зону основания сооружения.

Ключевые слова: огнеупорный или жаростойкий бетон, сила сцепления, угол внутреннего трения, сила набухания, модуль деформации, гидротермальные условия.

Самедов А.М., д.т.н., професор
Сніцар М.О., аспірант
НТУУ «Київський політехнічний інститут»

БАГАТОШАРОВИЙ ТЕПЛО- І ГІДРОЗАХИСТ ОСНОВ З НАБУХАЮЧИХ ҐРУНТІВ У ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ УМОВАХ

Запропоновано конструкцію багатошарового тепло- і гідрозахисту основ, що складаються з набухаючих глинистих ґрунтів (бентоніти, монтморилоніти, каолініти і сарматські глини) при зволоженні в гідротермальних умовах.

Узяті зразки з монтморилонітових глин випробувано в лабораторних умовах і визначено всі технічні характеристики при зволоженні водою $T = 20^{\circ}\text{C}$ і $T = 60^{\circ}\text{C}$. З'ясовано, що джерелом гідротермального зволоження є висока температура, яка просочується через фундаменти промислових печей ($+300...+500^{\circ}\text{C}$ під підшовою фундаменту), теплових агрегатів ($+ 120...+180^{\circ}\text{C}$ під підшовою фундаменту), теплотраси ($+ 90...+96^{\circ}\text{C}$ під підшовою фундаменту) і при тривалому режимі роботи цього обладнання проникає на значну глибину ґрунтового шару (до 30 м і більше); висока температура нагріває ґрунтову воду до кипіння, у куполоподібному вигляді піднімається у вигляді пари через капіляри ґрунту і просочується в активну зону основи споруди.

Ключові слова: вогне- або жаротривкий бетон, сила зчеплення, кут внутрішнього тертя, сила набухання, модуль деформації, гідротермальні умови.

MULTILAYER HEAT- AND HYDROPROTECTION GROUNDS OF SWELLING SOIL UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS

The design of multi-layer and heat seal section bases consisting of swelling clay soil (bentonite, montmorillonite, kaolinite clay and Sarmatian) during moistening under hydrothermal conditions, is discussed in the article.

The samples of montmorillonite clay were tested in the laboratory. It was identified all specifications during moistening with water under the temperatures $T = 20^{\circ}\text{C}$ and $T = 60^{\circ}\text{C}$. The source of the hydrothermal hydration is temperature, which seeps through the foundation of industrial furnaces ($+300...+500^{\circ}\text{C}$ under the sole foundation), thermal units ($+120...+180^{\circ}\text{C}$ under the sole foundation), heating duct ($+90...+96^{\circ}\text{C}$ under foundation base). During prolonged operation of the equipment it penetrates to great depths of the soil layer (up to 30 m or more). High temperature warms the ground water to a boiling point. As a result, in the domed steam rises through the soil capillaries and invades «the active construction of the base of the zone» (the active zone is the distance from the foot of the basement to the bottom of the compressible strata NGST line).

Samples of montmorillonite clay were tested during moistening with water at temperatures $T=18...20^{\circ}\text{C}$ and $T=40...80^{\circ}\text{C}$ (the values at $T = 20^{\circ}\text{C}$ and $T = 60^{\circ}\text{C}$ are given in this paper). Thus, the swelling forces SF were obtained: at $T = 20^{\circ}\text{C}$; $SF = 1,52\text{ MPa}$, and at $T = 60^{\circ}\text{C}$; $SH = 1,98\text{ MPa}$. It can be seen that the swelling clay force SH , moistened with water at $T = 60^{\circ}\text{C}$, are higher than the swelling force, moistened with water $T = 20^{\circ}\text{C}$, in 1,3 times. Swelling force at $T = 60^{\circ}\text{C}$ is higher than the allowable pressure on the subsoil more than in 6 times, having a design pressure of about $R = 0,32\text{ MPa}$. Therefore, swelling force can deform any construction causing destruction.

The thickness of the montmorillonite clay in natural conditions was 5,4 m, and testing samples were taken at 3,6 m depth.

It should be noted that the swelling soils structures substrates during moistening with cold water $T = 18...20^{\circ}\text{C}$ and especially warm water, $T = 40... 80^{\circ}\text{C}$ and more are uneven (because of the inhomogeneity of ground, uneven wetting and drying). It is causing uneven deformation of the foundations and structures causing destruction.

It was obtained the change of technical parameters of swelling soils in the foundations facilities under hydrothermal conditions, which lead to the destruction of all buildings and structures.

The design of multi-layer and heat seal section bases witch consist of a swelling clay soil under the foundation of thermal plants or industrial furnaces, through which the high temperature seeps is proposed.

Keywords: *refractory or heat-resistant concrete, adhesive force, internal friction angle, the force of swelling, modulus, hydrothermal conditions and humidity.*

Введение. Фундаменты под промышленные печи, тепловые агрегаты и оборудование обычно изготавливаются из огнеупорного или жаростойкого бетона с огнеупорными заполнителями, выдерживающими температуру до $T=1380^{\circ}\text{C}$ и более на специальном вяжущем (высокоглиноземистом цементе – стойкость 1770°C и выше; глиноземистом цементе – 1580°C и выше; жидком стекле – 1380°C и выше, портландцементе – $900\div 1100^{\circ}\text{C}$). Известно, что с увеличением температуры нагрева уменьшается модуль деформации E , МПа, жаростойкого бетона, увеличивается коэффициент Пуассона μ и мера ползучести материалов δ , из которых изготовлены фундаменты под промышленные печи и тепловые сооружения.

Анализ последних источников, исследований и публикаций. Применительно к жароупорным бетонным и железобетонным конструкциям известны работы: В. И. Мурашова [8], С. В. Александровского [1], А. Ф. Милованова [7], К. Д. Некрасова [10], Г. В. Исаханова [4], Г. Н. Маслова [6], О. Е. Ольховика [5], А. П. Синицына [13], В. В. Федорова [14], Б. Е. Гейтвуда [2], И. А. Мотовильца [9] и др.

Развитию методов температурного поля и теплоотдачи однородных тел с цилиндрическими источниками тепла посвящены работы В. В. Жукова [3] и А. В. Путанса [11], которые, изучая прочность сцепления раствора с заполнителями из огнеупорных материалов, отметили, что повышение температуры даже до 200°C значительно влияет на прочность при растяжении образцов из жаропрочного раствора и зависит от вида породы заполнителей. Например, при заполнителе из диоритового песка при 200°C прочность на сцепление уменьшается на 87% по сравнению с прочностью при 20°C .

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Вышеперечисленные исследователи установили ряд важных особенностей тепло- и массопереноса в конструкциях, в том числе и фундаментах, изготовленных из огнеупорного (температура до 1580°C) и жаростойкого (температура до 1380°C) бетона во время эксплуатации промышленных печей и теплового оборудования.

Например, А. Ф. Милованов установил, что прочность при сжатии и изгибе жаростойкого бетона на вяжущем портландцементе при нагреве и увлажнении даже до $60^{\circ} - 100^{\circ}\text{C}$ снижается в течение суток на 20 – 40%, а при повторном нагреве и охлаждении она резко падает.

Однако диапазон температурных воздействий, проходящих через толщу фундамента под печными сооружениями на поверхность грунтовых оснований, эти ученые не изучили, и какие-либо данные об изменении свойств набухающих грунтов, составляющих массив, как основания сооружений при гидротермальных условиях отсутствуют.

Постановка задачи. Задача заключается в защите массива, состоящего из набухающих грунтов, как основания сооружения при гидротермальных увлажнении водой $T = 18 - 20^{\circ}\text{C}$ и $T = 40 - 80^{\circ}\text{C}$ и более от разрушения.

Мы провели испытания на изменение технических параметров массивов, состоящих из набухающих грунтов, которые приведены в таблице 1.

Сила набухания S_n измерялась с помощью динамометра после увлажнения водой $T = 20^{\circ}\text{C}$ и $T = 60^{\circ}\text{C}$, которая имела значение при $T = 20^{\circ}\text{C}$ $S_n = 1,52$ МПа; при $T = 60^{\circ}\text{C}$ $S_n = 1,98$ МПа и водонасыщении $W = 18\% = \text{const}$ (табл. 1).

Эти данные показывают, что набухание глинистых грунтов непосредственно зависит от температуры воды. При увлажнении набухающих грунтов сила набухания S_n увеличивается настолько, что около шести раз превышает допустимую величину давления от сооружения (примерно 0,32 МПа) на основание. Поэтому необходимо принимать меры защиты основания из набухающих грунтов в условиях увлажнений, особенно в гидротермальных условиях.

**Таблица 1 – Технические характеристики
монтмориллонитовых глин при увлажнении**

Показатели	Обозначения	Ед.изм.	Технические характеристики		
			в природном состоянии	при увлажнении водой	
				T = 20°C	T = 60°C
- удельный вес частицы	γ_s	кН/м ³	27,2	27,2	27,2
- удельный вес	γ	кН/м ³	16,8	17,2	17,6
- удельный вес в сухом виде	γ_d	кН/м ³	13,6	13,64	13,68
- естественная влажность	W	доли ед.	0,0806	–	–
- влажность набухания	W _{sw}	доли ед.	–	0,18÷0,2	0,18÷0,2
- пористость	n	%	42	–	–
- коэффициент пористости	e ₀	-	0,72	0,96	1,16
- предел текучести	W _L	доли ед.	0,55	–	–
- предел раскатывания	W _p	доли ед.	0,16	–	–
- сила сцепления	C	МПа	2,5	0,312	0,136
- угол внутреннего трения	φ	град.	14° 30′	7° 12′	2° 30′
- модуль общей деформации	E ₀	МПа	40	5,22	3,42
- коэффициент жесткости массивов из набухающей монтмориллонитовой глины при K=K ₀ b ₀ , где b ₀ =1 п. м сооружений подошвы; K ₀ =2,4·10 ⁴ кН/м ³	K	кН/м ³	–	(2,0÷2,4)·10 ⁴	(2,7÷3,2)·10 ⁴
- пороговое давление набухания	P _{sw}	МПа	-	(0,48÷0,52)	(0,68÷0,76)
- относительное свободное набухание при уплотняющем давлении: - P = 0 МПа; W = 0,18 - P = 0,2 МПа; W = 0,18 - P = 0,6 МПа; W = 0,18	E _{sw} E _{sw} E _{sw}	- - -	- - -	(0,16÷0,18) (0,12÷0,13) (0,06÷0,07)	(0,24÷0,28) (0,14÷0,16) (0,09÷0,12)
- коэффициент Пуассона	μ ₀	-	(0,28÷0,32)	(0,24÷0,26)	(0,20÷0,22)
- скорость набухания при P = 0	V _{sw}	м/сут	–	1,0·10 ⁻⁴	(1,4÷1,6)·10 ⁻⁴
- параметр набухания, описывающий траекторию поверхности	c	м ⁻¹	–	1,0·10 ⁻²	(1,1÷1,23)·10 ⁻²
- коэффициент фильтрации	k _f	м/сут	(2,3·10 ⁻⁹)	–	–
- сила набухания	S _н	МПа	-	(1,38÷1,52)	(1,71÷1,98)

Следует отметить, что общая величина набухания зависит не только от мощности (толщины) слоя набухающего грунта, но и от природной влажности грунтов W (чем меньше влажность, тем набухание больше при увлажнении), от начальной плотности ρ_0 , тс/м³ (возрастая почти линейно с увеличением плотности) и от величины внешнего (уплотняющего) давления P , МПа, значительно уменьшаясь с его увеличением. Зависимость величины относительного набухания ε_{sw} при действующем уплотняющем давлении $P = 0$ составляет свободное набухание ε_{sw} (образцы взяты с глубины $H = 3,6$ м): $\varepsilon_{sw} = 0,45 \div 0,48$; при $P = 0,5$ МПа $\varepsilon_{sw} = 0,26 \div 0,28$; при $P = 0,3$ МПа $\varepsilon_{sw} = 0,16 \div 0,18$.

$$\varepsilon_{sw} = \frac{h' - h}{h}, \quad (1)$$

где h – высота образца грунта природного сложения и влажности, обжатого без возможности бокового расширения заданным давлением P , МПа;

h' – высота того же образца после замачивания $W = 18 \div 28\%$ при том же внешнем давлении P .

Реологические функции ползучести или относительное набухание зависит от функции уплотняющего давления $f(P)$ и от функции времени $\psi(t)$, тогда можно записать

$$\varepsilon_{sw}(P, t) = f(P) \psi(t). \quad (2)$$

Функция времени $\psi(t) = \alpha t^\beta$ зависит только от времени t и реологических параметров α и β . Эти параметры определяются испытанием набухающих грунтов при увлажнении. Например, по нашим исследованиям получены значения α и β при увлажнении $W = 18\% = \text{const}$ монтмориллонитовой глины при $T = 20^\circ\text{C}$, уплотняющем давлении $P = 0$, $\alpha = 38 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,46 \cdot 10^{-2}$; при этих же условиях, только при $T = 60^\circ\text{C}$, $\alpha = 34 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,52 \cdot 10^{-2}$; при $W = 18\% = \text{const}$, $P = 0,2$ МПа, $T = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 31 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,66 \cdot 10^{-2}$; при этих же условиях, только при $T = 60^\circ\text{C}$, $\alpha = 28 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,72 \cdot 10^{-2}$; при $W = 18\% = \text{const}$, $P = 0,6$ МПа, $T = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 22 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,84 \cdot 10^{-2}$; при $W = 18\% = \text{const}$, $P = 0,6$ МПа, $T = 60^\circ\text{C}$, $\alpha = 18 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$; $\beta = 99,92 \cdot 10^{-2}$.

Как видно, температура воды резко влияет на изменение реологических параметров α и β при функции ползучести только времени $\psi(t) = \alpha t^\beta$.

Функция напряжений $f(P)$ при $\psi(t) = 0$ описывает изохронную кривую $P = f(\varepsilon_{sw})$ для мгновенной деформации при $t = 0$.

Основной материал и результаты. Наши исследования показали, что в зависимости от теплового режима работы и качества теплоизоляции под подошвой фундаментов промышленных печей может возникать температура от 100 до 500°C, которая, проходя через толщу грунтового основания на большую глубину (до 30 м и более), при непрерывном режиме работы этих сооружений может нагревать грунтовую воду до кипения и резко изменять (уменьшать) прочностные параметры: силу сцепления C , МПа, и угол внутреннего трения ϕ , град; модуль общей деформации E_0 , МПа, и увеличивать силу набухания S_n в случаях, когда основание сооружений состоит из набухающих глинистых грунтов. Поэтому необходимо принимать меры защиты массивов как оснований сооружений, состоящих из набухающих грунтов. Такие меры можно рекомендовать в виде конструкции из «многослойной защиты», показанной на рис.1. Для такой конструкции можно использовать металлургические шлаки или керамзитовый гравий крупностью 10÷70мм.

В случае отсутствия металлургических шлаков при изготовлении «многослойной тепло- и гидрозащиты» конструкции можно применять керамзитовый гравий с сохранением размеров гранул на каждом слое.

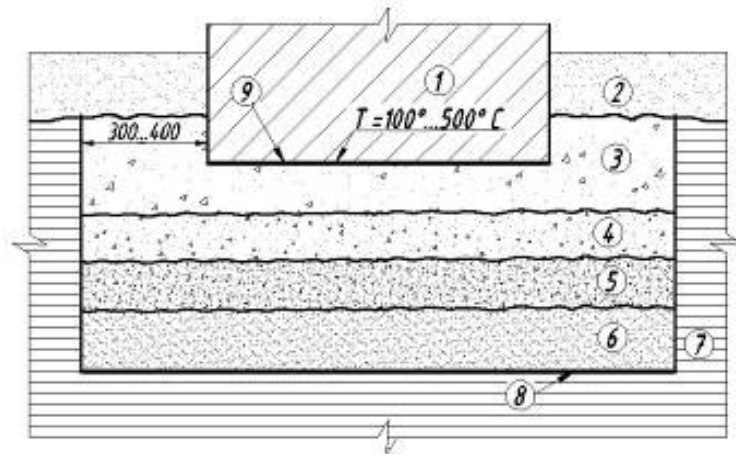


Рисунок 1 – Конструкция «многослойной защиты» основания из набухающих глинистых грунтов под фундаментами промышленных печей в гидротермальных условиях увлажнения:

- 1 – фундаменты из огнеупорного или жаростойкого бетона;
- 2 – верхний слой из песка средней крупности;
- 3 – слой из металлургических шлаков крупностью 40 – 70 мм – 120 мм;
- 4 – слой из металлургических шлаков крупностью 20 – 40 мм – 100 мм;
- 5 – слой из металлургических шлаков крупностью 10 – 20 мм – 100 мм;
- 6 – слой из крупного песка с диаметром частиц >0,5 мм – 100 – 190 мм;
- 7 – слой из набухающего глинистого грунта;
- 8 – гидроизоляция из толи или рубероида – два слоя;
- 9 – днище (подошва) фундамента, который передает тепло на грунтовое основание

Изменение параметров набухающих грунтов покажем на примере по полученным экспериментальным данным.

Пример. Допустим, массив как основание под тепловыми сооружениями состоит из монтмориллонитовой набухающей глины и подвергается гидротермальным воздействиям от проходящей температуры через фундамент из жаростойкого бетона. Под подошвой фундамента на поверхности основания из набухающих грунтов действует температура $T = 300^{\circ}\text{C}$, которая нагревает на определенной глубине грунтовую воду до температуры $T = 60\div 80^{\circ}\text{C}$ и более и приводит к набуханию грунтов.

Технические характеристики набухающей монтмориллонитовой глины при гидротермальных увлажнениях приведены в табл. 1.

Выводы:

1. Фундаменты промышленных печей и теплового оборудования изготавливают из огнеупорного или жаростойкого бетона на специальных вяжущих и огнеупорных заполнителях. Однако из-за слабой теплоизоляции они пропускают через тело фундамента высокую температуру, в результате чего под его подошвой и на поверхности основания возникает высокая температура ($100\div 500^{\circ}\text{C}$). Она проходит через слои грунтового основания на большую глубину (до 30 м и более), нагревая грунтовую воду до кипения, в куполообразном виде поднимается в виде пара через капилляры грунта и просачивается в активную зону основания сооружения.

2. В случае увлажнения набухающие грунты резко изменяют свои свойства и набухают, увеличивая объем примерно до 100%. Сила сцепления C уменьшается приблизительно в 8 – 18 раз, а угол внутреннего трения ϕ – в 2 – 6 раз.

3. Набухающие силы S_n при увлажнении водой $T = 60^\circ\text{C}$ в 1,3 раза превышают набухающие силы при увлажнении водой $T = 20^\circ\text{C}$. Силы набухания при $T = 60^\circ\text{C}$ более чем в 6 раз больше, чем допустимое давление на грунтовое основание, имеющее примерно расчетное давление $R = 0,32$ МПа. Поэтому силы набухания могут деформировать любые сооружения до разрушения.

4. Предложены эффективные меры защиты оснований сооружений, состоящих из набухающих грунтов, при возможном увлажнении холодной и горячей водой и от просачивания высокой температуры через фундаменты промышленных печей и тепловых агрегатов.

Литература

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) / С. В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1966. – 176 с.
2. Гейтвуд Б. Е. Температурные напряжения / Б. Е. Гейтвуд. – М.: ИЛ, 1959. – 349 с.
3. Жуков В. В. Влияние технологических факторов на внутренние напряжения в бетонных блоках / В. В. Жуков, В. И. Шевченко // Труды Волгоградского института инженеров городского хозяйства. – Волгоград: Главнижневолжстрой, 1969. – С. 132 – 138.
4. Исаханов Г. В. Прочность неметаллических материалов при неравномерном нагреве / Г. В. Исаханов // Институт проблем прочности АН УССР. – К.: Наукова думка, 1971. – С. 173 – 176.
5. Ольховик О. Е. О температурно-временной аналогии при объемной ползучести некоторых жестких полимеров / О. Е. Ольховик, А. Я. Гольдман, Е. С. Григорян // Механика полимеров. – 1974. – Вып. 5. – С. 930 – 934.
6. Маслов Г. А. Элементарные статические расчеты сооружений на температурные изменения / Г. А. Маслов // Известия ЛН СССР. – 1940. – Т. 26. – С. 18 – 26.
7. Милованов А. Ф. Прочность бетона при нагреве / А. Ф. Милованов. – М.: Госстрой СССР, НИИЖБ, Стройиздат, 1972. – С. 6 – 18.
8. Мурашев В. И. Принципы расчета и проектирования фундаментов доменных печей / В. И. Мурашев, Я. М. Немировский // Исследования по жароупорным бетону и железобетону. – М.: Госстройиздат, 1954. – С. 70 – 84.
9. Мотовилец И. А. Механика связанных полей в элементах конструкций / И. А. Мотовилец, В. И. Козлов // Институт механики АН УССР. – К.: Наукова думка, 1987. – Т.1. – 263 с.
10. Некрасов К. Д. Жароупорный бетон / К. Д. Некрасов. – М.: Промстройиздат, 1957. – 180 с.
11. Путанс А. В. Усадка и ползучесть бетона при циклическом нагревании и охлаждении / А. В. Путанс // Исследования по бетону и железобетону. – Рига, Изд-во АН Латв.ССР, 1963. – С. 46 – 56.
12. Самедов А. М. Деформирование и разрушение конструкций при термосиловых воздействиях / А. М. Самедов. – М.: Стройиздат, 1989. – 432 с.
13. Сеницын А. П. Расчет конструкций на тепловой удар / А. П. Сеницын. – М.: Стройиздат, 1971. – 231 с.
14. Федоров В. В. Термодинамические представления о прочности и разрушении твердого тела / В. В. Федоров // Проблемы прочности. – 1971. – № 3. – С. 32 – 34.

References

1. Aleksandrovskiy S. V. Raschet betonnyh i zhelezobetonnyh konstruksiy na temperaturnye i vlazhnostnye vozdeystviya (s uchetom polzuchesti) / S. V. Aleksandrovskiy. – M.: Stroyizdat, 1966. – 176 s.
2. Geytvud B. E. Temperaturnye napryazheniya / B. E. Geytvud. – M.: IL, 1959. – 349 s.
3. Zhukov V. V. Vliyanie tehnologicheskikh faktorov na vnutrennie napryazheniya v betonnyh bloках / V. V. Zhukov, V. I. Shevchenko // Trudy Volgogradskogo instituta inzhenerov gorodskogo hozyaystva. – Volgograd: Glavnizhnevolyzhstroy, 1969. – S. 132 – 138.

4. Isahanov G. V. *Prochnost nemetallicheskih materialov pri neravnomernom nagreve* / G. V. Isahanov // *Institut problem prochnosti AN USSR*. – K. : Naukova dumka, 1971. – S. 173 – 176.
5. Olhovich O. E. *O temperaturno-vremennoy analogii pri obemnoy polzuchesti nekotorykh zhestkiykh polimerov* / O. E. Olhovich, A. Ya. Goldman, E. S. Grigoryan // *Mekhanika polimerov*. – 1974. – Vyp. 5. – S. 930 – 934.
6. Maslov G. A. *Elementarnye staticheskie raschety sooruzheniy na temperaturnye izmeneniya* / G. A. Maslov // *Izvestiya LN SSSR*. – 1940. – T. 26. – S. 18 – 26.
7. Milovanov A. F. *Prochnost betona pri nagreve* / A. F. Milovanov. – M. : Gosstroy SSSR, NIIZhB, Stroyizdat, 1972. – S. 6 – 18.
8. Murashev V. I. *Printsipy rascheta i proektirovaniya fundamentov domennykh pechey* / V. I. Murashev, Ya. M. Nemirovskiy // *Issledovaniya po zharoupornym betonu i zhelezobetonu*. – M. : Gosstroyizdat, 1954. – S. 70 – 84.
9. Motovilets I. A. *Mekhanika svyazannykh poley v elementakh konstruktsiy* / I. A. Motovilets, V. I. Kozlov // *Institut mehaniki AN USSR*. – K. : Naukova dumka, 1987. – T.1. – 263 s.
10. Nekrasov K. D. *Zharoupornyy beton* / K. D. Nekrasov. – M. : Promstroyizdat, 1957. – 180 s.
11. Putans A. V. *Usadka i polzuchest betona pri tsiklicheskom nagrevanii i ohlazhdenii* / A. V. Putans // *Issledovaniya po betonu i zhelezobetonu*. – Riga, Izd-vo AN Latv.SSR, 1963. – S. 46 – 56.
12. Samedov A. M. *Deformirovanie i razrushenie konstruktsiy pri termosilovykh vozdeystviyakh* / A. M. Samedov. – M. : Stroyizdat, 1989. – 432 s.
13. Sinitsyn A. P. *Raschet konstruktsiy na teplovoy udar* / A. P. Sinitsyn. – M. : Stroyizdat, 1971. – 231 s.
14. Fedorov V. V. *Termodinamicheskie predstavleniya o prochnosti i razrushenii tverdogo tela* / V. V. Fedorov // *Problemy prochnosti*. – 1971. – № 3. – S. 32 – 34.

© Самедов А.М., Сницарь М.А.
Надійшла до редакції 25.03.2016

*Пічугін С.Ф., д.т.н., професор
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Кінаш Р.І., д.т.н., професор
Національний університет «Львівська політехніка»
Гук Я.С., к.т.н., доцент
Ужгородський національний університет*

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ВІТРОВОГО ТИСКУ В ЛИПНІ І СІЧНІ ДЛЯ ДЕВ'ЯТИ ВЕРШИН КАРПАТ ЗАКАРПАТСЬКОЇ ОБЛАСТІ

У попередніх нормативних документах параметри вітру на вершинах Карпат з абсолютними відмітками вище 1330 м (метеостанція Плай) не досліджено. На базі спостережень за кліматичними параметрами у 1955 – 2005 роках на дев'яти метеостанціях із застосуванням чотирьох напрямків між початковими метеостанціями: Берегово – 113 м, Ужгород – 114,6 м, Хуст – 166 м, В. Березний – 209 м і кінцевою станцією Говерла – 2061 м за формулами висотних коефіцієнтів обчислено значення літніх і зимових характеристичних вітрових тисків для дев'яти вершин Карпат. Запропоновано детальне вітрове районування гірського регіону Закарпатської області.

Ключові слова: висотні коефіцієнти, напрямки, середні вітрові тиски, середні швидкості вітру.

*Пичугин С.Ф., д.т.н., профессор
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Кинаш Р.И., д.т.н., профессор
Национальный университет «Львовская политехника»
Гук Я.С., к.т.н., доцент
Ужгородский национальный университет*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕТРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ИЮЛЕ И ЯНВАРЕ ДЛЯ ДЕВЯТИ ВЕРШИН КАРПАТ ЗАКАРПАТСКОЙ ОБЛАСТИ

В предыдущих нормативных документах параметры ветра на вершинах Карпат с абсолютными отметками выше 1330 м (метеостанция Плай) не исследованы. На базе наблюдений за климатическими параметрами в 1955 – 2005 годах на девяти метеостанциях с использованием четырех направлений между начальными метеостанциями: Берегово – 113 м, Ужгород – 114,6 м, Хуст – 166 м, В. Березный – 209 м и конечной станцией Говерла – 2061 м по формулам высотных коэффициентов определены значения летних и зимних характеристических ветровых давлений для девяти вершин Карпат. Обосновано детальное ветровое районирование горного региона Закарпатской области.

Ключевые слова: высотные коэффициенты, направления, средние ветровые давления, средние ветровые скорости.

*Pichugin S., DSc, Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
Kinash R., DSc, Professor
National University «Lviv Polytechnic»
Huk Ya., PhD, Associate Professor
Uzhgorod National University*

DETERMINING OF CHARACTERISTIC VALUES OF WIND PRESSURE IN JULY AND JANUARY FOR 9 CARPATHIAN PEAKS OF TRANSCARPATHIAN REGION

Taking into account of the wind loading is important at planning of wind power-stations, calculation of building constructions, at the stowage of general layouts of settlements and others like that. The wind loading has difficult physical nature and probabilistic character, it depends on the physical and geographical features of locality, in particular, from a geographical height.

The previous regulations (SNIP 2.01.01.82, DBN V.1.2-2: 2006, ISO B.1.1 NB: 2010) parameters of wind on the tops of the Carpathian Mountains with an altitude above 1330 m (weather station Playa) were not investigated. Based on observations of climate parameters in 1955 – 2005, respectively 9 weather stations used 8 directions between the initial eight weather stations and Playa ultimate meteorological station by the average characteristic values of wind pressure in July and January to the highest peak of the Carpathians – Hoverla. 4 directions between the initial weather stations: Beregovo – 113 m, Uzhhorod – 114,6 m, Hust – 166 m, V.Berezhnyy – 209 m and the final station Hoverla – 2061 m the altitude coefficients and formulas, atmospheric pressure parameters and average outdoor temperatures (in January and July) were used for calculating comparative characteristic values of summer and winter wind pressure for 9 peaks of the Carpathians: Petros – 2020 m, Pip Ivan – 1936 m, Syvulya – 1818 m, Tovsta – 1818 m, Unharyaska – 1707 m, Tempa – 1634 m, Velykiy Verkh – 1598 m, Polonyna Rivna – 1470 m.

In summer and winter the atmospheric pressure for 9 applied tall peaks of the Carpathians was calculated and the four factors above directions.

For calculating of characteristic values of wind pressure for 9 peaks of the Carpathians the four areas of initial weather stations were applied: Beregovo – 113 m, Uzhhorod – 114,6 m, Hust – 166 m Velyky Berezhnyy – 209 m and the ultimate transition mount Hoverla station – 2061 m and high-rise factors:

a) difference of maximal wind speed in July and January, divided by the difference of altitudes stations 1, 2 one of four directions;

b) the difference between maximal summer and winter wind pressure divided by the difference of summer and winter pressure stations 1, 2 one of four directions;

a) difference of maximal summer and winter wind pressure divided by the difference of altitudes stations 1, 2 one of 4 directions.

Similar high-altitude coefficients by the maximal summer and winter wind speed and wind pressure were determined using the 23 weather stations directions between 9 and 18 transitional stations and transient 46 stations.

Keywords: *height coefficients, trends, characteristic wind pressure, maximal wind speed.*

Вступ. Урахування вітрового навантаження є важливим при проектуванні вітрових електростанцій, розрахунку конструкцій висотних будівель і споруд, при складанні генеральних планів населених пунктів тощо. Вітрове навантаження має складну фізичну природу й імовірнісний характер, воно залежить від фізико-географічних особливостей місцевості, зокрема від географічної висоти.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Починаючи з 80-х років минулого сторіччя в Україні досить активно велися ймовірнісні дослідження вітрового навантаження [11 – 16], головним результатом яких є розроблення національних норм навантажень [17], побудованих на сучасній науковій основі в ув'язці з європейськими нормами Єврокод. У ці норми введено поняття характеристичного значення вітрового тиску W_0 , що дорівнює середній (статичний) складовій тиску вітру на висоті 10 м над поверхнею землі, який може бути перевищений у середньому один раз за 50 років і визначається згідно з існуючими нормами за картою районування території України.

Характеристичне значення вітрового тиску W_0 обчислюється за формулою

$$W_0 = 0,61 V^2, \quad (1)$$

де V – відповідна швидкість вітру, м/с.

На відміну від попередніх норм [18], які відводили Україні три вітрові райони, згідно з нормативним документом [12] територія України поділена на п'ять вітрових районів з відповідними характеристичними значеннями вітрового тиску: 1-й – 400 Па; 2-й – 450 Па; 3-й – 500 Па; 4-й – 550 Па; 5-й – 600 Па.

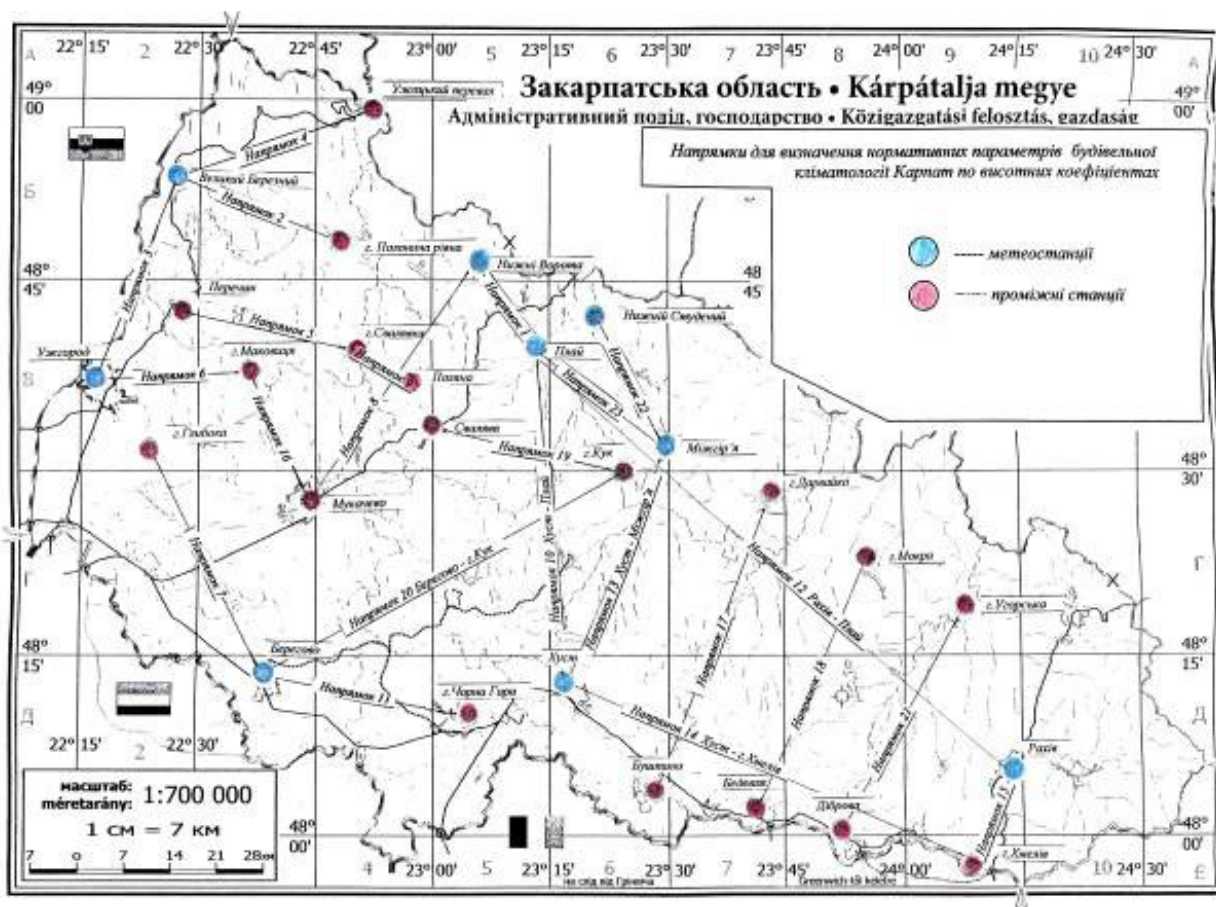


Рисунок 1 – Метеостанції та проміжні (перехідні) станції Закарпатської області з відповідними напрямками

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. За нормами [17] територія Закарпатської області віднесена до 1-го і 2-го вітрових районів, що не має необхідного ймовірнісного обґрунтування. При цьому більша частина території області позначена як гірський район, для якого наводиться орієнтовна залежність вітрового тиску від географічної висоти, котру допускається уточнювати за наявності метеорологічних даних. Станом на початок ХХІ століття були відсутні достовірні дані щодо детального опису вітрового режиму для гірської частини Закарпатської області.

Завдання роботи полягає в розробленні детального вітрового районування Закарпатської області з урахуванням географічних та кліматичних особливостей цього гірського району.

Основний матеріал і результати. Для дослідження ймовірнісних вітрових параметрів використані: схема 23-х напрямків між 9-ма метеостанціями і 18-ма перехідними станціями (рис.1.) та дані спостережень за кліматичними параметрами у 1955 – 2005 роках на дев'яти метеостанціях Закарпатської області (табл.1).

Таблиця 1 – Результати спостережень за кліматичними параметрами у 1955 – 2005 роках на дев'яти метеостанціях Закарпатської області

№ з/п	Назва метеостанції	Висота над рівнем Балтійського моря Н, м	Швидкість вітру – чисельник, м/с, вітровий тиск – знаменник, Па				Атмосферний тиск, ГПа		Середня температура повітря, °С	
			середні значення		максимальні значення					
			липень	січень	липень	січень	липень	січень	липень	січень
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Берегово	113	$\frac{2,9}{5,1}$	$\frac{2,5}{3,8}$	$\frac{24}{351}$	$\frac{20}{244}$	1000,5	1005,0	+20,2	-2,7
2	Ужгород	114.6	$\frac{3,3}{6,6}$	$\frac{3,6}{7,9}$	$\frac{26}{412}$	$\frac{24}{351}$	1000,3	1004,8	+19,9	-2,8
3	Хуст	166	$\frac{2,2}{2,95}$	$\frac{1,8}{1,98}$	$\frac{20}{244}$	$\frac{20}{244}$	995,6	1000,0	+19,2	-4,3
4	В. Березний	209	$\frac{2,5}{3,8}$	$\frac{2,1}{2,7}$	$\frac{20}{244}$	$\frac{25}{381}$	990,5	995,1	+18,1	-4,1
5	Рахів	438	$\frac{1,5}{1,4}$	$\frac{8,7}{46,2}$	$\frac{30}{549}$	$\frac{20}{244}$	968,2	972,5	+17,0	-4,3
6	Міжгір'я	456	$\frac{2,1}{2,7}$	$\frac{2,5}{3,8}$	$\frac{35}{747}$	$\frac{24}{351}$	966,4	970,7	+16,4	-5,0
7	Нижні Ворота	500	$\frac{2,4}{3,5}$	$\frac{3,9}{9,3}$	$\frac{21}{269}$	$\frac{20}{244}$	962,0	966,3	+16,2	-4,6
8	Нижній Студений	615	$\frac{2,2}{2,95}$	$\frac{3,3}{6,6}$	$\frac{18}{198}$	$\frac{24}{351}$	950,5	954,8	+15,2	-5,8
9	Плай	1330	$\frac{7,0}{29,8}$	$\frac{8,7}{46,2}$	$\frac{40}{976}$	$\frac{40}{976}$	867,1	861,2	+11,1	-6,3

Порядок обчислення максимальних швидкостей вітру і вітрового тиску для дев'яти вершин Карпат. Для обчислення максимальних швидкості вітру й вітрового тиску для перехідної станції г. Говерла – 2061 м застосовано вісім напрямків з початковими метеостанціями: Берегово – 113 м, Ужгород – 114,6 м, Хуст – 166 м, Великий Березний – 209 м, Рахів – 438 м, Міжгір'я – 456 м, Н. Ворота – 500 м, Н.Студений – 615 м і кінцевою метеостанцією Плай – 1330 м та висотні коефіцієнти. Для обчислення середніх вітрових параметрів для восьми вершин Карпат: Петрос – 2020 м, Піп Іван – 1936 м, Сивуля – 1818 м, Товста – 1818 м, Унгарська – 1707 м, Темпа – 1634 м, Великий Верх – 1598 м, Полонина Рівна – 1470 м застосовані висотні коефіцієнти і чотири напрямки між початковими метеостанціями: Берегово – 113 м, Ужгород – 114,6 м, Хуст – 166 м, Великий Березний – 209 м і кінцевою перехідною станцією г. Говерла – 2061 м.

Таблиця 2 – Результати обчислень характеристичних значень максимальних літніх і зимових вітрових тисків для дев'яти вершин Карпат за чотирма напрямками та висотними коефіцієнтами

№ з/п	Назва вершин	Висота над рівнем Балтійського моря, м	Чисельник – літні, знаменник – зимові				
			а) за висотними коеф. різниці максимальних швидкостей вітру в липні і січні, поділеної на різницю абсолютних висот ст. 1, 2, ГПа	б) за висотними коеф. різниці максимальних літніх і зимових вітрових тисків, поділеної на різницю літніх і зимових атмосферних тисків на ст. 1, 2, ГПа	в) за висотними коеф. різниці максимальних літніх і зимових вітрових тисків, поділеної на різницю абсолютних висот ст. 1, 2, ГПа	Пропоновані параметри	
						Характеристичні вітрові тиски, ГПа	Максимальні швидкості вітру, м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Говерла	2061	$\frac{1,397}{1,86}$	$\frac{1,397}{1,86}$	$\frac{1,397}{1,86}$	$\frac{1,397}{1,86}$	$\frac{47,85}{55,20}$
2	Петрос	2020	$\frac{1,36}{1,81}$	$\frac{1,37}{1,82}$	$\frac{1,37}{1,82}$	$\frac{1,37}{1,82}$	$\frac{47,28}{54,46}$
3	Піп Іван	1936	$\frac{1,30}{1,71}$	$\frac{1,32}{1,75}$	$\frac{1,32}{1,75}$	$\frac{1,32}{1,74}$	$\frac{46,13}{52,96}$
4	Сивуля	1818	$\frac{1,21}{1,57}$	$\frac{1,25}{1,66}$	$\frac{1,26}{1,66}$	$\frac{1,23}{1,64}$	$\frac{44,50}{50,84}$
5	Товста	1818	$\frac{1,21}{1,57}$	$\frac{1,25}{1,66}$	$\frac{1,26}{1,66}$	$\frac{1,23}{1,64}$	$\frac{44,50}{50,84}$
6	Унгарська	1707	$\frac{1,13}{1,45}$	$\frac{1,19}{1,57}$	$\frac{1,19}{1,57}$	$\frac{1,15}{1,52}$	$\frac{42,98}{48,85}$
7	Темпа	1634	$\frac{1,07}{1,38}$	$\frac{1,15}{1,51}$	$\frac{1,15}{1,51}$	$\frac{1,12}{1,45}$	$\frac{41,97}{47,54}$
8	Великий Верх	1598	$\frac{1,05}{1,34}$	$\frac{1,13}{1,48}$	$\frac{1,13}{1,48}$	$\frac{1,10}{1,45}$	$\frac{41,48}{46,90}$
9	Полонина Рівна	1470	$\frac{0,98}{1,21}$	$\frac{1,05}{1,36}$	$\frac{1,05}{1,36}$	$\frac{1,00}{1,30}$	$\frac{40,00}{46,60}$

Для обчислення максимальних швидкостей вітру та вітрових тисків і порівняння обчислень [1 – 10] використані загальні формули висотних коефіцієнтів: а) за різницею максимальних швидкостей вітру в липні й січні, поділеною на різницю абсолютних висот станцій 1, 2; б) за різницею максимальних літніх і зимових вітрових тисків, поділеною на різницю літніх і зимових атмосферних тисків станцій 1, 2; в) за різницею максимальних літніх і зимових вітрових тисків, поділеною на різницю абсолютних висот станцій 1, 2:

$$Z_X = Z_1 + K_{Z1-2} \cdot \Delta H_{X-Z}, \quad (2)$$

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1, \quad (3)$$

$$K_{Z1-2} = \frac{Z_2 - Z_1}{H_2 - H_1}, \quad (4)$$

$$\Delta H_{X-Z} = H_X - H_Z \quad (5)$$

або для контролю

$$Z_X = Z_2 - K_{Z1-2} \cdot H_{Z-X}, \quad (6)$$

де Z_X, Z_1, Z_2 – параметри (літні, зимові) на станціях X, 1, 2; а саме:

W_o – характеристичні значення вітрових тисків у січні і липні, Па;

V – зимові та літні максимальні швидкості вітру, м/с;

$P_{атм.}$ – зимовий і літній атмосферні тиски, Па;

K_{Z1-2} – висотні коефіцієнти вітрових параметрів між метеостанціями 1, 2 одного із чотирьох напрямків;

H_X, H_1, H_2 – висоти станцій X, 1, 2 над рівнем Балтійського моря, м.

У табл. 2 подано результати обчислень літніх і зимових максимальних характеристичних значень вітрових тисків за чотирма напрямками з використанням висотних коефіцієнтів, обчислених на базі параметрів атмосферних тисків, середніх температур зовнішнього повітря в липні й січні, що отримані за спостереженнями на дев'яти метеостанціях Закарпатської області в 1955 – 2005 роках.

У табл. 3 наведено результати обчислень за висотними коефіцієнтами і 23-ма напрямками між 9-ма метеостанціями та 18-ма перехідними станціями максимальних швидкостей вітру та характеристичних значень вітрових тисків (літніх і зимових) для 46-ти населених пунктів, вершин і перевалів Закарпатської області.

Таблиця 3 – Результати обчислення максимальних швидкостей вітру і максимальних характеристичних значень вітрових тисків у липні й січні для перехідних станцій, окремих населених пунктів, вершин і перевалів за 23-ма напрямками, висотними коефіцієнтами й даними спостережень на дев'яти метеостанціях Закарпатської області у 1955 – 2005 роках

№ з/п	Назва перехідних станцій, населених пунктів, вершин, перевалів	Висота над рівнем Балтійського моря, м	Географічна довгота, град., мін.	Географічна широта, град., мін.	Максимальна швидкість вітру, м/с, – чисельник, характеристичне значення вітрового тиску, Па, – знаменник	
					літні	зимові
1	2	3	4	5	6	7
1	Чоп	100,0	22°18'	48°21'	23,71/340	19,61/230
2	Батьово	102,5	22°23'	48°22'	23,71/340	19,61/230
3	Мукачеве	116,5	22°44'	48°26'	24,08/350	20,11/240

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7
4	Велика Паладь	120,0	22°53'	47°59'	24,04/350	20,09/240
5	Виноградів	127,4	23°02'	48°08'	24,09/350	20,2/250
6	Довге	166,0	23°16'	48°21'	24,69/370	20,87/270
7	Іршава	141,5	23°02'	48°18'	24,37/360	20,47/260
8	Перечин	142,0	22°28'	48°44'	25,71/400	22,84/310
9	Буштино	195,8	23°19'	48°02'	20,62/240	20,42/250
10	Свалява	203,5	23°00'	48°32'	23,88/350	20,09/240
11	Тячів	210,0	23°34'	48°00'	20,92/270	20,62/260
12	Бедевля, Тересва	225,2	23°39'	48°02'	21,23/270	20,83/260
13	Поляна	242,0	22°58'	48°36'	23,07/320	20,07/240
14	Діброва	250,0	23°51'	48°00'	21,75/280	21,17/270
15	Великий Бичків	290,9	24°00'	47°58'	22,60/310	21,74/290
16	г. Глибока	301,1	22°24'	48°32'	28,18/480	25,73/400
17	Дубове	363,7	23°53'	48°10'	23,74/340	23,23/330
18	Кобилецька Поляна	387,3	24°05'	48°03'	24,10/350	23,54/330
19	Вільшани	420,0	23°37'	48°20'	25,41/390	23,60/340
20	Воловець	472,9	23°12'	48°42'	21,22/270	20,01/240
21	Усть-Чорна	502,0	23°56'	48°19'	26,10/420	25,79/400
22	Кваси	513,0	24°09'	47°55'	30,84/590	21,68/290
23	г. Свалявка	525,0	22°49'	43°40'	29,56/530	21,01/380
24	Богдан	525,0	24°21'	48°02'	30,98/590	21,95/290
25	Буковець	550,0	22°57'	48°54'	22,14/300	21,20/270
26	г. Чорна Гора (Виноградів)	565,0	23°03'	48°09'	26,86/440	26,86/440
27	Лопухів	615,0	23°58'	48°22'	28,09/480	27,39/460
28	Ясіня	636,6	24°22'	48°16'	32,23/630	24,45/360
29	Перевал Пшеленч- Бескид	790,0	22°42'	49°05'	33,39/680	29,21/520
30	г. Прапор	819,0	22°29'	48°59'	33,80/700	29,67/540
31	Перевал Середньо- Верецький	839,0	23°09'	48°48'	28,76/500	28,16/480
32	г. Дарвайка	883,0	23°45'	48°28'	34,99/740	29,98/540
33	г. Хмелів	887,0	24°67'	47°55'	35,04/750	30,07/550
34	Перевал Вишківський	930,0	23°37'	48°42'	30,84/580	30,36/560
35	Перевал Яблунецький	931,0	24°26'	48°18'	35,53/770	31,05/590
36	г. Маковиця	978,0	22°36'	48°39'	36,10/790	32,20/630
37	Перевал Бескид	981,0	23°20'	48°45'	32,01/630	31,59/610
38	г. Дахманів	1017,0	22°57'	48°29'	35,72/780	34,90/740
39	г. Мокра	1225,0	23°55'	48°21'	38,82/920	37,65/860
40	г. Верхні Дебрі	1237,0	24°28'	48°15'	38,80/918	37,50/858
41	г. Угорська	1294,0	24°07'	48°16'	39,60/950	39,19/930
42	г. Кук	1361,0	23°24'	48°28'	40,18/980	40,57/1000
43	г. Кукуль	1539,0	24°32'	48°08'	42,10/1081	44,20/1192
44	г. Братківська	1788,0	24°11'	48°22'	44,90/1228	49,70/1507
45	г. Стіг	1850,0	24°33',5	48°57'	45,00/1235	43,41/1149
46	г. Чорна Гора (Рахів)	2020,0	24°37',5	48°02',5	47,40/1370	54,80/1832

За даними таблиць 1, 2, 3 побудовані графіки зміни максимальної швидкості вітру в липні й січні (рис. 1) та характеристичного вітрового тиску в липні й січні (рис. 2) залежно від розміщення метеостанцій і вершин Карпат над рівнем Балтійського моря. На графіках чітко ілюструється практично лінійна залежність швидкості й тиску вітру від географічної висоти, починаючи з висоти 600 м.

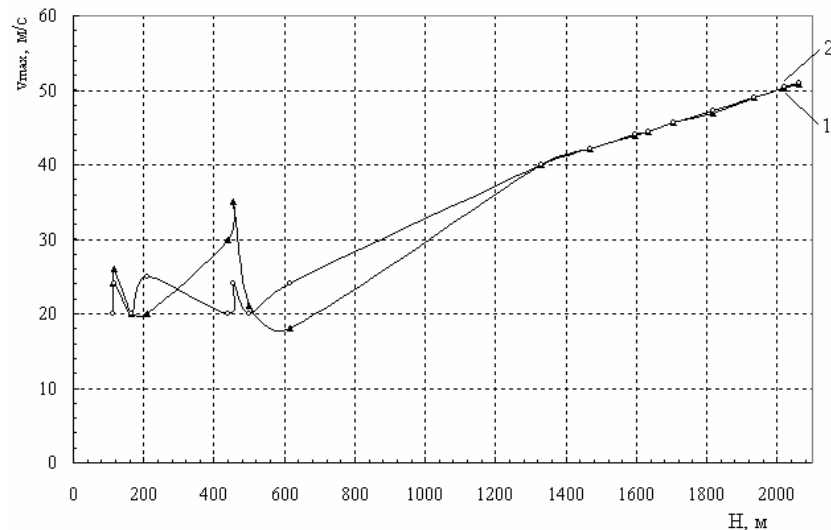


Рисунок 1 – Графік зміни максимальної швидкості вітру залежно від розміщення метеостанцій і вершин Українських Карпат над рівнем Балтійського моря: 1 – липень, 2 – січень

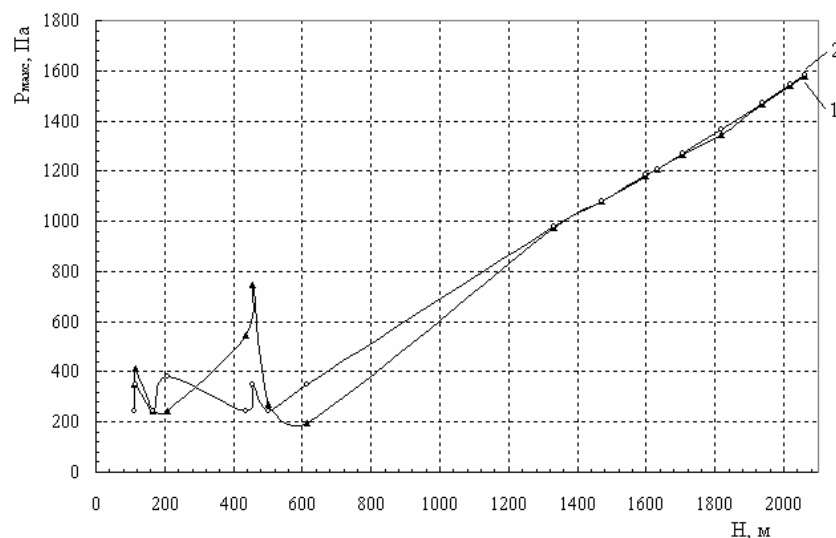


Рисунок 2 – Графік зміни характеристичного вітрового тиску залежно від розміщення метеостанцій і вершин Українських Карпат над рівнем Балтійського моря: 1 – липень, 2 – січень

Висновки:

1. У природному середовищі кліматичні параметри взаємопов'язані між собою. Це доведено при застосуванні у формулах розрахунку характеристичного значення вітрового тиску (літнього, зимового), параметрів: швидкості вітру, атмосферного тиску, температур зовнішнього повітря в липні й січні, що отримані за спостереженнями у 1955 – 2005 роках на дев'яти метеостанціях Закарпатської області.

2. Обчислені характеристичні значення максимальних вітрових тисків залежно від висоти розміщення станцій над рівнем Балтійського моря [8] коливаються в межах:

- літні: 340 Па (Чоп – 100 м) – 1370 Па (г. Говерла);
- зимові: 230 Па (Чоп – 100 м) – 1832 Па (г. Говерла).

3. Існуючі норми забезпечуються на перехідних станціях :

- для 1-го вітрового району (400 Па):
 - літні: м. Перечин – 142 м (400 Па);
 - зимові: г. Глибока – 301,1 м (400 Па);
- для 2-го вітрового району (450 Па):
 - літні: г. Глибока – 301,1 м (480 Па);
 - зимові: с. Лопухів – 615 м (460 Па).

4. Таким чином, від висоти над рівнем Балтійського моря 615 до 2061 м (г. Говерла) існуючі норми застосовувати не доцільно.

5. Для заповнення «білих плям» рекомендується поділити територію Закарпатської області за максимальним зимовим вітровим тиском на дев'ять районів:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1-й район – 250 – 400 Па; | 6-й район – 600 – 800 Па; |
| 2-й район – 400 – 450 Па; | 7-й район 800 – 1000 Па; |
| 3-й район – 450 – 500 Па; | 8-й район – 1000 – 1300 Па; |
| 4-й район – 500 – 550 Па; | 9-й район – 1300 – 1900 Па; |
| 5-й район – 550 – 600 Па; | |

за максимальним літнім вітровим тиском на вісім районів:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1-й район – 250 – 400 Па; | 5-й район – 550 – 600 Па; |
| 2-й район – 400 – 450 Па; | 6-й район – 600 – 800 Па; |
| 3-й район – 450 – 500 Па; | 7-й район – 800 – 1000 Па; |
| 4-й район – 500 – 550 Па; | 8-й район – 1000 – 1300 Па. |

Література

1. ASCE 7-93 1993 and Draft of ASCE 7-95, 1995. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers. – New York. – P. 10 – 12.
2. Андреева Г. К. Некоторые вопросы построения климатических карт / Г. К. Андреева, В. Н. Бабиченко. – К. : Укр НцГМИ, 1974. – Вып.131. – С. 106 – 116.
3. Бабиченко В. Н. Климат Ужгорода / В. Н. Бабиченко. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 190 с.
4. Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем / М. И. Будыко – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 351 с.
5. Бучинский И. Е. Климат Украины / И. Е. Бучинский. – Л. : Гидрометеиздат, 1960. – 130 с.
6. Гук М. І. Клімат УРСР / М. І. Гук, І. К. Половко, Г. Ф. Прихотько. – К. : Р. шк., 1958. – 72 с.
7. Гук Я. С. Визначення рекомендованих нормативних параметрів тиску для населених пунктів, окремих вершин і перевалів Закарпатської області / Я. С. Гук // Науковий вісник УжНУ. Серія: Фізика. – Ужгород, 2006. – Вип. 19. – С. 206 – 208.
8. Гук Я. С. Методика визначення висот горизонталей на топографічних картах Закарпатської області, що відповідають максимальним зимовим і літнім вітровим тискам / Я. С. Гук // Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава, 2015. – Вип. 2 (44). – С. 42 – 51.
<http://znp.pntu.edu.ua>
9. ДСТУ НБ В.1.1-21:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – К., 2010. – 55 с.
10. Закарпатська обл. Загальногеографічна карта (М 1:250 000). – К.: АГП, 2006. – 1 лист.
11. Кінаш Р. І. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні / Р. І. Кінаш, О. М. Бурнаєв. – Львів: Вид-во науково-технічної літератури, 1998. – 1152 с.
12. Кінаш Р. І. Методика визначення параметрів будівельної кліматології для населених пунктів, вершин і перевалів Закарпатської області / Р. І. Кінаш, Я. С. Гук // Problems of the Technical Meteorology (22 – 26 may, 2006). – Львів, 2006. – P. 50 – 56.

13. Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції / В. А. Пашинський. – К.: УкрНДІПСК, 1999. – 185 с.
14. Пичугин С. Ф. Вероятностный анализ ветровой загрузки / С. Ф. Пичугин // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 12. – С. 13 – 20.
15. Pichugin S. F. Probabilistic Analysis on Wind Load and Reliability of Structures / S. F. Pichugin // Proc. of the 2 EACWE. Vol. 2. – Genova, Italy, 1997. – P. 1883 – 1890.
16. Пичугин С. Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции / С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько. – Полтава: Изд-во «АСМІ», 2005. – 342 с.
17. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 35 с.
18. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. – М.: Стройиздат. 1985. – 35 с.
19. СНиП 2.01.01.82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.

References

1. ASCE 7-93 1993 and Draft of ASCE 7-95, 1995. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers. – New York. – P. 10 – 12.
2. Andreeva G. K. Nekotorye voprosy postroeniya klimaticheskikh kart / G. K. Andreeva, V. N. Babichenko. – K. : Ukr NiGMI, 1974. – Vyp.131. – S. 106 – 116.
3. Babichenko V. N. Klimat Uzhgoroda / V. N. Babichenko. – L. : Gidrometeoizdat, 1991. – 190 s.
4. Budyko M. I. Klimat v proshlom i budushchem / M. I. Budyko – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 351 s.
5. Buchinskiy I. E. Klimat Ukrainy / I. E. Buchinskiy. – L. : Gidrometeoizdat, 1960. – 130 s.
6. Guk M. I. Klimat URSS / M. I. Guk, I. K. Polovko, G. F. Prihotko. – K. : R. shk., 1958. – 72 s.
7. Guk Ya. S. Vyznachennya rekomendovanih normativnih parametriv tisku dlya naselenih punktiv, okremih vershin i perevaliv Zakarpatskoyi oblasti / Ya. S. Guk // Naukoviy visnik UzhNU. Seriya: Fizika. – Uzhgorod, 2006. – Vip. 19. – S. 206 – 208.
8. Guk Ya. S. Metodika viznachennya visot gorizontaley na topografichnih kartah Zakarpatskoyi oblasti, shcho vidpovidayut maksimalnim zimovim i litnim vitrovim tiskam / Ya. S. Guk // Zb. nauk. prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava, 2015. – Vip. 2 (44). – S. 42 – 51.
<http://znp.pntu.edu.ua>
9. DSTU NB V.1.1-21:2010. Zahist vid nebezpechnih geologichnih protsesiv, shkidlivih ekspluatatsiy nih vpliviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatologiya. – K., 2010. – 55 s.
10. Zakarpatska obl. Zagalnogeografichna karta (M 1:250 000). – K.: AGP, 2006. – 1 list.
11. Kinash R. I. Vitrove navantazhennya i vitroenergetichni resursi v Ukrayini / R. I. Kinash, O. M. Burnaev. – Lviv: Vid-vo naukovno-tehnichnoyi literaturi, 1998. – 1152 s.
12. Kinash R. I. Metodika viznachennya parametriv budivelnoyi klimatologiyi dlya naselenih punktiv, vershin i perevaliv Zakarpatskoyi oblasti / R. I. Kinash, Ya. S. Guk // Problems of the Technical Meteorology (22 – 26 may, 2006). – Lviv, 2006. – P. 50 – 56.
13. Pashinskiy V. A. Atmosferni navantazhennya na budivelni konstruktsiyi / V. A. Pashinskiy. – K.: UkrNDIPSK, 1999. – 185 s.
14. Pichugin S. F. Veroyatnostnyy analiz vetrovoy zagruzki / S. F. Pichugin // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. – 1997. – № 12. – S. 13 – 20.
15. Pichugin S. F. Probabilistic Analysis on Wind Load and Reliability of Structures / S. F. Pichugin // Proc. of the 2 EACWE. Vol. 2. – Genova, Italy, 1997. – P. 1883 – 1890.
16. Pichugin S. F. Vetrovaya nagruzka na stroitelnye konstruktsii / S. F. Pichugin, A. V. Mahinko. – Poltava: Izd-vo «ASMI», 2005. – 342 s.
17. ДБН В.1.2-2:2006. Система zabezpechennya nadiynosti ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Navantazhennya i vplivi. Normi proektuvannya. – K.: Minbud Ukrayini, 2006. – 35 s.
18. SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeystviya. – M.: Stroyizdat. 1985. – 35 s.
19. SNiP 2.01.01.82. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika. – M.: Stroyizdat, 1983. – 136 s.

© Пічугін С.Ф., Кінаш Р.І., Гук Я.С.
Надійшла до редакції 27.03.2016

Дорофеев В.С., д.т.н., профессор
Пушкар Н.В., к.т.н., доцент
Пашинський В.В., к.т.н.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

МЕТОДИКИ НОРМУВАННЯ СИЛОВОГО ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

За результатами статистичного аналізу метеорологічних даних визначено розрахункові параметри температури атмосферного повітря як силового впливу на несучі будівельні конструкції. Розроблено два варіанти методики нормування температурних впливів: через розрахункові температури повітря і температури замикання конструкцій та на основі безпосереднього встановлення перепадів температури. Виконано гармонізацію існуючого порядку визначення розрахункових значень силового впливу температури з Єврокодом та формами подання інших кліматичних навантажень у ДБН. З'ясовано, що запропонований порядок визначення розрахункових значень температурного впливу простіший від поданих у чинних нормах і гармонізований з формами подання інших атмосферних навантажень.

Ключові слова: кліматичні навантаження, силовий вплив температури, нормування навантажень, територіальне районування.

Дорофеев В.С., д.т.н., профессор
Пушкар Н.В., к.т.н., доцент
Пашинский В.В., к.т.н.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

МЕТОДИКИ НОРМИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

По результатам статистического анализа метеорологических данных определены расчетные параметры температуры атмосферного воздуха как силового воздействия на несущие строительные конструкции. Разработаны два варианта методики нормирования температурных воздействий: через расчетные температуры воздуха и температуры замыкания конструкций и на основе непосредственного нормирования перепадов температуры.

Выполнена гармонизация существующего порядка определения расчетных значений силового воздействия температуры с Еврокодом и формами представления других климатических нагрузок в ДБН. Выяснено, что предложенный порядок определения расчетных значений температурного воздействия проще от представленного в действующих нормах и гармонизирован с формами представления других атмосферных нагрузок.

Ключевые слова: климатические нагрузки, силовое воздействие температуры, нормирование нагрузок, территориальное районирование.

Dorofeev V., DSc, Professor
Pushkar N., PhD, Associate Professor
Pashinsky V., PhD

Odesa State Academy of Construction and Architecture

NORMALIZATION METHODS OF POWER IMPACT FROM AIR TEMPERATURE

In order to simplify the work of the designer in DBN averaged some design parameters of the power impact of air temperature on the territory of Ukraine. A simple calculation shows that such averaging may lead to errors in the 10 – 15% of the design strength of steel under the condition of rigid fixing. Therefore, ignoring the territorial variability of the average daily temperature in the DBN to be considered unacceptable.

It is also clear that the current rules for determining the value of the temperature difference did not harmonized with the rules for any other climatic loads, or with the Eurocodes.

Based on the results of the statistical analysis of meteorological data the design parameters of air temperature, as the force impact on the supporting constructions are determined.

Processing of obtained results was performed using special software package which was used to build the zoning maps and perform anti-aliasing of borders of climatic regions.

In some cases, the boundaries of territorial areas combined with the boundaries of administrative areas, near which they were held, providing unambiguous decision on the classification of certain localities or areas to certain areas.

We offer two options for standardization of the temperature effects.

The first variant offers to normalize force effect of air temperature on the load-bearing constructions through design temperature and the temperature of designs closure. It's a classic scheme, which is used in the SNIP and DBN. The characteristic values of the temperature of the coldest and warmest days are determined by the zoning maps.

To implement the first option of standardization two zoning maps are used.

Second variant of methodology offers to normalize temperature changes directly. For this approach is enough only one zoning map.

For each of these methods developed detailed calculation algorithm. First variant of standardization of temperature effects 13 design parameters need to be calculated, and for the second variant – only 9.

Harmonization of the existing order of definition of the estimated values of the power effects of temperature with Eurocodes and other forms of presentation of climatic loads in DBN are performed.

The proposed order of definition of estimated values of the impact of climatic temperature is easier from that presented in the existing standards and harmonized with the forms of representation of other atmospheric loads in State Building Codes.

Keywords: *climatic loads, the force effect of temperature, regulation of loads, territorial zoning.*

Вступ. Зміни температури викликають лінійні деформації та переміщення, а також додаткові напруження в жорстких статично невизначних системах. Згідно з фундаментальними положеннями опору матеріалів та будівельної механіки, деформації від зміни температури визначаються через коефіцієнт лінійного температурного розширення, а додаткові напруження від змін температури – відповідно до закону Гука. У той же час величина температурного перепаду, що визначається за діючими нормами проектування, обґрунтована недостатньо та може бути уточненою.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Розрахункові значення температурного впливу на несучі будівельні конструкції встановлюються за нормами навантажень [6], які не враховують мінливості розрахункових параметрів [1, 2, 3, 4] по території України [5] та не встановлюють залежність розрахункових значень температурних перепадів від строку служби конструкції, як це зроблено в тих же нормах [6] для інших кліматичних навантажень (сніг, вітер, ожеледь).

Для дослідження силового впливу змін температури атмосферного повітря на несучі будівельні конструкції можна використати статистичні характеристики квазістаціонарного випадкового процесу середньодобової температури повітря на території України, які наведені й проаналізовані в монографії [7] та в роботі [8].

Пропозиції щодо нормування силового впливу температури повітря з урахуванням строку служби конструкцій і територіальної мінливості розрахункових параметрів розроблені в статті [9]. Запропонована схема нормування відповідає класичному підходу ДБН [6] та EN [10], який базується на визначенні розрахункових значень температурних перепадів як різниць між температурами найхолоднішої чи найтеплішої доби та початкової температури замикання конструкції. Розрахункові температури доби відповідають заданим періодам повторюваності, а їх характеристичні значення встановлюються за розробленими картами територіального районування, що й розв'язує проблему гармонізації з методикою нормування інших кліматичних навантажень. Недоліком методики [9] є значна кількість розрахункових параметрів, а також необхідність використання двох карт територіального районування України за характеристичними значеннями температури найхолоднішої та найтеплішої доби, що ускладнює норми навантажень і користування ними.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У нормативному документі [6] з метою спрощення роботи проектувальника виконано осереднення низки розрахункових параметрів силового впливу температури атмосферного повітря по всій території України. Простий розрахунок показує, що за умови жорсткого закріплення кінців таке осереднення може призводити до виникнення похибок у 10 – 5% розрахункового опору сталі. Тому ігнорування територіальної мінливості середньодобової температури повітря в нормах [6] слід вважати недопустимим.

Очевидно, що й діючі правила визначення величини температурного перепаду не гармонізовані ні з нормами встановлення інших кліматичних навантажень, ні з Єврокодом [10].

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованих пропозицій щодо нормування температури атмосферного повітря для проектування несучих будівельних конструкцій на території України.

Основний матеріал і результати. Розроблення карт територіального районування України виконано за такими базовими параметрами температури атмосферного повітря:

- характеристичне значення температури найхолоднішої доби t_{c0} ;
- характеристичне значення температури найтеплішої доби t_{m0} ;
- характеристичне значення від'ємного перепаду температури Δ_{c0} .

Інші розрахункові параметри температури можуть визначатися через указані базові параметри або прийматися єдиними для всієї території України.

Карти районування розроблені з використанням методики і програми, описаної в роботі [11]. Програма обчислює табличну функцію математичного сподівання випадкового поля районуваного параметра температури шляхом згладжування даних на вузли прямокутної сітки, після чого визначає його верхню або нижню межу з урахуванням стандарту поля та заданої забезпеченості районування. Лінії рівня, проведені по встановленій таким чином верхній (нижній) межі поля параметра, є шуканими межами територіальних районів. Такий алгоритм дозволяє оптимальним чином вибрати крок градації територіальних районів і встановити їх географічні межі із заданою забезпеченістю, що гарантує керовані запаси територіального районування.

З урахуванням значної кількості пунктів спостереження та невеликої середньої відстані між ними константа згладжування випадкового поля нормованого параметра згідно з рекомендаціями [11] прийнята такою, що дорівнює 30 кілометрів. Відстань від математичного сподівання до верхньої (нижньої) межі цього поля та кроки градації територіальних районів обиралися за таблицями [11] такими, щоб отримати забезпеченість територіального районування в межах від 0,85 до 0,95, котра є близькою до забезпеченості районування снігового та вітрового навантажень у нормах [6].

З наведених нижче карт (рис.1, 2, 3) видно, що прийняті параметри забезпечили отримання досить плавних і систематично розміщених меж територіальних районів (ізотерм). У деяких випадках межі територіальних районів суміщені з межами адміністративних областей, поблизу яких вони проходили, що забезпечує однозначність рішення щодо віднесення певних населених пунктів чи територій до тих або інших районів.



Рисунок 1 – Територіальне районування України за характеристичним значенням температури найхолоднішої доби t_{c0}

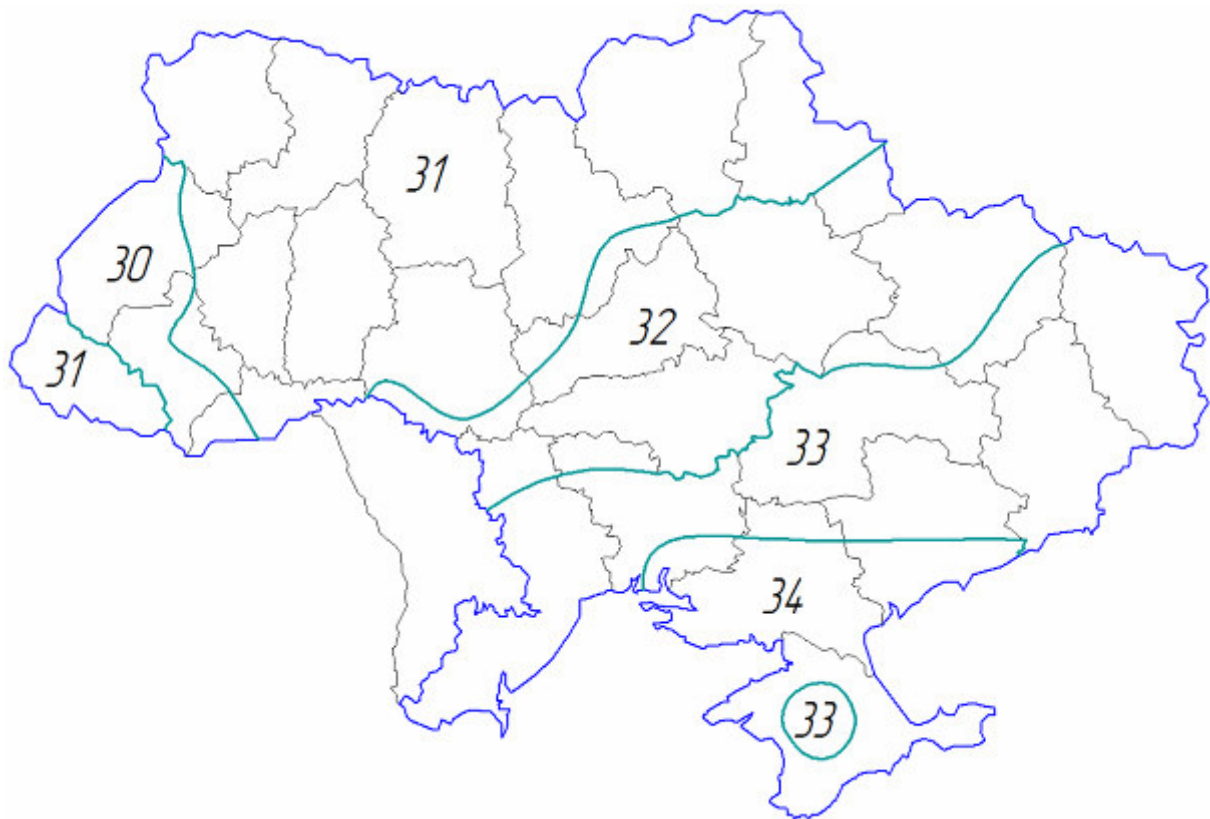


Рисунок 2 – Територіальне районування України за характеристичним значенням температури найтеплішої доби t_{w0}

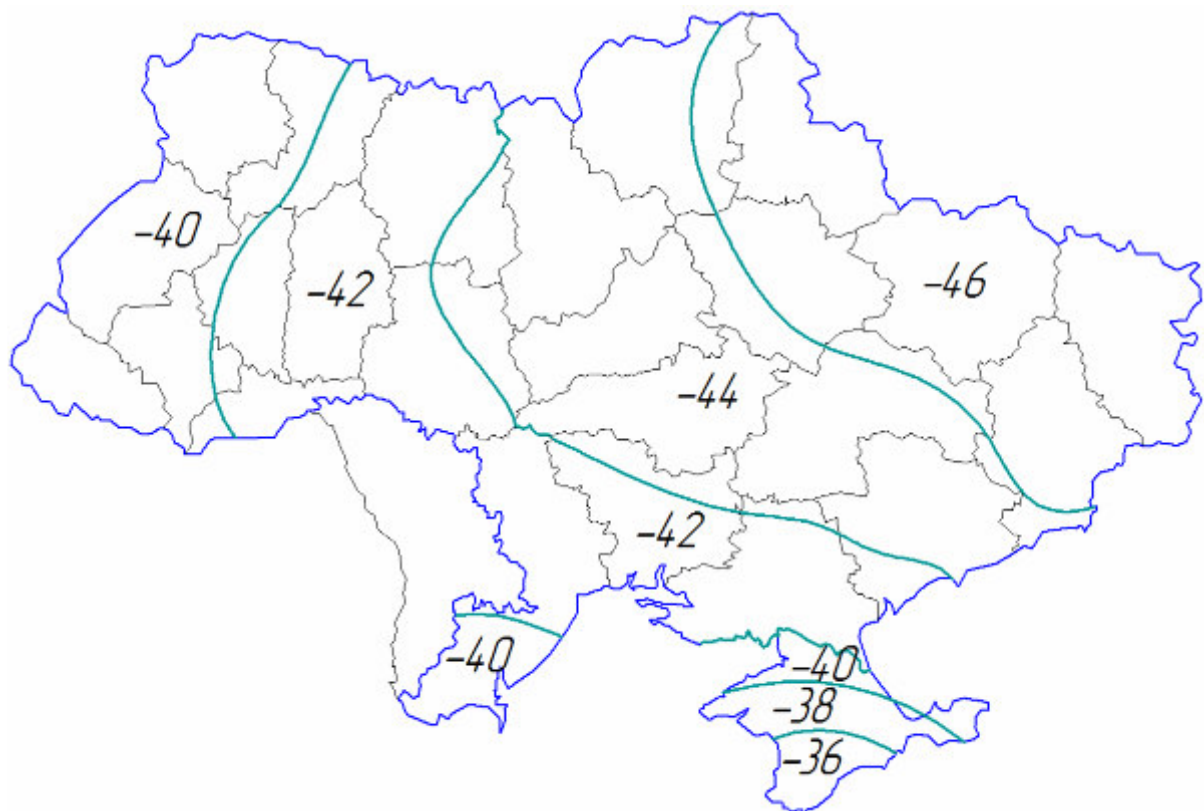


Рисунок 3 – Територіальне районування України за характеристичним значенням температурного перепаду Δ_{0c}

Аналіз розроблених карт територіального районування дозволяє зробити ряд узагальнень та висновків щодо характеру територіальної мінливості розрахункових параметрів температури повітря. Зокрема, з рисунка 1 видно, що:

- абсолютне значення температури найхолоднішої доби зростає з південного заходу на північний схід;
- на карті виділено дев'ять територіальних районів з характеристичними значеннями температури найхолоднішої доби від -16°C на південному березі Криму до -32°C на північному сході України;
- найбільша мінливість температури притаманна території АР Крим, де виділено чотири територіальні райони.

З рисунка 2 видно, що:

- абсолютне значення температури найтеплішої доби зростає з північного заходу на південний схід України;
- на карті виділено сім територіальних районів з характеристичними значеннями перепаду температури: $+30^{\circ}\text{C}$, $+31^{\circ}\text{C}$, $+32^{\circ}\text{C}$, $+33^{\circ}\text{C}$, $+34^{\circ}\text{C}$.

З рисунка 3 видно, що:

- абсолютне значення перепадів температури зменшується з північного сходу на південний захід України;
- на карті виділено шість територіальних районів з такими характеристичними значеннями перепаду температури при літньому замиканні конструкцій: -36°C , -38°C , -40°C , -42°C , -44°C , -46°C ;
- значною мінливістю температурного режиму характеризується територія Криму, на якій розміщено три територіальні райони з шести існуючих на карті.

Порівняння розроблених карт з фактичними значеннями параметрів температури повітря для окремих пунктів спостереження показало, що виявлені похибки територіального районування, особливо не в запас надійності, є незначними, що дозволяє використовувати наведені карти для визначення характеристичних значень розрахункових параметрів температури атмосферного повітря.

Отримані результати дозволяють сформулювати два варіанти порядку визначення розрахункових параметрів температури атмосферного повітря при розрахунках несучих будівельних конструкцій.

Перший варіант відповідає класичній схемі ДБН [6] та EN [10], яка базується на встановленні початкових температур замикання конструкцій і температур найтеплішої й найхолоднішої доби. Характеристичні значення температур найхолоднішої та найтеплішої доби встановлюються за картами районування з рисунків 1 і 2. Послідовність визначення інших розрахункових параметрів викладена в таблиці 1.

Другий варіант порядку визначення розрахункових параметрів температури атмосферного повітря базується на безпосередньому визначенні за картою з рисунка 3 характеристичного значення мінусового перепаду температури, що відповідає замиканню конструкцій у теплий період року. Порядок установаження інших параметрів викладено в таблиці 2.

При використанні таблиці 2 початкові температури замикання конструкцій, необхідні для визначення температурних перепадів у будівлях зі штучним кліматом за формулами з таблиці 11.1 норм [6], доцільно приймати однаковими для всієї території України. На відміну від нормативного документа [6], де прийняті середні по території України значення t_{0w} й t_{0c} , в таблиці 2 значення t_{0w} і t_{0c} встановлені в запас надійності із забезпеченістю близько 0,85...0,90.

Таблиця 1 – Порядок нормування через розрахункові температури повітря та температури замикання конструкцій

Параметри	Способи визначення
Характеристичне значення температури найхолоднішої доби t_{c0}	За картою 1
Характеристичне значення температури найтеплішої доби t_{w0}	За картою 2
Граничне розрахункове значення температури найхолоднішої доби $t_{mc}(T)$ з періодом повторюваності T	$t_{mc}(T) = \gamma_{fmc} t_{c0}; \quad (1)$
Граничне розрахункове значення температури найтеплішої доби $t_{mw}(T)$ з періодом повторюваності T	$t_{mw}(T) = \gamma_{fmw} t_{w0}; \quad (2)$
Початкова температура замикання конструкцій в теплий період року (середня температура теплого півріччя) t_{0w}	$t_{0w} = 1,3 t_{w0} - 24; \quad (3)$ $t_{0w} = +16^{\circ}\text{C}$ (середнє) $t_{0w} = +18^{\circ}\text{C}$ (забезпеч. 0,85)
Початкова температура замикання конструкцій в холодний період року (середня температура холодного півріччя) t_{0c}	$t_{0c} = 13,8 + 0,56 t_{c0} \quad (4)$ $t_{0c} = 0^{\circ}\text{C}$ (середнє) $t_{0c} = -2^{\circ}\text{C}$ (забезпеч. 0,90)
Граничне розрахункове значення додатного перепаду температури $\Delta_{mw}(T)$ (при зимовому замиканні) з періодом повторюваності T	$\Delta_{mw}(T) = t_{mw}(T) - t_{0c} \quad (5)$
Граничне розрахункове значення від'ємного перепаду температури $\Delta_{mc}(T)$ (при літньому замиканні) з періодом повторюваності T	$\Delta_{mc}(T) = t_{mc}(T) - t_{0w} \quad (6)$
Експлуатаційне розрахункове значення температури найхолоднішої доби $t_{ec}(\eta)$ для частки строку служби η	$t_{ec}(\eta) = \gamma_{fec} t_{c0}; \quad (7)$
Експлуатаційне розрахункове значення температури найтеплішої доби $t_{ew}(\eta)$ для частки строку служби η	$t_{ew}(T) = \gamma_{few} t_{w0}; \quad (8)$
Експлуатаційне розрахункове значення додатного перепаду температури $\Delta_{ew}(\eta)$ (при зимовому замиканні конструкцій) для частки строку служби η	$\Delta_{ew}(T) = t_{ew}(T) - t_{0c}; \quad (9)$
Експлуатаційне розрахункове значення від'ємного перепаду температури $\Delta_{ec}(\eta)$ (при літньому замиканні конструкцій) для частки строку служби η	$\Delta_{ec}(T) = t_{ec}(T) - t_{0w}; \quad (10)$
Квазіпостійне розрахункове значення перепаду температури Δ_p	$\Delta_p = 4,5 - 0,16 t_{c0} \quad (11)$ або $\Delta_p = 9^{\circ}\text{C}$

Таблиця 2 – Порядок нормування через розрахункові перепади температури повітря

Параметри	Способи визначення
Характеристичне значення від'ємного перепаду температури Δ_{c0} (при літньому замиканні конструкцій)	За картою 3
Характеристичне значення додатного перепаду температури Δ_{w0} (при зимовому замиканні конструкцій)	$\Delta_{w0} = 11 - 0,5 \Delta_{c0}$ (12)
Граничне розрахункове значення від'ємного перепаду температури $\Delta_{mc}(T)$ (при літньому замиканні конструкцій) з періодом повторюваності T	$\Delta_{mc}(T) = \gamma_{fm} \Delta_{c0}$ (13)
Граничне розрахункове значення додатного перепаду температури $\Delta_{mw}(T)$ (при зимовому замиканні конструкцій) з періодом повторюваності T	$\Delta_{mw}(T) = \gamma_{fm} \Delta_{w0}$ (14)
Експлуатаційне розрахункове значення від'ємного перепаду температури $\Delta_{ec}(\eta)$ при літньому замиканні конструкцій для частки строку служби η	$\Delta_{ec}(\eta) = \gamma_{fec} \Delta_{c0}$ (15)
Експлуатаційне розрахункове значення додатного перепаду температури $\Delta_{ew}(\eta)$ (при зимовому замиканні конструкцій) для частки строку служби η	$\Delta_{ew}(\eta) = \gamma_{few} \Delta_{w0}$ (16)
Початкова температура замикання конструкцій в теплий період року (середня температура теплого півріччя) t_{0w}	$t_{0w} = +16^{\circ}\text{C}$ (середнє) $t_{0w} = +18^{\circ}\text{C}$ (забезпеч. 0,85)
Початкова температура замикання конструкцій в холодний період року (середня температура холодного півріччя) t_{0c}	$t_{0c} = 0^{\circ}\text{C}$ (середнє) $t_{0c} = -2^{\circ}\text{C}$ (забезпеч. 0,90)
Квазіпостійне розрахункове значення перепаду температури Δ_p	$\Delta_p = 9^{\circ}\text{C}$

В обох варіантах визначення розрахункових параметрів температурного впливу добові коливання температури атмосферного повітря запропоновано враховувати за зміненою таблицею 11.2 норм [6], яку слід викласти в такій редакції:

Конструкції будівель	Прирости температури θ , $^{\circ}\text{C}$			
	θ_1	θ_6	θ_2	θ_3
Металеві	8	5	6	4
Залізобетонні, бетонні, армокам'яні і кам'яні за товщи, см:				
до 15	8	5	6	4
від 15 до 39	6	4	4	6
понад 40	2	2	2	4

При цьому наведену в третьому рядку таблиці 11.1 нормативного документа [6] формулу для визначення розрахункової температури повітря в холодний період року $t_c = t_{ec} - 0,5\theta_1$ слід замінити на $t_c = t_{ec} - \theta_6$. Додатковий параметр θ_6 враховує реальні відхилення температури повітря у бік пониження від середньої температури найхолоднішої доби.

Перевага другого варіанта нормування температурного впливу полягає в меншій кількості розрахункових параметрів і карт районування, що спрощує норми та порядок користування ними.

Недоліком цього варіанта є менш точне визначення початкових температур замикання конструкцій t_{0w} і t_{0c} , необхідних для обчислення температурних перепадів у будівлях зі штучним кліматом за формулами з таблиці 11.1 норм [6], а також квазіпостійного розрахункового значення температурного перепаду Δp , які встановлені єдиними для всієї території України.

Висновки:

1. Відповідно до принципів методу граничних станів, встановлено характеристичні значення параметрів температури повітря (за середнім періодом повторюваності 50 років), а також коефіцієнти надійності, які враховують заданий період повторюваності граничних розрахункових значень та частку терміну експлуатації, протягом якої можуть перевищуватися експлуатаційні розрахункові значення температурного впливу.

2. За результатами досліджень запропоновано й обґрунтовано два варіанти нормування температурного впливу на будівельні конструкції. Перший варіант відповідає класичній схемі чинних норм, яка базується на встановленні температур найтеплішої і найхолоднішої доби за відповідними картами районування та початкових температур замикання конструкцій – за виявленими залежностями. У другому варіанті розрахункові значення перепадів температури обчислюються шляхом множення характеристичних значень на обґрунтовані в роботі коефіцієнти надійності, які враховують заданий період повторюваності граничних розрахункових значень і частку терміну експлуатації, протягом якої можуть перевищуватися експлуатаційні розрахункові значення температурного впливу.

3. Запропоновано методику нормування та визначення граничних, експлуатаційних і квазіпостійних розрахункових значень впливу температури атмосферного повітря на несучі будівельні конструкції, яка базується на безпосередньому районуванні мінусових перепадів температури та визначенні всіх інших параметрів за виявленими залежностями. Ця методика гармонізована з формою подання інших кліматичних навантажень у нормативному документі [6], але відрізняється меншою кількістю розрахункових параметрів і карт районування, що спрощує норми та порядок користування ними.

Література

1. Wang S. *Simplified Building Model for Transient Thermal Performance Estimation Using GA-based Parameter Identification* / S. Wang, X. Xu // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2006. – № 45. – P. 419 – 432.
2. Fernando S. W. *The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings* / S. W. Fernando, R. Lamberts // *Energy Efficiency in Buildings Laboratory (Civil Engineering Department)*. – Santa Catarina: Federal University of Santa Catarina, 2004. – P. 109 – 113.
3. Namias J. *Some Statistical and Synoptic Characteristics Associated with El Niño* / J. Namias // *J. Phys. Oceanogr.* – 1976. – № 6. – P. 130 – 138.
4. Willmott C. J. *Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States* / C. J. Willmott, K. Matsuura // *J. Appl. Meteor.* – 1995. – № 34. – P. 2577 – 2586.

5. Кінаш Р. І. Температурний режим повітря і ґрунту в Україні / Р. І. Кінаш, О. М. Бурнаєв. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 2001. – 800 с.
6. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К. : Мінбуд України, 2007. – 60 с.
7. Дорофєєв В. С. Напружено-деформований стан сталевих каркасів при температурних впливах / В. С. Дорофєєв, Н. В. Пушкар, В. В. Пашинський. – Одеса: ОДАБА, 2014. – 160 с.
8. Карюк А. М. Статистичні характеристики середньодобової температури повітря на території України / А. М. Карюк, В. В. Пашинський // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2012. – Вип. 47, ч. 2. – С. 157 – 163.
9. Пашинський В. В. Нормування й районування розрахункових параметрів температури повітря на території України / В. В. Пашинський // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків, 2015. – Вип. 120. – С. 49 – 53.
10. ENV 1991-2-5. Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures. Part 2.5: Thermal actions. – CEN, 1997.
11. Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції на території України / В. А. Пашинський. – К. : УкрНДІпроектстальконструкція, 1999. – 185 с.

References

1. Wang S. Simplified Building Model for Transient Thermal Performance Estimation Using GA-based Parameter Identification / S. Wang, X. Xu // International Journal of Thermal Sciences. – 2006. – № 45. – P. 419 – 432.
2. Fernando S. W. The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings / S. W. Fernando, R. Lamberts // Energy Efficiency in Buildings Laboratory (Civil Engineering Department). – Santa Catarina: Federal University of Santa Catarina, 2004. – P. 109 – 113.
3. Namias J. Some Statistical and Synoptic Characteristics Associated with El Niño / J. Namias // J. Phys. Oceanogr. – 1976. – № 6. – P. 130 – 138.
4. Willmott C. J. Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States / C. J. Willmott, K. Matsuura // J. Appl. Meteor. – 1995. – № 34. – P. 2577 – 2586.
5. Kinash R. I. Temperaturniy rezhim povitrya i gruntu v Ukrayini / R. I. Kinash, O. M. Burnaev. – Lviv: Vidavniststvo naukovo-tehnichnoyi literaturi, 2001. – 800 c.
6. DBN V.1.2-2:2006. Sistema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Navantazhennya i vplivi. Normi proektuvannya. – K. : Minbud Ukrayini, 2007. – 60 s.
7. Dorofeev V. S. Napruzheno-deformovaniy stan stalevih karkasiv pri temperaturnih vplivah / V. S. Dorofeev, N. V. Pushkar, V. V. Pashinskiy. – Odesa: ODABA, 2014. – 160 s.
8. Karyuk A. M. Statistichni harakteristiki serednodobovoyi temperaturi povitrya na teritoriyi Ukrayini / A. M. Karyuk, V. V. Pashinskiy // Visnik Odeskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi. – Odesa, 2012. – Vip. 47, ch. 2. – S. 157 – 163.
9. Pashinskiy V. V. Normuvannya y rayonuvannya rozrahunkovih parametriv temperaturi povitrya na teritoriyi Ukrayini / V. V. Pashinskiy // Komunalne gospodarstvo mist: nauk.-tehn. zb. – Harkiv, 2015. – Vip. 120. – S. 49 – 53.
10. ENV 1991-2-5. Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures. Part 2.5: Thermal actions. – CEN, 1997.
10. Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції на території України / В. А. Пашинський. – К. : УкрНДІпроектстальконструкція, 1999. – 185 с.

© Дорофєєв В.С., Пушкар Н.В., Пашинський В.В.
Надійшла до редакції 03.05.2016

Писаренко О.М., к.ф.-м.н., доцент
Вілінська Л.М., к.ф.-м.н., доцент
Одеська державна академія будівництва і архітектури

МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ВОЛОГИ В БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ

Отримано чисельне рівняння теплопровідності для симетричного нагріву тіл довільної геометрії при складних початкових і граничних умовах із залежними від температури теплофізичними властивостями. Виконано розрахунок прогріву досліджуваного матеріалу з урахуванням коефіцієнтів теплопровідності й вологості. Наведено нестационарне рівняння теплопровідності за допомогою скінченних різниць. З'ясовано, що уявлення дає можливість розглянути кінетику температурних профілів усередині зразка з фіксованими температурними умовами на границі. Отримано вираз характерного часу для прогріву зразка до фіксованої температури. Показано, що характерний час з достатнім ступенем точності збігається з його експериментальним значенням. Розроблено програмний комплекс, що дозволяє проводити варіювання основних теплофізичних параметрів досліджуваного матеріалу.

Ключові слова: математичне моделювання, температурні поля, вологість, нестационарна теплопровідність, час прогріву, будівельні матеріали.

Писаренко А.Н., к.ф.-м.н., доцент
Вилинская Л.Н., к.ф.-м.н., доцент
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Получено численное решение уравнения теплопроводности для несимметричного нагрева тел произвольной геометрии при сложных начальных и граничных условиях с зависящими от температуры теплофизическими свойствами. Проведен расчет прогрева исследуемого материала с учетом коэффициентов теплопроводности и влажности. Представлено нестационарное уравнение теплопроводности с помощью конечных разностей. Выяснено, что представление дает возможность рассмотреть кинетику температурных профилей внутри образца с фиксированными температурными условиями на границе. Получено выражение характерного времени для прогрева образца до некоторой температуры. Показано, что характерное время с достаточной степенью точности совпадает с его экспериментальным значением. Разработан программный комплекс, позволяющий проводить варьирование основных теплофизических параметров исследуемого материала.

Ключевые слова: математическое моделирование, температурные поля, влажность, нестационарная теплопроводность, время прогрева, строительные материалы.

UNSTEADY TEMPERATURE FIELD SIMULATION IN VIEW OF HUMIDITY CONTENT IN BUILDING MATERIALS

It was developed a mathematical model and assess the impact of moisture content on the integral characteristics of the one-dimensional isotropic non-stationary temperature field in building materials with a time constant and isotropic thermal materials. The numerical solution of the heat equation was obtained for the symmetric heating bodies of arbitrary geometry in complex initial and boundary conditions, depending on the thermal properties of temperature.

To expand the field of application authors were used dimensionless parameters for temperature, local temperature gradient, the heating time and the coordinates of the sample.

The authors carried out a calculation of the material, taking into account the warm thermal coefficients and humidity. Using the finite-difference time-dependent heat equation it was composed for the calculation of temperature fields of different degrees of humidity of building materials. The calculation showed that the change in the humidity of the sample results in a change in the relative temperature at a fixed value relative coordinates. The increase in the relative temperature is a nonlinear function of the relative coordinates

This representation makes it possible to examine the kinetics of thermal waves inside the sample with fixed temperature conditions at the border. The expression of the characteristic time for warming the sample to a fixed temperature has been received. It has been shown that the characteristic time with sufficient accuracy coincides with the experimental value. The kinetics of warming the sample at a constant humidity has been investigated.

It was evaluated changes in temperature along the sample using a non-stationary heat equation. We performed statistical processing of the curves of the temperature profile with time at a fixed value of moisture. This dependence is approximated by a polynomial of 4th degree. It has been found that the temperature in the alignment which is equidistant from the ends of the sample with time occurs almost linearly.

Nonlinear process heating of the sample is characterized by high values of the relative temperature gradient in the vicinity and at a distance from the border. Between these areas there is a local maximum, the parameters of which depend on the boundary conditions of temperature. In this study evaluated the rate of removal of the border for this maximum.

It was found that the temperature between the areas of wave propagation occurs a local maximum relative temperature gradient. The maximum amplitude of the relative change in temperature varies significantly with changes in the relative warm-up time.

The work was presented numerical methods that allow at the local level to investigate the effect of moisture on building materials and temporary coordinate components of the one-dimensional non-stationary temperature field.

The authors have developed a software environment based on the Borland C++ Builder software package, which allows for variation in the main thermal parameters of the test material.

Keywords: *math modeling, temperature fields, humidity, unsteady heat conduction, warm-up time, construction materials.*

Вступ. Відомо, що вплив температурно-вологісних режимів необхідно враховувати при розрахунках надійності будівельних конструкцій та технологічних процесів. Мінімізація теплових втрат вимагає врахування архітектурного і конструктивного рішень будівель, теплозахисних властивостей огорожень, кліматичних умов районів будівництва [1] та підтримуваних параметрів внутрішнього мікроклімату.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. У роботі [2] виконано аналіз методів дослідження теплотривкості огорожувальних конструкцій і будівель. Процеси дифузії тепла і перенесення вологи носять випадковий характер і можуть бути описані методами теорії ймовірностей. У роботах [3 – 5] запропоновано методи, що описують нестационарний перенос тепла та маси через багат шарові огорожувальні конструкції, а також математичні моделі теплового балансу будівлі.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Запропоновані математичні моделі досить повно описують процеси тепло- і вологонакопичення, однак існуючі методики обліку вологісного режиму при розрахунку теплопередачі через огороження не розраховані на дослідження локальних процесів теплопереносу та вологонакопичення в будівельних матеріалах і конструкціях. Цим визначається актуальність питань чисельного розрахунку й аналізу тепло-та масообмінних процесів, що протікають в огорожувальних конструкціях.

Мета роботи – математичне моделювання й оцінювання інтегрального впливу вмісту вологи на характеристики одновимірного нестационарного ізотропного температурного поля в будівельних матеріалах з ізотропними та постійними в часі теплофізичними параметрами.

Основний матеріал і результати. Розвиток теорії вологісного режиму огорожувальних конструкцій будинків призвів до широкого використання поняття потенціалу вологості, яке дозволяє не розмежовувати потік вологи на ізотермічну та термоградієнтну складові, при цьому розв'язується рівняння, аналогічне рівнянню теплопровідності [6, 7]. Недоліком цього підходу є складність експериментального визначення необхідних характеристик матеріалів.

Вибір нами числового методу дослідження температурних полів зумовлений можливістю отримання рішення рівняння теплопровідності для несиметричного нагріву і довільної геометрії при складних початкових і граничних умовах із залежними від температури теплофізичними властивостями.

На основі програмного середовища Borland C++ Builder 6.0 розроблений програмний комплекс із розрахунку прогріву пластинки товщиною b (відстань між ізотермічними поверхнями з температурою $T = T_k$, $k = 1, 2$) впродовж часу t_0 . Початкова температура внутрішньої області пластинки приймалася такою, що дорівнює рівню T_0 . Матеріал пластини характеризувався об'ємною вагою γ ; вологістю ω і коефіцієнтом температуропровідності a .

Пластина розбивалася на розрахункові елементи за координатою X (координата напрямку, перпендикулярному до границь області з $T = T_k$) і часом t . Для розрахункової сітки були введені такі позначення: $i = 1, \dots, N_x$ – номер вузла сітки у напрямку X ; $j = 1, \dots, N_t$ – номер вузла сітки, пов'язаний із часом t ; N_x – число вузлів сітки у напрямку X ; $N_t = t_0/\Delta t$ – число вузлів сітки за часом t ; $\Delta X = b(N_x - 1)^{-1}$ – період сітки у напрямку X . Інтервал інтегрування визначався з умови стійкості різницевої схеми і становив $\Delta t < \Delta X^2/(2a)$ [8]. У цій роботі вважалося, що $\Delta t = 0,4\Delta X^2/a$.

У методиках розрахунку нестационарного температурно-вологісного впливу на будівельні матеріали використовується рівняння, аналогічне рівнянню теплопровідності для суцільних середовищ [6, 7]. Представлення нестационарного рівняння теплопровідності за допомогою скінченних різниць [8] дозволяє записати вираз для температури в i -му вузлі сітки

$$T_i' = T_i \Delta X^{-2} [\Delta X^2 - 2a\Delta t + a\Delta t (T_{i-1} + T_{i+1})] \quad (1)$$

де T_i , T_i' – значення температури в моменти часу t і $t + \Delta t$ відповідно.

Таке уявлення дає можливість розглянути кінетику зміни температури всередині зразка з фіксованими температурними умовами на границі.

Крайові умови для цього завдання мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} T|_{i=1} &= T_1, \\ T|_{i=N_x} &= T_2, \\ T|_{t=0, 1 < i < N_x} &= T_0. \end{aligned}$$

З метою врахування специфіки розподілу нестационарного температурного поля в зразку введемо відносний інтервал часу $\varepsilon_{tj} = t_j / t_H$ (t_H – характерний час прогріву [5]); відносну координату по X : $\varepsilon_{Xi} = b^{-1} X_i$; відносну температуру $\varepsilon_{Ti} = T_{Xi} / T_1$, де T_{Xi} – температура, яка відповідає координаті X_i ; відносна зміна координати x при зсуві на період сітки по X : $\Delta \varepsilon_{Xi} = b^{-1} (X_{i+1} - X_i)$; відносна зміна температури при зсуві на період сітки по X : $\Delta \varepsilon_{Ti} = (T_{Xi+1} - T_{Xi}) / T_1$; локальний відносний градієнт температури в напрямку X : $\nabla \varepsilon_{Ti} = \Delta \varepsilon_{Ti} / \Delta \varepsilon_{Xi}$.

Уведення безрозмірного часу вимагає оцінювання характерного часу прогріву t_H . Швидкість зміни відносної температури, що виникає на початкових етапах прогріву, визначається тепловою інерцією огорожі [9]

$$D = R_b S, \quad (2)$$

де R_b – опір теплопередачі; S – коефіцієнт теплосасвоєння матеріалу.

Для величин R_b і S маємо

$$R_b = dT dt dS / dQ = b / \lambda, \quad S = \sqrt{2\pi\lambda c \rho / T}, \quad (3)$$

де T – граничне значення температури; dT , dt , dS , dQ – елементарні температура, час і площа поверхні, через яку проходить кількість теплоти dQ при теплопередачі; λ , c , ρ – коефіцієнт теплопровідності, що враховує вміст вологи, питома теплоємність і щільність матеріалу відповідно. З формул (2) і (3) отримуємо для теплової інерції огородження

$$D = \sqrt{2\pi\lambda t} / T. \quad (4)$$

Перепишемо рівняння (4)

$$dt = t_H = D^2 T / (2\pi), \quad (5)$$

або

$$t_H = (R_b S)^2 T / (2\pi) = b^2 S^2 T / (2\pi\lambda^2). \quad (6)$$

Отримано характерний час для прогріву до температури T зразка товщиною b , виготовленого з матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності λ і коефіцієнтом теплосасвоєння S .

Нами проведена оцінка характерного часу прогріву для пінобетону [10] з об'ємною вагою $\gamma = 646 \text{ кг/м}^3$, пористістю $p = 79\%$, вологістю $\omega = 0\%$ і коефіцієнтом теплосасвоєння $S = 4,5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, коефіцієнт теплопровідності дорівнює $\lambda = 0,14 \text{ Вт/(м К)}$. З виразу (6) для часу прогріву зразка товщиною $b = 0,2 \text{ м}$ до температури $T = T_1 = 100^\circ\text{C}$ отримано значення $t_H' = 658 \text{ с}$. Розрахунковий експеримент, проведений за методикою [8], дає величину $t_H = 710 \text{ с}$, що збігається з t_H' з точністю $\sim 7\%$.

Розрахована на підставі виразу (1) зміна температури уздовж напрямку X з вірогідністю R^2 , що знаходиться в інтервалі $(0,9995 \div 0,9999)$, дозволяє отримати серію кривих (рис. 1) і апроксимується поліномом 4-го ступеня. Зокрема, для характерного значення $\varepsilon_t = 1,2$ справедливе таке співвідношення:

$$\nabla \varepsilon_T = -95,801\varepsilon_X^4 + 131,49\varepsilon_X^3 - 53,29\varepsilon_X^2 - 0,345\varepsilon_X + 3,311, \quad (7)$$

де $\nabla \varepsilon_T$ – градієнт відносної температури ε_T .

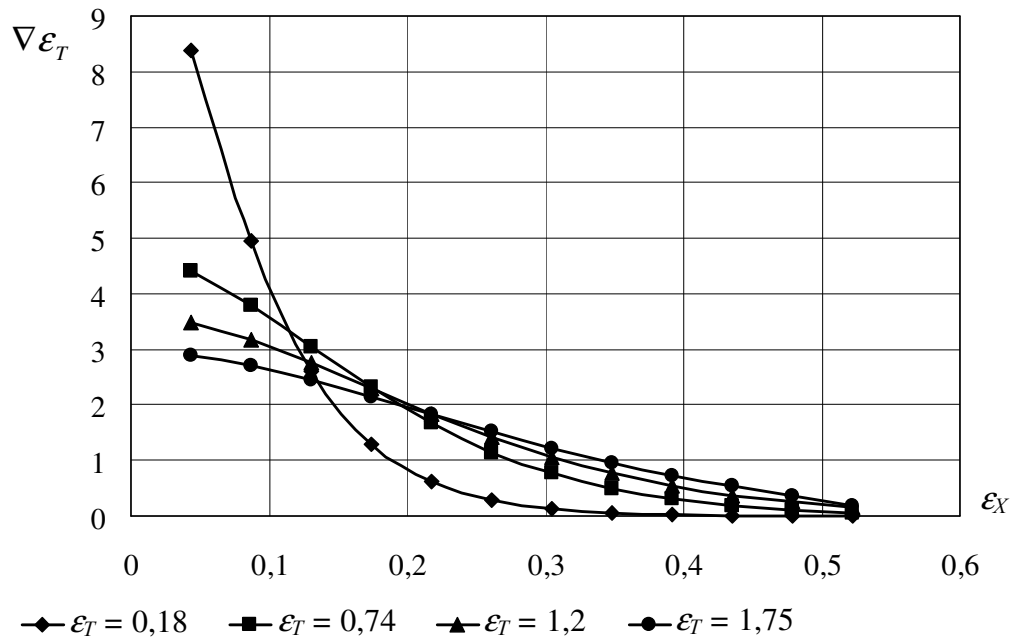


Рисунок 1 – Зміна за часом температурного профілю області зразка при фіксованій ($\omega = 5\%$) вологості

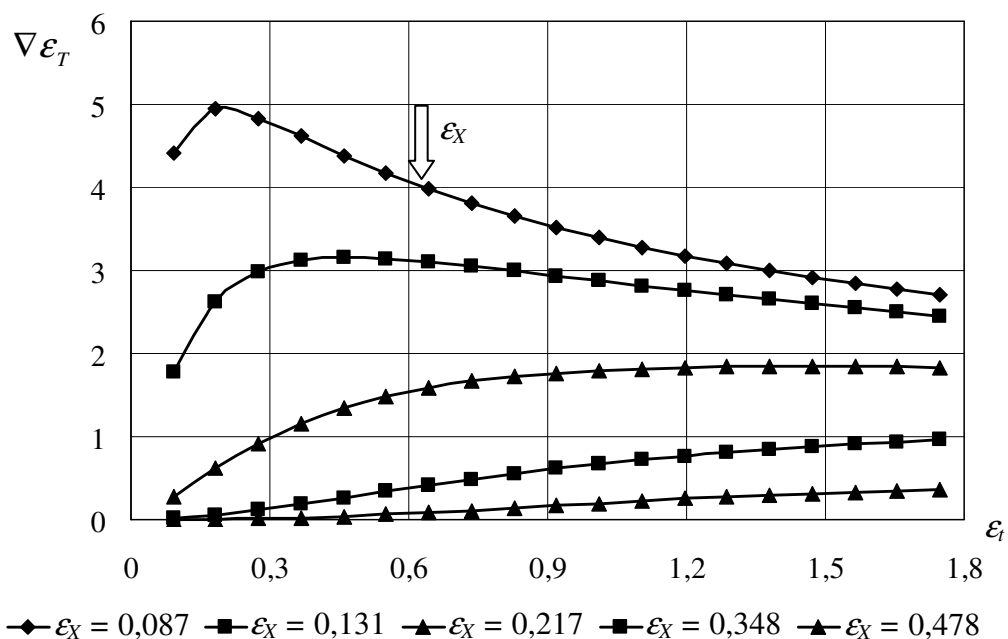


Рисунок 2 – Вплив граничних умов на кінетику прогріву області зразка (для вологості $\omega = 5\%$)

Вирівнювання температури всередині області зразка зі зростанням ε_t відбувається з практично лінійною залежністю $A = A(\varepsilon_t)$ при фіксованому значенні ε_x , де A – коефіцієнт при старшому члені полінома, що апроксимує залежність $A = -111 \varepsilon_t + 242$. Графік наведено при фіксованому ($\omega = 5\%$) значенні вологості.

Уведемо коефіцієнт згасання градієнта відносної температури у напрямку X

$$\beta = \nabla \varepsilon_{T0} / \nabla \varepsilon_{Tx}, \quad (8)$$

де індекси «0» і «X» відповідають краю області та поточній безрозмірній координаті ε_x відповідно. Позначимо як $\varepsilon_x|_{\beta=e} = \varepsilon_{x\beta e}$ відносну координату зменшення $\nabla \varepsilon_T$ в e разів. Отримано, що зі збільшенням відносного часу прогріву величина $\varepsilon_{x\beta e}$ змінюється за законом $\varepsilon_{x\beta e} = 0,141\varepsilon_t + 0,126$.

Розрахунки показали, що зміна вологості ω зразка призводить при фіксованому значенні ε_x до зміни відносної температури $\Delta \varepsilon_T$. Збільшення часу прогріву супроводжується зростанням $\Delta \varepsilon_T$. В свою чергу, приріст $\Delta \varepsilon_T$ є нелінійною функцією ε_x .

Для серії кривих $\Delta \varepsilon_T = \Delta \varepsilon_T(\varepsilon_x)$ параметричної множини ε_t був введений коефіцієнт розширення

$$\varphi = L / h, \quad (9)$$

де h , $L_{1/2}$ – висота і напівширина кривої $\Delta \varepsilon_T = \Delta \varepsilon_T(\varepsilon_x)$ для заданого значення ε_t , відповідно. Коефіцієнт розширення області максимального збільшення температури, який обумовлений зміною вологості, збільшується з часом за лінійним законом $\varphi = 1,007\varepsilon_t + 1,011$ з коефіцієнтом вірогідності $R^2 = 0,9904$. Отримана залежність $\varphi = \varphi(\varepsilon_t)$ описує динаміку поведінки термонапружених областей в будівельних матеріалах [11].

Нелінійний процес прогріву зразка характеризується підвищеними значеннями градієнта відносної температури $\nabla \varepsilon_T$ поблизу (перша гранична задача) і на видаленні (кінцеве значення швидкості зміни температури) від границі (рис. 2). Між зазначеними областями існує локальний максимум $\nabla \varepsilon_T$, параметри якого залежать від граничних температурних умов. Розрахунки показали, що цей максимум віддаляється від границі зі швидкістю $v_{max} = 0,092\varepsilon_t + 0,195$.

Висновки:

1. Наведені числові методи дозволяють на локальному рівні досліджувати вплив вологості будівельних матеріалів на координатну і змінну складові одновимірного нестационарного температурного поля.
2. На основі програмного середовища Borland C++ Builder 6.0 розроблений програмний комплекс, що дозволяє проводити варіювання основних теплофізичних параметрів досліджуваного матеріалу.
3. Отриманий аналітичний вираз для характерного часу прогріву зразка спрощує процедуру введення безрозмірних параметрів і відповідно мінімізує накопичення помилок при обчисленнях.
4. Визначено, що зі зростанням часу прогріву виникає локальний максимум градієнта відносної температури, параметри якого залежать від граничних температурних умов.
5. За отриманою формулою доцільно розрахувати характерний час прогріву деяких будівельних матеріалів, а також з'ясувати вплив вологості й теплопровідності на цю величину.

Література

1. Температурні впливи на огорожувальні конструкції будівель: монографія / В. А. Пашинський, Н. В. Пушкар, А. М. Карюк. – Одеса, 2012. – 180 с.
2. Фаренюк Г. Г. Теплові впливи на огорожувальні конструкції за нестационарних умов / Г. Г. Фаренюк, О. І. Філоненко // Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПолтНТУ, 2015. – Вип. 2 (44). – С. 234 – 238.
<http://znp.pntu.edu.ua>
3. Рымкевич П. П. Физико-математические основы для описания нестационарной теплопроводности через ограждающие конструкции зданий и сооружений / П. П. Рымкевич, М. В. Хохлова, В. Б. Кокович // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сб. трудов Всероссийской науч.-техн. конф. (10 – 11.12.2009). – СПб., 2009. – С. 124 – 130.
4. Табунчиков Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунчиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
5. Янковский А. П. Асимптотический анализ решения нелинейной задачи нестационарной теплопроводности слоистых анизотропных неоднородных оболочек при граничных условиях первого рода на лицевых поверхностях / А. П. Янковский // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – Самара, 2014. – Вип. 1 (34). – С. 168 – 185.
6. Богословский В. Н. Исследования температурно-влажностного режима наружных ограждений зданий методом гидравлических аналогий: дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / В. Н. Богословский. – М., 1954. – 193 с.
7. Гагарин В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / В. Г. Гагарин. – М., 2000. – 396 с.
8. Кузнецов Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
9. Куприянов В. Н. Проектирование теплозащиты ограждающих конструкций / В. Н. Куприянов. – Казань : КГАСУ, 2011. – 161 с.
10. Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М. : Стройиздат, 1969. – 143 с.
11. Троян В. В. Термонапружений стан залізобетону як аспект довговічності монолітних конструкцій / В. В. Троян // Наук.-техн. зб. «Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка». – К. : Товариство «Знання» України, 2010. – Вип. 35. – С. 119 – 124.

References

1. Temperaturni vplivi na ogorodzhivalni konstruktsiyi budivel: monografiya / V. A. Pashinskiy, N. V. Pushkar, A. M. Karyuk. – Odesa, 2012. – 180 s.
2. Farenjuk G. G. Teplovi vplivi na ogorodzhivalni konstruktsiyi za nestatsionarnih umov / G. G. Farenjuk, O. I. Filonenko // Zb. nauk. prats. Seriya: Galuzeve mashino-buduvannya, budivnitstvo. – Poltava : PoltNTU, 2015. – Vip. 2 (44). – S. 234 – 238.
<http://znp.pntu.edu.ua>
3. Rymkevich P. P. Fiziko-matematicheskie osnovy dlya opisaniya nestatsionarnoy teploprovodnosti cherez ograzhdayushchie konstruktsii zdaniy i sooruzheniy / P. P. Rymkevich, M. V. Hohlova, V. B. Kokovich // Stroitel'naya teplofizika i energo-effektivnoe proektirovanie ograzhdayushchih konstruktsiy zdaniy: Sb. trudov Vserossiyskoy nauch.-tehn. konf. (10 – 11.12.2009). – SPb., 2009. – S. 124 – 130.
4. Tabunshchikov Yu. A. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy / Yu. A. Tabunshchikov, M. M. Brodach. – M. : AVOK-PRESS, 2002. – 194 s.
5. Yankovskiy A. P. Asimptoticheskiy analiz resheniya nelineynoy zadachi nestatsionarnoy teploprovodnosti sloistyh anizotropnyh neodnorodnyh obolochek pri granichnyh usloviyah pervogo roda na litsevyh poverhnostyakh / A. P. Yankovskiy // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki. – Samara, 2014. – Vyp. 1 (34). – S. 168 – 185.

6. Bogoslovskiy V. N. *Issledovaniya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima naruzhnyh ograzhdeniy zdaniy metodom gidravlicheskih analogiy: dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk* / V. N. Bogoslovskiy. – M., 1954. – 193 s.
7. Gagarin V. G. *Teoriya sostoyaniya i perenosa vlagi v stroitelnyh materialah i teplozashchitnye svoystva ograzhdayushchih konstruktsiy zdaniy: dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk* / V. G. Gagarin. – M., 2000. – 396 s.
8. Kuznetsov G. V. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* / G. V. Kuznetsov, M. A. Sheremet. – Tomsk : Izd-vo TPU, 2007. – 172 s.
9. Kupriyanov V. N. *Proektirovaniye teplozashchity ograzhdayushchih konstruktsiy* / V. N. Kupriyanov. – Kazan : KGASU, 2011. – 161 s.
10. Franchuk A. U. *Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitelnyh materialov* / A. U. Franchuk. – M. : Stroyizdat, 1969. – 143 s.
11. Troyan V. V. *Termonapruzheniy stan zalizobetonu yak aspekt dovgovichnosti monolitnih konstruktsiy* / V. V. Troyan // *Nauk.-tehn. zb. «Budivelni materiali, virobi ta sanitarna tehnika»*. – K. : Tovarnistvo «Znannya» Ukrayini, 2010. – Vip. 350 – S. 119 – 124.

© Писаренко О.М., Вілінська Л.М.
Надійшла до редакції 25.04.2016

*Новохатний В.Г., д.т.н., професор
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Ландар О.М., к.т.н., генеральний директор
Товариство з додатковою відповідальністю «Полтавтрансбуд»
Гах Д.О., аспірант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

УПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ В ІНЖЕНЕРНОМУ ОБЛАДНАННІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Проаналізовано вимоги ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво». Установлено, що незадовільно виконується вимога щодо розміщення стояків холодного і гарячого водопостачання, арматури та вимірювальних приладів поза межами квартир у сучасних багатопверхових житлових будинках. Запропоновано нові конкретні інженерні рішення санітарно-технічних систем шляхом розташування відповідних стояків і вузлів обліку води й тепла на сходових майданчиках сучасних житлових будинків, що дасть змогу підвищити надійність систем водопостачання, а також заощаджувати теплову енергію.

Ключові слова: житлові будинки; санітарно-технічні системи; стояки холодної, гарячої води й опалення; вузли обліку води і тепла.

*Новохатний В.Г., д.т.н., професор
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Ландарь А.М., к.т.н., генеральный директор
Общество с дополнительной ответственностью «Полтавтрансстрой»
Гах Д.А., аспирант
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБОРУДОВАНИИ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Проанализированы требования ДБН В.2.5-64:2012 «Внутренний водопровод и канализация. Часть І. Проектирование. Часть ІІ. Строительство». Установлено, что неудовлетворительно выполняется требование размещения стояков холодного и горячего водоснабжения, арматуры и измерительных приборов за пределами квартир в современных многоэтажных жилых домах. Предложены новые конкретные инженерные решения санитарно-технических систем путем расположения соответствующих стояков и узлов учета воды и тепла на лестничных площадках современных жилых домов, что позволит повысить надежность систем водоснабжения, а также экономить тепловую энергию.

Ключевые слова: жилые дома; санитарно-технические системы; стояки холодной, горячей воды и отопления; узлы учета воды и тепла.

Novokhatniy V., DSc, Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
Landar A., Ph.D., Director General
Limited liability company «Poltavatransbud»
Gakh D., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

ENGINEERING EQUIPMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS INNOVATION IMPLEMENTATION

Requirements of ДБН В.2.5-64:2012 «Internal water supply and sewerage» in section 1 «design» and section 2 «construction» have been analyzed. It was discovered that requirements for placement of stanchions of cold and hot water supply, valves and measuring devices outside apartments in modern multi-storey buildings are fulfilled unsatisfactory.

But traditional construction solutions of multi apartment system of water and heating supplying have several significant shortcomings. Among them: the absence of heat energy meter discourages residents of an apartment to economical expenditure of heat; installing four water meters at all entrant points of hot and cold water in the apartment leads to the additional construction cost and inconveniences during its exploitation; the meters are installed inside apartment, so there is no possibility to check its readings without the permission of the apartment owner; address shutdown of apartments from water and heat supplying in the case of accumulation of debts is complicated.

New specific engineering solutions are outlined for sanitary technical systems. These solutions provide placement of stanchions and metering stations for water and heat at a stairwell of modern residential buildings. Exploitation personnel will get the opportunity to control all necessary parameters of water supplying system: pressure and water expenditure for each apartment of residential part of the building or premises for public use at any time of day; quickly eliminate detected violations; carry out routine inspection of water supply in accordance with the approved schedules; replace outdated or damaged valves, measuring devices if its necessary.

It is suggested to set one entrant point for cold water and another one for hot water. Aside from that one entrant point for supplying and another one for reverse pipelines of heat supplying for multi room apartment should be installed. The hubs of water and heat meters should be taken out to the stairway platform near each apartment. It is suggested to mount these hubs of meters inside alcoves or special metal cases that allow taking readings of meters without opening the doors.

Expected results of suggested assembling of water and heat supplying systems for apartments inside residential buildings:

- controllers access to check meters readings will be improved; address disabling of residents in case of debts accumulating for water and heat supplying will simplify;*
- reliability of water supplying will increase due to prevention of possible flooding of apartment;*
- heat energy saving will be possible via shutting down heating system for a period of owner absence from the apartment.*

Keywords: *engineering equipment, sanitary technical systems, stanchions of cold, hot water and heating, metering hubs for water and heat.*

Вступ. Нормативний документ [1] містить вимоги щодо підвищення безпеки та якості експлуатації сучасних житлових багатоповерхових будинків шляхом удосконалення побудови їх санітарно-технічних систем. У побудові систем опалення багатокімнатних квартир уже застосовуються сучасні інженерні рішення, але в системах холодного і гарячого водопостачання традиційні рішення переважають повсюдно. Та, зважаючи на високі тарифи на комунальні послуги, необхідність підвищення якості життя в сучасних квартирах і зручностей обслуговування санітарно-технічних систем, удосконалення їх побудови є актуальним завданням.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Аналіз публікацій та Інтернет-видань [2 – 7] показує, що нині відбувається перехід від традиційних інженерних рішень при проектуванні санітарно-технічних систем житлових будинків до нових підходів, які підвищують безпеку об'єктів і поліпшують експлуатацію цих систем. Проте здійснюється цей перехід надто повільно з огляду на те, що проектувальники житла не звертають увагу на ті незручності, які чекають майбутніх мешканців квартир. Ці незручності полягають саме в експлуатації санітарно-технічних систем, а точніше – в обслуговуванні приладів обліку води й тепла. При цьому проектувальники не звертають уваги на чітко сформульовані вимоги норм [1], а пропонують традиційні рішення, які є усталеними і перевіреними практикою будівництва та експлуатації.

Постановка завдання: потрібно запропонувати нові інженерні рішення санітарно-технічних систем сучасних житлових будинків для поліпшення експлуатації цих систем та обслуговування приладів обліку води і тепла.

Основний матеріал і результати. Традиційні способи побудови квартирної холодної, гарячої водопостачання та опалення житлових будинків зводяться [2, 4] до влаштування у підвалі будинку вузлів обліку води і тепла, прокладання від них горизонтальних магістралей водо- та теплопостачання. До магістралей теплопостачання приєднуються вертикальні стояки, що проходять через житлові кімнати квартир; стояки водопостачання проходять через санвузли (зазвичай для одно- та двокімнатних квартир) або санвузли і кухні окремо (зазвичай для багатокімнатних квартир). При цьому в багатокімнатних квартирах встановлюються чотири лічильники – два на кухні (холодна й гаряча вода) та два у санвузлі, а квартирні лічильники теплової енергії взагалі не встановлюються. Така побудова багатоквартирних систем водо- й теплопостачання має кілька суттєвих недоліків.

1. Відсутність лічильника теплової енергії не стимулює мешканців квартири до економного витрачання тепла.

2. Установлення чотирьох лічильників води на всіх вводах холодної і гарячої води у квартиру призводить до додаткових затрат на будівництво та незручностей при експлуатації.

3. Установлені лічильники знаходяться у квартирі, а тому немає можливості перевірити їх показання без дозволу власника квартири.

4. Ускладнюється адресне відключення квартири від водо- і теплопостачання у разі накопичення боргів через дві причини: доступ до квартири обмежений; – неможливо використати систему «Спрут» за наявності П-подібних компенсаторів лінійного подовження пластмасових труб на стояках холодного і гарячого водопостачання.

Що вимагає нормативний документ [1]? «Стояки холодної і гарячої води, до яких приєднуються санітарно-технічні прилади при проектуванні нового будівництва, слід розміщувати поза межами квартир, у комунікаційних шахтах з улаштуванням на кожному поверсі дверей, що відчиняються, розміри яких повинні бути достатніми для проведення необхідних експлуатаційних робіт» [1, с.V]. «Водорозбірні стояки холодної і гарячої води в житлових будинках, до яких приєднуються санітарно-технічні прилади, а також вузли обліку, фільтри та запірно-регулювальну арматуру необхідно

розташовувати поза межами житлових квартир, у комунікаційних шахтах з улаштуванням на кожному поверсі дверей (люків), що відчиняються, розміри яких повинні бути достатніми для обслуговування та проведення необхідних експлуатаційних робіт» [1, п. 10.8, с. 23].

Норми [1] обґрунтовують зазначені вимоги: «Це дає можливість швидко відключати введення водопроводу в будь-яку квартиру або інші приміщення, де сталася аварія (а не відключати стояк), незалежно від присутності мешканців у квартирі або працівників у нежитлових приміщеннях. Крім того, у експлуатаційного персоналу з'являється можливість контролювати всі необхідні параметри водопостачання: тиск і витрату води по кожній квартирі житлової частини будинку або приміщень громадського призначення у будь-який час доби й оперативно усувати виявлені порушення, а також проводити профілактичний огляд систем водопостачання відповідно до затверджених графіків і, за необхідності, замінити застарілу або зіпсовану арматуру, вимірювальні прилади тощо» [1, с. V, VI].

Чому вимоги ДБН не виконуються?

1. Проектувальники обмежуються найпростішими традиційними рішеннями, тому що на це не звертають увагу контролюючі органи місцевої влади, а вчені не пропонують нових інженерних рішень – їх ніхто не ставить до відома.

2. Будівельники не піднімають ці питання, тому що заборонено порушувати проект.

3. Приватні інвестори житла зацікавлені у нових рішеннях, але вони недостатньо інформовані.

Але ці питання із часом мають вирішитися, тому що накопичується занадто багато проблем, коли кожні три роки власнику квартири потрібно провести перевірку лічильників. Для цього потрібно спочатку їх розпломбувати, що може виконати тільки працівник «Водоканалу» за оформленою заявкою, потім зняти лічильники з підвідних труб і віднести їх на перевірку до лабораторії «Водоканалу» (на місце лічильників треба змонтувати відповідні вставки – відрізки труб). Потім слід забрати лічильники, встановити на місце та оформити заявку на опломбування, при цьому акт може скласти тільки представник «Водоканалу». У цілому, процедура повірки лічильників вимагає значних витрат часу у власника квартири. Тому пропонується переходити на більш прогресивні рішення, а саме – виносити лічильники за межі квартири і дозволити працівникам «Водоканалу» проводити перевірки лічильників без участі власника квартири.

Запропоновано влаштувати по одному вводу холодної і гарячої води та по одному вводу подавального та зворотного трубопроводів тепlopостачання у багатокімнатну квартиру. Вузли обліку води та вузол обліку теплової енергії потрібно винести на сходовий майданчик біля кожної квартири. Ці вузли обліку пропонується монтувати у нішах або спеціальних металевих шафах. Дверцята шаф обладнуються заскленими віконцями, що дозволяє зняти показання лічильників без відкриття дверцят шаф чи ніш. Від вузлів обліку води і тепла труби опалення, холодної та гарячої води потрібно завести у квартиру і виконати розведення їх у спеціальних гофрованих трубах по залізобетонній плиті перекриття. Після цього поверх прокладених труб виконується керамзитобетонна підготовка під майбутню підлогу таким чином, щоб повністю сховати труби. Усі стояки, від підвалу до найвищого поверху, необхідно виконати на сходових майданчиках у нішах, які треба передбачити у проекті, та влаштувати при будівництві стін.

При подібному влаштуванні інженерне обладнання квартир набуває такого вигляду (рис. 1, 2). Стояки холодної В1 води 1 і гарячої Т3 води 2 та стояки опалення Т1 (подавальний 3) і Т2 (зворотний 4) розташовують біля стіни 5 на сходовому майданчику. Вузли обліку води приєднані до стояків і знаходяться у металевій шафі 6, вузол обліку теплової енергії знаходиться у металевій шафі 7. Кожний вузол обліку води включає кульовий кран 8, фільтр 9, лічильник води 10, зворотний клапан 11. Від вузлів обліку

води труби проходять через стіну в квартиру, де розділяються за напрямками подавання води на кухню, ванну і туалет. Від вузла обліку теплової енергії подавальні та зворотні труби опалення проходять через стіну в квартиру і прокладаються у підлозі квартири до кожного радіатора.

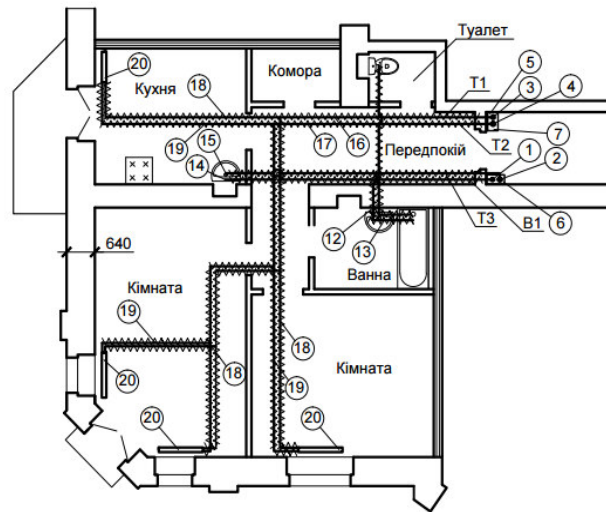


Рисунок 1 – План розташування трубопроводів холодного, гарячого водопостачання і тепlopостачання з вузлами обліку води в металевих шафах на сходовому майданчику двокімнатної квартири:
 В1 – водопровід господарсько-питний; Т1 – подавальний трубопровід теплоносія;
 Т2 – зворотний трубопровід теплоносія; Т3 – водопровід гарячої води

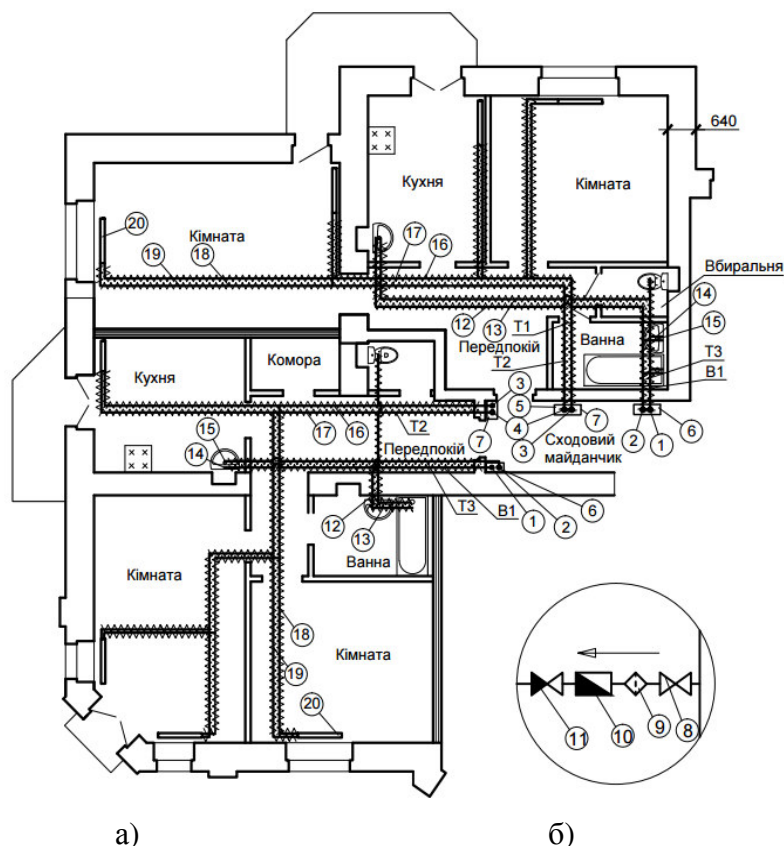


Рисунок 2 – План розташування трубопроводів холодного, гарячого водопостачання і тепlopостачання з вузлами обліку води в металевих шафах на сходовому майданчику двох суміжних квартир (а) та схема вузла обліку (б)

Система водопостачання багатокімнатної квартири (рис. 1, 2) працює за розгалуженою схемою: холодна вода зі стояка 1 і гаряча вода зі стояка 2 (стояки знаходяться біля стіни 5) надходить через кран 8, фільтр 9, лічильник води 10 та зворотний клапан 11 у квартирні розподільні труби. Трубами 14 та 15 холодна і гаряча вода надходить у кухню, а трубами 12 та 13 – у ванну і туалет. Вузли обліку води закриті у металевій шафі 6 на сходовому майданчику.

Система тепlopостачання багатокімнатної квартири (рис. 1, 2) працює за циркуляційною схемою: теплоносієм (гаряча вода) із подавального стояка 3, який знаходиться біля стіни 5, надходить через вузол обліку теплової енергії у подавальну магістраль 16 квартири, потім до подавальних труб 18 і через радіатори 20 потрапляє у зворотні труби 19 та зворотню магістраль 17, котра проходить через стіну 5, вузол обліку теплової енергії, й надходить у зворотний стояк 4. Вузол обліку теплової енергії закритий у металевій шафі 7 на сходовому майданчику.

Розроблено ряд інженерних рішень розміщення вузлів обліку води і теплоносія в металевих шафах на сходовому майданчику (рис. 2 – 6).

Висновки. Запропонована побудова систем водопостачання та тепlopостачання багатокімнатних квартир житлових будинків дозволяє:

- 1) поліпшити доступ контролерів для перевірки показів лічильників і спростити адресне відключення абонента у разі накопичення боргів за воду та тепло;
- 2) зменшити кількість вузлів обліку води й кількість водопровідних стояків;
- 3) поліпшити умови перевірки лічильників води і тепла, оскільки вона може бути виконана без участі абонента;
- 4) підвищити надійність водопостачання за рахунок відвернення можливого затоплення квартири шляхом простого відключення водопостачання при виході з квартири;
- 5) заощадити теплову енергію шляхом вимкнення опалення на період відсутності мешканців квартири протягом денної частини доби (падіння температури повітря в квартирі буде незначним за рахунок інерційності процесу тепловтрат).

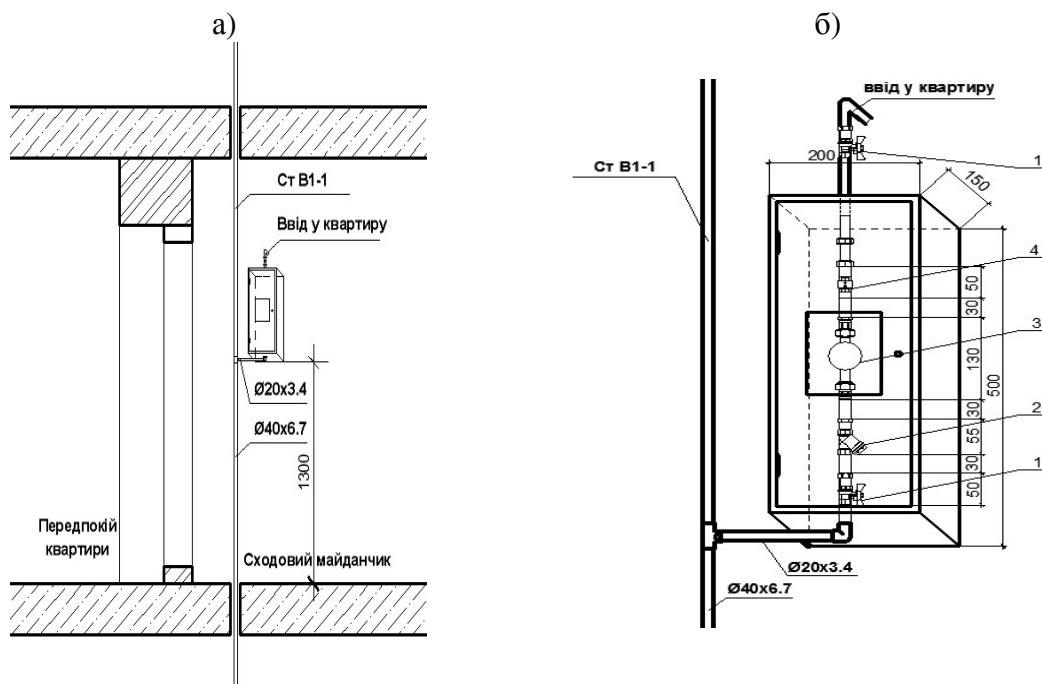


Рисунок 3 – Розміщення одного стояка В1 та лічильника холодної води на сходовому майданчику в металевій шафі (а) та креслення (б) шафи (розміри у міліметрах):

1 – кульовий кран; 2 – фільтр; 3 – лічильник води; 4 – зворотний клапан

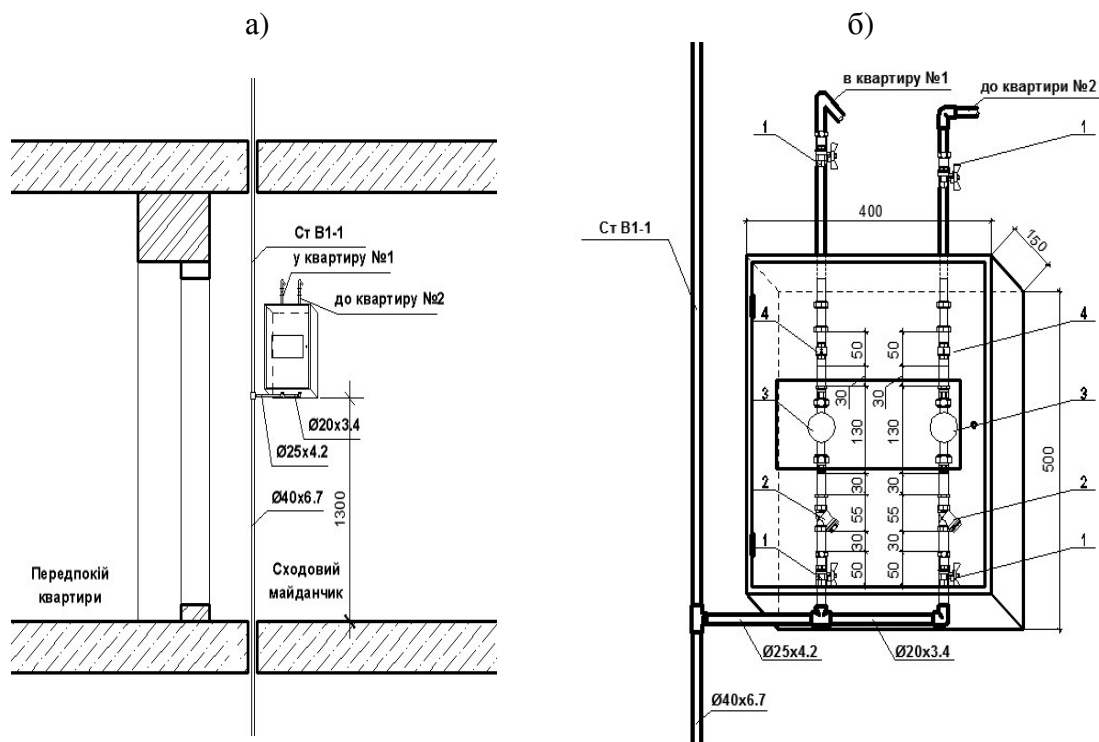


Рисунок 4 – Розміщення одного стояка В1 і лічильників холодної води на сходовому майданчику у металевій шафі для двох суміжних квартир (а) та креслення шафи (б) (розміри у міліметрах):

1 – кульовий кран; 2 – фільтр; 3 – лічильник води; 4 – зворотний клапан

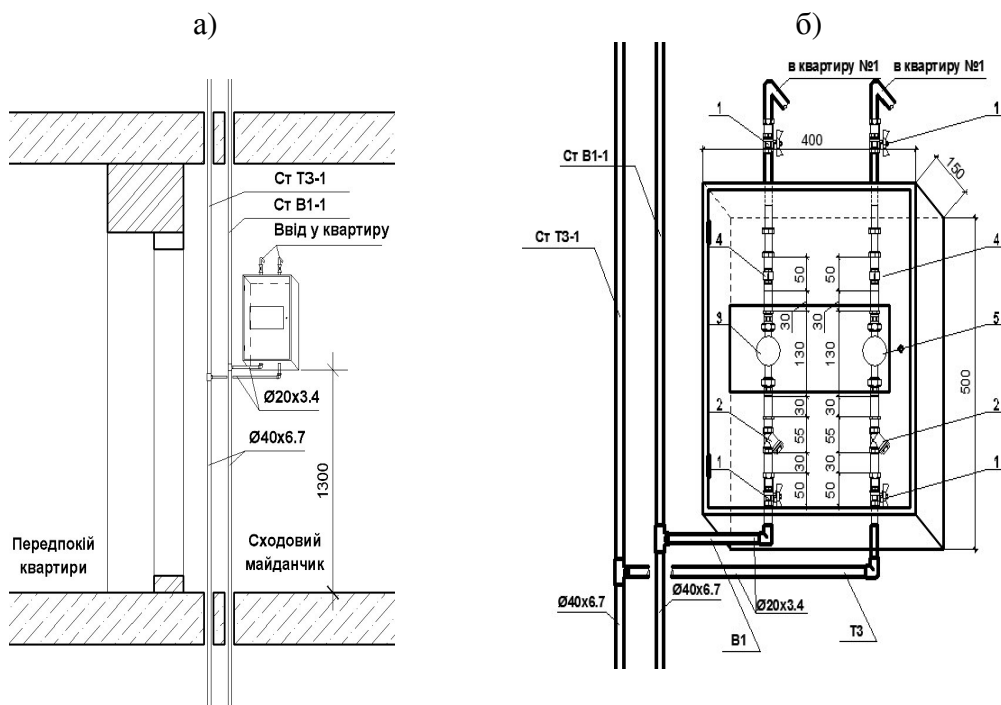


Рисунок 5 – Розміщення стояків і лічильників холодної та гарячої води на сходовому майданчику для однієї квартири (а) та креслення шафи (б) (розміри у міліметрах):

1 – кульовий кран; 2 – фільтр; 3 – лічильник води; 4 – зворотний клапан

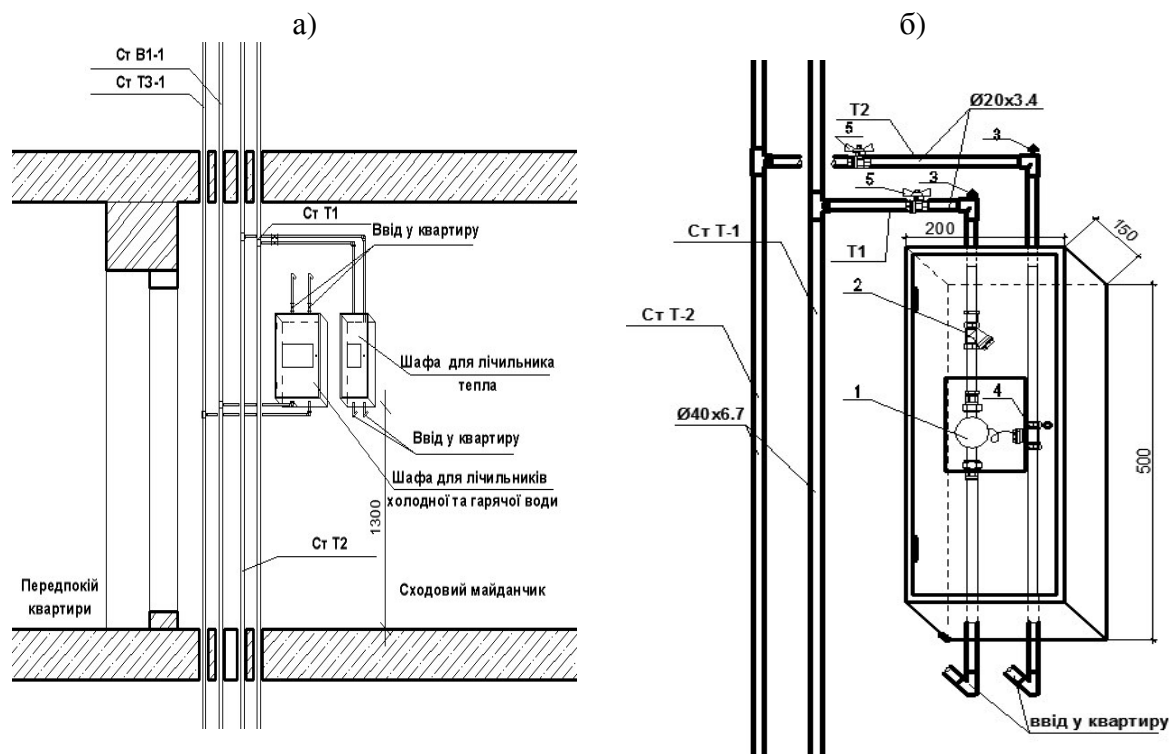


Рисунок 6 – Розміщення стояків і лічильників холодної, гарячої води й теплоносія на сходовому майданчику для однієї квартири (а) та креслення шафи для теплоносія (б) (розміри у міліметрах):
 1 – лічильник; 2 – фільтр; 3 – кран Маєвського; 4 – датчик температури; 5 – кран

Література

1. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. – К. : Мінрегіонбуд, 2013. – 104 с.
2. Кедров В. С. Санитарно-техническое оборудование зданий: учебник для вузов / В. С. Кедров, Е. Н. Ловцов. – М. : Стройиздат, 1989. – 595 с.
3. Орман А. О. Реконструкция и модернизация водопроводной сети / А. О. Орман, К. И. Ибрагимов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – № 11. – С. 34 – 37.
4. Кравченко В. С. Водопостачання та каналізація: підручник / В. С. Кравченко. – К. : Кондор, 2003. – 288 с.
5. Пат. № 35381 Україна, МПК Е03 В 1/00. Спосіб побудови водопостачання багатокімнатних квартир / В. Г. Новохатній, О. В. Матяш, Я. В. Синягівська; заявник і патентовласник – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка; заявл. 30.04.2008, опубл. 10.09.2008. – Бюл. № 17.
6. Бутко Д. А. Обзор инженерных систем (водоснабжения) существующих высотных зданий и существующих зданий с нетиповыми объемно-планировочными решениями [Электронный ресурс] / Д. А. Бутко, И. С. Мельников // Наукоеведение. – 2013. – № 3. – С. 1 – 6. – Режим доступа: <http://www.publ.naukovedenie.ru>.
7. Сізіков О. О. Особливості проектування зонованих систем внутрішнього протипожежного водопроводу у будівлях з умовною висотою вище 26,5 м / О. О. Сізіков, Р. В. Уханський, В. П. Балло // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2014. – № 1(29). – С. 30 – 36.
8. Исаев В. Н. Водоснабжение и водоотведение высотных зданий. Часть 1 [Электронный ресурс] / В. Н. Исаев, М. Г. Мхитарян, С. А. Никонов // Сантехника. – 2004. – № 5. – Режим доступа: <http://www.abok.ru/for spec/articles.phpnid = 2644>.

9. Исаев В. Н. Водоснабжение и водоотведение высотных зданий. Часть II [Электронный ресурс] / В. Н. Исаев, М. Г. Мхитарян, С. А. Никонов // Сантехника. – 2004. – № 6. – Режим доступа: <http://www.abok.ru/for spec/articles.phpnid = 2705>.
10. Дмитриева Е. Застройщики удивляют технологиями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fontanka.ru/2015/07/03/104/>.
11. Swamee P. K. Design of Water Supply pipe Networks [Electronic resource] / P. K. Swamee, A. K. Sharma. – Wiley-Interscience, 2008. – 353 p. – Access mode: <http://bookodrom.ru/1589-prabhata-k-swamee-ashok-k-sharma-design-of-water.html>.
12. Ozger S. Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability / optimization approach [Electronic resource] / S. Ozger, L. Mays // Chapter 7. – P. 1 – 27. – Access mode: http://www.public.asu.edu/~lwmais/Ch07_Mays_144381-9.pdf.

References

1. DBN V.2.5-64:2012. Vnutrishniy vodoprovod ta kanalizatsiya. Chastina I. Proektuvannya. Chastina II. Budivnitstvo. – K. : Minregionbud, 2013. – 104 s.
2. Kedrov V. S. Sanitarno-tehnicheskoe oborudovanie zdaniy: uchebnik dlya vuzov / V. S. Kedrov, E. N. Lovtsov. – M. : Stroyizdat, 1989. – 595 s.
3. Orman A. O. Rekonstruktsiya i modernizatsiya vodoprovodnoy seti / A. O. Orman, K. I. Ibragimov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika. – 2002. – № 11. – S. 34 – 37.
4. Kravchenko V. S. Vodopostachannya ta kanalizatsiya: pidruchnik / V. S. Kravchenko. – K. : Kondor, 2003. – 288 s.
5. Pat. № 35381 Ukrayina, MPK E03 V 1/00. Sposib pobudovi vodopostachannya bagatokimnatnih kvartir / V. G. Novohatniy, O. V. Matyash, Ya. V. Sinyagivska; zayavnik i patentovlasnik – Poltavskiy natsionalniy tehnicniy universitet imeni Yuriya Kondratyuka; zayavl. 30.04.2008, opubl. 10.09.2008. – Byul. № 17.
6. Butko D. A. Obzor inzhenernyh sistem (vodosnabzheniya) sushchestvuyushchih vysotnyh zdaniy i sushchestvuyushchih zdaniy s netipovymi obemno-planirovochnymi resheniyami [Electronic resource] / D. A. Butko, I. S. Melnikov // Naukovedenie. – 2013. – № 3. – S. 1 – 6. – Access mode: <http://www.publ.naukovedenie.ru>.
7. Sizikov O. O. Osoblivosti proektuvannya zonovanih sistem vnutrishnogo protipozhezhnogo vodoprovodu u budivlyah z umovnoyu visotoyu vishche 26,5 m / O. O. Sizikov, R. V. Uhanskiy, V. P. Ballo // Naukoviy visnik UkrNDIPB. – 2014. – № 1(29). – S. 30 – 36.
8. Isaev V. N. Vodosnabzhenie i vodootvedenie vysotnyh zdaniy. Chast 1 [Electronic resource] / V. N. Isaev, M. G. Mhitaryan, S. A. Nikonov // Santechnika. – 2004. – № 5. – Access mode: <http://www.abok.ru/for spec/articles.phpnid = 2644>.
9. Isaev V. N. Vodosnabzhenie i vodootvedenie vysotnyh zdaniy. Chast II [Electronic resource] / V. N. Isaev, M. G. Mhitaryan, S. A. Nikonov // Santechnika. – 2004. – № 6. – Access mode: <http://www.abok.ru/for spec/articles.phpnid = 2705>.
10. Dmitrieva E. Zastroyshchiki udivlyayut tehnologiyami [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.fontanka.ru/2015/07/03/104/>.
11. Swamee P. K. Design of Water Supply pipe Networks [Electronic resource] / P. K. Swamee, A. K. Sharma. – Wiley-Interscience, 2008. – 353 p. – Access mode: <http://bookodrom.ru/1589-prabhata-k-swamee-ashok-k-sharma-design-of-water.html>.
12. Ozger S. Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability / optimization approach [Electronic resource] / S. Ozger, L. Mays // Chapter 7. – P. 1 – 27. – Access mode: http://www.public.asu.edu/~lwmais/Ch07_Mays_144381-9.pdf.

© Новохатній В.Г., Ландар О.М., Гах Д.О.
Надійшла до редакції 20.05.2016

THE SELECTION OF RESERVED STRUCTURE AND THE CREATION OF THE FUNCTION FOR RELIABILITY

The determining of reliability of water systems is introduced, is derived formulas for definition the reliability of some water pipe structures and is made the comparative analysis of reliability and topology of these structures. The engineering method of analysis the reliability of tracing the cyclical water pipe systems is developed, which is allowed to select a structure of network with maximum reliability, is defined the limit reliability of area of network, is identified that areas which would increase the reliability of the structure during its development. The method of graph-analytic formation of tracing the new circular water pipe system was developed ed, which would given the opportunity to build a number of competitive options for trace circular water network and choose the best for reliability.

Keywords: *the reliability of the network structure, the topology, the boundary reliability of sections.*

Усенко І.С., к.т.н., доцент

Усенко Д.В., студент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВИБІР РЕЗЕРВОВАНОЇ СТРУКТУРИ ТА ПОБУДОВА ФУНКЦІЙ ЗА НАДІЙНІСТЮ

Уведено визначення надійності водопровідних мереж, отримано формули надійності для деяких структур водопровідних мереж та виконано порівняльний аналіз надійності й топології цих структур. Розроблено інженерну методику аналізу надійності трасувань кільцевих водопровідних мереж, яка дозволяє вибрати структуру мережі максимальної надійності. Визначено граничну надійність ділянки мережі, а також ті ділянки мережі, які найбільше підвищували б надійність структури при її розвитку. Розроблено методику графоаналітичної побудови трасувань нових кільцевих водопровідних мереж, котра дала б можливість створити декілька конкурентоспроможних варіантів трасувань кільцевої водопровідної мережі та вибрати найкращий за надійністю.

Ключові слова: *надійність структур мереж, топологія, гранична надійність ділянки.*

Introduction. Modern development of pipe line in Ukraine is moving the way of the reconstruction and intensification of existing pipe line facilities. The status of these structures is the considerable wear, low efficiency and high power consumption. A shortage of financial resources required for implementation of modern technologies and equipment and its economic exploitation, the question of resource and energy efficiency throughout the chain of water facilities, including those in the pipe line networks. But in pipe line theory up to today is not met modern research and not developed appropriate mathematical methods, which would allow to conduct efficient tracing of new and rehabilitation of existing water supply systems. Intensive development of computer technology allows you to raise these issues in a new, much higher scientific level. On the other hand, the development and introduction into practice of such methods can reduce the cost of water supply and save energy during operation and enhance reliability of networks that guarantees the consumers the water.

Analysis of recent sources of research and publications. The company Haestad Methods has developed a system WaterCAD for modeling water networks [4]. This system is based on genetic methods, which are methods of creating and structured search for the best solution in the water supply system and water distribution. The methods are using the theory of natural selection and mechanisms of genetics. It has to deal with the initial set of randomly constructed water supply and searching towards a combination which meets at least cost construction of water mains, reservoirs, pumping stations. Genetic methods creates the consistent sets of trial and the most appropriate solutions, from which then selects the best one.

The US Agency for Environmental Protection developed a program «EPANET 2.0». This program [5] provides the ability to run hydraulic model and model of water quality. «EPANET 2.0» fixes the flow of water in each pipe, the pressure in each node, the water pressure in each tank and concentration of chemicals across the network during the period simulation.

The hydraulic model is used for the following tasks: changing situations on the water supply system with the analysis of the effects of the system; assessment of crashes on consequences on water supply facilities; identify areas of low pressure; planning of the work of pumping plants the second upswing and so on.

The company «Polyterm» (St. Petersburg) supplies the software package ZuluHydro [6], which is designed to calculate water systems. The ZuluHydro performs the hydraulic calculation of water pipe network for different hydraulic work modes of pipeline water network, determined costs and the loss of pressure in all areas. For calculation the water pipeline network is defined diameters of pipes and the pressure in the connection point. The system determines the pressure in points of the water pipe network in the event of hydraulic shock. As for commutation problems, that solves of system are such as: the analysis of outage, the switching, the searching for the nearest stop valves. In addition, the system answers the following questions: how many customers remain without water, if is closed a latch; or is the pressure sufficient in the point of connection of new facilities; what kind of stop valves is used for localizing the accident.

Singling unsolved aspects of the problem. As stated in the Ukrainian Law «On Drinking Water and Water Pipe Line», one of the principles of the state policy in the field of drinking water supply is guaranteed drinking water to the population for drinking, physiological, sanitary and household needs. The implementation of this principle requires the creation of high-tech and economic systems of water supply, which is impossible without the proper research prior to the creation of such systems. Systems of submission and distribution of water, part of which is the water supply networks largely define the reliable and economic operation of all the water complex structures, and therefore require studies that meet modern requirements of customers. But the question of guaranteed economic security and water consumers can not be addressed separately from the problem of evaluating the reliability and

efficiency of water supply systems, construction and improvement trace which is the first step towards the construction or reconstruction of these networks.

Setting objectives. Scientific substantiation of calculating the reliability and building the circular of water supply systems of settlements.

Basic material and results. The question the reliability and efficiency of main water supply systems are complex and aren't understood until now. The main reasons for this are:

1. The main water network cities usually has structural and functional redundancy, and therefore is difficult to identify its «failure criterion». For these networks more accurate are the property «effective functioning» when is also considered the level of failure.

2. To assessig the reliability of the basic characteristic is «denial». The fact of «failure» of main water supply network is closely linked to the consequences of failure. So is needed to assess the consequences of failure and then determine what constitutes a waiver of main water network.

3. Has not developed engineering methods of calculating the reliability of water supply network, which is the main water network cities.

4. The current rate of efficiency – the given cost – do not meet modern market conditions of functioning of municipal services of cities.

5. Generally, the term «reliability» and «efficiency» are in contradiction. For increasing the reliability is required additional investment funds, but there is no «optimum of reliability», followed by further investing virtually no increases reliability or it grows very slowly.

Everything given makes it necessary to solve the problem of optimal tracing of main water network.

The reliability and efficiency laid at the design stage as it is known. Tracking, marked on the plan of the city water network backbone is assumed as a first stage of design. The structure of the future network is called the trace [1]. That structure reflects both the topology of water network and the length of the future network, but this structure does not have the diameters of areas yet .

The first stage is the creation of water pipe network structure with the conditions of efficiency, reliability and optimization of this structure.

The second stage is hydraulic, technical and economical calculations that means the transforming the structure of optimal reliability in actual backbone network tap by calculating the optimal diameter of pipes of sections.

The study and evaluation of reliability starts with the establishment of the concept of «denial». According to [2] – is «an event that is the subject of the loss of ability to perform the desired function, therefore, working in violation of the facility». Failure criterion is formulated as a «sign or set of signs of working of the facility set in the regulatory or design documents». That should apply to the term «functional state». By definition, a «state of the object, which is characterized by its ability to perform all the necessary functions», and it's inoperable state of the object on which it is unable to perform at least one of the required functions.

During the calculating of the main hydraulic cycle in water network believes that water consumers are in knots. As a result of tracing, we get the structure of network (SN), which is the analogous of the future network (length and topology are similar), but it isn't has the diameter of sections. The most important on this stage is to determine the reliability of SN and to create the maximum reliability. When all components of SN are interconnected it names the operable condition. The maximum usable state of forms creates the covering the network of graph. In terms of probability theory of reliability of SN, R can be formulated as a probability of failure-free operation, ie the probability of the existence of at least one covering graph:

$$R = P\left(\bigcup_{i=1}^T B_i\right), \quad (1)$$

where B_i – is an event that is in existence of i graph;

T – the number of covering graph.

Bearing in mind that the events B_i are joint, the probability of sum of such events is:

$$R = \sum_{i=1}^T P(B_i) - \sum_{i \neq j} P(B_i \cap B_j) + \dots + (-1)^{T-1} P(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_T), \quad (2)$$

where $P(B_i)$ – is the probability of the existence of graph B_i ;

$P(B_i \cap B_j)$ – the probability of simultaneous existence of graph B_i and B_j .

Formula of reliability of SN as a polynomial will look like:

$$R = a_1 r^p - a_2 r^{p-1} + a_3 r^{p-2} \dots - a_n r^{p-n-1} + T r^{p-n}, \quad (3)$$

where p – the number of sectors;

n – the number of cycles ;

T – the numbers of SN;

a – the coefficient that determines the number of operable SN;

r – the reliability (probability of no-failure operation) of separate area of SN.

The biggest difficulty for building formulas (3) – is the definition of working condition SN, in other words the factors a . To this end is developed an algorithm that uses the «depth-first search», known from graph theory. For this is needed to renumber all areas of the structure from 1 to p . At each step, during each embranchment of decision graph is elected the plot, which together with other areas, which is selected at the previous stages, will create the part of constructive substructure. In the next step, this area is added to others has already selected and the process continues until substructure will be built. The areas are sorted in order of increasing their numbers. This makes fully and without repetition solving the problem. [1]

It is established that during the choice for the best reliability of water supply network of topological structure, should be used a point on the graph of function $R=f(r)$, which is determined of the maximum reliability r_{lim} . It must be chose that structure of water network, which has a minimum value of marginal reliability r_{lim} for a given geometric characteristics of the structure: the number of knots m , the number of structures n , the number of plots p .

The algorithm of the definition for the working condition SN:

Step 1. Renumber all areas of SN.

Step 2. Take a copy of the SN and remove from it the last section lst with the number $Nlst$. Calculate and memorize the a coefficient of substructures (SS) SN.

Step 3. Discard from substructure the last section lst and pass to the section with the previous number in SN to the number of rejected.

Step 4. If there is a plot pst with number $Npst$ which is higher per unit of the number of $Nlst$ rejected lst , then add pst to substructure.

Step 5. If there is no plot pst with number $Npst$ which is higher per unit of the number of $Nlst$ rejected lst , then discard lst . Go to the section with the previous number in the substructure relative rejected. Calculate and remember the value coefficient of substructure. Go to step 4.

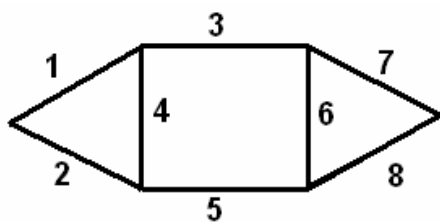
Step 6. As long as in the substructure are areas with greater numbers of the number of added plot, then sum these sections.

Step 7. If created substructure is not coherent and covering, then go to step 3.

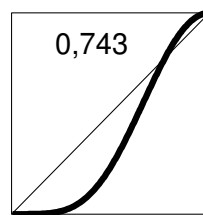
Step 8. Calculate and remember the values of a of given substructure.

Step 9. If not exhausted all options of the substructure, go to the step 4.

The structures of the same numerical characteristics, but with the different topology. The structure of network (fig. 1 – 3) has the same number of: knots $m = 6$, sections $p = 8$, cycles $n = 3$.

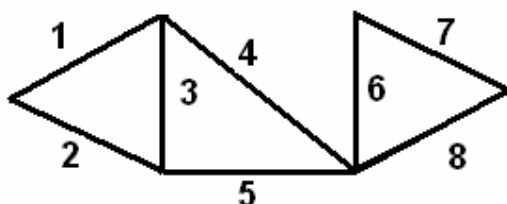


$$R_1 = -12r^8 + 48r^7 - 65r^6 + 30r^5$$

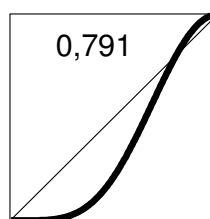


$$r_{lim} = 0,743$$

Figure 1 – The structure of the graph № 1 and the graph of reliability function SN № 1

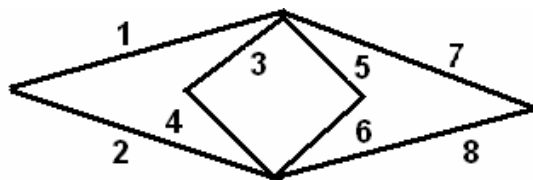


$$R_2 = -8r^8 + 34r^7 - 49r^6 + 24r^5$$

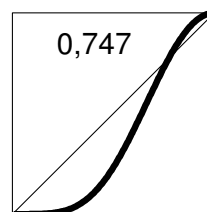


$$r_{lim} = 0,791$$

Figure 2 – The structure of the graph № 2 and the graph of reliability function SN № 2



$$R_3 = -15r^8 + 56r^7 - 72r^6 + 32r^5$$

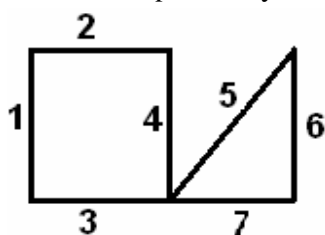


$$r_{lim} = 0,747$$

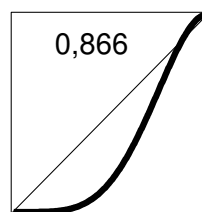
Figure 3 – The structure of the graph № 3 and the graph of reliability function SN № 3

$$R_1 > R_3 > R_2 \quad \forall r$$

The structure of network (fig. 4–6) has the same number of:
knots $m = 6$, sections $p = 7$, cycles $n = 2$.

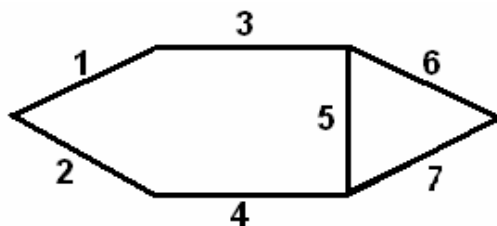


$$R_4 = 6r^7 - 17r^6 + 12r^5$$

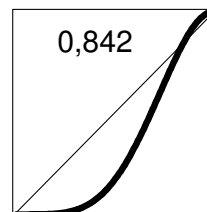


$$r_{lim} = 0,866$$

Figure 4 – The structure of the graph № 4 and the graph of reliability function SN № 4

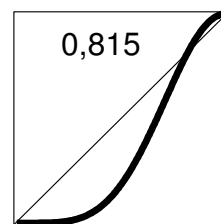
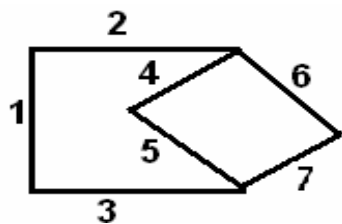


$$R_5 = 8r^7 - 21r^6 + 14r^5$$



$$r_{lim} = 0,842$$

Figure 5 – The structure of the graph № 5 and the graph of reliability function SN № 5



$$R_6 = 10r^7 - 25r^6 + 16r^5$$

$$r_{lim} = 0,815$$

Figure 6 – The structure of the graph № 6 and the graph of reliability function SN № 6

$$R_6 > R_5 > R_4 \forall r$$

Conclusions. It was established that during the choice of the best of reliability of topological structure of pipeline network should use a point on the graph function $R=f(r)$, which determines the maximum reliability r_{lim} . It has been chosen that structure of water network, which has a minimum value of marginal reliability r_{lim} for a given geometric characteristics of structure: the number of knots m , the number of sections n , the number of cycles p .

References

1. Новохатний В. Г. Топологическая методика оценки надежности водопроводных сетей / В. Г. Новохатний // Обеспечение надежности систем хозяйственно-питьевого водоснабжения: материалы семинара. – М.: Московский Дом научно-технической пропаганды имени Ф.Э. Дзержинского, 1989. – С. 10 – 16.
2. DSTU 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К., 1995.
3. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання» від 07.03.02 р. № 315-IV // Голос України. – 2002. – 26 берез. – С. 10 – 13.
4. Tribut J. The Reliability of Water Supply Systems from Source to Consumer / J. Tribut // Aqua. – 1973. – № 2 – P. 3 – 18.
5. Waschanlagen: Nachspeisen von Regenwasser / K. niq Klaus W. Wasserwirt. – Wassertechn. – 2002. – № 8. – P. 14 – 16.
6. Wilkov R.S. Analysis and Design of Reliable Computer Networks / R.S. Wilkov // IEEE Trans, 1972. – P. 20.

© Usenko I., Usenko D.
Надійшла до редакції 26.04.2016

MATHEMATICAL MODELING OF TRANSITION HEAT AND HYDRAULIC PROCESSES IN THE WATER TUBE HEATING SYSTEM WITH RADIATOR THERMOSTATS

The modern building normative base Ukraine provides installation radiator thermostat on heating devices water heating systems. In spite of the declared producers energy-efficient effect in 10 – 20% of the annual cost of heat and comparatively not high cost, the energy saving measure is not widely spread in Ukraine. It is related to number of peculiarities of domestic of systems heating: use of hydraulic elevator thermal units, a small number of buildings equipped with heat counters, the constant hydraulic regime of systems heating and district heating, etc. This work is devoted to investigation of thermal and hydraulic regimes of tube heating systems with thermostatic controls.

For the simulation transient thermal and hydraulic regimes of heating systems with radiator thermostats in this paper proposed of the mathematical model. Its peculiarity is a comprehensive consideration of various factors (both disturbing and regulating) on the thermal and hydraulic modes of work automated heating system. This mathematical model can be used to create computer programs and perform a variety of researches in the field automatic control thermal mode of premises. The research results can be applied to the design and optimization of modern control systems tempering heat.

Keywords: mathematical model, heating system, thermostatic valve.

Кутний Б.А., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВОДОТРУБНИХ СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ З РАДІАТОРНИМИ ТЕРМОСТАТАМИ

Розглянуто особливості отримання енергозберігаючого ефекту при застосуванні термостатичних клапанів у системах опалення будівель. Встановлено, що для його збільшення режим роботи термостатів повинен узгоджуватися з тепловим та гідравлічним режимом усієї системи опалення. Роботу присвячено дослідженню теплових та гідравлічних режимів водотрубних систем опалення з термостатичними регуляторами. Розроблено комплексну математичну модель перехідних процесів у приміщеннях із двотрубними водяними системами опалення з термостатами, яка дозволяє розраховувати теплові та гідравлічні режими в автоматизованих системах опалення. Розрахунки виконуються з урахуванням теплофізичних характеристик огорожуючих конструкцій будівлі та попереднього налаштування термостатичного клапана. Доведено, що результати досліджень можуть застосовуватися для проектування й оптимізації сучасних систем керування відпуском теплоти.

Ключові слова: математична модель, система опалення, термостатичний клапан.

Introduction. The modern normative basis [1] provides installation radiator thermostats, heating devices for water heating systems. Thermostatic valves developed by different manufacturers for both one- and two-pipe systems for heating. In opinion of manufacturer, this energy-efficient measure should provide heat savings of 10 - 20% of its annual expenditure. This is possible by limiting heat proceeds from the heating system in excess of the set temperature value internal air.

Overview of recent sources of research and publications. There are mathematical models of thermal modes of premises [2, 3], mathematical models of heating systems [4, 5]. There is information on design features, construction and hydraulic characteristics radiator thermostats [6, 7]. However, little data on the dynamics of thermal and hydraulic processes that occur during the work of these regulators in the system heating. This is not to predict work radiator thermostats in different conditions.

Selection not solved earlier of parts the general problem. To correctly describe the thermal hydraulic modes that occur in the heating system when using the radiator thermostat required complex mathematical model. It should take into account the convection and radiation heat flow in the room, transient conditions in the heating system and the work of radiator thermostat.

Problem statement. The aim is to develop a mathematical model to study the thermal and hydraulic modes water-pipe heating system with radiator thermostats.

Basic material and results. Transient thermal conditions of each heat capacity multilayer outer enclosure of the building with sufficient accuracy can describe the thermal conductivity differential equation

$$\frac{\partial t_{3Ki}(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \frac{\partial^2 t_{3Ki}(x, \tau)}{\partial x_i^2}, \quad (1)$$

where t_{3Ki} – temperature i -th layer, °C;

τ – hourly coordinate, s;

λ_i – coefficient of thermal conductivity i -th construction material of wall, W/(m·°C);

c_i – heat capacity i -th layer, J/(kg·°C);

ρ_i – density i -th layer, kg/m³;

x_i – spatial coordinate i -th layer, kg/m³.

Boundary conditions at the border contact between two adjacent layers (i to $i+1$)

$$-\lambda_i \frac{\partial t_{3Ki}}{\partial x_i}(\delta_i, \tau) = \lambda_{(i+1)} \frac{\partial t_{3K(i+1)}}{\partial x_{(i+1)}}(\delta_{(i+1)}, \tau). \quad (2)$$

Boundary conditions at the inner wall surface ($x = 0$)

$$-\lambda \frac{\partial t_{3K}}{\partial x}(0, \tau) = \alpha_B^K (t_B - t_{3K(0, \tau)}) + \alpha_B^R (t_R - t_{3K(0, \tau)}), \quad (3)$$

where α_B^K – convective heat transfer coefficient at the inner wall surface, W/(m²·°C);

α_B^R – coefficient of radiation heat transfer at the inner wall surface, W/(m²·°C);

t_B – temperature of internal room air, °C;

t_R – medium radiation temperature of internal room air, °C.

The boundary conditions at the outer wall surface ($x = \delta$)

$$-\lambda \frac{\partial t_{3K}}{\partial x}(\delta, \tau) = \alpha_3 (t_{3K(\delta, \tau)} - t_3), \quad (4)$$

where α_3 – heat transfer coefficient at the outer surface of the wall, W/(m²·°C);

t_3 – ambient air temperature, °C.

The difference calculating thermal conditions internal heat capacity structures of the external is only symmetry boundary conditions. Therefore, in the center of this design is no heat flow

$$\lambda_i \frac{\partial t_{BKi}}{\partial x_i}(\delta_i / 2, \tau) = 0. \quad (5)$$

The initial of time conditions provide a linear (stationary) temperature distribution in the thickness walling.

To calculate the temperature on the inner surface of the small-heat capacity walling (windows, exterior doors, etc.) write the equation of their heat balance without considering accumulation of heat

$$\alpha_B^K F_{MK}(t_B - t_{MK}) + \alpha_B^R F_{MK}(t_R - t_{MK}) = \frac{F_{MK}}{R_{MK}}(t_{MK} - t_3), \quad (6)$$

де F_{MK} – area of small-heat capacity construction, m^2 ;

R_{MK} – thermal resistance design without considering heat transfer at its inner surface, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$;

t_{MK} – temperature of on the inner surface, $^\circ C$.

After the reduction in the area from the equation (6) possible to determine the temperature on the inner surface small-heat capacity construction

$$t_{MK} = \frac{\alpha_B^K t_B + \alpha_B^R t_R + t_3 / R_{MK}}{\alpha_B^K + \alpha_B^R + 1/R_{MK}}. \quad (7)$$

To determine the temperature of the internal environment of the building, use the heat balance equation

$$\begin{aligned} c_{II} m_{II} \frac{dt_{B(\tau)}}{d\tau} = & \alpha_2^K F_2 (t_{CT(\tau)} - t_{B(\tau)}) - \sum \alpha_B^K F_{3K} (t_{B(\tau)} - t_{3K(0,\tau)}) - \\ & - \sum \alpha_B^K F_{BK} (t_{B(\tau)} - t_{BK(\delta/2,\tau)}) - c_{II} G_{inf} (t_{B(\tau)} - t_{3(\tau)}) - \\ & - \sum \alpha_B^K F_{MK} (t_{B(\tau)} - t_{MK(\tau)}) + Q_{BT}. \end{aligned} \quad (8)$$

where c_{II} – heat capacity of air, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

m_{II} – mass of air or equivalent for the environment, kg ;

α_2^K – convective heat transfer coefficient near of heating system elements, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

F_2 – heat exchange surface area of heating system, m^2 ;

t_{CT} – temperature of heat exchange elements surface of heating system, $^\circ C$;

G_{inf} – loss of infiltrated air, kg/s ;

Q_{BT} – Domestic and technological heat flow, W .

Summation in equation (8) indicates adding heat flows from walling with different thermophysical properties.

Heat exchange radiation occurs almost instantly, because equations of thermal balance beam components of heat flow to the internal environment of the heated building is stationary character

$$\begin{aligned} a_2^R F_2 (t_{CT} - t_R) - \sum a_B^R F_{3K} (t_R - t_{3K(0,\tau)}) - \sum a_B^R F_{BK} (t_R - t_{BK(\delta/2,\tau)}) - \\ - \sum a_B^R F_{MK} (t_R - t_{MK}) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

From the equation (9) can determine the medium-radiation temperature of heating premises

$$t_R = \frac{\alpha_2^R F_2 t_{CT} + \sum \alpha_B^R F_{3K} t_{3K(0,\tau)} + \sum \alpha_B^R F_{BK} t_{BK(\delta/2,\tau)} + \sum \alpha_B^R F_{MK} t_{MK}}{\alpha_2^R F_2 + \sum \alpha_B^R F_{3K} + \sum \alpha_B^R F_{BK} + \sum \alpha_B^R F_{MK}}.$$

To describe transient thermal processes in the heating system will replace its equivalent for heat transfer of heating device. Then design scheme two-pipe of heating system takes the form shown in Figure 1.

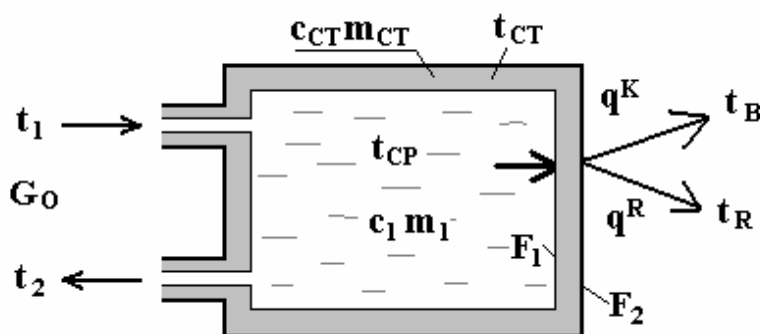


Figure 1 – Calculated scheme "water-pipe" of heating system

In accordance with works [8, 9], possible to use the following mathematical model "water-pipe" of heating system:

$$\begin{cases} c_1 m_1 \frac{dt_{2(\tau)}}{d\tau} = (c_1 G + \alpha_1 F_1)(t_{2(\infty)} - t_{2(\tau)}) \\ c_1 m_1 \frac{dt_{CP(\tau)}}{d\tau} = c_1 G(t_1 - t_{2(\tau)}) - \alpha_1 F_1(t_{CP(\tau)} - t_{CT(\tau)}) \\ c_{CT} m_{CT} \frac{dt_{CT(\tau)}}{d\tau} = \alpha_1 F_1(t_{CP(\tau)} - t_{CT(\tau)}) - \alpha_2^K F_2(t_{CT(\tau)} - t_{B(\tau)}) - \alpha_2^R F_2(t_{CT(\tau)} - t_R), \end{cases} \quad (10)$$

where c_1 – heat capacity of water, J/(kg·°C);

m_1 – mass of water in the heating system, kg;

t_2 – the coolant temperature in the return pipe of heating system, °C;

G – heat consumption in the heating system, kg/s;

α_1 – heat transfer coefficient between coolant and wall equivalent to the heat transfer heating device, W/(m²·°C);

F_1 – area of internal heat transfer surface, m²;

t_{CP} – the average temperature of the coolant in the heating system, °C;

c_{CT} – the average heat capacity of heating system elements, J/(kg·°C);

m_{CT} – mass of element of heating system, kg.

To determine the temperature in the return pipe of heating system in stationary conditions possible to apply the formula

$$t_{2(\infty)} = t_{CT} + (t_1 - t_{CT}) \ell^{\frac{\alpha_1 F_1}{c_1 G}}. \quad (11)$$

Let us assume that each heating device is equipped with an automatic temperature controller direct action. Each thermostat consists of a valve and thermostatic head.

To describe the heating system with radiator thermostats must combine of their thermal and hydraulic mode Fig. 2. The total loss of pressure in the automated heating system will consist of a pressure loss in thermostatic valve and pressure losses in pipes and heating devices

$$\Delta P_{TB} = \Delta P_{KA} + \Delta P_{CO} , \quad (12)$$

where ΔP_{KA} – loss of pressure on thermostatic valve, bar;

ΔP_{CO} – pressure loss in the heating system, bar.

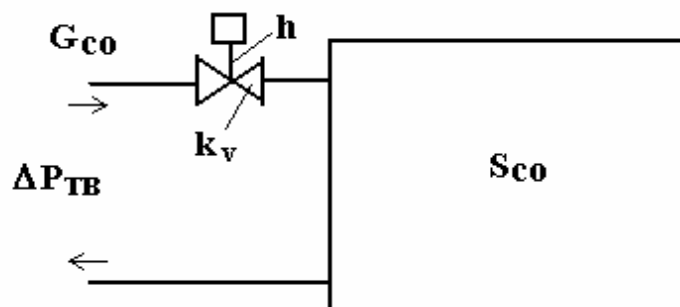


Figure 2 - Design scheme of heating system with individual thermostats

Considering that two-pipe heating system, all valves connected in parallel. Using the method of hydraulic characteristics of equation (12) can be written as

$$\Delta P_{TB} = \left(\frac{1}{(Nk_v)^2} + S_{CO} \right) G_{CO}^2 , \quad (13)$$

where N – the total number of thermostatic valves, pieces;

k_v – coefficient throughput valve, $(\text{m}^3/\text{h})/\text{bar}^{0.5}$;

S_{CO} – hydraulic characteristics of heating system, $\text{bar}/(\text{m}^3/\text{h})^2$;

G_{CO} – heat consumption in the heating system, m^3/h .

From the formula (13) can be heat consumption in the heating system

$$G_{CO} = \sqrt{\frac{\Delta P_{TB}}{\frac{1}{(Nk_v)^2} + S_{CO}}} . \quad (14)$$

The relationship between the move valve stem and his throughput coefficient called costly characteristic of the valve. There are three main types of characteristics: linear, quadratic and equally-percentage. Each type characteristics corresponds their profiling plate valve. For radiator thermostats are used primarily logarithmic characteristics. The coefficient throughput valve with logarithmic characteristic can be defined by the formula

$$k_v = (k_{vB})^h (k_{v3})^{1-h} , \quad (15)$$

where k_{vB} – coefficient throughput valve in open position, $(\text{m}^3/\text{h})/\text{bar}^{0.5}$;

k_{v3} – that, in the closed position, $(\text{m}^3/\text{h})/\text{bar}^{0.5}$;

h – the relative position of the valve rod.

The coefficient throughput valve in the open state depends on its a standard size, which is determined by hydraulic calculation of heating system. The coefficient throughput valve in the closed position can be taken as being equal to the standard leakage $k_{vII} = 0,0005 k_{vB}$.

Hydraulic resistance of the valve is also determined by the provisions of the rod (h). The maximum position of the rod ($h_{max} \leq 1$) given at the previous setting valve (installation). Other provisions rod depending on the temperature in the room. Due to this being implemented "negative" an inverse relationship between temperature of air indoors and heat transfer of heaters. Excluding the friction in the valve stem headwork its provisions can describe linear dependence form

$$\begin{aligned} h_{(\tau=\infty)} &= h_{max}, & \text{if } t_B < t_{min}; \\ h_{(\tau=\infty)} &= \frac{t_{max} - t_B}{t_{max} - t_{min}}, & \text{if } t_{min} \leq t_B \leq t_{max}; \\ h_{(\tau=\infty)} &= 0, & \text{if } t_B > t_{max}, \end{aligned} \quad (16)$$

where $h_{(\tau=\infty)}$ – rod position after transient processes;

t_{max}, t_{min} – in accordance with the maximum and minimum temperature at which the valve stem reaches extreme positions, °C.

Maximum and minimum air temperature is set by turning the thermostatic valve head. To fully open the valve in ideal conditions $t_{max} - t_{min} = 2K$. In the case of this have previously configured temperature difference decreases proportionally to limit of the stroke rod.

Another important factor is the transition process in thermostatic valve head. Thus, for thermostats company "Danfoss" this time is $\tau_K = 12-15$ minutes. Given the transition processes in the head with thermostatic valve stem position can be described by the formula

$$h_{(\tau)} = h_{(\tau=\infty)} + (h_{(\tau=0)} - h_{(\tau=\infty)}) e^{-\frac{\tau}{\tau_K}}. \quad (17)$$

The system of equations 1-17 combines thermal and hydraulic mode of heating system in transition process and considers the work of individual thermostatic valves. The resulting system of equations thermal-hydraulic balance can be solved if you set the appropriate initial conditions.

Conclusions. The mathematical model for comprehensive consideration of the impact of various factors (both disturbing and regulating) the thermal and hydraulic modes of automated heating system with radiator thermostats. This mathematical model can be used to create computer programs and perform various research in the field of automated control thermal conditions premises.

References

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К.: Укрархбудінформ, 2013. – 141 с.
DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventilyatsiya ta konditsionuvannya. – K.: Ukrarhbudininform, 2013. – 141 s.
2. Zhuang Z. A mathematical model for a house integrated with an elevated chinese kang heating system / Zhi Zhuang, Yuguang Li and Bin Chen / China Proceedings: Building Simulation, 2007. – P. 63 – 70.
3. Строй А. Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений / А. Ф. Строй. – К.: Вища шк., 1993. – 155 с.
Stroy A. F. Upravlenie teplovym rezhimom zdaniy i sooruzheniy / A. F. Stroy. – K.: Vishcha shk., 1993. – 155 s.

4. Baoping X. Simulation on hydraulic heating system of building under the control of thermostat radiator valves / Xu Baoping, Fu Lin and Di Hongfa / *China Proceedings: Building Simulation*, 2007. – P. 575 – 579.
5. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович, В. К. Аверьянов, Ю. Я. Темперль, С. И. Быков. – Л. : Стройиздат, 1987. – 248 с.
Avtomatizirovannye sistemy teplosnabzheniya i otopleniya / S. A. Chistovich, V. K. Averyanov, Yu. Ya. Temperl, S. I. Bykov. – L. : Stroyizdat, 1987. – 248 s.
6. Покотилов В. В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло- и холодоснабжения / В. В. Покотилов. – Вена: Herz Armaturen, 2010. – 176 с.
Pokotilov V. V. Reguliruyushchie klapany avtomatizirovannyh sistem teplo- i holodosnabzheniya / V. V. Pokotilov. – Vena: Herz Armaturen, 2010. – 176 s.
7. Energy Saving Solutions for renovation of heating and cooling systems / Heating Solutions. Hydronic Balancing & Control. Ulvehavevej 61. DK-7100 Vejle. Denmark / VZ.A6.E3. 02 Sep 2014. – 44 p.
8. Кутний Б. А. Нестационарный тепловой режим системы отопления будівлі в умовах кількісного регулювання / Б. А. Кутний // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – Вип.14. – С. 113 – 116.
Kutniy B. A. Nestatsionarniy teploviy rezhim sistemi opalennya budivli v umovah kilkisnogo reguluyannya / B. A. Kutniy // Zbirnik naukovih prats. Seriya: galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava: PoltNTU, 2004. – Vip.14. – S. 113 – 116.
<http://znp.pntu.edu.ua>
9. Кутний Б. А. Тепловой режим системы отопления будівлі в умовах кількісно-якісного регулювання / Б. А. Кутний // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вип.15. – С. 177 – 181.
Kutniy B. A. Teploviy rezhim sistemi opalennya budivli v umovah kilkisno-yakisnogo reguluyannya / B. A. Kutniy // Zbirnik naukovih prats. Seriya: galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava: PoltNTU, 2005. – Vip.15. – S. 177 – 181.
<http://znp.pntu.edu.ua>

© Kutnyi B.
Received 30.12.2015

SOLAR ENERGY APPLICATION FOR FARM ENTERPRISES ELECTRICAL MAINTENANCE

Features of livestock houses designing for rural (farm) enterprises with observance of sanitary standards have been described; expensiveness of the design phases, construction and installation works and electricity generation equipment in such buildings is emphasized. Foreign experience in solar cell batteries application has been analyzed. Advantages and disadvantages of the renewable power sources setting up have been determined, particularly concerning the first few years of operation. The dynamics of the energy-intensive equipment installation at farm enterprises of Ukraine has been analyzed, a trend of implementing innovative technologies as an autonomous, maximally independent energy supply source, has been detected. The environmental safety of such energy supply solution and its installation efficiency in any region is emphasized. The possibility is considered for alternative energy supply sources application and energy supply independence of cooperated livestock houses at farm enterprises, particularly under the conditions of persistent reduction in prices for photo-electric modules and persistent growth of gas and electricity rates.

Keywords: livestock house, farm enterprise, natural energy sources, solar cell batteries.

Нестеренко С.В., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

Відмічено особливість проектування тваринницьких будівель селянських (фермерських) господарств з дотриманням санітарних вимог; відзначено дорожнечу етапів проектування, будівельно-монтажних робіт та технічної експлуатації електроустановок у таких будівлях. Проаналізовано закордонний досвід використання сонячних батарей. Визначено переваги та недоліки встановлення відновлювальних джерел енергії, особливо в перші роки використання. Проаналізовано динаміку встановлення енергоємного обладнання у фермерських господарствах в Україні, виявлено тенденцію до запровадження новітніх технологій автономного, максимально незалежного джерела енергопостачання. Відмічено екологічність такого рішення з енергозабезпечення, ефективність установлення для будь-якого регіону. Розглянуто можливість застосування альтернативних джерел енергозабезпечення й енергонезалежності в кооперованих тваринницьких будівлях фермерських господарств, особливо в умовах постійного зниження цін на фотоелектричні модулі та постійного підвищення тарифів на газ і світло.

Ключові слова: тваринницька будівля, фермерське господарство, природні джерела енергії, сонячні батареї.

Introduction. Until quite recently, in Ukraine, solar energy was only discussed in the academic circles, and it was considered that solar power stations construction and solar cell batteries installation is a costly affair and low efficient in our climes. However, permanent gas and electricity prices growing has caused the interest of common Ukrainians in the alternative electric and energy independence sources [1].

Analysis of the latest research sources and publications. Basing upon the analysis of space-planning and constructive decisions of small-space livestock houses, taking into account microclimate parameters, availability of different animal species in a cooperated building for farm enterprises of the Poltava region, the design proposals of cooperated livestock houses [2] have been developed, where the basic performance specifications, requirements concerning space-planning and constructive decisions of cooperated livestock houses, design proposals with applying current technological systems are considered.

Substantiation of space-planning decisions of cooperated livestock houses is presented. New types of houses have been suggested on the basis of the developed cooperated livestock houses nomenclature, matrix of possibilities for cooperating and blocking small-space cooperated livestock houses with different animal species [3]. To calculate the parameters of production premises in a cooperated and blocked building, the algorithm for calculating the livestock house's total area and the production area [4] as well as a block diagram of the calculation program have been developed [5].

Highlighting the earlier unsolved issues of the general problem. At present, many solar power stations have been built in Ukraine, both large and small ones. Solar energy projects are popular among the companies and investors, whose primary activity is agro-business. Farm enterprises' owners in the present day environment, having calculated their possible losses and the investments' costs, more frequently decide to install solar power stations.

The main purpose of the above stations construction is the necessity of providing the uninterrupted service of equipment under the condition of interruptible energy supply from electric power networks; additionally, there is a possibility of energy accumulation in the batteries for using it at night or during the low light periods. Besides, farmers can gain profits from selling the electric energy according to «green» tariff.

The aim of the study is to disclose the possibility of solar cell batteries application for electrification, hot water supply and heating livestock houses of farm enterprises.

Basic material and study results. The peculiarity of livestock houses planning is mandatory compliance with the requirements to the rural (farm) enterprises location. According to [6], the length of sanitary protection zones from various small-space livestock houses to the nearest residential building must make from 15 to 400 m. That means remoteness from energy supply sources, which, in its turn, influences growing prices of the design phases, construction and installation works and technical operation of electric plants.

The greatest advantage of the solar energy application is its availability, because even in winter, sunlight is shining outside, thus, it can generate at least the minimal necessary amount of energy. Additionally, solar cell batteries do possess a long term of operation, so consequently they are perfectly repaid. If you divide the cost of solar batteries installation by the number of years they can be operated, savings will become vivid.

An autonomous solar cell battery can generate the sufficient amount of energy to meet the every-day needs (Fig.1). Besides, the solar cell battery provides the complete independence of the electric power system in future. Additionally, a solar collector does not need careful maintenance: the only thing needed is a periodic cleaning. Moreover, there is no need to pay the electricity bills, and the invested money will be repaid within the 5 years term.

One more solar systems' advantage is that they are easily scaled. That means, that one can buy a small installation with a few panels, and later on one can buy some more. Therefore, if a family budget is limited, transfer to the solar energy is quite possible, though partial.



Figure 1 – Solar cell batteries at a private enterprise

First solar batteries able to transform solar energy into the mechanical one were constructed in France. Late in the XIX century, at the World's Fair in Paris, P. Muse, an inventor, demonstrated an insulator, an apparatus focusing sun rays on the steam boiler by means of a mirror. The boiler drove a typing machine, which typed 500 printed copies per hour.

Solar energy was also used late in the XXth century in the USA: a solar battery supplied energy to the American satellite vehicle «Vanguard».

The first industrial solar power station was constructed in the Crimea, in 1985, not far from the town of Shcholkine. Its peak capacity made 5 MW. It equaled the capacity of the first nuclear reactor. It has only generated 2 mln kW/hours of electricity for the 10 years period, however, the cost of its electricity was high enough, and the station was closed in the middle 90ies. It was the very time, that analogous works were activated in the USA, where Loose Industries Company launched an 80 MW solar-gas power station in 1989. Over the 5 years period, only in California, there had been built several stations of the sort, with the capacity of 480 MW; the cost of one solar-gas kW/hour was brought to 7 – 8 cent against 15 cent for a kW/hour: that is the cost of electricity generated by an atomic power station (APS).

Nowadays, the world's leader in using solar installations is China, where solar heat collectors occupy 80% of the market.

In general, all the developed countries of Europe and Asia, as well as the USA, possess the experience of using alternative sources of energy. In Japan, for instance, the total capacity of solar power stations makes directly 3 GW. The most ecologically safe city in the world has been constructed in Japan.

All buildings in it are using solar energy, water consumption is reduced by 30%, and instead of public transport bicycles and electric cars are used. Gasoline service stations are replaced with the electric car service stations.

It seemed that there was too much sunlight in Japan, and it seemed difficult to match the Japanese. However, Germany, which is located more northward than Ukraine, has already installed nearly 9GW of solar panels. Last year, in July, 2015, first in the German history, solar batteries, installed throughout the country, produced the same amount of electric energy as APS: the both generated 5.18 TW (terawatt) hours (it is proved by the calculations made at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Freiburg, Germany).

In the Republic of Korea 274 MW of solar panels capacity were installed in 2008. It can be compared with the Vladivostok TPP's (thermal power plant) capacity in the same year. In Italy solar power stations with the total capacity of 900 MW were only implemented in 2009, in the USA – that of 475 MW, in Czech Republic – 411 MW, in Belgium – 292 MW, in France – 195 MW.

Current models are so efficient that they successfully collect energy not only in our climates, but even in Yakutia. The largest solar power station above the Arctic Circle has been recently built there; its capacity makes 1 MW, it is also designed to operate in the conditions of frosts up to minus 50°C. The station is expected to save nearly 5 tank wagons of diesel oil for the population next winter; before now, only generators were used, since it was practically impossible to install trunk transmission line at such a long distance.

The first currently known farmer, who has undertaken risks of using renewable power sources in the Subarctic, was Artem Andronaki [7]. In his farm keeping of such animals and birds as ostriches, reindeers, quails, goats, rabbits, various chicken breeds, turkeys, guinea fowls, a peacock and even a sea-eagle is cooperated. All animals and birds are kept by the farmer due to sales of meat and quail eggs, goat milk, ostrich chicken and eggs, live rabbits, as well as at the expense of tourists.

«I'm pleased very much with the solar cell batteries operation in our north conditions! Many people consider that they constantly need direct sunlight. But it is not so! They need ultraviolet light, which penetrates through clouds. My solar panel produces nearly 700 W in overcast days, and 1 kW in sunny days. Thus, the difference is small...», – the farmer thought. The decisive factor for solar cell batteries installation has been a high cost of electric transmission lines repair and the electricity price itself. However, installation itself requires sufficient expenses, and it is the technology's expensiveness is the main reason of the alternative energy sources' slow spreading in the agricultural sector.

In 2015 – 2016, almost 20% of farm enterprises in Ukraine are going to install a solar power station with the capacity starting from 0.5 MW. It is proved by the data of the public opinion poll performed by the Farmers' and Private Land Owners Association of Ukraine.

Taking into account the number of farm enterprises, which made 39563 as of 1, July, 2015, and solar power stations' prices, making about €1300 per 1 kW capacity, in the nearest six months Ukrainian agrarians can buy 8.000 solar power plants with the total cost of €5.2 bln, – experts say, mentioning, that only objects with the capacity of 0.5 MW are spoken about. A solar power plant with the capacity of 0.5 – 1.5 MW will permit complete providing of an average farm enterprise with electric energy.

The above forecast is proved by the dynamics of the energy- intensive equipment installation for the latest year and a half. Thus, while before now, the only one efficient «farm» solar power station with the capacity of 1.3 MW was working in Ukraine (in the village of Ivanivka, Kirovograd region), at present, about 15 such stations with the capacities of 0.5 0 1.5 MW have appeared.

As a result of the last year rotating power cuts, numerous farm manufacturers suffered losses. This year, a lack of coal is observed at thermal power plants, producing nearly 40% of all the electricity in the country. Thus, as of 21, August, 2015, the coal reserves in the Ukrainian TPP made less than 1.3 t, while the norm was 2.7 mln t. At present, five TPP are on the brink of ruin, they are: Kryvorizka, Prydniprovsk, Slov'yanska, Zmiyivska and Kurakhovska thermal power plants. According to the data of Minenergovugillya, in 2015 the current monthly electric energy deficiency is estimated to be 250-300 mln kW a year. It is covered due to imports from Russia.

Taking into consideration the region's climate conditions, dimensions, installation, build-up factor and regeneration technology simplification, the solar cell batteries structure is being permanently improved. American physicists have developed a new technology, which provides

raising the solar cell batteries' efficiency by 30% (Fig. 2). The batteries' efficiency is approximately relevant to that of the new generators, having batteries driven by a mechanic motor. Applying the technologies based on the Japanese art of kirigami permits not only obtaining cheaper «green» energy, but just as well reducing the solar cell batteries' manufacturing costs [8].



Figure 2 – Volume elements of the innovative technologies for solar cell batteries manufacturing

However, what structure solar cell batteries may have, the basic technology of electric energy collection in the livestock house remains unchanged (Fig. 3).

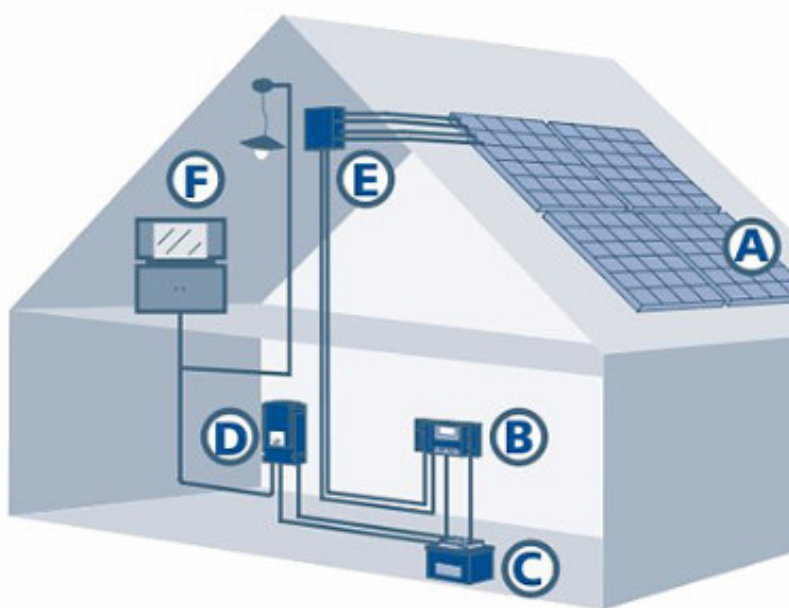


Figure 3 – An example of a typical network photoelectric system installation in the livestock house:

A – generator; B – solar panel charging controller; C – accumulator;
D – inverter; E – contact box; F – consumer

Conclusions. Energy independence, provided to the farm enterprises owners by solar cell batteries application, is getting closer to reality. More and more frequently solar cell batteries are used as an autonomous, maximally independent energy source. Ecological safety of the above energy supply decision is vivid, as energy is obtained from the renewable source, that is the Sun. There are no limitations on the consumed energy amount. If the total energy consumed was multiplied thirtyfold, even then it only would make 0.001% of the Sun's energy reaching the Earth.

Experts are sure that in the nearest years the demand for solar power stations will remain, particularly under the conditions of the photoelectric modules prices decline. According to the studies of Fraunhofer Institute (ISE), since early 2012, the European modules have got cheaper by 32% up to € 0.73 per 1W, and those of China got cheaper by 27% up to € 0.58 per 1W. Savings from payments for energy products, centralized energy consumption while using solar cell batteries, are also very significant. Their application is an ideal decision in cases, when the cost of the limits committed by the local heat and power authorities, is excessively high, and in a number of cases it even exceeds the cost of the solar cell batteries installation.

References

1. Сонячна електростанція: прибутковий бізнес чи недешева іграшка? // Фермер України. – 2015. – № 11 – 12. – С. 6 – 7.
Sonyachna elektrostantsiya: pributkoviy biznes chi nedesheva igrashka? // Fermer Ukraini. – 2015. – № 11 – 12. – S. 6 – 7.
2. Альбом проектних пропозицій кооперованих тваринницьких будівель (для фермерських господарств Полтавської області) / В. Й. Хазін, Г. І. Шарій, О. Б. Кошлатий, С. В. Нестеренко. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – 36 с.
Albom proektnih propozitsiy kooperovanih tvarinnitskikh budivel (dlya fermerskikh gospodarstv Poltavskoyi oblasti) / V. Y. Hazin, G. I. Shariy, O. B. Koshlatiy, S. V. Nesterenko. – Poltava: PoltNTU, 2013. – 36 s.
3. Нестеренко С. В. Формування малооб'ємних тваринницьких будівель на принципах кооперування, блокування і вдосконалення конструктивних рішень: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / С. В. Нестеренко. – Полтава, 2010. – 24 с.
Nesterenko S. V. Formuvannya maloob'emnih tvarinnitskikh budivel na printsipah kooperuvannya, blokuвання i vdoskonalennya konstruktivnih rishen: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.23.01 «Budivelni konstruktsiyi, budivli ta sporudi» / S. V. Nesterenko. – Poltava, 2010. – 24 s.
4. Нестеренко С. В. Формування об'ємно-планувальних рішень кооперованих тваринницьких будівель за допомогою ПЕОМ / С. В. Нестеренко // Вісник національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 5. – С. 147 – 149.
Nesterenko S. V. Formuvannya ob'emno-planuvальnih rishen kooperovanih tvarinnitskikh budivel za dopomogoyu PEOM / S. V. Nesterenko // Visnik natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo. – Kremenchuk: KrNU, 2011. – Vip. 5. – S. 147 – 149.
5. Нестеренко С. В. Ефективність кооперування й блокування малооб'ємних тваринницьких будівель / С. В. Нестеренко, І. В. Ткаченко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – Вип. 1 (40). – С. 323 – 327.
Nesterenko S. V. Efektivnist kooperuvannya y blokuвання maloob'emnih tvarinnitskikh budivel / S. V. Nesterenko, I. V. Tkachenko // Zbirnik naukovih prats. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. – Poltava: PoltNTU, 2014. – Vip. 1 (40). – S. 323 – 327.
<http://znp.pntu.edu.ua>
6. ДБН Б.2.4-4-97. Планування і забудова малих сільськогосподарських підприємств та селянських (фермерських) господарств. – К. : УкрНДІагропроект, 1997. – 36 с.
DBN B.2.4-4-97. Planuvannya i zabudova malih silskogospodarskikh pidpriemstv ta selyanskikh (fermerskikh) gospodarstv. – K. : UkrNDIagroproekt, 1997. – 36 s.
7. Solnechnye batarei prekrasno rabotayut v Zapolyare [Electronic resource] // Bellona. – Access mode: <http://bellona.ru/2014/07/18/murmanskij-fermer-solnechnye-batarei/>
8. Patel M. R. Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation. Second Edition / M. R. Patel. – New York, 2006. – 448 p.

© Nesterenko S.

Надійшла до редакції 16.03.2016

QUALITATIVE RELATIONSHIPS OF WATER MIGRATION IN HIGHWAY EMBANKMENT CLAY SOILS BY THE RESULTS OF LABORATORY AND FIELD RESEARCH

As a result of quantitative data analysis by laboratory and field experiments quantitative patterns of water migration in compacted silty loam embankment, including the stabilized (or final) clay soil moisture values, depending on their type (number plasticity), soil skeleton density, embankment height and time «rest» of the subgrade before it's operation are established. The soil moisture changes graphs at what the loam was compacted from soil skeleton density and stabilized soil moisture of already compacted loam after the subgrade «rest» from soil skeleton density are plotting in the article. The empirical dependence of compacted silty loams stabilized moisture for their multilayer consolidation is obtained. Empirical dependence parameter corresponds to maximum molecular moisture capacity at what it is advisable to do the subgrade clay soils multilayer consolidation for the ensuring their long-term strength.

Keywords: water migration, compacted loam, soil skeleton density, plasticity number, stabilized moisture, two-factor analysis, empirical dependence.

КІЛЬКІСНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ МІГРАЦІЇ ВОДИ В ТОВЦІ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНИХ І ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами кількісного аналізу даних лабораторного та польового дослідів встановлено кількісні закономірності міграції води в товщі ущільнених пилуватих суглинків дорожнього насипу, зокрема величин стабілізованої (чи кінцевої) вологості глинистого ґрунту залежно від їх виду (числа пластичності), щільності скелета ґрунту, висоти насипу та часу «відпочинку» земляного полотна до початку експлуатації. Побудовано графіки залежності вологості ґрунту, при якій суглинки ущільнювали, від щільності скелета ґрунту та стабілізованої вологості ґрунту вже ущільнених суглинків після «відпочинку» земляного полотна від щільності скелета ґрунту. Отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пилуватих суглинків для їх пошарового ущільнення, параметр котрої відповідає вологості максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно виконувати пошарове ущільнення глинистих ґрунтів для забезпечення їх тривалої міцності.

Ключові слова: міграція води, ущільнений суглинок, щільність скелета ґрунту, число пластичності, стабілізована вологість, двофакторний аналіз, емпірична залежність.

Introduction. For the reliable subgrade operation it's necessary not only to achieve maximum multilayer consolidation values of its soil skeleton density ρ_d and soil strength, but also to save them during normative time. On the embankment soils condition over time significantly affects moisture, at what the compaction was done. That's why for subgrade erection it's important long-term strength ensuring, i. e., when during normative operational time the values of soil mechanical characteristics, obtained after compaction, have been saved and excess soil's deformation isn't appear [1 – 3].

Review of recent sources of research and publications. It was established earlier by authors [4, 5] that on moisture condition and, in accordance, on long-term strength parameters of highway embankment clay soils significantly affects few factors, what it's necessary to consider at its erection:

- clay soil type, i.e. its indicative data: liquid limit W_L ; plastic limit W_p ; soil plasticity number I_p ;
- soil skeleton density ρ_d within compacted subgrade;
- soil moisture w , at what the compaction is conducting;
- compacted embankment height;
- the number of days, what compacted clay embankment «rests» after its erection, and before the operation.

Now both in Ukraine and in the world at the highway embankments erection it is normalized soil skeleton density, determined for each type of soil in the laboratory by Proctor test or its modification. However, the problem is that domestic regulations prescribe optimal parameters of compacted clay soil (maximum soil skeleton density ρ_d and optimum moisture content W_{opt}), based on the obtained values of laboratory conditions for a particular soil type and dynamic load characteristics without actual mechanisms characteristics [6 – 9].

When soil compacts due to high moisture, with a degree of saturation close to $S_r = 1,0$, then, of course, that the soil dries and held its sedimentation and therefore additional deformations, when soil compacts due to low moisture, it will be difficult to do the compaction, by the way, it's a little probability of desired soil skeleton density achieving, even with the modern mechanisms possibilities. Also national standards recommend for optimum clay soils moisture content, at the compaction by roller, to take plastic limit W_p , but this parameter is not related on how much unfree water the soil is actually containing.

The assertion that the current mechanisms by rolling can achieve maximum soil skeleton density at moisture, lower than plastic limit, confirms Romanian and British experts research [9 – 11].

Parts of the common problems that earlier unsolved. That's why optimal compaction criteria of highway embankment soils require improvement, wherefore authors [4] developed and realized physical laboratory experiment for water migration in compacted heavy and light silty loam relationships establishment, including the stabilized (or final) clay soil moisture values w_k , depending on their type (number plasticity), soil skeleton density, embankment height and time «rest» of the subgrade before it's operation.

Purpose of the research is to do the statistical analysis of compacted highway embankment clay soil stabilized moisture w_k from subgrade soil skeleton density ρ_d and plasticity number I_p .

Main material and results. The methodology of physical water migration modeling by the highway embankment height through time changes research of clay loams moisture, placed in plastic tubes and compacted at water saturation factor $S_r = 0,85$ to soil skeleton density $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ g/cm}^3$, changeable factors in what were: soil type – heavy and light silty loam, tube height – from 0,45 to 2,85 m; time «rest» of the subgrade before it's operation, – from 60 – 180 days is in details described in [4, 5].

The average results of determining the compacted clay soil stabilized moisture w_k by whole tube height, except it's upper and lower links for each preset soil skeleton value:

$$\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_d = 1,65 \text{ g/cm}^3, - \text{placed in Tab. 1 and Tab. 2.}$$

In the last column of both tables the variation coefficient values of w_k parameter is presented, by what the soil can be accepted as homogeneous.

Table 1 – Average of final moisture w_k of compacted heavy loam (research soil № 1) by whole tube height

Preset soil skeleton density $\rho_d, \text{g/cm}^3$	Corresponding void volume ratio e	Preset soil moisture w (at $S_r = 0,85$)	Final soil moisture w_k	Variation coefficient w_k, v
1,50	0,786	0,250	0,203	0,071
1,55	0,729	0,231	0,190	0,068
1,60	0,675	0,214	0,176	0,063
1,65	0,624	0,198	0,167	0,065

Table 2 – Average of final moisture w_k of compacted light loam (research soil № 2) by whole tube height

Preset soil skeleton density $\rho_d, \text{g/cm}^3$	Corresponding void volume ratio e	Preset soil moisture w (at $S_r = 0,85$)	Final soil moisture w_k	Variation coefficient w_k, v
1,50	0,786	0,250	0,162	0,072
1,55	0,729	0,231	0,143	0,070
1,60	0,675	0,214	0,130	0,072
1,65	0,624	0,198	0,114	0,068

By datum Tab. 1 and Tab. 2 the dependings graphs (Fig. 1 and Fig. 2) are drew:

- graph with domed markers curve – soil moisture w , at what both research soils were compacted from soil skeleton density ρ_d in highway embankment (plastic tube);
- graph with squarely markers curve – stabilized soil moisture w_k of already compacted loams after subgrade «rest» time from ρ_d within tube height.

Comparing by datum Tab. 1 and Tab. 2 the final average soil moisture values w_k of compacted loams after two months «rest» with initial moisture values w of this soil we can state, that:

- final average soil moisture value w_k of compacted loams compared with initial moisture w , at what the clay soil was compacted, decreased for all soil skeleton density value ρ_d almost for all tube height except it's upper link, for what soil moisture approached to the value w_{sat} , what corresponds to degree of saturation $S_r \approx 1,0$ by raising capillary moisture; soil moisture in lower tube link decreased to $w = 0,10 - 0,12$ and light silty loam moisture to $w = 0,08$ due to evaporation of free water;

- final moisture value w_k of compacted subgrade loams within experimental range $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ g/cm}^3$ decreases by dependence, close to logarithmic with soil skeleton value

increasing, what explains by the fact that with ρ_d increasing due to the fact of ρ_d increasing film thickness of unfree water something decreases and besides, the coefficient of permeability also decreases, what reduces to moisture speed redistribution;

- stabilized soil moisture w_k in all cases come to be less than soil plasticity number W_p and approach to its, so-called, maximum molecular moisture capacity w_{mm});

- moisture decreasing of initial w , at what the soil was compacted, within highway embankment in practice causes to it's additional settlement.

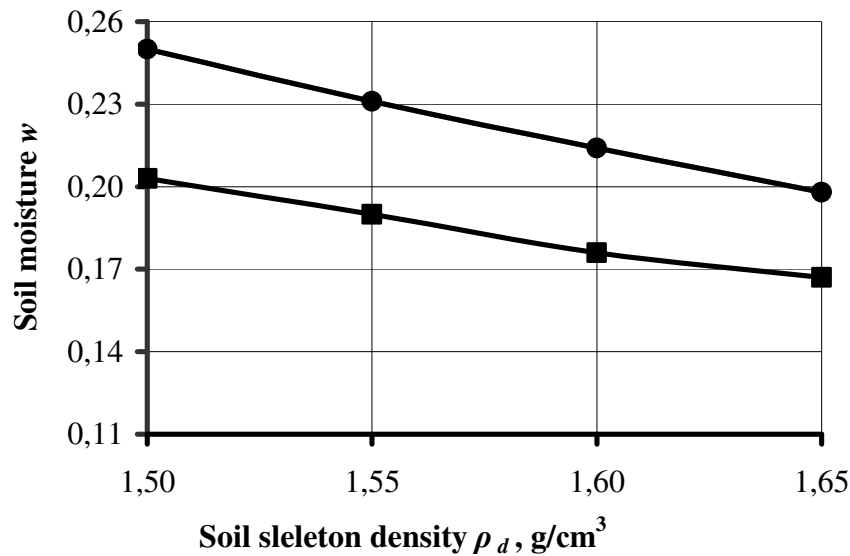


Figure 1 – Plots relation of soil moisture w at what the heavy loam was compacted from soil skeleton density ρ_d (curve with domed markers), and final average soil moisture w_k of already compacted heavy loam from ρ_d within tube height (curve with squarely markers)

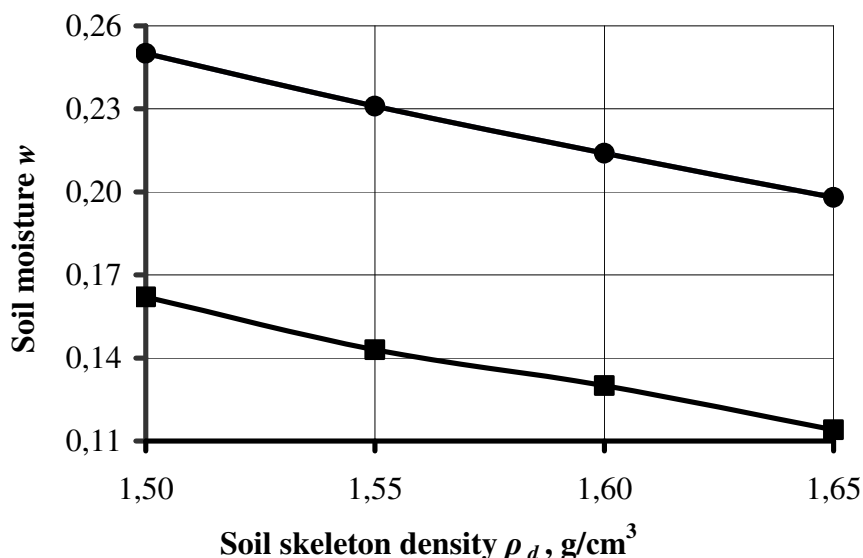


Figure 2 – Plots relation of soil moisture w at what the light loam was compacted from soil skeleton density ρ_d (curve with domed markers), and final average soil moisture w_k of already compacted light loam from ρ_d within tube height (curve with squarely markers)

As a result of statistical processing by least squares method of research data Tab. 1 (and Fig. 1) it is found that the decreasing of stabilized moisture value w_k of compacted heavy silty loam (research soil № 1) depending on the soil skeleton density growth within the experimental range $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ g/cm}^3$ it is most correctly to describe by logarithmic function of the form

$$w_k = a + b \ln \left(\frac{\rho_d}{\rho_{d0}} \right), \quad (1)$$

where is $\rho_{d0} = 1 \text{ g/cm}^3$;

empirical coefficient is: $a = 0,358$; $b = -0,384$.

At this multiple correlation coefficient r and variation coefficient v values in accordance is: $r = 0,997$; $v = 0,008$, what indicates about close relationship between the experimental data and about the correctness of their approximation by the logarithmic function.

A similar logarithmic dependence is obtained also for stabilized moisture value w_k of compacted light silty loam (research soil № 2).

Empirical coefficient of equation (1) is: $a = 0,362$; $b = -0,494$.

At this multiple correlation coefficient r and variation coefficient v values in accordance is: $r = 0,998$; $v = 0,0115$, what indicates about close relationship between the experimental data and about the correctness of their approximation by the logarithmic function.

The results of physical laboratory experiment related to quantitative patterns of water migration in compacted silty loams embankment (clay soils type – its plastic index I_p , soil skeleton density ρ_d , g/cm^3 , stabilized moisture of compacted clay soil w_k) are presented in Tab. 3.

From it, in particular, clearly shows that an increase of its plasticity number I_p at the same soil skeleton density values ρ_d , stabilized moisture of compacted clay soil w_k increases.

Earlier [5] it was established, that: highway embankment height with layer by layer compacted clay soil did not significantly affect on its moisture conditions; the «rest» time of subgrade after 2 months did not significantly affect on the stabilized clay soil moisture value. Therefore, it is advisable to perform two-factor statistical analysis of compacted clay soil stabilized moisture depending on its soil skeleton density and plasticity index.

Table 3 – Stabilized moisture values of compacted heavy and light silty loams within tube height for each preset soil skeleton density of subgrade

Preset soil skeleton density, $\rho_d, \text{g/cm}^3$	Soil plasticity number, I_p	
	0,162	0,080
1,50	<u>0,203</u> -0,95%	<u>0,162</u> 2,36%
1,55	<u>0,190</u> -0,51%	<u>0,143</u> -0,86%
1,60	<u>0,176</u> -0,58%	<u>0,130</u> -0,21%
1,65	<u>0,167</u> 2,35%	<u>0,114</u> -2,04%

Note: numerator – the experimental values of stabilized clay soil moisture w_k ; the denominator – the relative error of this parameter, calculated by the expression (2)

As a result of this statistical processing by least squares method of research data Tab. 3 the empirical dependence of compacted clay soil stabilized moisture w_k from soil skeleton density and its plasticity number is obtained

$$w_k = a_0 + a_1 \left(\frac{\rho_d}{\rho_{d0}} \right) + a_2 \cdot I_p \quad (2)$$

empirical coefficient is: $a_0 = 0,531$; $a_1 = -0,279$; $a_2 = 0,570$.

At this multiple correlation coefficient is $r = 0,995$, and Fisher's ratio test $F = 106,326$, what more than its table-valued $F_{\text{табл.}} = 4,89$ at test significance $p = 5\%$ and the degree of freedom $\nu_1 = 7$ and $\nu_2 = 5$.

Statistical values indicates about close relationship between the research data and therefore, about the logarithmic function (2) correctness. Stabilized moisture relative error value, calculated by the expression (2), compared with its experimental values is also presented in Tab. 3. They do not exceed 2,36%.

So, by the statistical processing analysis of laboratory experiment results, the empirical dependence of compacted loams stabilized moisture for their multilayer consolidation depending on soil skeleton density specified rate and plasticity number is obtained. This parameter corresponds to maximum molecular moisture capacity at what it is advisable to do the subgrade clay soils multilayer consolidation for their long-term strength ensuring.

Also two-factor statistical analysis of compacted clay soil embankment stabilized moisture dependence from subgrade soil skeleton density and its plasticity number by the results of five areas field research is done. As a result of this two-factor statistical analysis the empirical dependence, similar to the expression (2), (received by the results of laboratory tests), of compacted clay soil stabilized moisture from soil skeleton density and plasticity number, empirical coefficients of what in this case is : $a_0 = 0,490$; $a_1 = -0,238$; $a_2 = 0,440$ is obtained.

At this multiple correlation coefficient is $r = 0,993$, and Fisher's ratio test $F = 76,73$, what more than its table-valued $F_{\text{табл.}} = 19,25$ at test significance $p = 5\%$ and the degree of freedom $\nu_1 = 4$ and $\nu_2 = 2$ (at the experiments number $n = 5$). Statistical values indicates about close relationship between the research data and therefore, about the logarithmic function (2) correctness.

Conclusions. Consequently, multilayer consolidation of clay soil embankment it is desirable to do by the moisture, that corresponds to maximum molecular moisture capacity, accepted by the expression (2) depending on soil skeleton density specified rate and plasticity number of this soil. The value of this moisture is lower than plastic limit, but present-day compacted machines makes it possible to sufficiently increase the specific compaction energy for the soil compaction at moisture less than plastic limit with a maximum soil skeleton density.

By the full-scale experiment it is approved the general form of obtained by laboratory experiments silty loams stabilized moisture for their multilayer consolidation from subgrade soil skeleton density and its plasticity number dependence.

For new optimal compaction criteria substantiation, which provide their long-term strength new methodology of physical water migration modeling by the highway embankment height through time changes research of clay loam moisture, placed in plastic tubes and compacted at water saturation factor $S_r = 0,85$ to soil skeleton density $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ g/cm}^3$ is developed and realized. Soil's research results by author's development were compared with values, obtained by officially accepted method.

References

1. Винников Ю. Л. Лабораторные исследования влажностного режима уплотненного суглинка дорожной насыпи / Ю. Л. Винников, Т. В. Литвиненко // *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. – Х. : УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 155. – С. 158 – 164.
Vinnikov Yu. L. Laboratornye issledovaniya vlazhnostnogo rezhima uplotnennogo suglinka dorozhnoy nasypi / Yu. L. Vinnikov, T. V. Litvinenko // *Zbirnik naukovih prats UkrDAZT*. – H. : UkrDAZT, 2015. – Vip. 155. – S. 158 – 164.
2. Vynnykov Y. L. Investigation of Compacted Clay Embankment Stabilized Moisture / Y. L. Vynnykov, V. I. Kovalenko, T. V. Lytvynenko // *Collection of scientific articles «Energy, Energy Saving and Rational Nature Use»*, 2014. – №2 (3). – Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – Radom, 2014. – P. 53 – 57.
3. Lourenco S. Water repellent soils for slope stability / S. Lourenco, G.-H. Wang, T. Kamai // *Proc. of the 16th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Edinburgh, 2015. – P. 1609 – 1613.
4. Винников Ю.Л. Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // *Проблеми розвитку міського середовища: наук.-техн. зб.* – К.: НАУ, 2016. – Вип. 1 (15). – С. 92 – 102.
Vinnikov Yu.L. Faktori vplivu na migratsiyu vodi v tovshchi ushchilnenih glinistih gruntiv dorozhnih nasipiv / Yu.L. Vinnikov, T.V. Litvinenko // *Problemi rozvitku miskogo seredovishcha: nauk.-tehn. zb.* – K.: NAU, 2016. – Vip. 1 (15). – S. 92 – 102.
5. Lytvynenko T.V. Qualitative relationships of water migration in highway embankment clay soils / T.V. Lytvynenko // *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering – Poltava: PNTU*. – Issue 1 (46). – С. 255 – 262.
6. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. – К. : Мінрегіонбуд України, 2016. – 91 с.
DBN V.2.3-4:2015. Sporudi transportu. Avtomobilni dorogi. – K. : Minregionbud Ukrayini, 2016. – 91 s.
7. ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 19 с.
DSTU B V.2.1-12:2009. Grunti. Metod laboratornogo viznachennya maksimalnoyi shchilnosti. – K. : Minregionbud Ukrayini, 2011. – 19 s.
8. Литвиненко А.С. Ще до питання нормування ступеня ущільнення та контролю якості ущільнення ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг / А. С. Литвиненко // *Дороги і мости: зб. наук. праць ДерждорНДІ*. – 2012. – Вип. 12. – С. 90 – 101.
Litvinenko A.C. Shche do pitannya normuvannya stupenya ushchilnennya ta kontrolyu yakosti ushchilnennya gruntiv zemlyanogo polotna avtomobilnih dorig / A. S. Litvinenko // *Dorogi i mosti: zb. nauk. prats DerzhdorNDI*. – 2012. – Vip. 12. – S. 90 – 101.
9. Hassan A. Water content characteristics of mechanically compacted clay soil determined using the electrical resistivity method / A. Hassan, D. Toll // *Proc. of the 16th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Edinburgh, 2015. – P. 3395 – 3400.
10. Olinic E. Improvement of difficult soils by mixing with mineral materials and inorganic waste. Experimental projects and case studies from Romania / E. Olinic, T. Ivasuc, S. Manea // *Proc. of the 16th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Edinburgh, 2015. – P. 2437 – 2442.
11. Dobrescu C. Experimental applications regarding the stabilization of soils with low mechanical strength by using local materials / C. Dobrescu, E. Calarasu, I. Macarescu // *Proc. of the 16th Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Edinburgh, 2015. – P. 3159 – 3164.

© Vynnykov Yu., Lytvynenko T.
Received 18.03.2016

Павлюк Д.О., д.т.н., професор

Шур'яков М.В., аспірант

Гладун С.А., аспірант

Національний транспортний університет, м. Київ

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Аналіз сучасної нормативно-технічної бази свідчить, що в Україні нині чинними є три методи визначення максимальної щільності ґрунту земляного полотна, а саме: метод стандартної щільності, метод Проктора, модифікований метод Проктора. Установлено, що відношення показника максимальної щільності, отриманого цими методами, для глин становить 1:1,02:1,06. Оскільки показники максимальної щільності ґрунту за модифікованим методом Проктора перевищують аналогічні показники за стандартним методом щільності на 6%, то можна зробити висновок про те, що застосування модифікованого методу Проктора та вимог ДБН В.2.3-4 дозволить досягти суттєвого підвищення якості ущільнення ґрунтів при будівництві земляного полотна.

Ключові слова: щільність, максимальна щільність, метод стандартної щільності, метод Проктора, модифікований метод Проктора.

Павлюк Д.А., д.т.н., професор

Шур'яков М.В., аспірант

Гладун С.А., аспірант

Національний транспортний університет, г. Киев

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ҐРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Анализ современной нормативно-технической базы свидетельствует, что в Украине сейчас действительны три метода определения максимальной плотности ґрунта земляного полотна, а именно: метод стандартной плотности, метод Проктора, модифицированный метод Проктора. Установлено, что отношение показателя максимальной плотности, полученного этими методами, для глин составляет 1:1,02:1,06. Поскольку показатели максимальной плотности ґрунта по модифицированному методу Проктора превосходят аналогичные показатели по стандартному методу плотности на 6%, то можно сделать вывод о том, что применение модифицированного метода Проктора и требований ДБН В.2.3-4 позволит достичь существенного повышения качества уплотнения ґрунтов при строительстве земляного полотна.

Ключевые слова: плотность, максимальная плотность, метод стандартного уплотнения, метод Проктора, модифицированный метод Проктора.

*Pavlyuk D., DSc, Professor
Shuryakov M., post-graduate
Gladun S., post-graduate
National Transport University, Kyiv*

COMPARISON OF METHODS AND MEANS FOR SOIL COMPRESSION CONTROL AT SUBGRADE BUILDING

Loads on highways lately increased and considerably exceed design loads. It needs the revision of valid norms and methods of subgrade soil compression control. Subgrade soil compression control according to Ukrainian valid norm documents is realized by compression factor value. This factor represents the ratio of factual skeleton solidity to its maximum solidity under standard compression.

In Ukraine at present time there are in valid three methods of maximum density determination: method of standard compression, Proctor method and modified Proctor method. The last two methods are standardized in Change №1 to DSTU B B.2.1-12.2009.

When copying this change from the German standard DIN 18127:1997 there was committing an error, which must be corrected.

There is realized the comparison of technical parameters, methods and means for maximum soil density determination.

Standard compression device differs not only punch diameter, but that besides cylinder with diameter 100 mm there are using two more cylinders with diameter 150 and 250 mm. For better test soil compression for cylinders there are using punches with diameters twice smaller. During blow soil fractions are moving in vertical and horizontal directions. It led to more compact their siting. The presence of clearance promotes air moving off pores. The difference is also in the using of shock-worker with the spring, that excludes the operator influence at soil sample at blow moment.

There was realized density determination by Proctor method. Shock-worker with spring was made, and there was realized the comparison of its work and standard compression device work. There was established, that in Proctor shock-worker efficiency of weight fall up is not observed, bar does not vibrate and run up. Cylinder from home device was used as test cylinder. For measuring there was choosed the sample of clay with mass about three kilograms. There are adduced results of tests, which were carried out.

There are obtained the results of maximum density with the help of different methods. There are adduced tables and diagrams of dependences, using results of tests, which were carried out. Ratio of maximum density, which is obtained with the help of standard compression method, Proctor method and modified Proctor method for clays looks like 1:1,02:1,06. That may supplement with data of comparative tests, which were fulfilled earlier.

Since maximum density by Proctor method top by 6% the density by standard method then using of modified Proctor method and DBN B.2.3-4 demands it is possible to achieve essential increasing of subgrade soil compression in Ukraine.

For road laboratory supply it is necessary to elaborate the equipment for modified Proctor method realization. It is necessary to use standard compression SojuzdorNII device parts, which is in every road laboratory.

Keywords: *density, maximum density, standard compression method, Proctor method, modified Proctor method.*

Вступ. Рівність покриття та міцність дорожнього одягу значною мірою залежать від ступеня ущільнення ґрунту земляного полотна й шарів основи дорожнього одягу при будівництві автомобільної дороги. Недостатнє ущільнення цих елементів дорожньої конструкції може призводити до утворення колій, просідань, зміщень та тріщин на поверхні дорожнього покриття.

Останнім часом на автомобільних дорогах України з'явилося багато транспортних засобів, від яких фактичні параметри навантажень на дорожню конструкцію значно перевищують розрахункові навантаження, що прийняті в діючих нормативних документах.

Зміна навантажень на дорожню конструкцію потребує перегляду норм і методів контролю ущільнення ґрунту земляного полотна й шарів основи дорожнього одягу.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Контроль ущільнення ґрунтів земляного полотна за діючими в СРСР [1 – 4] і нині в Україні нормативними документами [5, 6] здійснюється за величиною коефіцієнта ущільнення ґрунту

$$K_{уц} = \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{max}}, \quad (1)$$

де γ_{ϕ} – фактична щільність скелета ґрунту, г/см³;

γ_{max} – максимальна щільність скелета ґрунту при стандартному ущільненні, г/см³.

Порівнювати фактичну щільність ґрунту з максимальною вперше запропонував Р. Проктор у 1933 році [7 – 9], який вважав, що при ущільненні ґрунту до максимальної щільності він не буде просідати під час експлуатації споруд. Критерій достатності ущільнення полягає в тому, що величина $K_{уц} \approx 1$. Ним були розроблені метод оцінювання та прилад для його реалізації, відомий у всьому світі як метод і прилад Проктора.

У другій половині 40-х років минулого століття у зв'язку з підвищенням вантажопідйомності транспортних засобів у США було модифіковано метод і прилад Проктора, за допомогою якого створювали більш жорсткі умови ущільнення ґрунту. Відповідно значення максимальної щільності стали більшими.

Використання метода Проктора і модифікованого метода Проктора, наприклад у Німеччині, було передбачено нормативним документом [14], який був перевиданий у 2012 році [15].

Визначення максимальної щільності скелета ґрунту в колишньому СРСР та нині в Україні здійснювалося за нормативами [10, 11] за допомогою приладу стандартного ущільнення (метод СоюздорНДІ), розробленого в СРСР наприкінці тридцятих років минулого століття шляхом видозміни конструкції приладу Проктора. На думку Б.С. Радовського: «Н.Н. Иванов и М.Я. Телегин, разработавшие на основе метода Проктора стандарт для СССР (переизданный в ГОСТ 22733-77), внесли, к сожалению, изменение – диаметр трамбовки приняли равным внутреннему диаметру стакана. Это повлекло за собой изменение схемы нагружения – образец находится в условиях однородного напряженного состояния без возможности сдвиговой деформации с боковым выпором грунта» [12].

У 2011 році Мінрегіонбуд України прийняв Зміну №1 до ДСТУ Б В.2.1-12 [16], у якій вказано: «Для адаптації національних стандартів на методи випробування ґрунтів у будівництві до європейських стандартів у додатку Ж цього стандарту як довідковий матеріал викладено тотожний переклад німецького стандарту DIN 18127:1997 [14], який встановлює метод Проктора, що використовується для визначення щільності сухого ґрунту після ущільнення при визначених умовах випробування як функції вологості». У вказаній зміні йдеться також про модифікований метод Проктора.

У вказаній Зміні №1 наведені дві однакові таблиці під різними назвами:

Таблиця Г.4.1 – Визначення щільності за Проктором ρ_{P_2}

Розміри випробувального циліндра (рисунок Г.4.1)				Розміри та падаючий вантаж ущільнювача (рисунок Г.4.2)				Умови випробування	
d_1 , мм	h_1 , мм	a , мм	s_1 , мм	форма	d_2 , мм	h_2^* , мм	Падаючий вантаж m_1^* , кг	Кількість ударів на шар	Кількість шарів
100	120	$\geq 7,5$	11	A	50	450	4,5	25	5
150	125	$\geq 9,0$	14	B	75	450	4,5	59	5
250	200	$\geq 14,0$	20	C	125	600	15,0	98	3
*) Граничний відхил: $\pm 0,004 \cdot h_2$ або $\pm 0,004 \cdot m$									

Таблиця Г.4.2 – Визначення модифікованої щільності за Проктором $mod \rho_{Pr}$

Розміри випробувального циліндра (рисунок Г.4.1)				Розміри та падаючий вантаж ущільнювача (рисунок Г.4.2)				Умови випробування	
d_1 , мм	h_1 , мм	a , мм	s_1 , мм	форма	d_2 , мм	h_2^* , мм	Падаючий вантаж m_1^* , кг	Кількість ударів на шар	Кількість шарів
100	120	$\geq 7,5$	11	A	50	450	4,5	25	5
150	125	$\geq 9,0$	14	B	75	450	4,5	59	5
250	200	$\geq 14,0$	20	C	125	600	15,0	98	3
*) Граничний відхил: $\pm 0,004 \cdot h_2$ або $\pm 0,004 \cdot m$									

Першу таблицю слід замінити на таку (табл. 1).

Таблиця 1 – Визначення щільності за Проктором ρ_{P_2}

Розміри випробувального циліндра (рисунок Г.4.1)				Розміри та падаючий вантаж ущільнювача (рисунок Г.4.2)				Умови випробування	
d_1 , мм	h_1 , мм	a , мм	s_1 , мм	форма	d_2 , мм	h_2^* , мм	Падаючий вантаж m_1^* , кг	Кількість ударів на шар	Кількість шарів
100	120	$\geq 7,5$	11	A	50	300	4,5	25	3
150	125	$\geq 9,0$	14	B	75	450	4,5	22	3
250	200	$\geq 14,0$	20	C	125	600	15,0	22	3
*) Граничний відхил: $\pm 0,004 \cdot h_2$ або $\pm 0,004 \cdot m$									

Таким чином, в Україні на сьогодні чинними є три методи визначення максимальної щільності ґрунту: метод стандартної щільності, метод Проктора, модифікований метод Проктора.

У роботі [13] наводяться результати порівняння максимальної щільності ґрунту, отримані за допомогою приладу стандартного ущільнення, приладу Проктора і модифікованого приладу Проктора. Виявляється, що значення максимальної щільності за першими двома приладами збігаються, а модифікований прилад Проктора дає результати, що на 4 – 5% завищені.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Згадана відмінність приладу стандартного ущільнення від приладу Проктора не є єдиною, тому доцільно проаналізувати конструкції приладів більш детально.

Відомі результати порівняння значень максимальної щільності застарілі, оскільки вони відносяться до 70-х років минулого століття. Доцільно виконати це порівняння з урахуванням останніх як вітчизняних, так і зарубіжних стандартів.

Мета дослідження – порівняння конструкцій приладів для визначення макимальної щільності ґрунту й отриманих з їх використанням результатів, а також розроблення рекомендацій щодо вдосконалення контролю ущільнення ґрунтів при зведенні земляного полотна.

Основний матеріал і результати дослідження. Порівняння технічних параметрів засобів та способів для визначення максимальної щільності скелета ґрунту наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння технічних параметрів засобів і способів для визначення максимальної щільності скелета ґрунту

Характеристика	Метод стандартного ущільнення [16]	Метод Проктора [14]			Модифікований метод Проктора [15]		
Висота циліндра, мм	127,4	120	125	200	120	125	200
Діаметр циліндра, см	10	10	15	25	10	15	25
Маса гирі, кг	2,5	2,5	4,5	15	4,5	4,5	15
Висота падіння гирі, см	30	30	45	60	30	45	60
Товщина шару ґрунту, який вкладається за один раз, см	5-6	-	-	-	-	-	-
Кількість шарів ґрунту, шт.	3	3	3	3	5	5	3
Кількість ударів при ущільненні шару ґрунту, шт.	40	25	22	22	25	59	98
Сумарна кількість ударів, шт.	120	75	66	66	125	295	294
Діаметр штампа, мм	100	50	75	125	50	75	125
Робота на ущільнення, МНм/м ³	–	0,6	0,6	0,6	2,7	2,7	2,7

Прилад для стандартного ущільнення ґрунту (рис. 1) відрізняється від приладу Проктора (рис. 2) не тільки діаметром штампа, а й тим, що, крім циліндра діаметром 100 мм, у приладі Проктора використовують ще два циліндри діаметром 150 та 250 мм. Для кожного циліндра використовується штамп, діаметр якого удвічі менший. Як згадувалося вище, це дає змогу краще ущільнити пробу ґрунту, тому що під час удару частинки ґрунту переміщуються не лише у вертикальному напрямку, а також і в горизонтальному, що призводить до більш щільного їх взаєморозташування. Крім того, наявність зазору дає змогу краще видалити повітря з пор ґрунту.

При використанні такого штампа удари повинні виконуватись за схемою, наведеною на рис. 3. Ущільнення має здійснюватися за 3 – 4 оберти штампа всередині циліндра, при цьому штамп має рівномірно зміщуватись на поверхні шару ґрунту. Ущільнюючі удари штампом повинні здійснюватися для кожного шару без перерви.

Другою головною відмінністю є використання ударника з пружиною (рис. 2, б; 4). Це виключає вплив оператора на пробу ґрунту в момент удару. Під час удару виникає реактивний момент, котрий компенсує силу, з якою оператор тисне на ударник.

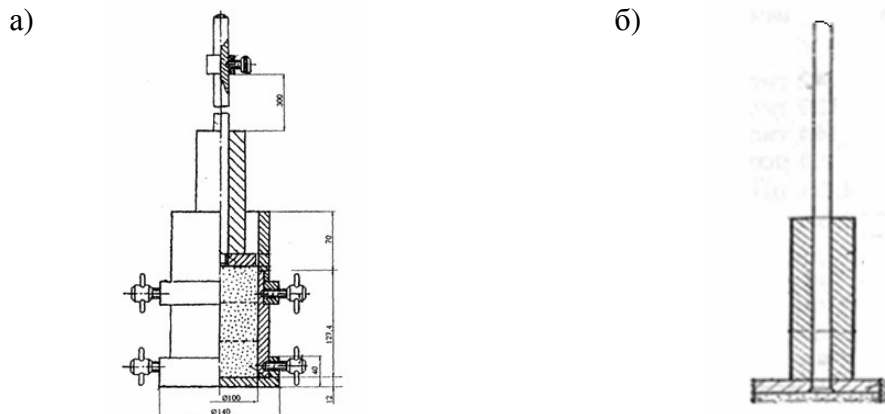


Рисунок 1 – Прилад стандартного ущільнення ґрунту: а) циліндр; б) ударник

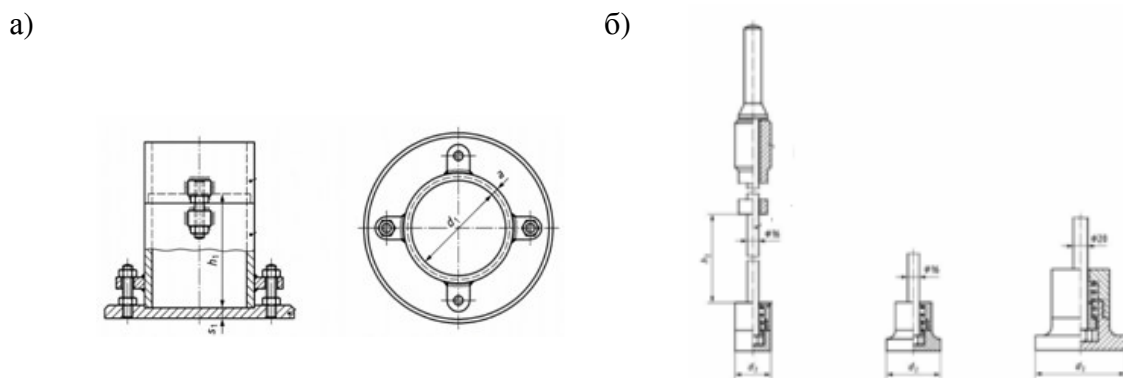


Рисунок 2 – Прилад Проктора: а) циліндр; б) ударник

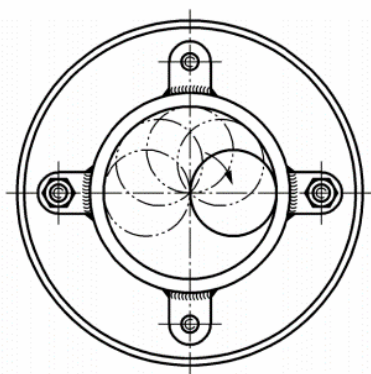


Рисунок 3 – Схема послідовності виконання ударів у дослідному циліндрі

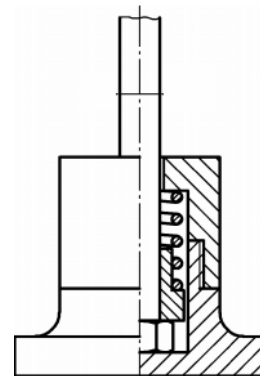


Рисунок 4 – Ударник із пружиною за нормами [14]

За отриманими даними будують графік (рис. 5), на якому суцільна лінія з маркерами означає криву Проктора; суцільна крива без маркера – криву насиченості для 100-відсоткового насичення усього об'єму пор ($S_r = 1$ при $p_s = 2,71 \text{ г/см}^3$); штрихова лінія – залежність щільності сухої речовини від умісту води при заданій частці повітряних пор (p_d при $n_a = 0,12$).

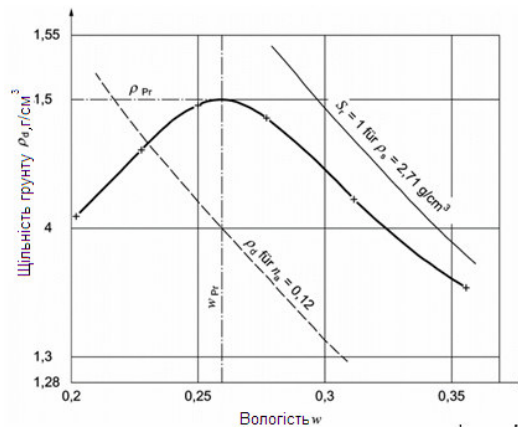


Рисунок 5 – Графік Проктора для дрібнозернистого ґрунту без частки зерен надлишкової форми, які відбираються з проби

Горизонтальна відстань від кривої насиченості ($S_r = 1$ при $\rho_s = 2,71 \text{ г/см}^3$) до кривої Проктора на рис. 5 – це міра вмісту повітря у кожній з проб.

Інша крива (ρ_d при $n_a = 0,12$) показує залежність щільності сухої речовини від умісту води при заданій частці повітряних пор $n_a = 0,12$. Це значення часто застосовується як критерій якості ущільнення при земляних роботах [14]. Із цього графіка можна побачити, що щільність за методом Проктора становить $\rho_{Pr} = 1,50 \text{ г/см}^3$ при вологості $w_{Pr} = 0,260$.

Згідно з описаною вище методикою було проведено визначення щільності за методом Проктора та методом стандартного ущільнення (рис. 6).



Рисунок 6 – Порівняння роботи ударників при визначенні щільності ґрунту

У результаті порівняння встановлено, що в ударникові приладу Проктора не відчувається віддача при падінні гири, штанга не вібрує і не підскакує вгору.

Як дослідний використовували циліндр від приладу стандартного ущільнення. Для вимірювань було відібрано пробу глини, масою близько 3 кг. Пробу попередньо просушили та довели до вологості 8%. Процес проведення вимірювання наведено на рис. 7.

Після кожного вимірювання ущільнений зразок зважували та заносили дані до відповідної таблиці. Потім готувалась нова проба з вологістю, більшою на 2%. Випробування повторювалися. Результати досліджень наведені у таблицях 3 – 5.



Рисунок 7 – Процес визначення щільності за методом Проктора

Таблиця 3 – Визначення вологості

Показники	Вологість у зразках			
	1	2	3	4
Маса вологої проби з контейнером, г	55	56	66	74
Маса сухої проби з контейнером, г	52	52,2	60,5	66
Маса контейнера, г	14	14	14	14
Маса води в порах, г	3	3,8	5,5	8
Маса сухої проби, г	38	38,2	46,5	52
Вологість, г/см ³	0,08	0,10	0,12	0,15

Таблиця 4 – Визначення щільності ґрунту

Показники	Вологість у зразках			
	1	2	3	4
Маса вологого зразка із циліндром, г	4693	4843	4949	4942
Маса циліндра, г	2862	2862	2862	2862
Маса вологого зразка, г	1831	1981	2087	2080
Об'єм циліндра, см ³	1000	1000	1000	1000
Щільність вологого ґрунту, г/см ³	1,831	1,981	2,087	2,080

Таблиця 5 – Визначення щільності сухого ґрунту

Показники	Вологість у зразках			
	1	2	3	4
Маса вологого зразка із циліндром, г	1,697	1,802	1,866	1,803

За даними табл. 5 було побудовано графік, зображений на рис. 8.

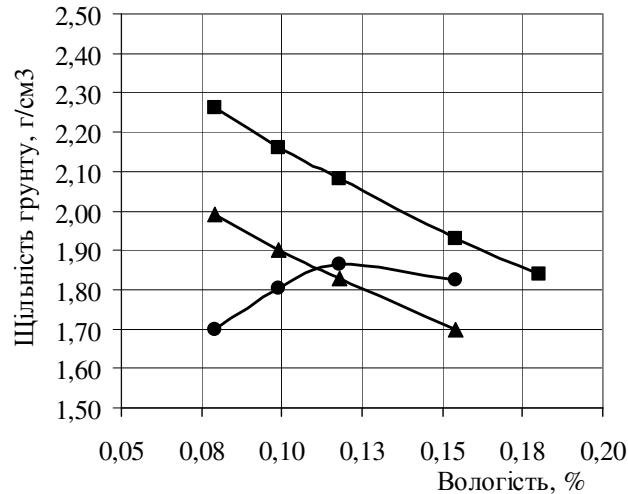


Рисунок 8 – Визначення щільності ґрунту за методом Проктора

(крива з круглими маркерами – щільність ґрунту;
крива з квадратними маркерами – $S_r = 1$ при $p_s = 2,71$ г/см³;
крива з трикутними маркерами – p_d при $n_a = 0,12$)

На цьому графіку також наведено криву насиченості ($S_r = 1$ при $p_s = 2,75$ г/см³) для 100-відсоткового насичення всього об'єму пор та криву p_d при $n_a = 0,12$, яка показує залежність щільності сухої речовини від умісту води при заданій частці повітряних пор $n_a = 0,12$. У цьому випадку щільність за Проктором $p_{Pr} = 1,866$ г/см³ при вологості $w_{Pr} = 0,120$ г/см³.

Для порівняння результатів вимірювань за нормами [11, 14] було побудовано графік, зображений на рис. 9.

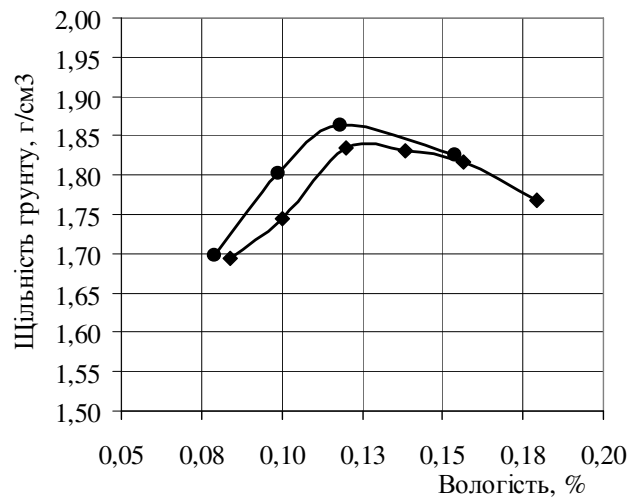


Рисунок 9 – Графік порівняння щільності ґрунту, отриманої різними методами

(крива з круглими маркерами – метод Проктора;
крива з ромбічними маркерами – метод стандартного ущільнення)

Як видно із графіка, щільність за методом Проктора склала $p_{Pr} = 1,866$ г/см³ при вологості $w_{Pr} = 0,120$ г/см³, а щільність, отримана за методом стандартного ущільнення, – $1,834$ г/см³ при тій самій вологості. Різниця складає $0,032$ г/см³, або близько 2%.

Оскільки максимальна щільність ґрунту менша за методикою стандартного ущільнення, то отримаємо більше значення коефіцієнта ущільнення, ніж за методом Проктора (табл. 6). Це означає, що, використовуючи на практиці метод Проктора, можна досягти кращого ущільнення ґрунтів.

Таблиця 6 – Порівняння значень коефіцієнта ущільнення

Фактична щільність, г/см ³	Максимальна щільність, г/см ³	Коефіцієнт ущільнення
1,8	1,834	0,98
1,8	1,866	0,96

На наступному етапі були проведені порівняння максимальної щільності за методом СоюздорНДІ згідно з нормами [11] та за модифікованим методом Проктора згідно з нормами [15] (табл. 7).

Таблиця 7 – Параметри випробувань модифікованим методом Проктора [15]

Розміри циліндра (рис. 1)				Розміри падаючої гири пристрою для ущільнення (рис. 2)				Умови випробування	
d_1 , мм	h_1 , мм	a , мм	s_1 , мм	форма	d_2 , мм	h_2^* , мм	Падаючий вантаж m_1^* , кг	Кількість ударів на шар	Кількість шарів
100	120	$\geq 7,5$	11	А	50	300	4,5	25	5
150	125	$\geq 9,0$	14	В	75	450	4,5	59	5
250	200	$\geq 14,0$	20	С	125	600	15,0	98	3

* Граничне відхилення: $\pm 0,004 \cdot h_2$ або $\pm 0,004 \cdot m$

Як слідує з табл. 7, модифікований метод Проктора характеризується посиленням навантаженням ґрунту та збільшенням кількості шарів і ударів.

Процес проведення випробувань наведено на рис. 10.



Рисунок 10 – Процес визначення щільності модифікованим методом Проктора

Результати вимірювань наведено у таблицях 8 – 10.

Таблиця 8 – Визначення вологості

Показники	Вологість у зразках				
	1	2	3	4	5
Маса вологої проби із контейнером, г	69	64	79	79	67
Маса сухої проби з контейнером, г	66	60	72	71	59
Маса контейнера, г	14	14	14	14	14
Маса води в порах, г	3	4	7	8	8
Маса сухої проби, г	52	46	58	57	45
Вологість, г/см ³	0,06	0,09	0,12	0,14	0,18

Таблиця 9 – Визначення щільності ґрунту

Показники	Вологість у зразках				
	1	2	3	4	5
Маса вологого зразка із циліндром, г	4641	4886	5040	4955	4951
Маса циліндра, г	2862	2862	2862	2862	2862
Маса вологого зразка, г	1779	2024	2178	2093	2089
Об'єм циліндра, см ³	1000	1000	1000	1000	1000
Щільність вологого ґрунту, г/см ³	1,779	2,024	2,178	2,093	2,089

Таблиця 10 – Визначення щільності сухого ґрунту

Показники	Вологість у зразках				
	1	2	3	4	5
Маса вологого зразка із циліндром, г	1,682	1,862	1,943	1,835	1,774

За даними таблиці було побудовано графік (рис. 11).

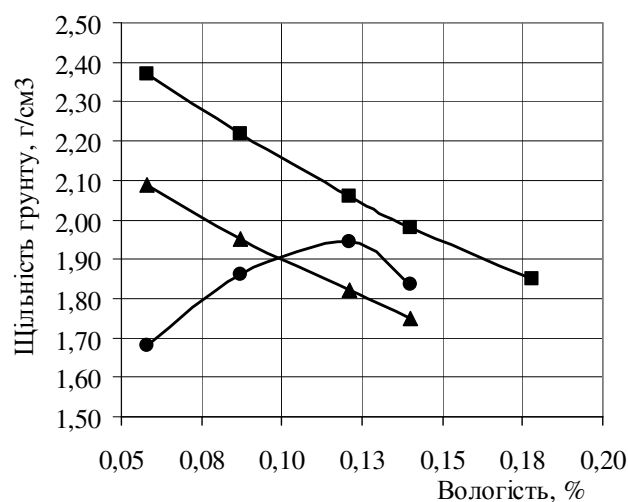


Рисунок 11 – Визначення щільності ґрунту за модифікованим методом Проктора

(крива з круглими маркерами – щільність ґрунту;
крива з квадратними маркерами – $S_r = 1$ при $p_s = 2,71$ г/см³;
крива з трикутними маркерами – p_d при $n_a = 0,12$)

Також на графіку наведено криву насиченості $S_r = 1$ при $p_s = 2,75 \text{ г/см}^3$ для 100-відсоткового насичення всього об'єму пор та криву p_d при $n_a = 0,12$, що показує залежність щільності сухої речовини від умісту води при заданій частці повітряних пор $n_a = 0,12$. Максимальна щільність за модифікованим методом Проктора склала $p_{Pr} = 1,943 \text{ г/см}^3$ при вологості $w_{Pr} = 0,120 \text{ г/см}^3$.

Для порівняння результатів вимірювань було побудовано графік, на якому зображено дані визначення щільності обома способами (рис. 12).

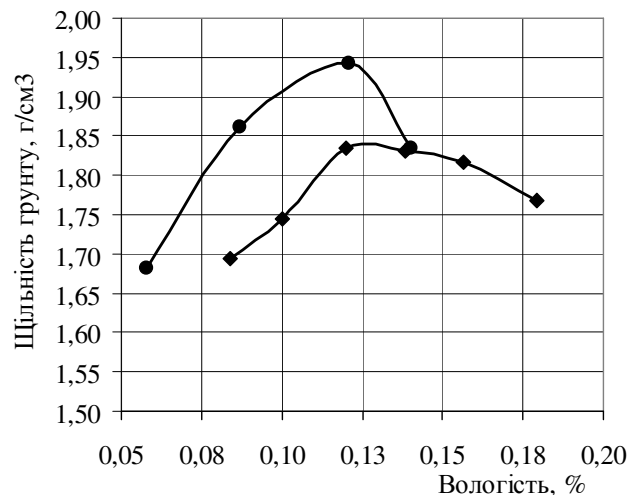


Рисунок 12 – Порівняння результатів, отриманих різними методами
(крива з круглими маркерами – модифікований метод Проктора;
крива з ромбічними маркерами – метод стандартного ущільнення)

Максимальна щільність, отримана за методом норм [11], склала $p_{Pr} = 1,834 \text{ г/см}^3$. Різниця суттєва і становить $0,109 \text{ г/см}^3$.

Оскільки максимальна щільність менша, за вітчизняною методикою отримаємо більше значення коефіцієнта ущільнення, ніж використовуючи модифікований метод Проктора (табл. 11).

Таблиця 11 – Порівняння значень коефіцієнтів ущільнення

Фактична щільність, г/см^3	Максимальна щільність, г/см^3	Коефіцієнт ущільнення
1,8	1,834	0,98
1,8	1,943	0,93

Різниця в значеннях коефіцієнта ущільнення з табл. 11 становить 0,05, тобто, використовуючи модифікований метод Проктора, можна досягти кращого ущільнення ґрунту земляного полотна.

Значення коефіцієнтів ущільнення за трьома методами наведено в таблиці 12.

Таблиця 12 – Порівняння коефіцієнтів ущільнення

Метод випробування	Максимальна щільність, г/см^3	$K_{уц}$ при фактичній щільності $1,80 \text{ г/см}^3$
Метод стандартного ущільнення	1,83	0,98
Метод Проктора	1,86	0,97
Модифікований метод Проктора	1,94	0,92

Висновки:

1. В Україні діють три методи визначення максимальної щільності ґрунту: метод стандартної щільності, метод Проктора та модифікований метод Проктора. Останні два методи стандартизовані в Зміні № 1 [16] до нормативного документа [11]. При копіюванні тексту цієї Зміни з німецького стандарту [14] була допущена неточність, яку слід виправити.

2. Прилад стандартного ущільнення відрізняється від приладу Проктора тим, що в приладі Проктора, крім циліндра діаметром 100 мм, використовують ще й циліндри діаметром 150 та 250 мм. Крім цього, в приладі Проктора використовують ударник з пружиною, що виключає вплив оператора на пробу ґрунту в момент удару.

3. Відношення максимальної щільності, отриманої за допомогою методу стандартного ущільнення, методу Проктора і модифікованого методу Проктора, для глин становить 1:1,02:1,06, що доповнює дані порівняльних випробувань з роботи [13].

4. Оскільки максимальна щільність за модифікованим методом Проктора перевершує щільність, отриману за стандартним методом, на 6%, то досягти суттєвого підвищення якості ущільнення ґрунтів земляного полотна можна завдяки використанню саме модифікованого методу Проктора та вимог норм [5].

5. Доцільно виконати переоснащення приладів стандартного ущільнення, що наявні в дорожніх лабораторіях, відповідно до вимог модифікованого методу Проктора.

Література

1. ННТУ 128-55. Нормы и технические условия проектирования автомобильных дорог. – М., 1955. – 109 с.
2. СНиП II-Д.5-62. Автомобильные дороги. – М. : Стройиздат, 1964. – 36 с.
3. СНиП II-Д.5-72. Автомобильные дороги. – М. : Стройиздат, 1973. – 110 с.
4. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. – М. : Стройиздат, 1986. – 56 с.
5. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. – К. : Мінрегіон України, 2016. – 91 с.
6. ВБН В.2.3-218-171-2002. Спорудження земляного полотна автомобільних доріг. – К. : Укравтодор, 2002. – 109 с.
7. Proctor R. The Design and Construction of Rolled Earth Dams / R. Proctor // Engineering News Record. – New York: Engineering News Publishing Co., 1933.
8. Proctor R. Description of Field and Laboratory Methods / R. Proctor // Engineering News Record. – New York: Engineering News Publishing Co., 1933.
9. Merkblatt für bodenpyzhikalische Prüffervaren. – Berlin: DIN, 1955. – 32 p.
10. ГОСТ 22733-2002. Ґрунти. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М. : Госстрой России, 2003. – 12 с.
11. ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 10 с.
12. Радовский Б. С. Методы и приборы контроля качества строительства дорожных покрытий в США / Б. С. Радовский // Дорожная техника. – 2005. – С. 162 – 174.
13. Хархута Н. Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н. Я. Хархута, Ю. М. Васильев. – М. : Транспорт, 1975. – 228 с.
14. DIN 18127:1997. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch. – Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 1997. – 33 p.
15. DIN 18127:2012. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch. – Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2012. – 32 p.
16. ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. Зміна №1. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 21 с.

References

1. NiTU 128-55. Normy i tehnicheskie usloviya proektirovaniya avtomobilnyh dorog. – M., 1955. – 109 s.
2. SNiP II-D.5-62. Avtomobilnye dorogi. – M. : Stroyizdat, 1964. – 36 s.
3. SNiP II-D.5-72. Avtomobilnye dorogi. – M. : Stroyizdat, 1973. – 110 s.
4. SNiP 2.05.02-85. Avtomobilnye dorogi. – M. : Stroyizdat, 1986. – 56 s.
5. DBN V.2.3-4:2015. Avtomobilni dorogi. – K. : Minregion Ukrayini, 2016. – 91 s.
6. VBN V.2.3-218-171-2002. Sporudzhennya zemlyanogo polotna avtomobilnih dorog. – K. : Ukravtodor, 2002. – 109 s.
7. Proctor R. The Design and Construction of Rolled Earth Dams / R. Proctor // Engineering News Record. – New York: Engineering News Publishing Co., 1933.
8. Proctor R. Description of Field and Laboratory Methods / R. Proctor // Engineering News Record. – New York: Engineering News Publishing Co., 1933.
9. Merkblatt für bodenpyzikalische Prüffervaren. – Berlin: DIN, 1955. – 32 p.
10. GOST 22733-2002. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimalnoy plotnosti. – M. : Gosstroy Rossii, 2003. – 12 s.
11. DSTU B V.2.1-12.2009. Grunty. Metod laboratornogo viznachennya maksimalnoyi shchilnost. – K. : Minregionbud Ukrayini, 2010. – 10 s.
12. Radovskiy B. S. Metody i pribory kontrolya kachestva stroitelstva dorozhnyh pokrytiy v SShA / B. S. Radovskiy // Dorozhnaya tehnika. – 2005. – S. 162 – 174.
13. Harhuta N. Ya. Prochnost, ustoychivost i uplotnenie gruntov zemlyanogo polotna avtomobilnyh dorog / N. Ya. Harhuta, Yu. M. Vasilev. – M. : Transport, 1975. – 228 s.
14. DIN 18127:1997. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch. – Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 1997. – 33 p.
15. DIN 18127:2012. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Proctorversuch. – Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2012. – 32 p.
16. DSTU B V.2.1-12.2009. Grunty. Metod laboratornogo viznachennya maksimalnoyi shchilnosti. Zmina №1. – K. : Minregionbud Ukrayini, 2011. – 21 s.

© Павлюк Д.О., Шур'яков М.В., Гладун С.А.
Надійшла до редакції 15.05.2016

Павлюк Д.О., д.т.н., професор
Шуляк І.С., аспірант
Національний транспортний університет, м. Київ

СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ КОЛІЄСТІЙКОСТІ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглянуто спосіб оцінювання колієстійкості нежорстких дорожніх одягів, що полягає в аналізі розмірів і форми лунки, яка утворюється при повторному динамічному навантаженні поверхні дорожнього покриття сферичним штампом безпосередньо в польових умовах. За результатами експериментальних досліджень на дослідних ділянках виявлено залежності форми й глибини лунки від типу асфальтобетону і температури поверхні покриття. Встановлено, що колієстійкість дорожніх одягів визначається не тільки глибиною лунки після виконання серії ударів, а й здатністю дорожніх одягів відновлювати форму поверхні покриття після закінчення випробувань. Порівняно результати випробувань з фактичним станом ділянок за їх колійністю, що дає змогу зробити припущення про можливість застосування запропонованого способу для оцінювання колієстійкості дорожнього покриття та прогнозування можливості її виникнення в процесі подальшої експлуатації дороги, зокрема при пробному вкладанні асфальтобетону на стадії влаштування дорожнього одягу.

Ключові слова: нежорсткий дорожній одяг, транспортне навантаження, глибина лунки, серія ударів, лазерний профілограф.

Павлюк Д.А., д.т.н., профессор
Шуляк И.С., аспирант
Национальный транспортный университет, г. Киев

СПОСОБ ОЦЕНКИ КОЛЕЕСТОЙКОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрен способ оценки колеестойкости нежестких дорожных одежд, заключающийся в анализе размеров и формы лунки, которая образуется при повторном динамическом нагружении поверхности дорожного покрытия сферическим штампом непосредственно в полевых условиях. За результатами экспериментальных исследований на опытных участках выявлены зависимости формы и глубины лунки от типа асфальтобетона и температуры поверхности покрытия. Установлено, что колеестойкость дорожных одежд определяется не только глубиной лунки после выполнения серии ударов, но и способностью дорожных одежд восстанавливать форму поверхности покрытия после окончания испытаний. Сравнено результаты испытаний с фактическим состоянием участков по их колееиспользованию, что позволяет сделать предположение о возможности применения предложенного способа для оценки колеестойкости дорожного покрытия и прогнозирования возможности ее возникновения в процессе последующей эксплуатации дороги, в частности при пробном укладывании асфальтобетона на стадии устройства дорожной одежды.

Ключевые слова: нежесткая дорожная одежда, транспортная нагрузка, глубина лунки, серия ударов, лазерный профилограф.

ASSESSMENT METHOD OF RESISTANCE TO RUTTING OF ROAD CONSTRUCTION

Known methods for evaluating resistance to asphalt rutting using laboratory facilities do not reflect the real stress-strain state road construction, as well as characteristics of the load does not correspond to the real conditions of road. Also investigated only a layer of asphalt pavement, which put on a metal base in a form that limits lateral deformation of the sample. In the real world track can be formed by deformation of bases or soil subgrade.

In the article refers to the method of assessment of resistance to rutting flexible pavements, based on analysis of the size and shape of the hole formed during repeated dynamic load spherical surface coating stamped directly on the road in the field.

In contrast to the known analogues way to simulate the long-term effect of transport loads on pavements in a short period of time.

Repeated stress created by the dynamic settings with falling load, such as using a unit measuring the strength of «Universal road measuring equipment» «URME-NTU», equipped with spherical stamp.

Installation of automated control system equipped with measurement processes allows you to perform a series of strikes any number of different intervals. This allows you to more fully recreate real mode of deformation of road structures exposed to traffic.

The size and shape of the hole recorded laser scanner, which consists of a beam on two supports and measuring carriage with a set of required sensors. The main working part of the device is a laser sensor mounted inside the measuring carriage.

The device scans and automatic recording marks in the surface coatings file. Thus, unlike the known analogues, the frequency of recording marks much more surface coverage (through ≈ 1 cm).

Testing method on test plots can detect shape and depth depending on the type of hole and the surface temperature of asphalt covering. Revealed the possibility of establishing such form the rutting hole.

Found that resistance to rutting pavements determined not only by the depth of the hole after a series of blows, but their ability to recover form the coating surface after its completion.

Comparison of test results with the actual condition of areas on rut allows you to make assumptions about the applicability of the proposed method for assessing resistance to rutting coatings and forecasting capabilities of its occurrence in the future period of operation of the road. It is advisable to use the method as a component of research at trial investing asphalt.

Keywords: *flexible pavement, traffic load, depth of wells, a series of shocks, laser profilograph.*

Вступ. Останнім часом у результаті постійного зростання інтенсивності руху і збільшення в складі транспортного потоку кількості великовагових транспортних засобів проблема колійності на автомобільних дорогах України набула загрозливого характеру (рис. 1).

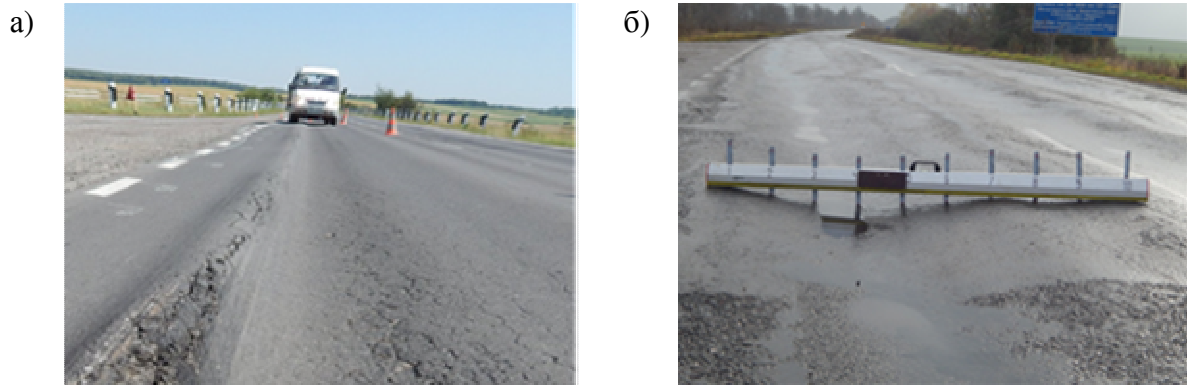


Рисунок 1 – Залишкові пластичні деформації у вигляді колії на автомобільних дорогах України: а – М-19; б – Р-32

Порушення поперечної рівності асфальтобетонного покриття у формі утворення колії створює небезпечні умови для руху автомобілів: підвищується ризик втрати управління автомобілем під час здійснення маневрів; застій води в колії може призводити до аквапланування коліс автомобіля і, як наслідок, до втрати управління автомобілем; у зимовий період є небезпека замерзання води в колії, а також ускладнюється ефективне видалення з колії сніжно-льодових відкладень, що збільшує зимову ковзкість у смугі накату та ін. [1].

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Найбільше піддаються впливу великовагових транспортних засобів верхні шари асфальтобетонного покриття [2, 3].

У наш час існує велика кількість методів оцінювання колієстійкості асфальтобетонних покриттів, які умовно можна поділити на дві основні групи: лабораторні та польові.

За кордоном стійкість асфальтобетонів до колієутворення в лабораторних умовах в основному оцінюють за допомогою методів, що моделюють колісне навантаження: метод із застосуванням установки прискореного навантаження (FHWA Accelerated Loading Facility – ALF); метод з використанням французького приладу для випробування покриттів на колієутворення (French Pavement Rutting Tester – FPRT); метод із застосуванням випробувальної установки навантаження колесом штату Джорджія (Georgia Loaded Wheel Tester – GLWT); метод з використанням німецького пристрою колієутворення (Hamburg Wheel Tracking Device – HWTД) та інше [4 – 8].

Згадані методи передбачають вимірювання колії в асфальтобетонному зразку після певної кількості проходів колеса з певним навантаженням. Відмінності полягають саме в типі колеса, через яке передається навантаження на зразок [9]. Так, у французькому приладі [6, 7] це пневматичне колесо, а в американському [8] – металеве.

Можна припустити, що результати колієутворення, отримані за допомогою пневматичного колеса, є більш достовірними, оскільки більшою мірою відображають вплив колеса автомобіля на покриття автомобільної дороги [9].

Останнім часом подібні установки широко використовуються і в країнах СНД. Так, у Росії розроблено установку для випробування асфальтобетону на колієутворення «УК-1» з пневматичним колесом [10]. В Україні проводять випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій з використанням установки, що має прогумоване або непрогумоване сталеве колесо [11 – 13].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Наскільки б лабораторні установки не були наближені до експлуатаційних умов роботи асфальтобетону, вони не в змозі відобразити реальний напружено-деформований стан дорожніх конструкцій, тому що час, швидкість і кількість прикладень розрахункового навантаження не відповідають фактичним умовам роботи автомобільної дороги [14]. Питання оцінювання колієстійкості нежорстких дорожніх одягів з асфальтобетонним покриттям у реальних умовах на конкретних ділянках автомобільних доріг на цей час залишається не вирішеним.

Мета дослідження полягає в тому, що для попередження виникнення колійності на автомобільних дорогах необхідно розробити спосіб оцінювання схильності реальних дорожніх одягів до накопичення залишкових пластичних деформацій.

З метою реалізації поставленої мети потрібно розробити пристрій, який дозволить у польових умовах створити навантаження на дорожній одяг, а потім оцінити величину та характер пластичних деформацій покриття, що виникають під цим навантаженням.

Основний матеріал і результати дослідження. Проблему створення навантаження можна розв'язати шляхом удавлювання в покриття жорсткого металевого штампа. Подібний спосіб набув широкого розповсюдження в процесі оцінювання реологічних властивостей литих асфальтобетонних сумішей. Основним показником, що характеризує стійкість литого асфальтобетону до накопичення пластичних деформацій, є глибина вдавлювання плоского штампа циліндричної форми площею $5,0 \text{ см}^2$ при температурі $+40^\circ\text{C}$. Визначення цього показника здійснюється в лабораторних умовах з використанням спеціального лабораторного устаткування [15] шляхом випробування зразків кубоподібної форми розміром $7,07 \times 7,07 \times 7,07 \text{ см}$. Методика проведення цих випробувань у європейських країнах (EN 12697-20:2012 [16]) та в Росії (ГОСТ Р54400-2011 [17]) фактично нічим не відрізняється.

Відомі дослідження з удавлювання в конструктивні шари дорожніх одягів сферичних штампів під дією статичного навантаження в польових умовах [18 – 20].

Подібні випробування досить трудомісткі, потребують значних затрат часу та використання джерела навантаження. Крім того, випробувальне обладнання досить важке та громіздке. Ще одним суттєвим недоліком статичних випробувань є неможливість створення циклічного навантаження на дорожній одяг, яке найбільш повно імітує дію рухомого транспорту.

Тому доцільно використовувати для цих цілей динамічні установки з падаючим вантажем [21], які позбавлені вищезгаданих недоліків. Серед вітчизняного обладнання цього типу існує можливість застосування вузла вимірювання міцності установки «УДВО-НТУ» [22], обладнаного сферичним штампом (рис. 2).

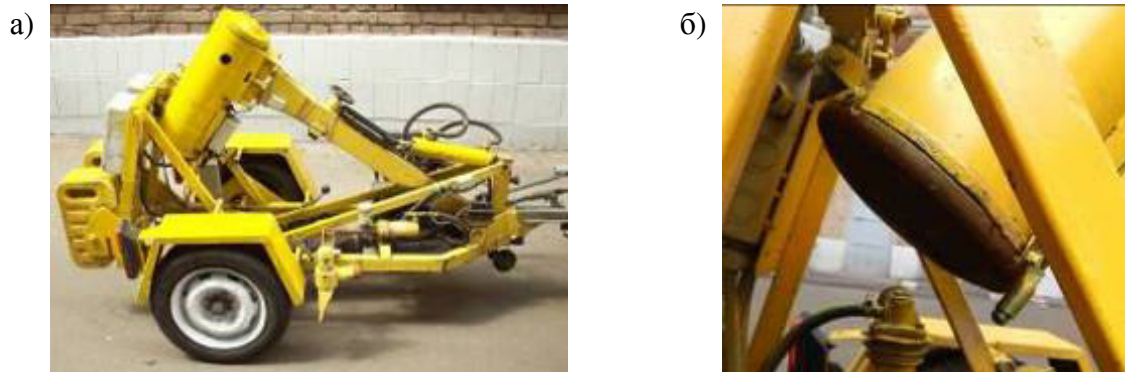


Рисунок 2 – Універсальне дорожнє вимірювальне обладнання «УДВО-НТУ»:

а – загальний вигляд установки;

б – вузол вимірювання міцності, обладнаний сферичним штампом

Така установка обладнана автоматизованою системою керування вимірювальними процесами [22], що дозволяє виконати серію ударів будь-якої кількості з різними інтервалами часу. Це дає змогу найбільш повно відтворити реальний напружено-деформований стан дорожніх конструкцій при дії на них рухомого транспорту.

Величину та характер залишкових пластичних деформацій покриття, викликаних ударним навантаженням, у польових умовах можна оцінити за допомогою рейок, геодезичних приладів [23, 10], ультразвукових і лазерних профілографів [23 – 28], ручних цифрових вимірювачів, що дозволяють виконувати статичні вимірювання поперечного профілю шляхом безперервної реєстрації відхилень датчика, який переміщується вздовж рейки [26, 29, 30].

У Національному транспортному університеті розроблено лазерний профілограф для сканування поверхні дорожнього покриття (рис. 3) [31].



Рисунок 3 – Прилад «Колімір-НТУ»

Прилад складається з балки на двох опорах і вимірювальної каретки з комплектом необхідних датчиків. Основним робочим елементом приладу є лазерний датчик, встановлений усередині вимірювальної каретки.

Прилад здійснює сканування та автоматичний запис відміток поверхні покриття у файл, який зберігається в комп'ютері. При цьому, на відміну від відомих аналогів, частота запису відміток поверхні покриття набагато більша (через ≈ 1 см). У результаті випробувань отримуємо детальний профіль поверхні покриття.

На дослідних ділянках на території Київської області (як з наявністю, так і відсутністю залишкових пластичних деформацій у вигляді колії) було проведено ряд експериментальних досліджень щодо оцінювання колієстійкості нежорстких дорожніх одягів у польових умовах (рис. 4) [32].

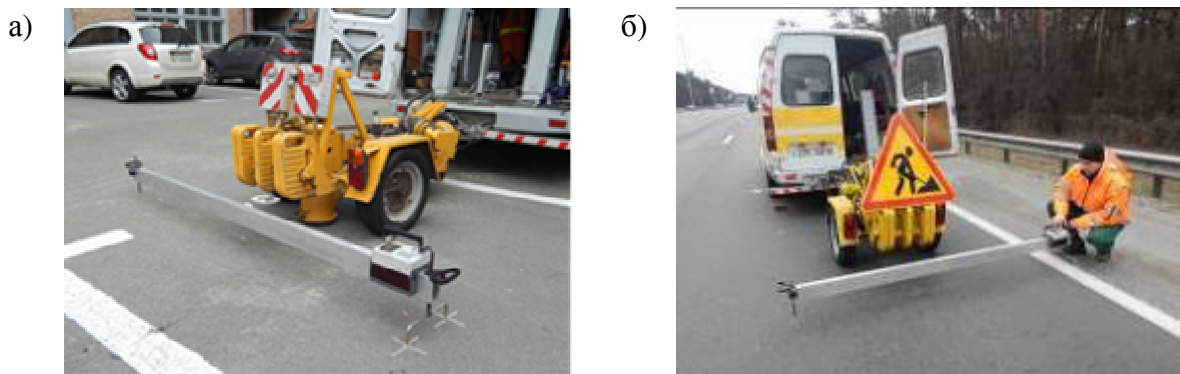


Рисунок 4 – Експериментальні дослідження колієстійкості дорожніх одягів

Дослідження виконувались на ділянках доріг з різноманітними конструкціями нежорстких дорожніх одягів у різні пори року як при високих, так і низьких температурах на поверхні покриттів. Детальна схема розміщення дослідних ділянок наведена на рис. 5.

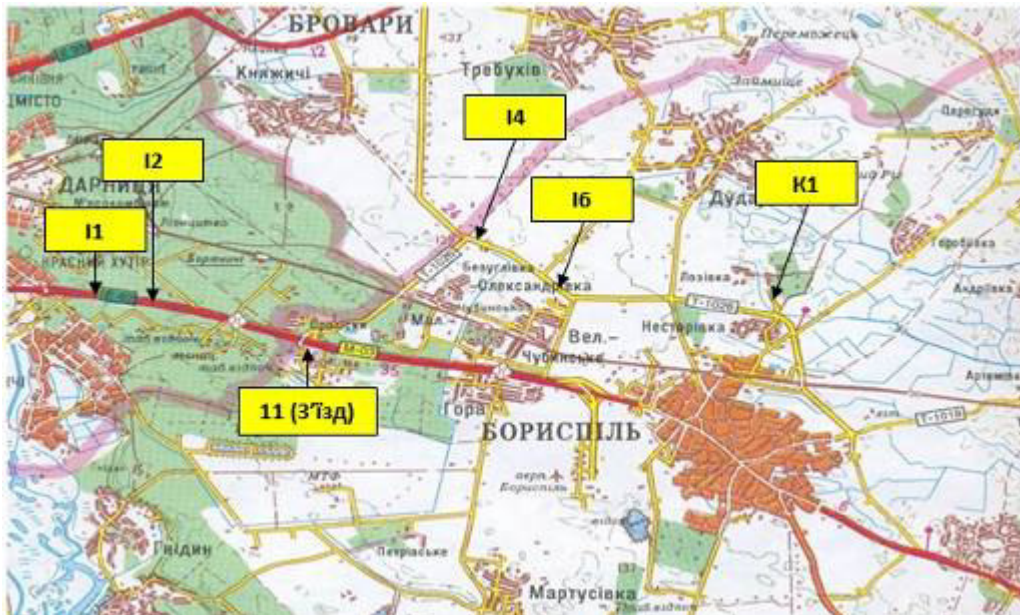


Рисунок 5 – Розміщення дослідних ділянок

Методика проведення експериментальних досліджень полягала у наступному. За допомогою лазерного профілографа фіксували поперечний профіль поверхні покриття до навантаження. При цьому на поперечному профілі обирали точку для подальших навантажень, яку позначали на поверхні покриття фарбою. Також на поверхні покриття фарбою фіксували положення опор профілографа з метою забезпечення можливості повторного сканування цього ж профілю після здійснення серії ударних навантажень.

Установивши прилад «УДВО-НТУ» так, щоб сферичний штамп ударника розміщувався в точці навантаження, здійснювали серію ударів, після яких на покритті залишалася лунка (рис. 6).



Рисунок 6 – Лунка на покритті, що утворилася після серії ударних навантажень

Зміни поперечного профілю лунки після кожного удару фіксували за допомогою лазерного профілографа. У результаті отримали графіки залежностей глибини та параметрів поперечного профілю лунки від кількості ударів, які наведено на рис. 7 – 11.

У процесі проведення експериментальних досліджень розглядалося питання впливу температури поверхні покриття на розміри лунки.

На ділянці «11 (з'їзд)», розміщеній на з'їзді автомобільної дороги М03 Київ – Харків – Довжанський, з однаковою конструкцією дорожнього одягу та відстанню між точками не більше 10 м були виконані три серії випробувань при температурах поверхні покриття $+6^{\circ}\text{C}$, $+33^{\circ}\text{C}$ та $+54^{\circ}\text{C}$ відповідно. Отримані результати випробувань наведені на рис. 7.

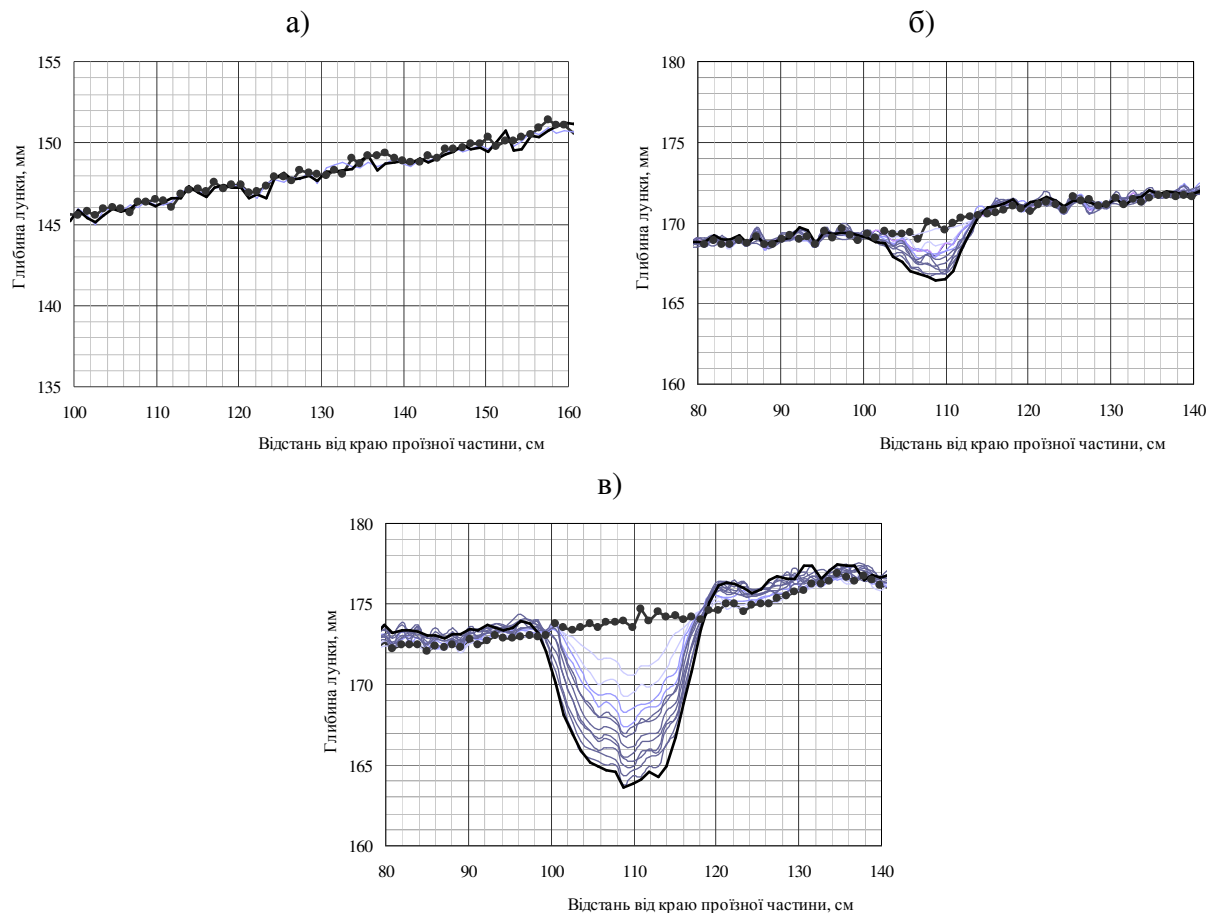


Рисунок 7 – Результати досліджень впливу температури на розміри лунки
(суцільна лінія з маркерами – початковий стан поверхні покриття;
суцільні лінії без маркерів – після нанесення ударів)
при температурі покриття: а – $+6^{\circ}\text{C}$; б – $+33^{\circ}\text{C}$; в – $+54^{\circ}\text{C}$

З рис. 7, а видно, що при температурі $+6^{\circ}\text{C}$ лунки не утворюється, тобто колієстійкість покриття забезпечена. При цьому максимальна глибина лунки з підвищенням температури покриття збільшується. Так, при температурі $+33^{\circ}\text{C}$ глибина лунки після 13 ударів становила 3,5 мм, а при температурі $+54^{\circ}\text{C}$ – 10,5 мм відповідно. Тобто цей метод чутливий до температури поверхні покриття, що дає можливість оцінити колієстійкість нежорстких дорожніх одягів залежно від температури.

У процесі подальших досліджень на дослідній ділянці, розміщеній у дворі НТУ, виявили вплив температури поверхні покриття не тільки на глибину, а й на форму лунки (рис. 8).

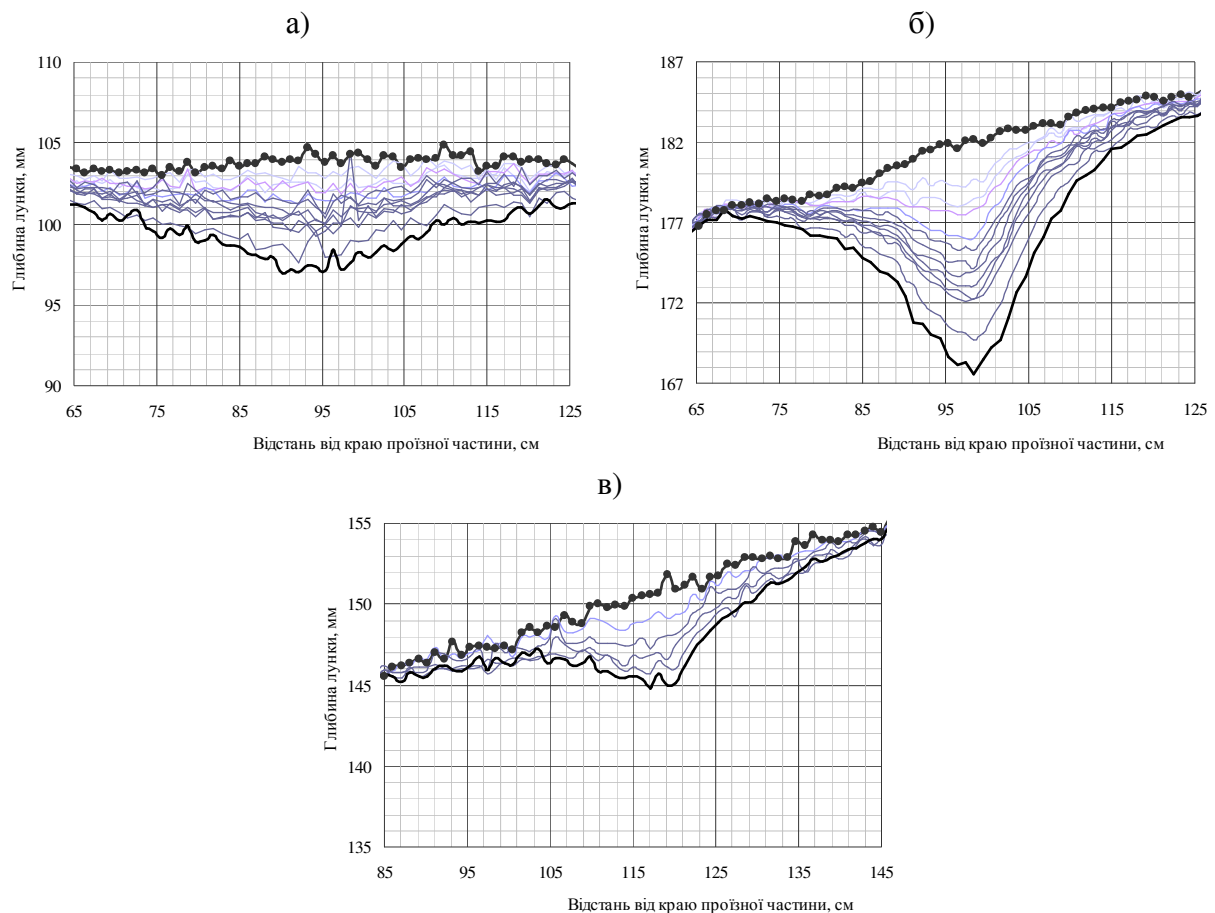


Рисунок 8 – Результати досліджень впливу температури на форму лунки
 (суцільна лінія з маркерами – початковий стан поверхні покриття;
 суцільні лінії без маркерів – після нанесення ударів)
 при температурі покриття: а – +8 °С; б – +30 °С; в – +39 °С

Так, при температурі поверхні покриття +8 °С схили лунки є більш пологими. Крутизна схилів збільшується з підвищенням температури (рис. 8, б, в).

За формою лунки можна оцінити тип колійності, який залежить від жорсткості основи дорожнього одягу. Так, на дослідній ділянці «К1» (рис. 9, а) з покриттям у вигляді поверхневої обробки по верху шару чорного щебеню та основою низької міцності, випори не спостерігаються. Цього не можна сказати про ділянку «І2» з покриттям у вигляді кількох шарів дрібнозернистого асфальтобетону та жорсткою основою (рис. 9, б). На цій ділянці лунка має по краях випори внаслідок випирання асфальтобетону (рис. 9, б).

У результаті проведення досліджень на дослідній ділянці «І1», розміщеній на 19 км автомобільної дороги М-03, при температурі поверхні покриття +38 °С лунки не спостерігалося (рис. 10, а).

Лунка не утворилась і при випробуваннях на дослідній ділянці «І7», розміщеній на 38 км автомобільної дороги М-06, при температурі поверхні покриття +35 °С (рис. 10, б).

Це свідчить про високу міцність конструкцій дорожніх одягів, а також пояснюється застосуванням для будівництва шарів покриття щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей.

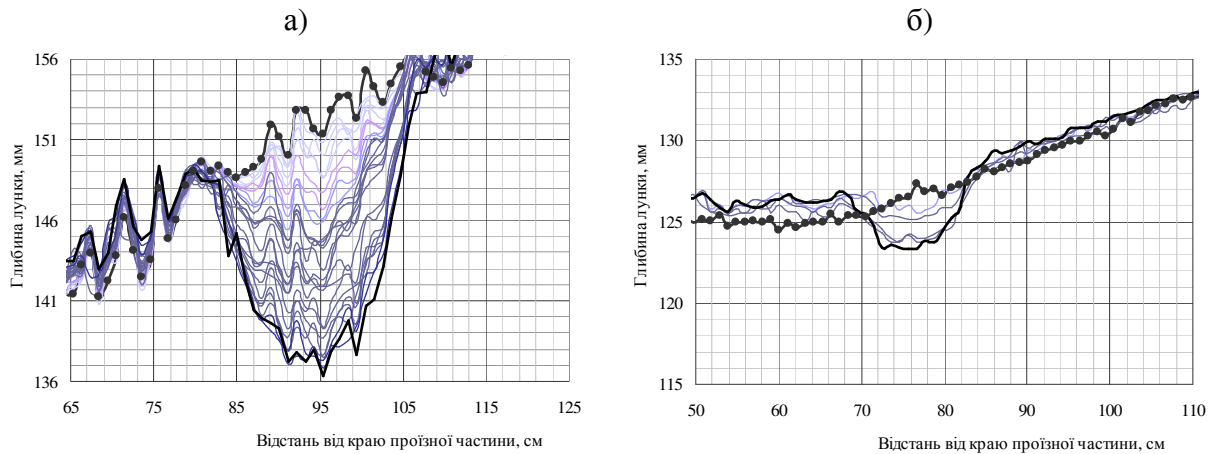


Рисунок 9 – Результати досліджень на ділянках доріг з різними конструкціями дорожніх одягів
 (суцільна лінія з маркерами – початковий стан поверхні покриття;
 суцільні лінії без маркерів – після нанесення ударів):
 а – з покриттям у вигляді поверхневої обробки та слабкою основою;
 б – з покриттям у вигляді кількох шарів дрібнозернистого асфальтобетону та жорсткою основою

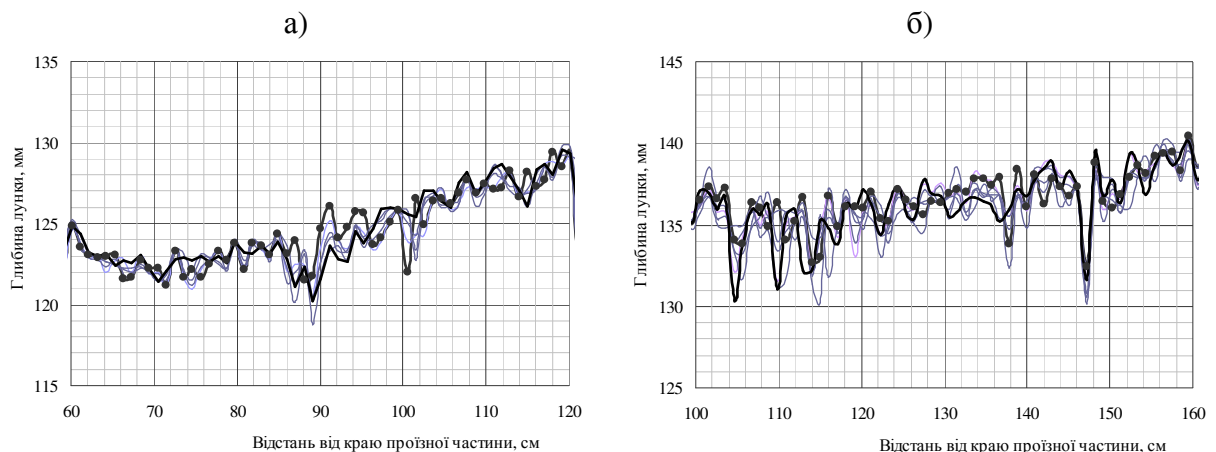


Рисунок 10 – Результати досліджень на ділянках доріг з покриттям із щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей
 (суцільна лінія з маркерами – початковий стан поверхні покриття;
 суцільні лінії без маркерів – після нанесення ударів):
 а – на ділянці автодороги М-03; б – на ділянці автодороги М-06

У процесі експериментальних досліджень було виявлено ще одну цікаву особливість поведінки асфальтобетону, пов'язану з відновленням форми лунки після припинення ударів.

Ця особливість була помічена при дослідженні відновлення форми лунки протягом 35 – 40 хв. На рис. 11, б показано, що на ділянці «І4», після остаточного припинення ударів лунка не відновилася, а на ділянці «І6» з таким же типом покриття вона відновилася на 60 % (рис. 11, а).

При цьому на ділянці «І4» спостерігалася значна колія на покритті, а на ділянці «І6» колія була відсутня.

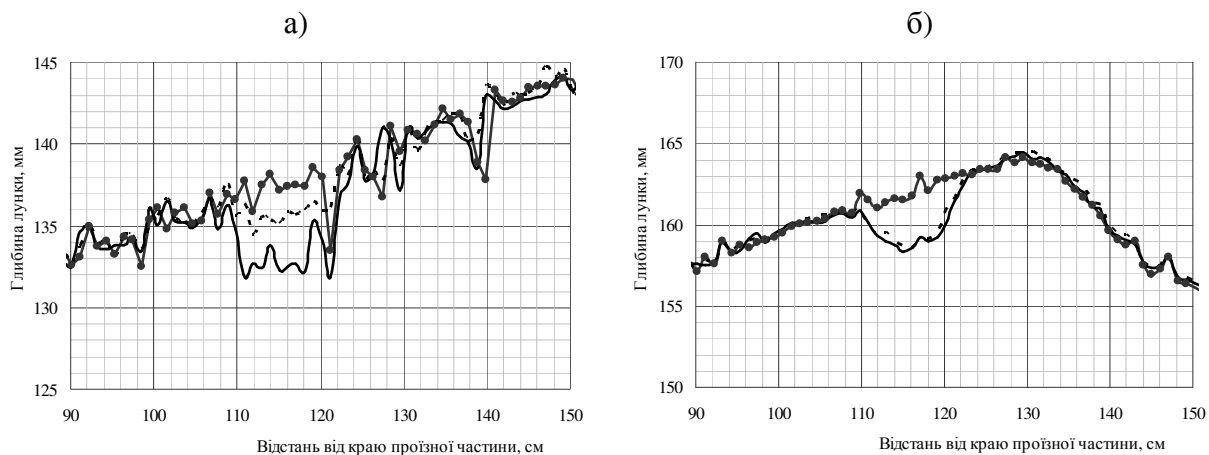


Рисунок 11 – Результати досліджень відновлення форми лунки після припинення ударів

(суцільна лінія з маркерами – початковий стан поверхні покриття;
без маркерів – після нанесення ударів;

штрихова лінія – відновлення через 40 хв) на дослідних ділянках: а – «І6»; б – «І4»

Висновки. Наведені результати вказують на те, що колієстійкість дорожніх одягів визначається не тільки глибиною лунки після виконання серії ударів, а й їх здатністю відновлювати форму поверхні покриття після закінчення ударів. Отже, розроблена методика дає можливість оцінити колієстійкість не тільки за глибиною та параметрами лунки, а й за характером відновлення поверхні покриття після серії ударів.

Загальні висновки по роботі:

1. Відомі методи оцінювання стійкості асфальтобетонів до колієутворення за допомогою лабораторних установок не в змозі відобразити реальний напружено-деформований стан дорожніх конструкцій, тому що час, швидкість і кількість прикладань розрахункового навантаження не відповідають фактичним умовам роботи. Крім того, досліджується лише шар асфальтобетонного покриття, який вкладають на металеву основу у форму, що обмежує поперечні деформації зразка. У реальних умовах колія може утворюватися за рахунок деформації основи чи ґрунту земляного полотна.

2. Розроблено спосіб оцінювання колієстійкості нежорстких дорожніх одягів, що полягає в аналізі розмірів і форми лунки, яка утворюється при повторному динамічному навантаженні поверхні дорожнього покриття сферичним штампом безпосередньо в польових умовах. На відміну від відомих аналогів, спосіб дозволяє моделювати тривалу дію транспортних навантажень на дорожній одяг за короткий проміжок часу.

3. Виконано апробацію запропонованого способу оцінювання колієстійкості на дослідних ділянках. Установлено залежності форми і глибини лунки від типу асфальтобетону й температури поверхні покриття. Виявлено можливість установлення типу колійності за формою лунки.

4. Досліджено поведінку дорожніх конструкцій після повторних динамічних навантажень. Виявлено, що колієстійкість дорожніх одягів визначається не тільки глибиною лунки після виконання серії ударів, а й здатністю їх відновлювати форму поверхні покриття після її закінчення.

5. Порівняння результатів випробувань з фактичним станом ділянок за колійністю дає змогу зробити припущення про можливість застосування запропонованого способу для оцінювання колієстійкості покриття та прогнозування можливості її виникнення в процесі майбутнього періоду експлуатації дороги. Доцільне також застосування способу як складової досліджень при пробному вкладанні асфальтобетону.

Література

1. Заходи з підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортних засобів / А. М. Онищенко, В. Ф. Невінгловський, М. В. Гаркуша, О. С. Різніченко, С. Ю. Аксьонов, О. О. Білан // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. – Макіївка : ДонНАБА, 2013. – Вип. 1 (99). – С. 58 – 65.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=vdnaba_2013_1_12
2. Schäfer F. Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen / F. Schäfer // Dissertation von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs. – 2009. – 127 s.
3. Brown E. R. A national study of rutting in hot mix asphalt pavements / E. R. Brown, S. A. Cross. – Auburn: Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 1992. – 41 p.
4. Обзорная информация об отечественных и зарубежных методах предотвращения колеобразовании на асфальтобетонных покрытиях в условиях современных транспортных нагрузок. – М. : Росавтодор, 2005. – 130 с.
5. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний. Обзорная информация / Информавтодор. – 2005. – Вып. 6. – 104 с.
6. Aschenbrener T. Comparison of Results Obtained from the French Tester with Pavements of Known Performance / T. Aschenbrener, K. Stuart. – Denver: Colorado Department of Transportation, 1992. – 71 p.
7. Sybilski D. Validation of empirical test for polymer-modified bitumens / D. Sybilski // Eurobitume workshop. – 1999. – № 88. – P. 19 – 22.
8. Prithvi S. K. Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using Loaded Wheel Tester / K. S. Prithvi, Jr. L. Allen Cooley. – Auburn: Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 2002. – 16 p.
9. Золотарев В. А. Сравнение показателей сдвигоустойчивости при кручении и колеобразовании / В. А. Золотарев, Д. Сибильски, С. А. Чугуенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Х. : ХНАДУ, 2005. – Вып. 29. – С. 255 – 258.
<http://www.khadi.kharkov.ua/nauka/naukovo-doslidna-chastina/naukovi-vidannja/visnik-kharkivskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universitetu.html>
10. Каталог продукции ООО «Спецдортехника». – Саратов: ООО «Спецдортехника», 2015. – 64 с.
11. Випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій / В. В. Мозговий, О. М. Куцман, Б. Ю. Ольховий, О. С. Кирієнко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету. – Х. : ХНАДУ, 2008. – Вип. 40. – С. 73 – 76.
<http://www.khadi.kharkov.ua/nauka/naukovo-doslidna-chastina/naukovi-vidannja/visnik-kharkivskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universitetu.html>
12. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колеи / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, А. В. Прудкий и др. // Каталог-справочник «Дорожная техника – 2010». – 2010. – С. 114 – 128.
13. Будівельні матеріали. Асфальтобетон дорожній. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій: СОУ 45.02-00018112-020:2009. – [Чинний від 2009-03-01]. – К. : Укравтодор, 2009. – 14 с.
14. Матуа В. П. Новое лабораторное оборудование и методика проведения испытаний дорожно-строительных материалов / В. П. Матуа, С. А. Мирончук // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 4. – С. 16 – 18.
15. Каталог продукции компании «InfraTest». – М. : Компания Би Эй Ви, 2015. – 32 с.
16. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 20: Indentation using cube or cylindrical specimens (CY): EN 12697-20:2012. – [Publication Date 2012-02-26]. – Brussels: European Committee for Standardization, 2012. – 22 p. – (European standard).

17. Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный литой горячий. Методы испытаний: ГОСТ Р54400-2011. – [Введен с 2011-09-14]. – М. : Стандартинформ, 2012. – 14 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).
18. Еремин А. В. Эксплуатационно-прочностные свойства шлаковых асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Андрей Владимирович Еремин. – Воронеж, ВГАСУ, 2000. – 19 с.
19. Волокитин В. П. Определение деформационно-прочностных характеристик асфальтобетонных слоев нежестких дорожных одежд: дис. ... к-та техн. наук: 05.23.11 / Владимир Павлович Волокитин. – Воронеж, ВГАСУ, 2004. – 195 с.
20. Волокитина О. А. Совершенствование определения расчетных характеристик слоев дорожных одежд методом сферического штампа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Ольга Анатольевна Волокитина. – Воронеж, ВГАСУ, 2012. – 18 с.
21. Шуляк І. С. Дослідження поведінки нежорстких дорожніх одягів при взаємодії зі штампом установки динамічного навантаження / І. С. Шуляк, Д. О. Павлюк // Матеріали Всеукр. Інтернет-конф. «Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій» (18.03.2015). – Полтава : ПолтНТУ, 2015. – С. 232 – 235.
22. Універсальне дорожнє вимірювальне обладнання «УДВО-НТУ» / Д. О. Павлюк, О. С. Лебедєв, В. В. Павлюк, В. В. Павлюк, Л. Л. Рибіцький та ін. // Автошляховик України. – 2011. – № 1. – С. 40 – 48.
http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Ashu/2011_1/zmist.htm
23. Леонович И. И. Диагностика автомобильных дорог: учебно-методическое пособие для студентов специальности «Автомобильные дороги» / И. И. Леонович, С. В. Богданович. – Минск: БНТУ, 2012. – 226 с.
24. Le matériel LPC. –Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997. – 132 p.
25. Соловчук А. А. Автоматизированные методы измерения глубины колеи и использование их результатов при планировании ремонтных работ / А. А. Соловчук // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2000. – № 3. – С. 34 – 35.
26. Жилин С. Н. Современные автоматизированные технические средства диагностики автомобильных дорог. Обзорная информация / С. Н. Жилин, В. И. Ермолаев // Информавтодор. – 2002. – № 5. – 60 с.
27. Sixbey D. G. It makes More than Mirrors to See Your «True Profile» / D. G. Sixbey // Public Roads. – 1998. – Vol. 61, № 5. – P. 36 – 39.
28. Farnell L. Road Measurement Data Acquisition System User's Guide / L. Farnell. – North Mymms, Hatfield (UK), 1996. – 36 p.
29. Field Evaluation of Automated Rutting Measuring Equipment / P. A. Serigos, J. A. Prozzi, B. H. Nam, M. R. Murphy. – Austin: The University of Texas at Austin, Center for Transportation Research, 2012. – 170 p.
30. Hoffman B. R. Verification of Rut Depth Collected with the INO Laser Rut Measurement System (LRMS) / B. R. Hoffman, S. M. Sargand. – Athens: Ohio University, Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (ORITE), 2011. – 80 p.
31. Результати наукової та дослідно-конструкторської роботи лабораторії автомобільних доріг та аеродромів Національного транспортного університету / Д. О. Павлюк, В. В. Павлюк, В. В. Павлюк, О. С. Лебедєв, А. П. Іващенко та ін. // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31). – С. 401 – 414.
http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=REF=&S21COLORTERMS=0&S21STR=Vntu
32. Шуляк І. С. Контроль стійкості дорожніх одягів до колієутворення / І. С. Шуляк // Тези XII Міжнар. конф. «Контроль і управління в складних системах» (14–17.10.2014). – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 73.

References

1. Zahodi z pidvishchennya koliestiykosti asfaltobetonnoho pokrittya avtomobilnih dorig z intensivnim ruhom velikovantazhnykh transportnykh zasobiv / A. M. Onishchenko, V. F. Nevinglovskiy, M. V. Garkusha, O. S. Riznichenko, S. Yu. Aksonov, O. O. Bilan // *Visnik Donbaskoyi natsionalnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi*. – Makiyivka : DonNABA, 2013. – Vip. 1 (99). – S. 58 – 65.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=vdnaba_2013_1_12
2. Schäfer F. Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen / F. Schäfer // *Dissertation von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs*. – 2009. – 127 s.
3. Brown E. R. A national study of rutting in hot mix asphalt pavements / E. R. Brown, S. A. Cross. – Auburn: Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 1992. – 41 p.
4. Obzornaya informatsiya ob otechestvennykh i zarubezhnykh metodakh predotvrashcheniya koleobrazovaniya na asfaltobetonnykh pokrytyiyah v usloviyakh sovremennykh transportnykh nagruzok. – M. : Rosavtodor, 2005. – 130 s.
5. Proektirovanie sostava asfaltobetona i metody ego ispytaniy. Obzornaya informatsiya / Informavtodor. – 2005. – Vyp. 6. – 104 s.
6. Aschenbrener T. Comparison of Results Obtained from the French Tester with Pavements of Known Performance / T. Aschenbrener, K. Stuart. – Denver: Colorado Department of Transportation, 1992. – 71 p.
7. Sybilski D. Validation of emperical test for polymer-modified bitumens / D. Sybilski // *Eurobitume workshop*. – 1999. – № 88. – P. 19 – 22.
8. Prithvi S. K. Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using Loaded Wheel Tester / K. S. Prithvi, Jr. L. Allen Cooley. – Auburn: Auburn University, National Center for Asphalt Technology, 2002. – 16 p.
9. Zolotarev V. A. Sravnenie pokazateley sdvigoustoychivosti pri kruchenii i koleobrazovanii / V. A. Zolotarev, D. Sibilski, S. A. Chuguenko // *Vestnik Harkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*. – H. : HNADU, 2005. – Vyp. 29. – S. 255 – 258.
<http://www.khadi.kharkov.ua/nauka/naukovo-doslidna-chastina/naukovi-vidannja/visnik-kharkivskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universitetu.html>
10. Katalog produktii OOO «Spetsdortehnika». – Saratov: OOO «Spetsdortehnika», 2015. – 64 s.
11. Viprobuvannya asfaltobetonu na stiykist do nakopichennya zalishkovih deformatsiy / V. V. Mozgoviy, O. M. Kutsman, B. Yu. Olhovi, O. S. Kirienko // *Visnik Harkivskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universitetu*. – H. : HNADU, 2008. – Vip. 40. – S. 73 – 76.
<http://www.khadi.kharkov.ua/nauka/naukovo-doslidna-chastina/naukovi-vidannja/visnik-kharkivskogo-nacionalnogo-avtomobilno-dorozhnogo-universitetu.html>
12. Eksperimentalnaya otsenka ustoychivosti asfaltobetonnoho pokrytiya k obrazovanii koleynosti / V. V. Mozgovoy, A. N. Onishchenko, A. V. Prudkiy i dr. // *Katalog-spravochnik «Dorozhnaya tehnika – 2010»*. – 2010. – S. 114 – 128.
13. Budivelni materialy. Asfaltobeton dorozhnyi. Metod viprobuvannya na stiykist do nakopichennya zalishkovih deformatsiy: SOU 45.02-00018112-020:2009. – [Chinniy vid 2009-03-01]. – K. : Ukravtodor, 2009. – 14 s.
14. Matua V. P. Novoe laboratornoe oborudovanie i metodika provedeniya ispytaniy dorozhno-stroitelnykh materialov / V. P. Matua, S. A. Mironchuk // *Nauka i tehnika v dorozhnoy otrasli*. – 2012. – № 4. – S. 16 – 18.
15. Katalog produktii kompanii «InfraTest». – M. : Kompaniya Bi Ey Vi, 2015. – 32 s.
16. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 20: Indentation using cube or cylindrical specimens (CY): EN 12697-20:2012. – [Publication Date 2012-02-26]. – Brussels: European Committee for Standardization, 2012. – 22 p. – (European standard).
17. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Asfaltobeton dorozhnyy litoi goryachiy. Metody ispytaniy: GOST R54400-2011. – [Vveden s 2011-09-14]. – M. : Standartinform, 2012. – 14 s. – (Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii).

18. Eremin A. V. *Ekspluatatsionno-prochnostnye svoystva shlakovykh asfaltobetonnykh pokrytiy avtomobilnykh dorog: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.11* / Andrey Vladimirovich Eremin. – Voronezh, VGASU, 2000. – 19 s.
19. Volokitin V. P. *Opredelenie deformatsionno-prochnostnykh harakteristik asfaltobetonnykh sloev nezhestkikh dorozhnykh odezhd: dis. ... k-ta tehn. nauk: 05.23.11* / Vladimir Pavlovich Volokitin. – Voronezh, VGASU, 2004. – 195 s.
20. Volokitina O. A. *Sovershenstvovanie opredeleniya raschetnykh harakteristik sloev dorozhnykh odezhd metodom sfericheskogo shtampa: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.11* / Olga Anatolevna Volokitina. – Voronezh, VGASU, 2012. – 18 s.
21. Shulyak I. S. *Doslidzhennya povedinki nezhorstkiy dorozhnykh odyagiv pri vzaemodiyi zi shtampom ustanovki dinamichnogo navantazhennya* / I. S. Shulyak, D. O. Pavlyuk // *Materiali Vseukr. Internet-konf. «Problemi i perspektivi stalogo rozvitku ta prostorovogo planuvannya teritoriy»* (18.03.2015). – Poltava : PolNTU, 2015. – S. 232 – 235.
22. *Universalne dorozhne vimiryuvalne obladnannya «UDVO-NTU»* / D. O. Pavlyuk, O. S. Lebedev, V. V. Pavlyuk, V. V. Pavlyuk, L. L. Ribitskiy ta in. // *Avtoshlyahovik Ukrainy*. – 2011. – № 1. – S. 40 – 48.
http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Ashu/2011_1/zmist.htm
23. Leonovich I. I. *Diagnostika avtomobilnykh dorog: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsialnosti «Avtomobilnye dorogi»* / I. I. Leonovich, S. V. Bogdanovich. – Minsk: BNTU, 2012. – 226 s.
24. *Le matériel LPC*. – Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997. – 132 p.
25. Solovchuk A. A. *Avtomatizirovannyye metody izmereniya glubiny kolei i ispolzovanie ih rezultatov pri planirovanii remontnykh rabot* / A. A. Solovchuk // *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. – 2000. – № 3. – S. 34 – 35.
26. Zhilin S. N. *Sovremennyye avtomatizirovannyye tekhnicheskie sredstva diagnostiki avtomobilnykh dorog. Obzornaya informatsiya* / S. N. Zhilin, V. I. Ermolaev // *Informavtodor*. – 2002. – № 5. – 60 s.
27. Sixbey D. G. *It makes More than Mirrors to See Your «True Profile»* / D. G. Sixbey // *Public Roads*. – 1998. – Vol. 61, № 5. – P. 36 – 39.
28. Farnell L. *Road Measurement Data Acquisition System User's Guide* / L. Farnell. – North Mymms, Hatfield (UK), 1996. – 36 p.
29. *Field Evaluation of Automated Rutting Measuring Equipment* / P. A. Serigos, J. A. Prozzi, B. H. Nam, M. R. Murphy. – Austin: The University of Texas at Austin, Center for Transportation Research, 2012. – 170 p.
30. Hoffman B. R. *Verification of Rut Depth Collected with the INO Laser Rut Measurement System (LRMS)* / B. R. Hoffman, S. M. Sargand. – Athens: Ohio University, Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (ORITE), 2011. – 80 p.
31. *Rezultati naukovoyi ta doslidno-konstruktorskoyi roboti laboratoriyi avtomobilnykh dorog ta aerodromiv Natsionalnogo transportnogo universitetu* / D. O. Pavlyuk, V. V. Pavlyuk, V. V. Pavlyuk, O. S. Lebedev, A. P. Ivashchenko ta in. // *Visnik Natsionalnogo transportnogo universitetu*. – K. : NTU, 2015. – Vip. 1 (31). – S. 401 – 414.
http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=PREF=&S21COLORTERMS=0&S21STR=Vntu
32. Shulyak I. S. *Kontrol stiykosti dorozhnykh odyagiv do kolieutvorenniya* / I. S. Shulyak // *Tezi XII Mizhnar. konf. «Kontrol i upravlinnya v skladnih sistemah»* (14–17.10.2014). – Vinnitsya : VNTU, 2014. – S. 73.

© Павлюк Д.О., Шуляк І.С.
Надійшла до редакції 05.05.2016

Lytvynenko T., PhD, Assistant Professor
Ivasenko V., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

STREET AND ROAD NETWORK'S PLANNING PRINCIPLES FOR NEEDS OF PERSONS WITH DISABILITIES

The development and improvement problem of principles and receptions of street-travelling network planning and also facilities of their providing, that would take into account the necessities of all users an environment, is in-process investigated, especially people with different disability nosologies and other categories of people with limited mobility. Distinguished basic groups of principles in relation to planning of environment. Analysed basic principles of planning of street-travelling network for conditioning for unimpeded motion by the community of all participants of traffic participants: functional integration, functional differentiation, compactness, town-planning integrating, microdistricts creation, construction of optimal street-travelling network, functional zoning, non-conflictual, modernisation, aesthetic attractiveness, visual perception, sequentialization, design of spatial corridor, universal design, availability, comfort, informing, unconcern, «smart adaptation», social, social adaptation, participating in public life, labour employment.

Keywords: street and road network, people with limited mobility (PLM), transport accessibility, mobility, transport infrastructure, design principles.

Литвиненко Т.П., к.т.н., доцент
Івасенко В.В., аспірант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ ВУЛИЧНО-ШЛЯХОВОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ПОТРЕБ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ

Досліджено проблему вдосконалення проектування та реконструкції вулично-шляхової мережі з визначенням принципів і прийомів, а також засобів їх забезпечення, які враховували б потреби всіх користувачів навколишнім середовищем, особливо людей з різними нозологіями інвалідності та інших маломобільних категорій. Виділено і проаналізовано основні принципи проектування вулично-шляхової мережі для створення умов для безперешкодного руху населеним пунктом усіх учасників дорожнього руху: функціональної інтеграції, функціональної диференціації, компактності, містобудівної інтегрованості, мікрорайонування, побудови оптимальної вулично-шляхової мережі, функціонального зонування, неконфліктності, модернізації, естетичної привабливості, візуального сприйняття, композиційності, моделювання просторового коридору, універсального дизайну, доступності, комфортності, інформативності, безпечності, «розумного пристосування», соціальної ефективності, соціальної адаптації, участі у громадському житті, трудової зайнятості.

Ключові слова: вулично-шляхова мережа, маломобільні групи населення, транспортна доступність, мобільність, транспортна інфраструктура, принципи проектування.

Introduction. Due to increased level of the life quality and population growth, the number of people with limited abilities and special needs has increased as well. While the vehicles expand dramatically on our roads and streets, the need for a special transport-distribution system has arisen so that all the participants of the street traffic, along with groups of population with limited mobility, will have access to existing street and road network and to the other elements of the infrastructure. People with limited mobility (PLM) are the people, who have difficulties with self-transportation and space-orientation, and who lack in appropriate services and information. They consist of disabled persons, persons with temporal loss of productivity and health, old people, pregnant women, persons with child's cart etc. They consist of disabled persons, persons with temporal loss of productivity and health, old people, pregnant women, persons with child's cart etc.

Increased mobility of modern world and stimulation of people to live active life have caused a huge demand for functional transformation city streets so that the needs of the GPLM would be taken into consideration.

Analysis of the latest sources of researches and publications. City traffic safety is the topic of researches of O.V. Tolok, Y.O. Reitsen. M.V. Sholukh raises an issue of rehabilitation environment of industrial city. O.V. Stelmakh emphasizes problem of parking spots for cars in the biggest cities of Ukraine. Principles of organization of rehabilitation centers for disabled people and other GPLM are under research of O.V. Prokopenko, V.V. Kutsevych. I.O. Danchak investigates the principles of ergonomic architecture for disabled persons. Foreign scientists who explore problems of street traffic for disabled are the following: L.-P. Grosbois (France), E. Rossman (Poland), J. Geil (Denmark) and others.

Unsolved parts of the common problems. While developing the community and changing its appearance, communication structure becomes less effective in terms of bandwidth lines, differentiation of movement types, and in terms of comfort for people who use it. The main purpose of urban space is creating conditions for a safe, comfortable, accessible traffic for all the users, including the most vulnerable people with limited mobility. Thus in the formation of existing and new transit space based on scientific principles, methods and techniques of urban transformation, we must consider the needs of people with special requirements, help them to move freely in the urban environment, including street and road network. Therefore, we must investigate needs of the people with limited mobility, identify measures to improve development of street and road network and implement this measures.

Purpose of research – improvement and development of the new principles and methods of designing street and road network to the needs of people with limited mobility.

Basic material and results. It was discovered the following group of principles, architectural and planning; technical and socioeconomic while exploring and analyzing the development of domestic and foreign scientists for the design environment (Fig.1).

The group of architectural and planning principles include: functional integration, functional differentiation, compactness, urban integration, zoning, building optimum street and road network, functional zoning, non-conflictual, upgradable, aesthetic appeal, visual perception, compositionality, modeling spatial corridor [2 – 13].

The technical group refers principles: universal design, accessibility, comfort, information, safety, «reasonable adaptation» [14 – 16].

Socio-economic group includes next principles: social efficiency principle, social adaptation principle, principle of participation in public life, employment principle (Fig. 2).

Let's analyze each principle and a system of methods and tools in details.



Figure 1 – Groups of street and road network design principles for needs of people with limited mobility

The principle of functional integration is aimed at adapting existing street and road network for persons with disabilities needs without capital construction activities and can be implemented by:

- allocation of separate lanes;
- the speed limit on the streets and roads;
- construction and arrangement of recreational areas.

The principle of functional differentiation is based on separation of road space functional areas and is aimed at future development of streets, roads and communities and include:

- designing the other roads that can be combined with bicycle's roads (this applies only to people who are moved by specialized vehicles);
- designing independent routes and associated facilities street and road network that take into account the needs of people with limited mobility.

The principle of compactness is to create conditions for people with limited mobility to move fast and freely on town or microdistrict, which are characterized by a relatively high density, so this will reduce the cost of construction.

The principle of integration of urban planning takes into account the optimal objects placement in the street and road network of the community and the rational distribution of certain elements of transport infrastructure. Also determines the availability of favorable conditions for street and road network.

The principle of zoning is based on the unity of residential buildings formations around daily service buildings; forming of sustainable community («neighborhoods»); a safe and comfortable environment; designing mainly pedestrian environment.

The principle of optimal street building and road network consists of a shortest community's network design; identifying additional nodal points and links; finding an effective solution to the problem of optimal street and road network, which would be convenient for people with limited mobility. In designing visual diagram showing shortest connecting networks of roads, assesses the cost-effectiveness of building each street individually and the entire network as a whole

The basis for *the principle of functional zoning* is a logical sequence «Life-work-rest» in the design of the surrounding space that means a clear demarcation of functions and processes in as a result of new methods of living space and transport and walking.

On the basis of the undertaken research it is proposed a *principle of non-conflict* that analyzes conflicts that could arise in the interaction between traffic and pedestrian flows in order to eliminate conflicts between different flows of people; demarcation of traffic and pedestrian flows. This principle focuses on the maximum segmentation level of these flows.

The principle of modernization aimed at reconstruction of the existing street and road network with current technology and full or partial reconstruction of the overall community system to accelerate of development of community.

The principle of aesthetic appealing aims to preserve the architectural and compositional unity of all the objects of a street and road space - lighting, landscaping, proper arrangement of small architectural forms, check the cleanliness and serviceability of all elements of street and road network, etc. while considering this principle in the design environment scientists from different countries didn't take into account the features of some groups of people with limited mobility (people with mental disabilities, the blind, people with hearing impairment), so it is proposed to extend this principle taking into account the peculiarities of perception.

The compositional principle is based on the perception of the environment, a sense of human in space; sensation when driving vehicles; fixing the most favorable terms to understand such elements as scale, rhythm, contrast, nuance, symmetry and asymmetry.

The principle of spatial corridor modeling integrates with hierarchical sequence location of certain elements of improvement. This principle allows design checking by volumetric modeling after the test facility and allows for quality decisions control.

Principle of the universal design were developed by a group of architects headed by Ron Maise [14]. The main ideas of the principle are: to provide even access to usage; usage flexibility; y usage simplicity; free access to the provided information; mistakes tolerance; little physical efforts; free space necessity, and appropriate size. Those features are provided by means of: usage equity for all the categories of users, so that additional available special devices do not put some visitors in a worse position; simplicity, so that an action does not demand special knowledge, skills, or language understanding; usage flexibility, so that the same device could be easily operated by many groups of people; signal perception easiness by blind, deaf people, or people with lower level of attention, mentally ill people; mistakes safety, so that accidental, unintentional action will not create a dangerous situation somehow; minimum effort, so that a continual usage of a device causes minimal fatigue; or single action takes very small effort; necessary space for special devices that people use, and proper size and zones of access for different people.

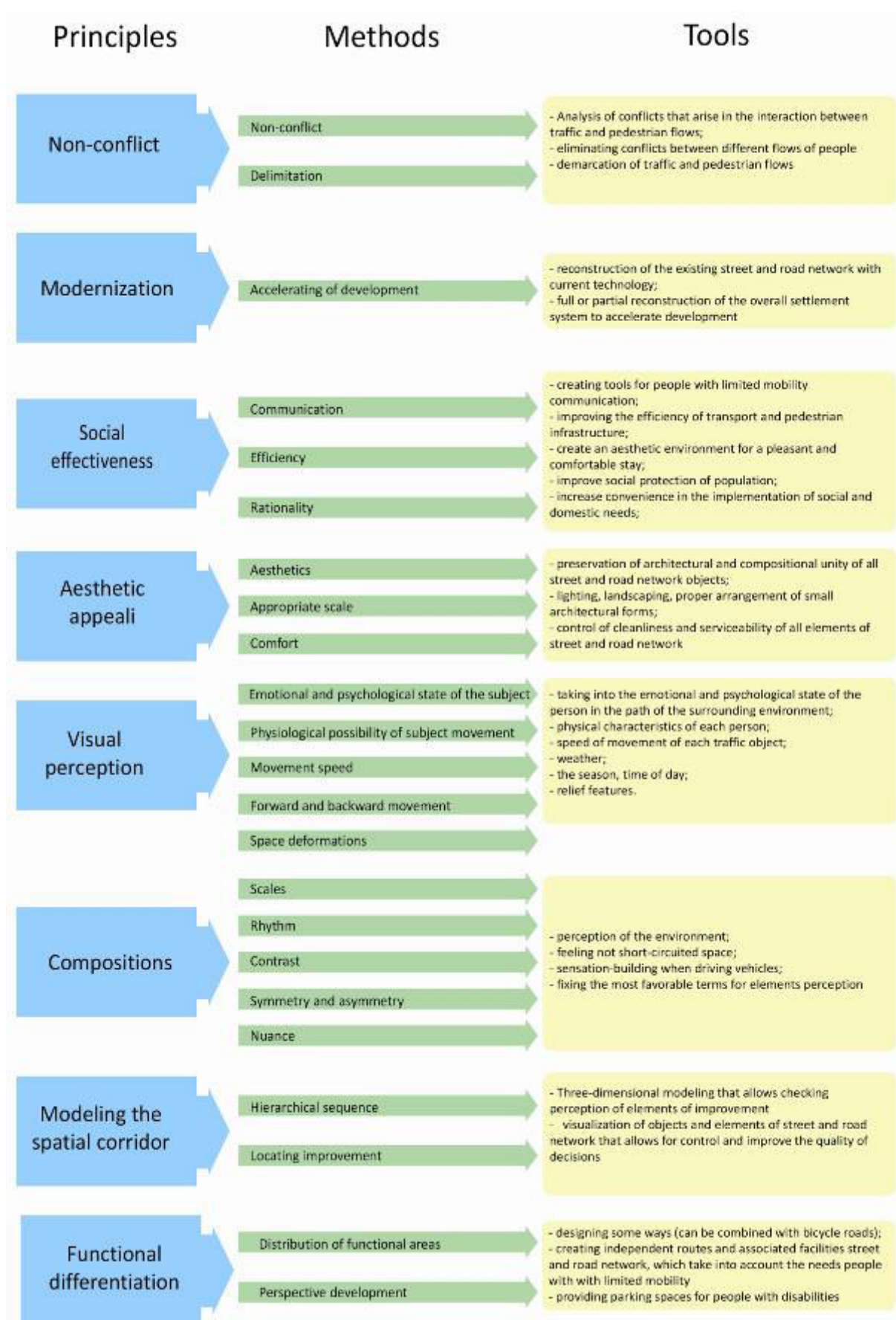


Figure 2 – Principles, methods and designing barrier-free street and road network

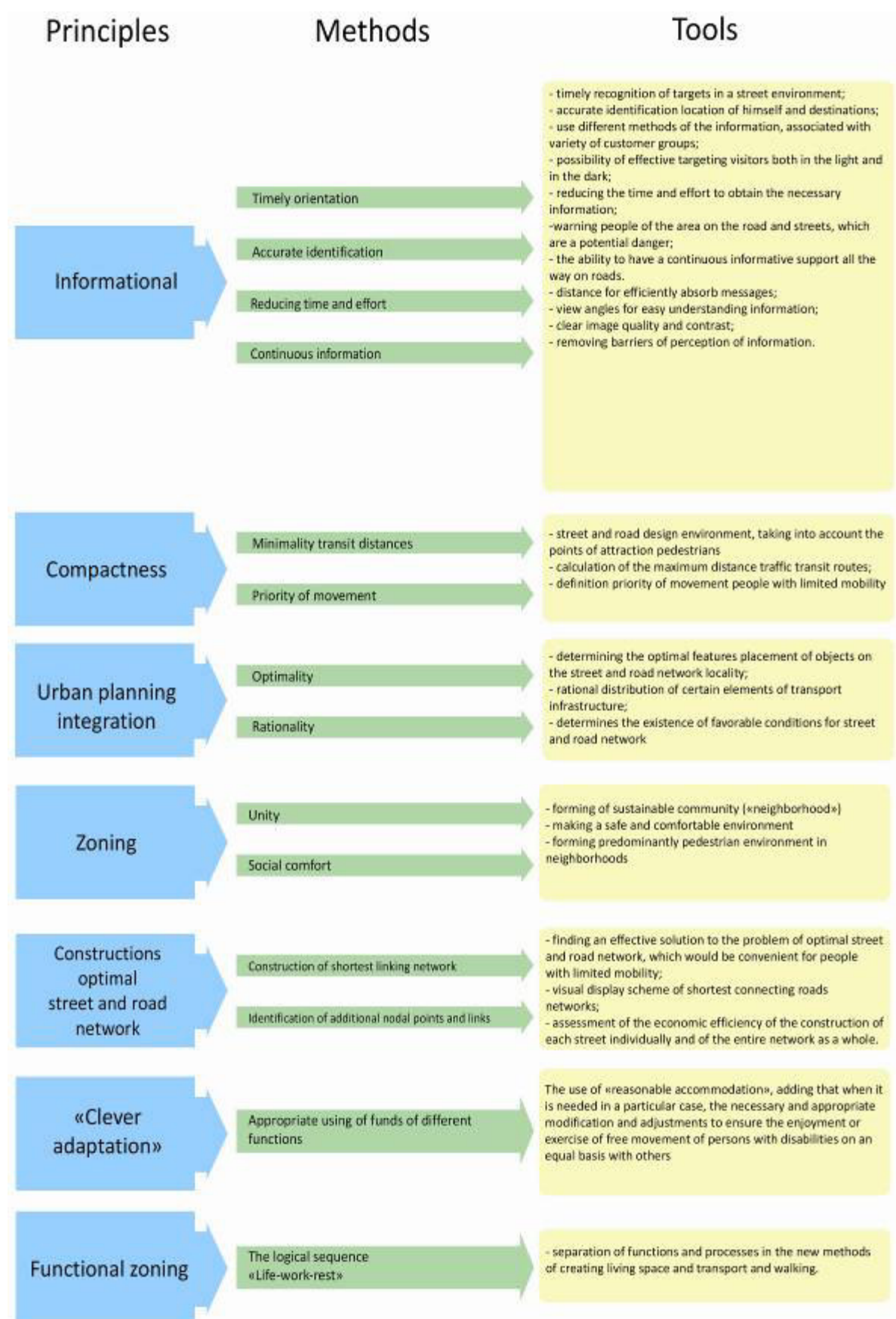


Figure 2 – Principles, methods and designing barrier-free street and road network (continuance)

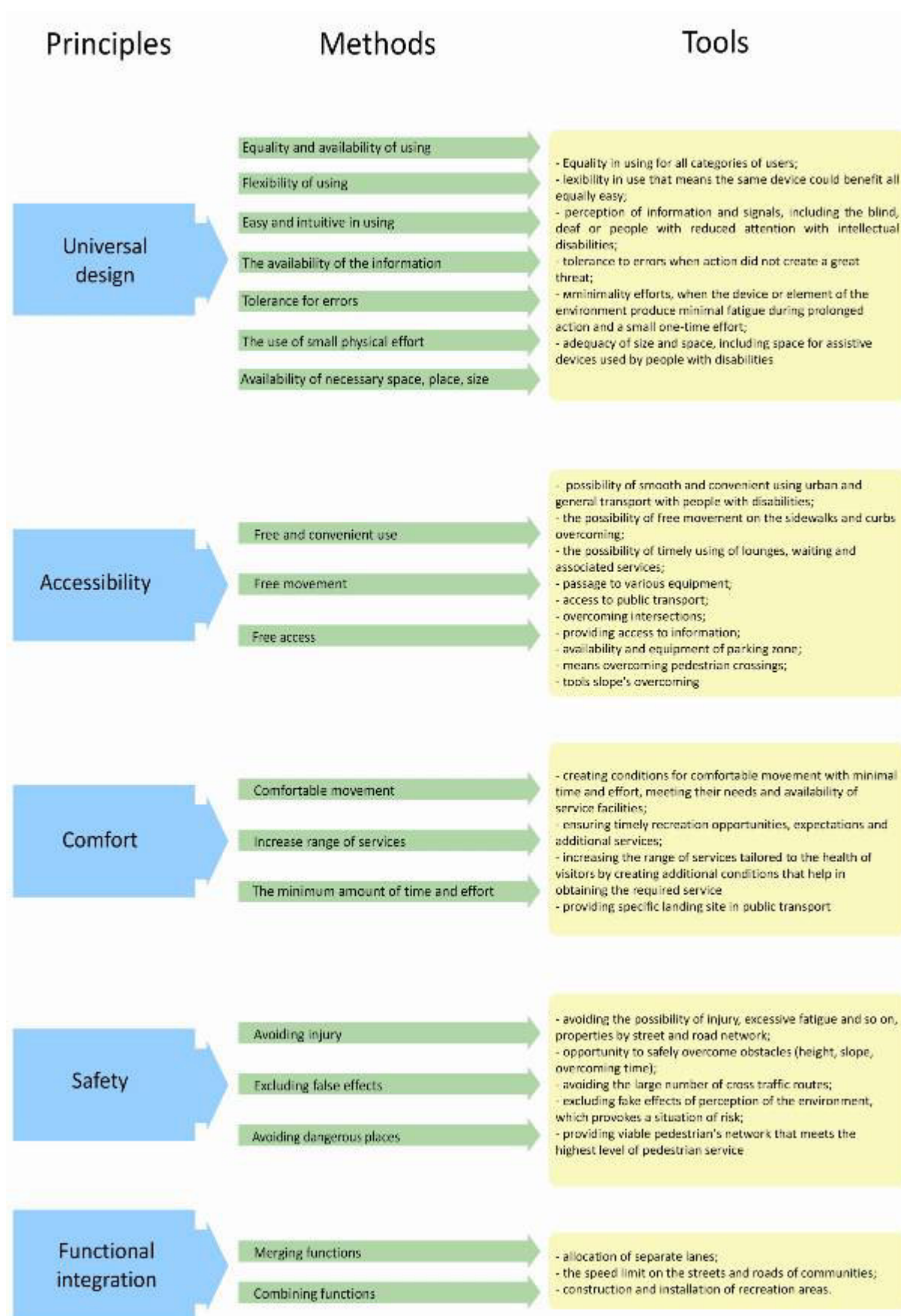


Figure 2 – Principles, methods and designing barrier-free street and road network (continuance)

Free space and access principle means that person has an ability to move in a space without any limitations and with maximum comfort; he/she has free access to devices and facilities, public and private transportation; he/she have an ability to move easily by sidewalk, use apparels without any help of other people; he/she has available parking spot, devices for crossing the street at crosswalks.

Comfort principle includes: conditions creation for comfortable transportation through a city; increasing number of services; minimal time waste; minimal efforts; availability for rest, comfortable waiting, and additional service.

Safety principle is intended to protect from traumas, dangerous places; decrease risks in the places of intersection of many directions traffic; help to deal with constraints (height, inclination, time); eliminate possibly misunderstandable signals and effects of environment, which increase risks

Informativeness principle helps orient in the space in a timely manner; gives precise identification of location; decreases efforts and optimizes time of a person; provides with continuous information while moving in traffic, no matter what the physical abilities or level of intelligence a person has.

Principle of the reasonable adaptation means that the need of modifications and improvements of particular special devices are properly investigated and evaluated, so that any excessive expenses risks and enormous efforts are being eliminated. Idea: «Make changes where it is needed, not where it is possible».

Taking into consideration United Nations convention and foreign best practices in designing non-barrier street and road environment, it can be defined another principle - *principle of social effectiveness*. This principle creates communication environment for the people with various levels of disabilities, gives an opportunity to freely move and be among the other people, to socialize and communicate, take part in public life, be employed and socially protected.

Conclusions. Street and road network design needs a lots of improvements and renovations to meet a special demands of people with limited mobility. Principles and methods of designing street and road infrastructure that were covered in the article, need a development of the calculation particular parameters methodology (width, inclination, speed of a stream, time, needed to crosswalk the street, zone of observation), which will allow improve PLM quality of life, increase their life standards, involve them in public activities, and increase a chance of their participation in social life along with all its members.

References

1. ДБН В.2.2-17-2006. Будинки і споруди. Доступність будинків і споруд для маломобільних груп населення [Чинний від 2007-05-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 20 с. – (Державні будівельні норми України).
DBN V.2.2-17-2006. Budinki i sporudi. Dostupnist budinkiv i sporud dlya malomobilnih grup naseleennya. [Chinniy vid 2007-05-01]. – K. : Minregionbud Ukrayini, 2007. – 20 s. – (Derzhavni budivelni normi Ukrayini).
2. McIntosh R. P. *The Background of Ecology: Concept and Theory* / Robert P. McIntosh // Cambridge University Press. – London, N.-Y., New Rochelle, Sydney, Melbourne, 1985. – 383 p.
3. Досвід та перспективи розвитку міст України // Проектно-планувальні аспекти містобудування: зб. наук. пр. – К. : Ін-т Діпромисто, 2004. – Вип. 7. – 188 с.
Dosvid ta perspektivi rozvitku mist Ukrayini // Proektno-planuvalni aspekti mistobuduvannya: zb. nauk. pr. – K. : In-t Dipromisto, 2004. – Vip. 7. – 188 s.
4. Ключниченко Є. Є. Соціально-економічні основи планування та забудови міст / Є. Є. Ключниченко. – К. : Укр. акад. архит., 1999. – 348 с.
Klyushnichenko E. E. Sotsialno-ekonomichni osnovi planuvannya ta zabudovi mist / E. E. Klyushnichenko. – K. : Ukr. akad. arhit., 1999. – 348 s.

5. Сардаров А. С. Архитектура автомобильных дорог / А. С. Сардаров. – М. : Транспорт, 1993. – 269 с.
Sardarov A. S. Arhitektura avtomobilnyh dorog / A. S. Sardarov. – M. : Transport, 1993. – 269 s.
6. Габрель М. М. Просторова організація містобудівних систем: монографія / М. М. Габрель. – К. : АСС, 2004. – 399 с.
Gabrel M. M. Prostorova organizatsiya mistobudivnih sistem: monografiya / M. M. Gabrel. – K. : ASS, 2004. – 399 s.
7. Дёмин Н. М. Управление развитием градостроительных систем / Н. М. Дёмин. – К. : Будівельник, 1991. – 184 с.
Demin N. M. Upravlenie razvitiem gradostroitelnyh sistem / N. M. Demin. – K. : Budivelnik, 1991. – 184 s.
8. Manual Of Uniform Traffic Control Devices / FHWA. – The US Acces Board, 2004. – 864 p.
9. Piverkova A. Spatial analysis for detection of places in a city with a high riskiness or handicapped persons: master thesis / A. Piverkova. – University of Pardubice, 2008. – 161 p.
10. Dufour D. Практична довідка PRESTO. Велосипедисти і пішоходи. Українська версія / D. Dufour, Ligtermoet&Partners. – Нідерланди, 2010. – 8 с.
11. Иодо И. А. Основы градостроительства. Теория и методология / И. А. Иодо – Минск, 1983. – 199 с.
Iodo I. A. Osnovy gradostroitelstva. Teoriya i metodologiya / I. A. Iodo – Minsk, 1983. – 199 s.
12. Лобанов Е. М. Транспортная планировка городов / Е. М. Лобанов. – М. : Транспорт, 1990. – 240 с.
Lobanov E. M. Transportnaya planirovka gorodov / E. M. Lobanov. – M. : Transport, 1990. – 240 s.
13. Ткаченко І. В. Принципи розміщення елементів благоустрою автомобільних доріг: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми / Ткаченко І. В. – Київ, 2013. – 20 с.
Tkachenko I. V. Printsipi rozmishchennya elementiv blagoustroyu avtomobilnih dorog: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: 05.22.11 – avtomobilni shlyahi ta aerodromi / Tkachenko I. V. – Kiyiv, 2013. – 20 s.
14. Mace R. What is Universal Design [Electronic resource] / Ronald Mace. – Access mode: <http://universaldesign.ie/what-is-universal-design/the-7-principles/the-7-principles.html>.
15. Доступність до об'єктів житлового та громадського призначення для людей з особливими потребами інвалідністю: методичний посібник. / ВГСПО «Національна Асамблея інвалідів України»: Я. Грибальський, В. Куцевич, К. Іванова, О. Полозюк, О. Журбенко. – К., 2007. – 138 с.
Dostupnist do ob'ektiv zhitlovogo ta gromadskogo pryznachennya dlya lyudey z osoblivimi potrebami invalidnistyu: metodichniy posibnik. / VGSPo «Natsionalna Asambleya invalidiv Ukrayini»: Ya. Gribalskiy, V. Kutsevich, K. Ivanova, O. Polozyuk, O. Zhurbenko. – K., 2007. – 138 s.
16. Офіційний сайт Організації Об'єднаних Націй (ООН). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.un.org>.
Ofitsiyiniy sayt OON. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.un.org>.

© Lytvynenko T., Ivasenko V.
Received 12.04.2016

Краюшкіна К.В., к.т.н., доцент

Химерик Т.Ю., к.т.н., доцент

Скрипченко О.В., аспірант

Національний авіаційний університет, м. Київ

РОЗРАХУНОК АРМУВАННЯ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Відомо, що багатократний циклічний вплив осевих зусиль від транспортного потоку, який рухається по автомобільній дорозі, збільшує навантаження на всю конструкцію дорожнього одягу. Досліджено, що надалі це призводить до таких розповсюджених явищ, як колійність, розтріскування від утомленості, а також пластичні деформації шару зносу. Виявлено, що заміна шару зносу тільки тимчасово поліпшує ситуацію, оскільки деформації, які з'являються в основі дорожнього одягу, швидко поширюються й на новий шар, викликаючи передчасний знос. Установлено, що армування асфальтобетонного дорожнього покриття дозволяє збільшити строк служби покриттів автомобільних доріг втричі за рахунок скорочення термічного розтріскування і розтріскування від утомленості, відображених тріщин та осідання. Витрати на ремонтні заходи й експлуатаційне утримання в армованого покриття нижчі, ніж у неармованого, завдяки збільшенню строку експлуатації та розширенню інтервалів між відновлювальними роботами.

Ключові слова: *армування, базальтові волокна, фібра.*

Краюшкіна К.В., к.т.н., доцент

Химерик Т.Ю., к.т.н., доцент

Скрипченко О.В., аспірант

Национальный авиационный университет, г. Киев

РАСЧЕТ АРМИРОВАНИЯ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Известно, что многократное циклическое влияние осевых усилий от движущегося по автомобильной дороге транспортного потока увеличивает нагрузку на всю конструкцию дорожной одежды. Исследовано, что в последствии это приводит к таким распространенным явлениям, как колееность, усталостное растрескивание, а также пластические деформации слоя износа. Определено, что замена слоя износа только временно улучшает ситуацию, поскольку зародившиеся деформации в основании дорожной одежды вскоре распространяются и на новый слой, вызывая преждевременный износ. Определено, что армирование асфальтового дорожнего покрытия позволяет увеличить срок службы покрытий автомобильных дорог в три раза за счет сокращения термического и усталостного растрескивания, отраженных трещин и осадки. Затраты на ремонтные мероприятия и эксплуатационное содержание у армированного покрытия ниже, чем у неармированного, благодаря увеличению срока эксплуатации и расширению интервалов между восстановительными работами.

Ключевые слова: *армирование, базальтовые волокна, фибра.*

Krayushkina K., PhD, Associate Professor
Khymerik T., PhD, Associate Professor
Skrypchenko O., post-graduate
National Aviation University, Kyiv

ESTIMATION OF REINFORCEMENT OF NON-RIGID ROAD STRUCTURES

The effect of repeated cyclic axial forces from moving on the road traffic flow, increases the load on the entire structure of the pavement. In consequence this leads to such common phenomena as rutting, fatigue cracking and plastic deformation of the wear layer. Over the years, the number of vehicles increases, which only exacerbates the problem. Replacement of the wear layer only temporarily improves the situation, since the strain originated at the base of the pavement soon spread to the new layer, causing premature wear. Reinforcement of asphalt road covering allows to increase the service life of pavement of highways three times over through reduced thermal and fatigue cracking, reflection cracking and precipitation. Due to the lifetime extension and expansion of intervals between restoration work costs for maintenance measures and operational maintenance have reinforced coating is lower than that of unreinforced.

For increased strength and durability, reducing or eliminating such damage, you can use the effect of reinforcement. Reinforcement of pavements involves the arrangement of additional layers or introduction to the design of the reinforcing element, in particular, geonet.

Reinforcing geogrids shall perform the following functions: enhancing the strength of asphalt pavement under tension; perception and even distribution over a greater area coverage of the major horizontal stress is tensile.

In contrast to the unreinforced samples of asphalt concrete, which typically occurs one big crack in reinforced samples formed small distributed cracks.

The geogrids shall meet the following requirements:

- 1) reinforcing geogrid must contain the free surface at least 75 % of the area of the grid, which allows direct contact of the layers of asphalt concrete over the mesh and under it;*
- 2) the cell size should be 2 – 2,5 times greater than the characteristic size of the particles of mineral filler in asphalt;*
- 3) strength of geogrid with a width of 1 m in the longitudinal and transverse directions shall be not less than 50 kN/m.*

Geonet recommended for reinforcement of monolithic layers of asphalt pavement. Reinforcement of the monolithic layer bottom face or the top of geogrids with tensile strength greater than the strength of the material layer is tensile in bending, increases the calculated strength of the structure according to the third criterion of strength (tensile strength in bending of monolithic layers), and this will reduce the thickness of the whole structure by at least 10 %. Use of geogrids can and as tradingperiod interlayer, preventing the emergence of a «mirrored» surface cracks, repair (laying a new layer of asphalt. Geogrid can be laid as the old paint, and between coats of the new coating.

Keywords: *reinforcement, basalt fiber, fiber.*

Вступ. Розв'язання проблем, пов'язаних з інтеграцією України у Європейську транспортну систему, підвищенням інтенсивності й вантажонапруженості руху автомобілів, вимагає поліпшення експлуатаційного стану доріг, їх якості та довговічності відповідно до вимог сучасного ринку учасників руху, що неможливо без упровадження новітніх матеріалів і раціональних технологій улаштування нових та ремонтів існуючих автомобільних доріг, які забезпечать економічність виконаних робіт, безпеку і комфортність дорожнього руху.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. У сучасному будівництві дорожній одяг з нежорстким покриттям займає провідне місце в усьому світі. В Україні до 90% автомобільних доріг вищих категорій мають покриття з асфальтобетону. Збільшенню міцності, зменшенню деформативності та стійкості проти різного роду руйнувань цього матеріалу присвячено дослідження [1 – 4].

Одним з найбільш ефективних заходів підтримання транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів на достатньому рівні є застосування геосинтетичних матеріалів як армуючих прошарків.

Армуючий матеріал, який застосовується при будівництві, реконструкції та ремонтах доріг, сприймає й перерозподіляє розтяжні зусилля і попереджає надлишкову горизонтальну деформацію подовження поблизу підшви шару при його згині, що виникають при багатократних короточасних впливах колісного навантаження від автотранспорту. Він повинен також сприймати і перерозподіляти розтяжні напруги та попереджувати надлишкову деформацію, які виникають у деяких перерізах від тривалого температурного впливу [5 – 8].

Застосування геосинтетичних матеріалів як армуючих прошарків в асфальтобетонних шарах можливе у двох напрямках: по-перше, збільшення міжремонтних строків служби армованого покриття і зниження витрат на його утримання за рахунок уповільнення процесів тріщиноутворення й колієутворення; по-друге, зниження витрат на будівництво армованого покриття шляхом деякого зменшення його товщини (без збільшення міжремонтних строків служби). Техніко-економічні розрахунки і досвід експлуатації армованих покриттів показують, що оптимальним напрямом застосування є перший, хоча в деяких випадках можливе застосування другого напрямку [9 – 10].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Таким чином, попередніми дослідженнями достатньо обґрунтовано можливості: поліпшення якості бітуму за рахунок уведення полімерних добавок; розроблення нових складів асфальтобетону шляхом додавання у суміш різних полімерних і мінеральних волокон; удосконалення організації технологічного процесу приготування матеріалів покриттів тощо. Однак при цьому використання базальтоволоконних матеріалів для армування дорожніх конструкцій з асфальтобетонним покриттям за умов зростання інтенсивності руху й вантажопідйомності транспортних засобів поки ще залишається не достатньо дослідженим питанням дорожнього будівництва.

Мета дослідження – обґрунтування необхідності розроблення раціональної технології дисперсного і напрямного армування дорожніх конструкцій нежорсткого типу (з асфальтобетонним покриттям) для підвищення транспортно-експлуатаційних показників автомобільних доріг в умовах стрімкого розвитку транспортних потоків.

Основний матеріал і результати. Базальтові волокна (БВ) і безперервні базальтові волокна (ББВ), отримані плавленням гірських базальтових порід, мають високі значення характеристик міцності, а також хімічну, корозійну та термічну стійкість до перепадів температур і знакоперемінних навантажень, але при цьому ще й відзначаються низькою вартістю [1 – 3]. Завдяки цьому, ББВ забезпечують високі будівельні властивості матеріалів, виготовлених на їх основі, а саме: фібр, сіток і суцільних полотен, нетканих

геотекстильних матеріалів, арматурних стрижнів, застосування яких у дорожньому будівництві дозволяє підвищувати стійкість асфальтобетонних покриттів до впливу транспортних навантажень і природно-кліматичних факторів, збільшити міжремонтні строки та ресурси різних конструктивних шарів, зменшити вартість будівництва і ремонтів автомобільних доріг.

Крім того, перспективним є застосування базальтових виробів – профілів, колесовідбійників, огорожень, тюбінгів для тунелів, стовпів освітлення і дорожніх знаків, лотків тощо.

Для отримання БВ з оптимальними властивостями була розроблена комплексна математична модель процесу виробництва й отримані уніфіковані диференціальні рівняння, які враховують теплообмін, текучість, витягування волокон як до відриву елементарних ниток, так і після їх відриву (первинне та вторинне витягування).

Рішення відповідних диференціальних рівнянь дозволило отримати такі розрахункові рівняння.

Для визначення температури БВ у будь-якому локальному перерізі (x) в безрозмірному вигляді запропоновано таку залежність:

$$V(x) = \frac{t_f - t(x)}{t_f - t_0} = \exp \left[-\sqrt{2\pi} \left(\frac{\lambda_{\varepsilon 0}}{C_0 \rho_0} \cdot \frac{L}{Q} \right) \frac{\bar{\lambda}_\varepsilon}{\rho c v_2} \cdot Re^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L}{r_{00}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\bar{W} - \bar{U}(x)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\bar{x}} \sqrt{\bar{r}(x)} d\bar{x} \right) \right], \quad (1)$$

де Re – середнє значення границі міцності БВ,

$$Re_\varepsilon = \frac{U_0 r_{00}}{v_2}; \quad (2)$$

$\bar{W}$ – термодинамічна робота адгезії,

$$\bar{W} = \frac{W}{U_0}; \quad (3)$$

W – робота когезії;

U – початкова швидкість;

η – в'язкість;

F – сила взаємодії, що обумовлює початок деформації;

T – ємність катіонного обміну;

$$\bar{U}(x) = \frac{U(x)}{U_0}; \quad \bar{r}(x) = \frac{r(x)}{r_{0\varepsilon}}; \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L}; \quad \bar{\rho}_\varepsilon = \frac{\rho_\varepsilon}{\rho_{\varepsilon 0}}; \quad \bar{\lambda}_\varepsilon = \frac{\lambda_{\varepsilon 0}}{\lambda_\varepsilon}; \quad \bar{v}_\varepsilon = \frac{v_{\varepsilon 0}}{v_\varepsilon}; \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}; \quad \bar{c} = \frac{c}{c_0};$$

індекс « ε » – газ; « 0 » – базальтові волокна; « 0 » – початкове значення.

$\bar{U}(x)$ – швидкість витягування;

$\bar{r}(x)$ – радіус БВ на ділянці витягування;

L – довжина ділянки витягування;

$Q = \pi r_{00}^2 U_0$ – витрата матеріалу на БВ;

W_ε – швидкість газового потоку;

t_f – температура газового потоку;

$t(x)$ – температура БВ;

C – теплоємність;

ρ – щільність;

v – в'язкість;

λ – теплопровідність.

Рівняння нерозривності має вигляд

$$r^2(x) \overline{U}(x) = 1.$$

Розрахунок швидкості витягування ведеться поінтервально

$$\overline{U}\left(\frac{i+1}{k}\right) = \overline{U}\left(\frac{i}{k}\right) + \frac{\overline{U}'\left(\frac{i}{k}\right)}{1!} \left(\frac{1}{k}\right) + \frac{\overline{U}''\left(\frac{i}{k}\right)}{2!} \left(\frac{1}{k}\right)^2 + \dots; \quad (5)$$

$$i=0,1,2,\dots,(k-1).$$

Для початкової ділянки $\overline{U}(0) = 1$;

$$\overline{U}'(0) = \frac{2}{3} \frac{\sigma_0}{\eta_0 r_{00}} \cdot \frac{L}{U_0} \cdot \frac{\sigma_0}{\eta r} \cdot \frac{\sigma}{\eta r} = 1, \quad (6)$$

де σ – поверхневий натяг.

Надалі приймається при визначенні $\overline{U}\left(\frac{i+1}{k}\right)$ значення $\overline{U}\left(\frac{i}{k}\right)$ з розрахунку попереднього інтервалу

$$\overline{U}'\left(\frac{i+1}{k}\right) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_0}{\eta_0 r_{00}} \cdot \frac{L}{U_0} \cdot \frac{\overline{\sigma}}{\overline{\eta}\left(\overline{T}\left(\frac{i}{k}\right)\right)\overline{r}\left(\frac{i}{k}\right)}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \overline{U}''\left(\frac{i+1}{k}\right) = & \frac{4}{9} F \cdot \frac{\overline{\sigma}_z}{\overline{\eta}_z\left(\overline{T}\left(\frac{i}{k}\right)\right)} \overline{U}\left(\frac{1}{k}\right) - \frac{1}{\overline{\eta}\left(\overline{T}\left(\frac{i}{k}\right)\right)} \cdot \frac{d\overline{\eta}}{d\overline{T}} \cdot \frac{d\overline{T}}{dx} + \\ & + \frac{R_{eo}}{3} \cdot \frac{\overline{\rho}\overline{U}\left(\frac{i}{k}\right)}{\overline{\eta}\left(\overline{T}\left(\frac{i}{k}\right)\right)} \cdot \frac{2}{3} F \frac{\overline{\sigma}}{\overline{\eta}\left(\overline{T}\left(\frac{i}{k}\right)\right)} \overline{U}^{\frac{1}{2}}\left(\frac{i}{k}\right) + \\ & + \frac{1,328}{3\sqrt{2}} \left(\frac{L}{r_{00}}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{R_{ez}} \left(\overline{W} - \overline{U}\left(\frac{i}{k}\right)\right)^{\frac{3}{2}} \overline{U}^{\frac{1}{2}}\left(\frac{i}{k}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{де } F = \frac{\sigma_0}{\eta_0 r_{00}} \cdot \frac{L}{U_0}; \quad R_{eo} = \frac{\rho_0 U_0 t}{\eta_0}$$

Алгоритм розрахунку такий:

1-й цикл:

$$\overline{r} = 1; \overline{t}(x) = t\left(\frac{1}{k}\right); \overline{\eta} = \overline{\eta}\left(\frac{1}{k}\right); \overline{U} = \overline{U}\left(\frac{1}{k}\right); \quad (9)$$

2-й цикл:

$$\overline{r} = \sqrt{\frac{1}{\overline{U}\left(\frac{1}{k}\right)}}; \overline{t}\left(r\left(\frac{1}{k}\right)\right); \overline{\eta}\left(t\left(\frac{1}{k}\right)\right); \overline{U} = \overline{U}\left(\frac{2}{k}\right); \quad (10)$$

3-й цикл:

$$\overline{r} = \sqrt{\frac{1}{\overline{U}\left(\frac{2}{k}\right)}}; \overline{t}\left(r\left(\frac{2}{k}\right)\right); \overline{\eta}\left(t\left(\frac{2}{k}\right)\right); \overline{U} = \overline{U}\left(\frac{3}{k}\right). \quad (11)$$

У результаті були отримані БВ з оптимальними розмірами – рублені на відрізки довжиною 15 – 30 мм і діаметром 13 – 18 мкм, які прийняті для досліджень дисперсного армування асфальтобетону і названі базальтовою фіброю (БФ), що придатна для дисперсного (об'ємного) армування асфальтобетонів різних типів. БФ при ретельному перемішуванні рівномірно розподіляється в суміші по всьому обсягу в різних напрямках таким чином, що в кожному кубічному сантиметрі асфальтобетону знаходиться від 20 до 30 штук БФ, що суттєво збільшує його міцність на згин, стиск, удар та тріщиностійкість, особливо до утворення відображених тріщин.

Загальний вигляд БФ наведений на рис. 1, армованого зразка – на рис. 2.



Рисунок 1 – Базальтова фібра довжиною 15 – 30 мм і діаметром волокон 13 – 18 мкм

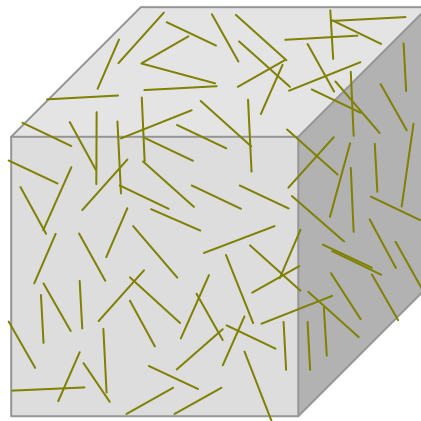


Рисунок 2 – Дисперсне (об'ємне) армування асфальтобетону

Визначення залежності міцності на розтяг при згині гарячого дрібнозернистого асфальтобетону типу «А» від довжини фібри наведено на рисунку 3.

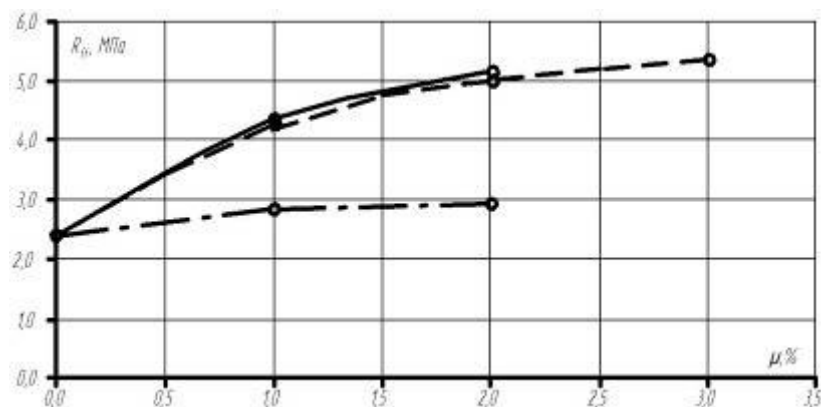


Рисунок 3 – Залежність міцності на розтяг при згині асфальтобетону типу «А», армованого базальтовою фіброю:

1 (суцільна лінія) – базальтова фібра довжиною 24 мм;
2 (пунктирна лінія) – 12 мм; 3 (штрих-пунктирна лінія) – 30 мм

З результатів досліджень видно, що для армування асфальтобетону найбільш придатна БФ довжиною 24 мм. Уміст БФ довжиною 24 мм повинен бути в межах 2 – 3% від ваги мінеральних складових (щебеню, піску, мінерального порошку). При такому армуванні міцність на розтяг при згині збільшується в 1,8 – 2,5 рази, міцність на стиск – на 37 – 40% і можливе підвищення тріщиностійкості у

2,0 – 2,5 рази, що дозволить попереджувати утворення колійності на покритті та збільшувати строки експлуатації автомобільних доріг.

БФ може бути застосована при приготуванні гарячих і холодних типів асфальтобетонів. Можлива технологія додавання БФ як до мінерального порошку (роздільна), так і безпосередньо до мінеральної частини суміші (сумісної) не впливає на фізико-механічні показники асфальтобетону.

Приготування гарячого асфальтобетону здійснюється при температурі 140 – 150°C, холодного – при 95 – 100°C. Час змішування гарячих і холодних сумішей за роздільною технологією складає 14 – 15 хв, за сумісною – 10 – 12 хв.

Уведення БФ поліпшує фізико-механічні властивості холодних асфальтобетонних сумішей, попереджує їх злежуваність; такі суміші мають підвищену міцність на стиск (на 70 – 80% більше, ніж еталонні холодні асфальтобетонні суміші). Значення коефіцієнта водостійкості знаходиться в межах норми завдяки тому, що при змішуванні фібри з бітумом утворюються граничні шари, які перешкоджають відшаруванню бітумного в'язучого з поверхні волокон і проникненню води під час експлуатації.

Це дає можливість застосування холодних асфальтобетонних сумішей, дисперсно-армованих базальтовою фіброю для аварійного ремонту доріг, який проводиться в складних погодних умовах – за пониженої температури і підвищеної вологості, для забезпечення безперебійного і безпечного руху транспорту протягом року.

Економічна ефективність використання дисперсно-армованих базальтовою фіброю асфальтобетонів різних типів виникає за рахунок збільшення строку служби дорожніх одягів, можливого зменшення товщини верхнього шару, а також зниження витрат на ремонт і експлуатаційне утримання доріг.

Окрім дисперсного армування асфальтобетонної суміші базальтовою фіброю, в дорожньому будівництві застосовується напрямне армування дорожньої конструкції сітками й суцільними полотнами.

Армування різних шарів дорожніх конструкцій (земляне полотно, основа, покриття) базальтоволоконними прошарками у вигляді сіток і полотен призводить до підвищення експлуатаційної надійності, стійкості та довговічності доріг, зменшення витрат традиційних дорожньо-будівельних матеріалів, об'ємів земляних робіт, енерго- і транспортних витрат. Базальтоволоконні прошарки виконують функції переривання тріщин, розділення шарів, фільтрації, дренажа та гідробар'єра.

Загальний вигляд базальтових сіток наведено на рисунку 4.

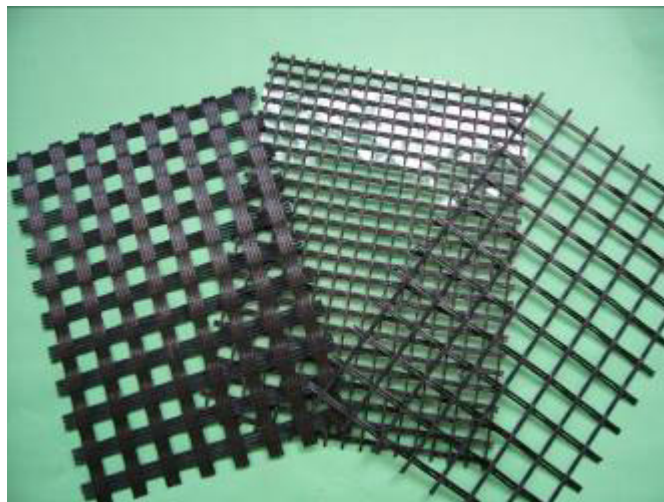


Рисунок 4 – Загальний вигляд базальтових сіток

Як видно з рис. 4, сітка – це плоска жорстка структура з рівномірно розташованими отворами змінних або постійних розмірів, що утворюються з двох систем ББВ, накладених одна на одну і скріплених третьою системою волокон, просочених полімерною композицією на основі бітуму.

Суцільне полотно – це плоска структура, яка складається із суцільно переплетених у поздовжньому і поперечному напрямках ББВ.

Дорожні сітки із ББВ мають ряд переваг: виготовлені з природної сировини, витримують високі навантаження та не витягуються під дією навантажень, мають високу хімічну стійкість і довговічність в експлуатації, витримують високі й низькі температури, вартість у 2,5 – 3 рази нижча, ніж полімерних. Порівняно зі скловолоконними, такі сітки не руйнуються під дією лужних середовищ, мають більш високу міцність та в цілому є сумісними з асфальтобетоном (субстратом).

Сумісністю є відповідність між фізичними і хімічними характеристиками нового й існуючого матеріалу. Невідповідність викликає розвиток внутрішніх напруг, які негативно впливають на всі складові композиції, а саме: субстрат, контактну область і новий матеріал. Значні внутрішні напруги сприяють утворенню тріщин від розтяжних напруг, зниженню несучої здатності, розшаруванню і руйнуванню матеріалу.

Для дорожнього будівництва були розроблені базальтові сітки марки ПСБ-Д (полотно сітчасте базальтове дорожнє), полотно марки НПБ-550К (полотно суцільне ткане (ниткопробивне) базальтове дорожнє) для особливо складних геологічних умов (болотисті місця, зсувні ділянки, для влаштування гідроізоляції на мостах) та ГПБ-Д (полотно суцільне голкопробивне (неткане) базальтове дорожнє) для укладання в земляне полотно. Основні технічні характеристики сіток і полотен на основі базальтових волокон наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1 – Технічні характеристики базальтових прошарків

Найменування показників	Технічні характеристики
Сітка ПСБ-Д	
Розривне навантаження не менше, кг	
– по ширині	120
– по довжині	120
Щільність, гр/м ²	250 ± 10
Подовження під дією навантаження, %	1 – 1,5
Просочення спеціальним складом забезпечує підвищення її міцності і жорсткості	
Полотно НПБ-550 К	
Розривне навантаження не менше, кг	
– по ширині	600
– по довжині	600
Щільність, гр/м ²	550 ± 10
Подовження під дією навантаження, %	12 – 17
Полотно ГПБ-Д	
Розривне навантаження не менше, кг	
– по ширині	50
– по довжині	40
Щільність, гр/м ²	(120 – 130) ± 10
Просочення для підвищення жорсткості	Полімерні композиції

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості базальтоволоконних прошарків

Найменування показників	Вид виробу		
	ткані		неткане суцільне полотно
	сітки	суцільне полотно	
Ширина, м	2 – 4	2,5 – 4	2 – 3,5
Розмір чарунок, м, не менше	25×25	–	–
Границя міцності при розриві, кН/м, не менше:			
вздовж волокон	50,0	30,0	4,0
поперек волокон	40,0	25,0	3,5
Границя міцності при розтягуванні, кН/м, не менше	300,0	400,0	–
Умовний модуль деформації (пружності), МПа	70,0	50,0	100-130
Повзучість, %/ годин	0,1	0,2	4
Залишки маси після кіп'ятіння протягом 3-х годин, відсоток від вихідної:			
у воді (H ₂ O)	99,9	99,9	100,0
у сірчаній кислоті (0,5H ₂ SO ₄)	97,5	98,0	100,0
у їдкому натру (0,5 NaOH)	92,0	95,0	98,0
(2 NaOH)	70,0	75,0	96,0
Випробування в камері штучного клімату протягом 600 годин	Витримує без зовнішніх змін, не ламається, не крихкий		
Температура плавлення, °С, не менше	1200	1200	1200

Найбільш важливими характеристиками базальтових прошарків для дорожнього будівництва є міцність на розрив, відносне подовження, повзучість. Повзучістю є залежність відносного подовження матеріалу під дією постійного навантаження від часу, при великому значенні якої довготривале навіть незначне навантаження може призвести до розриву прошарку.

Розривне навантаження сітки і полотна, витриманого в лужному та кислотному розчині, складає 80 та 70% від вихідної, що вдвічі більше, ніж за євростандартами, згідно з котрими ця величина повинна бути 40% від вихідної.

Величина модуля пружності сітки не нижча від модуля пружності асфальтобетону.

Розмір отворів вибраний достатнім для взаємопроникання матеріалів і забезпечення зчеплення між шарами.

Були розроблені вимоги до прилипання (адгезії) базальтоволоконних матеріалів до в'язучого, що використовуються як основа (підґрунтування) при застосуванні прошарків у верхніх шарах дорожнього одягу.

Випробування виконувались із стрічками шириною 5 см, довжиною 15 см на зразках асфальтобетону діаметром 7 см. Адгезію визначали за величиною сили відриву ручним динамометром за розробленою методикою. Результати наведено в табл. 3.

Укладання базальтоволоконних прошарків виконується на всю ширину проїзної частини або локально на тріщини шляхом розкочування смуг на ширину тріщини поверх підґрунтування з бітуму чи катіоноактивної бітумної емульсії товщиною 0,8 – 1,1 л/м².

У зв'язку з тим, що існують різні види тріщин за своєю шириною та конфігурацією, перекриття їх повинно виконуватися смугами різної ширини відповідно до вимог табл. 4.

У дорожню конструкцію сітку ПСБ-Д укладають між основою зі щебеню й асфальтобетонним покриттям, полотно НПБ-550К – між піщаним і щебеним шарами, полотно ГПБ-Д – у верхню частину (робочий шар) земляного полотна.



Рисунок 5 – Застосування дорожньої сітки ПСБ-Д при будівництві доріг



Рисунок 6 – Укріплення насипів дорожньою сіткою ПСБ-Д

Адгезію базальтоволоконних матеріалів до шару в'язучого наведена в таблиці 3.

Таблиця 3 – Адгезія базальтоволоконних матеріалів до шару в'язучого

Матеріал розливу	Адгезія, Н/см, не менше	
	сітка	полотно ткане
Бітум рідкий	14,0	17,0
Бітум марки БНД 90/130	12,0	16,0
Катіонна бітумна емульсія	50,0	35,0

Таблиця 4 – Ширина перекриття тріщин базальтоволоконними смугами

Типи існуючих тріщин	Ширина смуги
Одиночні, чітко визначені відкриті поздовжні та поперечні тріщини шириною до 3 мм	25 см (по 12,5 см з обох сторін)
Безперервні поздовжні або поперечні тріщини шириною більше 3 мм з розгалуженням або відкриті. Розтріскування у вигляді тонких ліній із сіткою тріщин	50 см (по 25 см з обох сторін)
Сильно розгалужені поздовжні та поперечні тріщини шириною більше 5 мм. Сітка тріщин із дрібними отворами, явно відкриті	70 – 80 см (по 35 – 40 см з обох сторін)

При розділенні шарів дорожньої конструкції армуванням з одночасним поліпшенням умов дренажу прошарок укладається на всю ширину із загином на вищерозташований шар.

Поверхня, на яку укладається базальтоволоконний прошарок, повинна бути чистою, сухою, спрофільованою й ущільненою. Відсіпання щебеневого шару на укладений прошарок виконують способом «від себе» з мінімальним заїздом технологічного транспорту на відкрите полотно.

Висновки:

1. Наведено основні етапи використання базальтоволоконних матеріалів для дисперсного і прямого армування дорожніх конструкцій з асфальтобетонним покриттям для поліпшення безпеки і комфортності руху автомобільних перевезень в умовах постійного зростання інтенсивності й вантажопідйомності транспортних засобів.

2. Матеріали на основі базальтових волокон унаслідок своїх характеристик і вартості знаходять широке застосування в дорожньому будівництві.

3. Використання матеріалів із ББВ дозволяє суттєво підвищити якість, фізико-механічні й експлуатаційні характеристики дорожніх конструкцій, строки експлуатації асфальтобетонних покриттів.

Література

1. ДБН В.2.3-4:2007. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. – К. : Мінрегіонбуд України, ДП Укрархбудінформ, 2007. – 142 с.
2. Надежко А. А. Об усовершенствованных типах покрытий дорог высоких категорий / А. А. Надежко // Автомобильные дороги. – 1989. – № 11. – С. 24 – 25.
3. Адоряни К. Н. Разработка методов оптимизации и технологии приготовления обновленных асфальтобетонных смесей при ремонте покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.14 – будівельні конструкції, будівлі та споруди / К. Н. Адоряни. – К. , 1988. – 15 с.
4. Красиков О. А. Исследование изменения прочности дорожных одежд в годовом периоде / О. А. Красиков, Е. П. Павловская // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации дорог: сб. науч. тр. – Алматы : КазАТК, 1998. – С. 204 – 210.
5. Бондарева Э. Д. Армирование асфальтобетонных покрытий геосетками / Э. Д. Бондарева // Строительство и городское хозяйство. – 2011. – № 46. – С. 22 – 27.
6. Матвеев С. А. Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет / С. А. Матвеев, Ю. В. Немировский. – Новосибирск : Наука, 2006. – 348 с.
7. Левашов Г. М. Повреждаемость геосинтетических материалов при армировании покрытия из асфальтобетона / Г. М. Левашов // Материалы 63-й науч.-техн. конф. СибАДИ. – Омск : СибАДИ, 2009. – Кн. 1. – С. 116 – 120.
8. Сиротюк В. В. Технологическая повреждаемость некоторых геосинтетических материалов, применяемых для армирования асфальтобетонных покрытий / В. В. Сиротюк, Г. М. Левашов // Дороги и мосты. – М., 2010. – Вып. 23/1. – С. 85 – 96.
9. Сиротюк В. В. Конструкции дорожных одежд с армированным асфальтобетонным покрытием / В. В. Сиротюк, Е. Ю. Крашенинин // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – М., 2008. – № 4. – С. 71 – 76.
10. Батеро К. Решетки из геосинтетических материалов как арматура для асфальтовых покрытий с интенсивным дорожным движением / К. Батеро // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2000. – № 5. – С. 4 – 5.

References

1. DBN V.2.3-4:2007. Sporudi transportu. Avtomobilni dorogi. – K. : Minregionbud Ukrayini, DP Ukrarhbuildinform, 2007. – 142 s.
2. Nadezhko A. A. Ob usovershenstvovannyh tipah pokrytiy dorog vysokih kategoriy / A. A. Nadezhko // Avtomobilnye dorogi. – 1989. – № 11. – S. 24 – 25.
3. Adoryani K. N. Razrabotka metodov optimizatsii i tehnologii prigotovleniya obnovlennyh asfaltobetonnnyh smesey pri remonte pokrytii: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.23.14 – budivelni konstruksiyi, budivli ta sporudi / K. N. Adoryani. – K. , 1988. – 15 s.

4. Krasikov O. A. *Issledovanie izmeneniya prochnosti dorozhnyh odezhd v godovom periode* / O. A. Krasikov, E. P. Pavlovskaya // *Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii dorog: sb. nauch. tr.* – Almaty : KazATK, 1998. – S. 204 – 210.
5. Bondareva E. D. *Armirovanie asfaltobetonnyh pokrytiy geosetkami* / E. D. Bondareva // *Stroitelstvo i gorodskoe hozyaystvo.* – 2011. – № 46. – S. 22 – 27.
6. Matveev S. A. *Armirovannye dorozhnye konstruksii: modelirovanie i raschet* / S. A. Matveev, Yu. V. Nemirovskiy. – Novosibirsk : Nauka, 2006. – 348 s.
7. Levashov G. M. *Povrezhdaemost geosinteticheskikh materialov pri armirovanii pokrytiya iz asfaltobetona* / G. M. Levashov // *Materialy 63-y nauch.-tehn. konf. SibADI.* – Omsk : SibADI, 2009. – Kn. 1. – S. 116 – 120.
8. Sirotyuk V. V. *Tehnologicheskaya povrezhdaemost nekotorykh geosinteticheskikh materialov, primenyaemykh dlya armirovaniya asfaltobetonnyh pokrytiy* / V. V. Sirotyuk, G. M. Levashov // *Dorogi i mosty.* – M., 2010. – Vyp. 23/1. – S. 85 – 96.
9. Sirotyuk V. V. *Konstruksii dorozhnyh odezhd s armirovannym asfaltobetonnyim pokrytiem* / V. V. Sirotyuk, E. Yu. Krasheninina // *Avtomatizirovannye tehnologii izyskaniy i proektirovaniya.* – M., 2008. – № 4. – S. 71 – 76.
10. Batero K. *Reshetki iz geosinteticheskikh materialov kak armatura dlya asfaltovykh pokrytiy s intensivnym dorozhnym dvizheniem* / K. Batero // *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka.* – 2000. – № 5. – S. 4 – 5.

© Краюшкіна К.В., Химерик Т.Ю., Скрипченко О.В.
Надійшла до редакції 13.05.2016

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ КОЛІЙНОСТІ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

Визначено, що для ретельного аналізу та прийняття правильного рішення щодо призначення заходів з усунення причин колієутворення необхідне детальне оцінювання колійності, яке полягає в дослідженні поперечної конфігурації колії. З'ясовано, що відомі вітчизняні та закордонні методики оцінювання колійності частково розкривають питання колієутворення, при цьому процес визначення параметрів колії є трудомістким і малоінформативним. Розглянуто процес створення спеціалістами лабораторії автомобільних доріг і аеродромів Національного транспортного університету діючої моделі приладу для оцінювання колійності з використанням лазерного датчика. Встановлено, що розроблений прилад дає можливість визначати не лише максимальну глибину колії, а й отримувати дані для детального аналізу її поперечної конфігурації. При цьому прив'язка поперечного профілю до репера дозволяє отримувати не тільки фактичні дані про колійність у момент вимірювання, а й спостерігати за динамікою поперечного профілю в процесі експлуатації автомобільних доріг.

Ключові слова: дорожнє покриття, колійність, глибина колії, транспортно-експлуатаційні показники дорожнього покриття.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК И СРЕДСТВ ОЦЕНКИ КОЛЕЙНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Известно, что для тщательного анализа и принятия правильного решения о назначении мероприятий по устранению причин колееобразования необходима детальная оценка колеености, которая заключается в исследовании поперечной конфигурации колеи. Установлено, что известные отечественные и зарубежные методики оценки колеености частично раскрывают вопросы колееобразования, при этом процесс определения параметров колеи является трудоемким и малоинформативным. Рассмотрен процесс создания специалистами лаборатории автомобильных дорог и аэродромов Национального транспортного университета действующей модели прибора для оценки колеености с использованием лазерного датчика. Установлено, что разработанный прибор дает возможность определять не только максимальную глубину колеи, но и получать данные для детального анализа ее поперечной конфигурации. При этом привязка поперечного профиля к реперу позволяет получать не только фактические данные о колеености в момент измерения, но и наблюдать за динамикой поперечного профиля в процессе эксплуатации автомобильных дорог.

Ключевые слова: дорожное покрытие, колееность, глубина колеи, транспортно-эксплуатационные показатели дорожного покрытия.

IMPROVING THE METHODS AND TOOLS FOR EVALUATION OF RUTTING PAVEMENT

For a thorough analysis and make correct decisions about actions to quickly eliminate the causes rutting requires a detailed assessment, which is to investigate transverse configuration rut.

In Ukraine using 2-meter rail for assessing rutting. It defines only one parameter – the maximum depth rut. Famous foreign rutting evaluation tools can be divided into two groups. The first group includes tools as a rectilinear rail length of 6 feet. Measurements performing by ruler or Rut Wedge, thus determining the maximum rut depth. The second group includes various profilometers such as: «Transverse Profile Beam», «MLS profiler» and others. With profilometers can get more detailed transverse profile, but for the functioning the majority of profilometers requires additional tools are arranged on the car-laboratory.

The search for more information about rut parameters led to the creation the new tools for rutting evaluation by specialists Laboratory of roads and airfields National Transport University. The first version was the two-meter wooden measuring rail on the piers. Defining the parameters of rut enforced through a variety of measurement probes. Wind load of traffic have caused measurement error and turning the device.

After much tests design of the device been improved and as a result has developed a working model of the device for assessing rutting. The main element of the device is accurate laser sensor mounted in the measuring carriage. Also in the measuring carriage are other necessary sensors, control which performs embedded computer. The device is equipped with a rechargeable battery, which provides independent measurement of more than 100 transverse profiles. These measurements are recorded on the SD card. Data processing measurement performed on the computer with the software Microsoft Excel. In the operation of the device defined features of his work, conducted its improvement and, as a result, the method of evaluation of rutting using a new the device.

A device to determine the profile of the chosen sites length of 2 m with points at 1 cm. At the beginning and end points of the profile is performed binding to constant rapper using leveling.

Thus the device makes it possible to determine not only the maximum depth, but also get data for detailed analysis transverse configuration rut. A linking of transverse profile to the rapper can get not only the actual data rutting at the time of measurement, but also to observe the dynamics of transvers profile in service of highways.

Keywords: *pavement, rut, rut depth, transport and maintenance indexes of pavement*

Вступ. Колія є одним з найбільш поширених дефектів покриття. Аналіз даних досліджень, проведених за кордоном, показує, що утворення колійності надмірної глибини становить від 20 до 35% усіх причин зниження транспортно-експлуатаційних якостей автомобільних доріг. Детальна оцінка колійності дозволить виконати ретельний аналіз та прийняти правильне рішення щодо призначення заходів для швидкого усунення причин виникнення цього дефекту.

На сьогодні в Україні для оцінювання колійності використовують двометрову рейку [12], за допомогою якої визначають лише один параметр – максимальну глибину колії. При вимірюванні поза увагою залишається поперечна конфігурація колії, яка є необхідною для встановлення причин колієутворення. Необхідність оцінювання поперечної конфігурації колії обумовила виконання цих досліджень.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Нині вимоги до стану доріг загального користування на стадії експлуатації регламентовані нормативним документом [1].

Що стосується граничних деформацій, то в нормативному документі [1] вказано: «3.1.1 Покриття проїзної частини не повинно мати осідань, вибоїн, напливів чи інших деформацій, що утруднюють рух транспортних засобів». Головним недоліком цих норм є відсутність вимог до такого показника, як колійність і методика його визначення.

У нормах [2] теж немає конкретної методики визначення колійності. Сказано лише про те, що пересувна лабораторія повинна мати дерев'яні рейки довжиною 1 і 2 м та лінійку з міліметровими поділками для визначення глибини колій.

У нормативному документі [3], уведеному в Російській Федерації на заміну норм [2], наведена спрощена методика. Як указано в нормах [4], спрощений метод використовують для попереднього оцінювання характеру утворення колії, виявлення ділянок, які потребують усунення колії, призначення виду робіт і визначення їх орієнтовних обсягів. Методика базується на використанні двометрової рейки та вимірювального щупа (рис. 1).

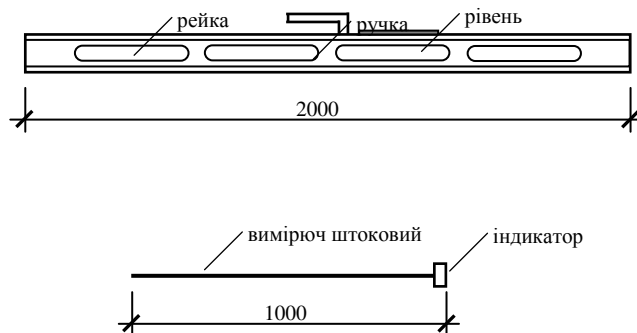


Рисунок 1 – Укорочена рейка та вимірювальний щуп для оцінювання стану поперечної рівності (колії)

За відсутності випорів рейку встановлюють на проїзну частину таким чином, щоб перекривати вимірювану колію [3].

Найбільш детальним джерелом інформації про колійність є рекомендації [4], в яких указано, що роботи з вимірювання колійності проводять у теплий період року за відсутності води на поверхні дороги. Для планування робіт на наступний рік вимірювання проводяться в осінній період після зниження температури повітря на відкритій місцевості до $+15^{\circ}\text{C}$ удень. Вимірювання слід завершити до того, як середньодобова температура повітря стане нижчою за 0°C .

Для детального оцінювання параметрів колієутворення рекомендується використовувати спосіб вимірювання вертикальних відміток із застосуванням укороченої рейки і підкладальних стаканів (рис. 2) [4].

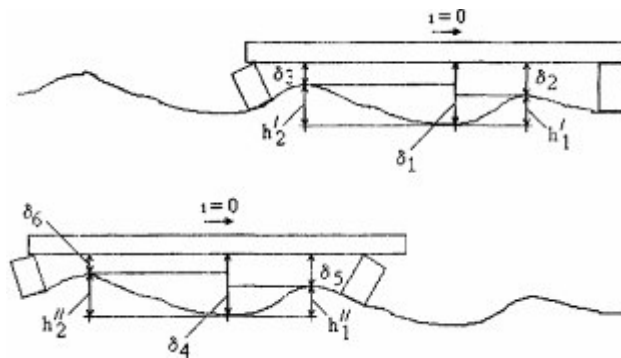


Рисунок 2 – Схема вимірювання параметрів колій за методикою вертикальних відміток

За методикою необхідно вимірювати величину найбільшого δ_1 і двох найменших δ_2 і δ_3 просвітів (рис. 2). При обробці результатів розраховують глибину колії відносно правого та лівого випорів як різницю $\delta_1 - \delta_2$ та $\delta_1 - \delta_3$ відповідно.

Аналізуючи методики, наведені в роботі [4], слід відзначити їх значну трудомісткість, відсутність можливості отримання чаші колії. Викликає сумнів і необхідність таких трудомістких робіт, результати яких ні в методиці розрахунку та прогнозування колієутворення на нежорстких дорожніх одягах [5], ні в рекомендаціях щодо усунення колій на автомобільних дорогах [6] не використовуються.

У білоруському стандарті [7] наведені вимоги до дефектів покриттів різних типів, у тому числі вимоги до колійності. Гранично допустима глибина колії залежно від рівня вимог для покриттів капітального і полегшеного типів – 3 – 5 см, для покриттів перехідного типу – 5 – 8 см. Стосовно методів, за якими проводити вимірювання колійності, в нормах [7] нічого не сказано.

У роботі [8] вказано, що вирівнюванню підлягають ділянки, які не задовольняють вимоги граничного стану за рівністю поверхні та за гранично допустимою глибиною колії (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала оцінювання стану дорожнього одягу за глибиною колії

Технічна категорія дороги	Гранично допустима глибина колії, мм
I	25
II	30
III	40
IV–V	50

Відповідно до норм [8], ділянки дорожнього одягу з глибиною колії, більшою ніж гранично допустимі значення, належать до небезпечних для руху автомобілів і вимагають негайного проведення робіт з усунення колії та підсилення конструкції відповідно до вимог нормативного документа [13]. Інформацію про методи та засоби, якими необхідно проводити вимірювання колійності, тут не наведено.

Зупинимося на відомих засобах і методах оцінювання колійності, які застосовуються за кордоном.

У роботі [11] наведено інформацію про прилад «Transverse Profile Beam» (балка для визначення поперечного профілю), розроблений компанією ROMDAS у Новій Зеландії у 2006 році (рис. 3). Він складається з балки довжиною 3,6 м і моторизованої каретки. Каретка рухає колесо поперек покриття, а її оптичні датчики фіксують коливання колеса по вертикалі з точністю 0,2 мм та по горизонталі з точністю 3 мм. Важлива особливість роботи приладу – потреба у взаємодії з комп'ютером під час вимірювання, що є суттєвим недоліком, тому що автономність роботи залежить у першу чергу від комп'ютера. Достатньо висока точність оптичних датчиків у цьому випадку не гарантує точність побудови профілю, бо під час руху колеса по поверхні покриття поза увагою знаходяться тріщини і невеликі вибоїни. Робота [9] розкриває й інші аспекти експлуатації приладу.



**Рисунок 3 – «Transverse Profile Beam»
(балка для визначення поперечного профілю)**

Інший прилад «MLS profiler», розробка якого розпочалася понад 20 років тому в штаті Техас (США) [10], працює подібно до «Transverse Profile Beam». Відмінністю є ручне пересування каретки з колесом по покриттю вздовж балки, яке виконує оператор. Вимірювання зміни у висоті по відношенню до базової площини для кожної горизонтальної координати здійснюється за допомогою лінійного змінного диференційного трансформатора (рис. 4). Система підключається до комп'ютера, який зберігає виміряні координати поперечного профілю. Автономність роботи «MLS profiler» залежить від комп'ютера, і тому він має обмеження у використанні.



Рисунок 4 – Прилад «MLS profiler»

У центрі транспортних досліджень Техаського університету в Остіні [10] для визначення максимальної глибини колії в першу чергу використано рейку довжиною 6 футів (приблизно 1,83 м) з клиновим промірником (рис. 5), а також прилад з лазерним далекоміром Leica (рис. 6), який переміщується оператором уздовж прямолінійної балки. Інформація автоматично записується в таблицю Excel через Bluetooth-з'єднання з комп'ютером. Один такий поперечний профіль може містити до 27 вимірювань, причому на кожне необхідно приблизно 4 секунди [10]. Можна відмітити, що висока точність цього методу вимірювань повністю нівелюється трудомісткістю та затратами часу на вимірювання.



Рисунок 5 – Використання рейки довжиною 6 футів і клинового промірника



Рисунок 6 – Вимірювання колійності з використанням лазерної системи Leica

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. На сьогодні в Україні для оцінювання колійності використовується 2-метрова рейка, за допомогою якої визначається лише один параметр – максимальна глибина колії. При вимірюванні не враховується поперечна конфігурація колії, яка є необхідною для встановлення причин колієутворення. Сучасні закордонні методи частково розв'язують це завдання, проте мають недоліки: необхідність постійного зв'язку з комп'ютером; складність конструкції приладів; недостовірність відображення результатів; трудомісткість проведення вимірювань.

Постановка завдання. Метою дослідження є вдосконалення оцінювання колійності дорожніх покриттів за рахунок розроблення нового засобу визначення колійності та методики роботи з ним.

Основний матеріал і результати. Пошук способів отримання більш детальної інформації про параметри колії привів до створення спеціалістами лабораторії автомобільних доріг і аеродромів Національного транспортного університету двометрової дерев'яної вимірювальної рейки для визначення параметрів колії за допомогою багатьох вимірювальних щупів (рис. 7).



Рисунок 7 – Вимірювальна рейка з багатьма вимірювальними щупами

Вимірювальна рейка мала 11 щупів, які розташовувалися на відстані 20 см один від одного вздовж рейки та мали міліметрову шкалу загальною довжиною 300 мм. Вимірювання колійності виконували шляхом фотографування рейки з опущеними щупами, розміщеної у місці відповідного поперечного профілю (див. рис. 7). Після проведення вимірювань на дослідній ділянці виконувалась обробка результатів шляхом розшифрування знімків. Практичні виміри за допомогою вимірювальної рейки показали, що її легка і нестійка конструкція піддається впливу вітру та проїжджаючого поруч транспорту, що дуже впливає на результати вимірювання.

У подальших пошуках дерев'яну рейку замінили на алюмінієву балку, яка мала 10 щупів та встановлювалась безпосередньо на покриття (рис. 8)



Рисунок 8 – Вимірювальна об'ємна алюмінієва балка

У подальших пошуках способу отримання більш детальної інформації про параметри колії Володимиром Павлюком та Віктором Павлюком було розроблено модель приладу для оцінювання колійності з використанням лазерного датчика, який дозволяє визначити профіль довжиною 2 м з кроком вимірювань через 1 см (рис. 9).

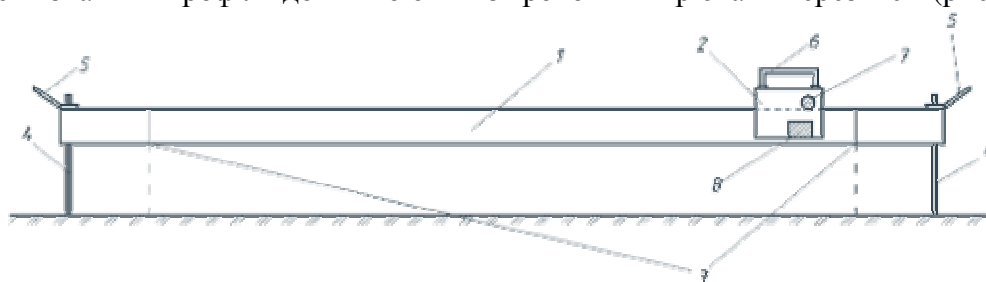


Рисунок 9 – Конструкція приладу для вимірювання колійності:

- 1 – балка; 2 – вимірювальна каретка; 3 – межі вимірювання; 4 – регулюючі опори;
- 5 – ручки для переміщення балки; 6 – ручка для переміщення каретки;
- 7 – датчик нахилу (інклінометр); 8 – лазерний датчик

Основним вимірювальним елементом приладу є рухома вимірювальна каретка з лазерним датчиком (рис. 10)



Рисунок 10 – Вимірювальна каретка приладу (вигляд зверху і знизу)

Лазерний датчик приладу проводить вимірювання відстані до поверхні дорожнього покриття в межах обраного поперечного профілю. У точках початку і кінця профілю виконується прив'язка до постійного репера за допомогою нівеліра (рис. 11).



Рисунок 11 – Приклад закріплення постійного репера

Загальний вигляд процесу вимірювання наведено на рис. 12.



Рисунок 12 – Загальний вигляд процесу вимірювання та прив'язки до постійного репера

Результати вимірювань записуються на флеш-накопичувач, установлений у вимірювальну каретку. Обробка цих результатів виконується за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel. Приклад поперечного профілю, побудованого за даними вимірювань, наведено на рис. 13

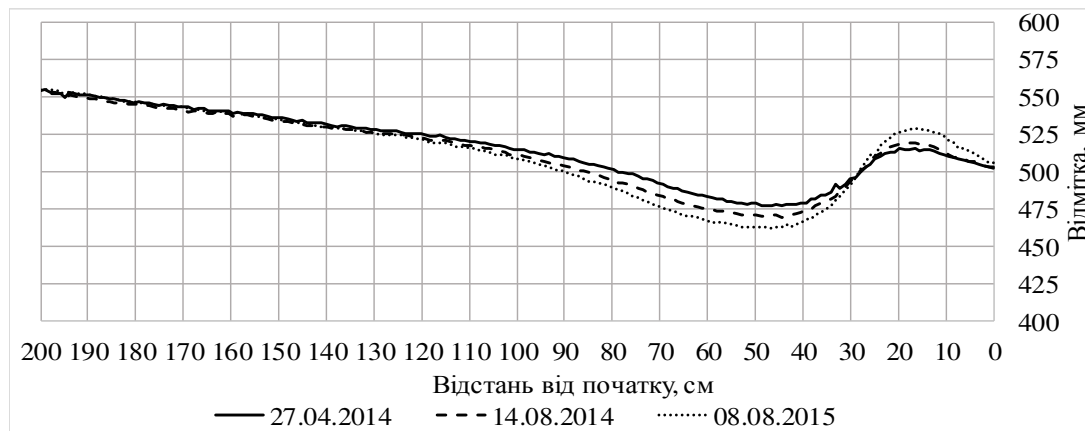


Рисунок 13 – Поперечний профіль проїзної частини правої смуги накату на автомобільній дорозі М-12 (км 213+970)

У процесі експлуатації приладу визначались особливості його роботи та проводилося його вдосконалення. У результаті досліджень було розроблено методику оцінювання колійності. Згідно з нею перш за все необхідно обрати дослідну ділянку. Відмітки поперечного профілю слід визначати через кожні 6 м довжини ділянки. Перед вимірюванням покриття потрібно ретельно очистити від пилу й бруду, щоб було чітко видно межі покриття та обочин. Для проведення вимірювання прилад установлюється над зовнішньою смугою накату поперек осі дороги таким чином, щоб його початок знаходився біля крайової розмітки або кромки покриття (у разі відсутності крайової розмітки). Необхідно позначити місця встановлення опор приладу та межі (початок і кінець) сканування, навівши їх фарбою (рис. 14).



Рисунок 14 – Приклад позначення місця встановлення опор приладу

Після проведення вимірювання необхідно виконати нівелювання меж (початку і кінця) поперечного профілю з прив'язкою до постійного репера, що є одним з основних пунктів методики, яка дозволяє отримувати не тільки фактичні дані про колійність у момент вимірювання, а й спостерігати за динамікою поперечного профілю в процесі експлуатації автомобільних доріг.

Висновки. У результаті аналізу сучасних засобів визначення колійності дорожніх покриттів були встановлені їх недоліки: необхідність постійного зв'язку з комп'ютером; складність конструкції приладів; недостовірність відображення результатів; трудомісткість проведення вимірювань. Для їх усунення виникла потреба у створенні нових засобів оцінювання колійності. Було розроблено прилад у вигляді рейки з багатьма вимірювальними щупами. У процесі виявлення недоліків під час експлуатації прилад багаторазово вдосконалювався. У результаті конструкція була повністю змінена, і на цьому етапі розроблено діючу модель приладу, що являє собою балку з рухомою кареткою. Прилад дає можливість визначати не лише максимальну глибину, а й отримувати дані для детального аналізу поперечної конфігурації колії.

Література

1. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. – К. : Держстандарт України, 1997. – 23 с.
2. ВСН 6-90. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. – М. : Стройиздат, 1990. – 21 с.
3. ОДН 218.0.006-2002 (взамен ВСН 6-90). Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. – М., 2002. – 78 с.
4. Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Часть 1. Методика измерений и оценки эксплуатационного состояния дорог по глубине колее. – М., 2002. – 23 с.
5. Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Часть 2. Методические рекомендации по расчету и прогнозированию колеобразования на нежестких дорожных одеждах. – М., 2002. – 29 с.
6. Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Часть 3. Рекомендации по устранению колее на автомобильных дорогах. – М., 2002. – 33 с.
7. СТБ 1291-2001. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности движения. – Минск, 2001.
8. Р В.2.7-218-02071168-784:2011. Рекомендації щодо вибору армуючих матеріалів для підвищення стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії. – К. : Укравтодор, 2011. – 22 с.
9. Mallela R. Harmonizing Automated Rut Depth Measurement / R. Mallela, H. Wang, Wellington // Land Transport New Zealand Research Report 277. – Wellington, 2006. – 58 p.
10. Field Evaluation of Automated Rutting Measuring Equipment. Technical Report No. FHWA/TX-12/0-6663-1 / P. A. Serigos, J. A. Prozzi, B. H. Nam, M. R. Murphy // Texas Department of Transportation. – Austin, 2012. – 170 p.
11. The ROMDAS Transverse Profile Beam (TPB) Reference Profiler [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.romdas.com/hard/specs/sp-tpb.pdf>.
12. Методичні рекомендації щодо класифікації колій на дорожніх покриттях і способів їх ліквідації / Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор). – К. : Укравтодор, 2002. – 17 с.
13. ГБН Г.1-218-182:2011. Ремонт автомобильных дорог общего пользования. Виды ремонтов та перечень работ. / Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор). – К. : Укравтодор, 2011 – 21 с.

References

1. DSTU 3587-97. Bezpeka dorozhnogo ruhu. Avtomobilni dorogi, vulitsi ta zaliznichni pereyizdi. Vimogi do ekspluatatsiyного stanu. – K. : Derzhstandart Ukraini, 1997. – 23 s.
2. ВСН 6-90. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. – М. : Stroyizdat, 1990. – 21 с.

3. ODN 218.0.006-2002 (vzamen VSN 6-90). *Pravila diagnostiki i otsenki sostoyaniya avtomobilnyh dorog.* – M., 2002. – 78 s.
4. *Rekomendatsii po vyyavleniyu i ustranenyu koley na nezhestkih dorozhnyh odezhdah. Chast 1. Metodika izmereniy i otsenki ekspluatatsionnogo sostoyaniya dorog po glubine kolei.* – M., 2002. – 23 s.
5. *Rekomendatsii po vyyavleniyu i ustranenyu koley na nezhestkih dorozhnyh odezhdah. Chast 2. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu i prognozirovaniyu kolee-obrazovaniya na nezhestkih dorozhnyh odezhdah.* – M., 2002. – 29 s.
6. *Rekomendatsii po vyyavleniyu i ustranenyu koley na nezhestkih dorozhnyh odezhdah. Chast 3. Rekomendatsii po ustranenyu koley na avtomobilnyh dorogah.* – M., 2002. – 33 s.
7. STB 1291-2001. *Dorogi avtomobilnye i ulitsy. Trebovaniya k ekspluatatsionnomu sostoyaniyu, dopustimomu po usloviyam obespecheniya bezopasnosti dvizheniya.* – Minsk, 2001.
8. R V.2.7-218-02071168-784:2011. *Rekomendatsiyi shchodo viboru armuyuchih materialiv dlya pidvishchennya stiykosti asfaltobetonnih pokrityt do utvorenniya koliyi.* – K. : Ukravtodor, 2011. – 22 s.
9. Mallela R. *Harmonizing Automated Rut Depth Measurement* / R. Mallela, H. Wang, Wellington // *Land Transport New Zealand Research Report 277.* – Wellington, 2006. – 58 p.
10. *Field Evaluation of Automated Rutting Measuring Equipment. Technical Report No. FHWA/TX-12/0-6663-1* / P. A. Serigos, J. A. Prozzi, B. H. Nam, M. R. Murphy // *Texas Department of Transportation.* – Austin, 2012. – 170 p.
11. *The ROMDAS Transverse Profile Beam (TPB) Reference Profiler* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.romdas.com/hard/specs/sp-tpb.pdf>.
12. *Metodichni rekomendatsiyi shchodo klasifikatsiyi koliy na dorozhnikh pokritytyah i sposobiv yih likvidatsiyi* / *Derzhavna sluzhba avtomobilnih dorig Ukrayini (Ukravtodor).* – K. : Ukravtodor, 2002. – 17 s.
13. GBN G.1-218-182:2011. *Remont avtomobilnih dorig zagalnogo koristuvannya. Vidi remontiv ta perelik robit.* / *Derzhavna sluzhba avtomobilnih dorig Ukrayini (Ukravtodor).* – K. : Ukravtodor, 2011 – 21 s.

© Чаповський В.С.
Надійшла до редакції 03.04.2016

Білецький В.С., д.т.н., професор
Ткаченко М.В., асистент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПРИГОТУВАННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ

Виконано огляд сучасних конструкцій устаткування для приготування й очищення бурового розчину, що сприятиме вибору найбільш прийняттого варіанта комплектуючого обладнання при оснащенні нових та існуючих циркуляційних систем бурових установок. Описано сучасний стан та можливі напрями вдосконалення циркуляційних систем. Визначено перспективні напрями: блочне виконання циркуляційної системи, вибір і оптимізація конструкції змішувача. Розглянуто такі базисні варіанти змішувачів: 1) гідравлічні змішувачі (запропоновано застосування багатоствольного сопла, що збільшує число Рейнольдса (Re) в робочій зоні); 2) високоефективні лопатеві мішалки типу «Turbotron» (запропоновано їх моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation і варіант модернізації); 3) статичні змішувачі (встановлено, що число Re в зоні $l = 10 d$ знаходиться в межах $10^5 - 10^7$).

Ключові слова: циркуляційна система, буровий розчин, регенерація, гідравлічний змішувач, лопатеві мішалки типу «Turbotron», статичний змішувач.

Білецький В.С., д.т.н., професор
Ткаченко Н.В., асистент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Выполнен обзор современных конструкций оборудования для приготовления и очистки бурового раствора, что будет способствовать выбору наиболее приемлемого варианта комплектующего оборудования при оснащении новых и существующих циркуляционных систем буровых установок. Описаны современное состояние и возможные направления совершенствования циркуляционных систем. Определены перспективные направления: блочное исполнение циркуляционной системы, выбор и оптимизация конструкции смесителя. Рассмотрены такие базовые варианты смесителей: 1) гидравлические смесители (предложено применение многоствольного сопла, что увеличивает число Рейнольдса (Re) в рабочей зоне); 2) высокоэффективные лопастные мешалки типа «Turbotron» (предложено их моделирование с помощью программного комплекса SolidWorks Flow Simulation и вариант модернизации); 3) статические смесители (установлено, что число Re в зоне $l = 10 d$ находится в пределах $10^5 - 10^7$).

Ключевые слова: циркуляционная система, буровой раствор, регенерация, гидравлический смеситель, лопастные мешалки типа «Turbotron», статический смеситель.

*Biletskyy V., DSc, Professor
Tkachenko M., assistant
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

MODERN TRENDS OF IMPROVEMENT OF PREPARATION AND CLEANING MUD

Flushing the well – one of the most important processes in the drilling, which includes various technological operations: preparation of drilling mud, quality cleaning (regeneration), adjustment of process parameters, properties.

Successful, high-quality and trouble-free construction of wells is primarily determined by the perfection of the washing and applied with the equipment.

During the period 1990 – 2015 years was circulating upgrading of modern equipment, providing technical and solution of environmental problems in cleaning wells. Its quality and reliability grow, as a result of stronger tendency to purchase cheaper products Drilling Company domestic production.

The purpose of the work – a review of contemporary designs equipment for preparation and cleaning of mud, which will contribute to the selection of the most appropriate option kit at the hardware equipment of new and existing circulation drilling rigs systems. The information on the current state and possible ways to improve the circulation systems and their components for the equipment, when equipping new rigs and upgrading old ones. Perspective directions: block execution of the circulation system, the selection and optimization of the design of the mixer.

Consider these basic options mixers:

1) Hydraulic mixers. Substantial efficiency can be achieved with a significant increase in the Reynolds number of the working mixing zone, it is possible in the transition from a compact jet to dispersion. Therefore, a promising direction for further improvement of the system of preparation of drilling fluid is to develop hydro ejector mixer with multicore nozzle.

2) High-efficiency impellers type «Turbotron». Proposed their modeling using the software package SolidWorks Flow Simulation (simulation of the flow of liquids and gases) and version upgrades.

3) Static mixers. A static mixer is a precision engineered device for the continuous mixing of fluid materials. The energy needed for mixing comes from a loss in pressure as fluids flow through the static mixer. One design of static mixer is the plate-type mixer and another common device type consists of mixer elements contained in a cylindrical (tube) or squared housing. Typical construction materials for static mixer components included stainless steel, polypropylene, Teflon, PVDF, PVC, CPVC and polyacetal. The calculated data of Reynolds number Re are within 10^5 – 10^7 , correspond with foreign research and respond «fully developed turbulence», which provides high efficiency homogenization and rapid dissolution of the reagents, which determines the quality of the mud.

It can be assumed that with the information presented in this work, drilling companies will have an opportunity to choose the most acceptable variant circulation system and standard equipment to them at the snap of new rigs and upgrade existing ones.

Keywords: *circulating system, mud, regeneration, hydraulic mixer, paddle mixers such as «Turbotron», static mixer, SolidWorks Flow Simulation, Reynolds number «fully developed turbulence».*

Вступ. Промивання свердловини – це один з найбільш важливих технологічних процесів у бурінні, що включає різні технологічні операції:

- приготування бурового розчину;
- якісне очищення (регенерація);
- регулювання технологічних параметрів, властивостей [1].

Успішне, якісне та безаварійне будівництво свердловин у першу чергу визначається досконалістю процесу промивання і застосовуваного при цьому устаткування.

Аналіз техніко-економічних показників підтверджує той факт, що навіть з використанням високоефективного бурового устаткування ці показники не завжди є високими. Застосування сучасного бурового устаткування дозволяє досягти максимальних техніко-економічних показників тільки при високих технологічних властивостях бурових розчинів, що забезпечується вдосконаленням технології промивання.

Узагальнення світового досвіду сприяє оснащенню вітчизняних бурових установок високоефективним устаткуванням для приготування розчину та його багатоступеневого очищення на сучасному рівні.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженню устаткування та процесів приготування бурових розчинів і пов'язаних з ними явищ приділяли увагу багато вітчизняних та зарубіжних інженерів і вчених. Серед них А.І. Булатов, Ю.М. Проселков, П.П. Макаренко, В.І. Міщенко, А.В. Картунов, В.М. Мільштейн, С. Баумгартен (С. Baumgarten), Д.О. Робертсон (J.O. Robertson), Т.Е. Аллен (Т.Е. Allen), П.О. Паджетт (Р.О. Padgett). Результати їх досліджень опубліковані в ряді статей і узагальнювальних монографій, у яких розглянуті основні питання приготування й регенерації бурових розчинів [1 – 13].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Очищенню і приготуванню бурових розчинів приділяють особливу увагу, оскільки вибурена порода, що надходить у буровий розчин, негативно впливає на його основні технологічні властивості, а отже, і на техніко-економічні показники буріння свердловин, зокрема на вартість свердловини через швидкість проходки, гідравліку, об'єми розбавлення для підтримки густини, коефіцієнт тертя бурильного інструмента, диференціальні прихвати, втрату циркуляції, сальнікоутворення на компановці низу бурильної колони (КНБК), знос бурового устаткування й інструмента тощо. Крім того, при накопиченні шламу в буровій промивальній рідині істотно знижується її глинізуюча здатність, що приводить до зміни структури товстої пухкої кірки на стінках свердловини в зонах фільтрації (ця кірка стає більш пухкою і проникною). За рахунок підвищення густини промивальної рідини, а значить і сумарної ваги стовпа бурового розчину у свердловині значно зростає вірогідність його поглинання. Витрати на очищення та приготування бурового розчину, а також розв'язання проблем, пов'язаних з підвищеним умістом твердої фази, складають значну частину загальних витрат на буріння свердловин [2].

Усе це приводить до зниження надійності обладнання, зменшення швидкості буріння та економічних втрат.

Мета роботи – аналіз сучасних конструкцій устаткування для приготування й очищення бурового розчину, що сприятиме вибору найбільш прийняттого варіанта комплектуючого обладнання при оснащенні нових та існуючих циркуляційних систем бурових установок.

Основний матеріал і результати. Технологічне устаткування для промивання свердловини представлено рядом взаємопов'язаних систем: приготування й обробки бурового розчину, регенерації, очищення його від шламу і газу, циркуляції. Кожна система містить ряд блоків або декілька одиниць устаткування.

Блочне виконання циркуляційної системи. Сьогодні все більшого поширення набувають циркуляційні системи (ЦС), складені з ланок, що випускаються промисловістю у вигляді блоків.

Схема монтажу ЦС з готових блоків прискорює і здешевлює монтаж і сприяє розв'язанню проблеми охорони навколишнього середовища при бурінні свердловин. Блоки заводського виготовлення дозволяють повністю відмовитися від створення амбарів і жолобових систем у ґрунті.

Основна тенденція в удосконаленні блоків полягає в збільшенні об'єму резервуара до 80 м³ і більше та створенні теплоізоляції й укриттів на всіх блоках, призначених для буріння в зимових умовах [1].

На рис. 1 наведено для прикладу один з варіантів блочної циркуляційної системи, що випускається ТОВ «Компанія «Техномехсервіс». Він містить блок очищення, проміжну і приймальну ємності, блок приготування бурових розчинів. Блок очищення забезпечений дегазатором «Каскад-40», віброситом СВ1ЛМ, ситогідроциклонним сепаратором, центрифугою ОГШ-50.

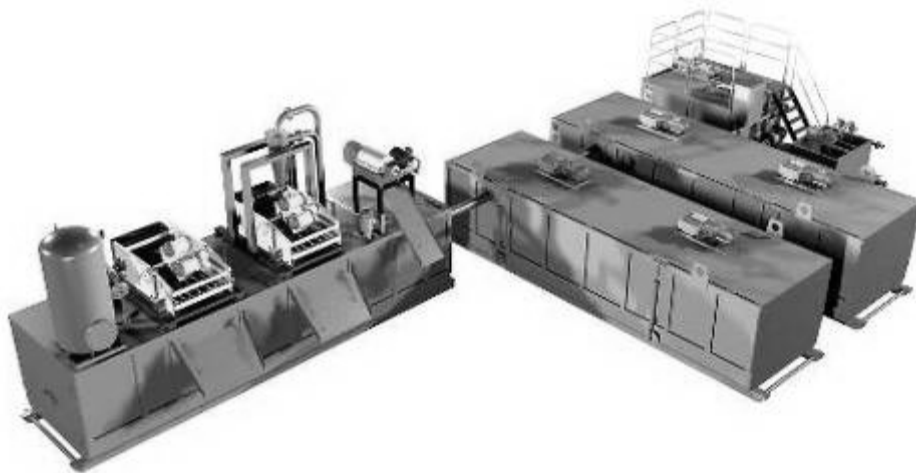


Рисунок 1 – Циркуляційна система ТОВ «Компанія «Техномехсервіс»

Удосконалення системи приготування бурового розчину підбором ефективного змішувача

Гідравлічні змішувачі. При розвідувальному бурінні нафтових і газових свердловин в умовах автономного розташування бурових велике значення має гідравлічний спосіб приготування глинистих промивальних рідин, при якому для руйнування частини твердої фази використовується тільки кінетична енергія струменя. Пристрої для гідравлічного способу приготування глинистих промивальних рідин отримали назву гідравлічних змішувачів або гідромішалок [1].

Гідравлічні змішувачі ежекторного типу (гідроворонки) використовуються для приготування промивальної рідини з глинопорошку. Це – пристрій безперервної дії. На сьогодні найбільше розповсюдження має гідравлічна мішалка ГСМ.

Якість глинистої промивальної рідини, приготованої в гідроворонках, досить низька. Незважаючи на тонке мливо, частинки глинопорошку в процесі перемішування з водою повинні пройти подальше диспергування [2].

Істотне підвищення ефективності може бути досягнуто при значному збільшенні числа Рейнольдса в робочій зоні змішування, що можливо при переході від компактного струменя до диспергованого. Тому перспективним напрямом подальшого вдосконалення системи приготування бурового розчину є, на нашу думку, розроблення гідроежекторного змішувача з диспергованим струменем (багатоствольне сопло). Зауважимо, що одним з визначальних параметрів процесу є число Вебера [6].



Рисунок 2 – Гідроциклонний змішувач

Вітчизняні підприємства освоюють виробництво гідроциклонного змішувача (рис. 2) з подвійним циклонним принципом дії, що забезпечує якісніше перемішування домішок до бурового розчину. Перевагами такого змішувача є:

- використання подвійного циклонного принципу дозволяє здійснювати швидке додавання сухих матеріалів у буровий розчин і гарантує ретельне змочування й перемішування сухого матеріалу перед подачею його в активний буровий розчин;
- природне завихрювання, що досягається при роботі змішувача, дозволяє досягти ефекту самоочищення воронки [9].

Високоєфективні лопатеві мішалки. Сьогодні запропоновано і працює в промисловості ряд конструкцій лопатевих мішалок. Вимогам високоенергетичного й водночас гомогенного поля гідродинамічних впливів на буровий розчин відповідає конструкція три-, чотири-, п'ятиімпелерної мішалки типу «Turbotron» (рис. 3, а). Оптимізація її конструкції можлива шляхом вибору оптимальних розмірів окремих імпелерів та відстаней між ними. Для цього доцільно використати моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation [14], що дозволить виконати порівняльний аналіз полів швидкостей рідини (і чисел Re) у робочій зоні мішалки й обрати найбільш доцільну їх конфігурацію. На рис. 3, б наведено поле швидкостей гідросуміші при перемішуванні бурового розчину в мішалці «Turbotron», одержане за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation. На рис. 4 показано криву зміни колової швидкості бурового розчину в робочій зоні мішалки «Turbotron».

В.С. Білецький та Ю.С. Міщук запропонували вдосконалення конструкції мішалки типу «Turbotron», зокрема додатково встановлено обертові вертикальні пластини 8, жорстко з'єднані зі стрижнями 9, які вставлені в отвори кріпильних вушок 10, що жорстко кріпляться до стінки корпусу. Фіксатори забезпечують сталий кут відхилення обертових пластин 8. У робочому режимі фіксаторами забезпечують однаковий кут відхилення діаметрально розташованих пластин [15]. Таке вдосконалення дозволяє вирівняти епюру швидкостей по робочому простору мішалки, що підвищує ефективність її використання для гомогенізації гідросумішей.

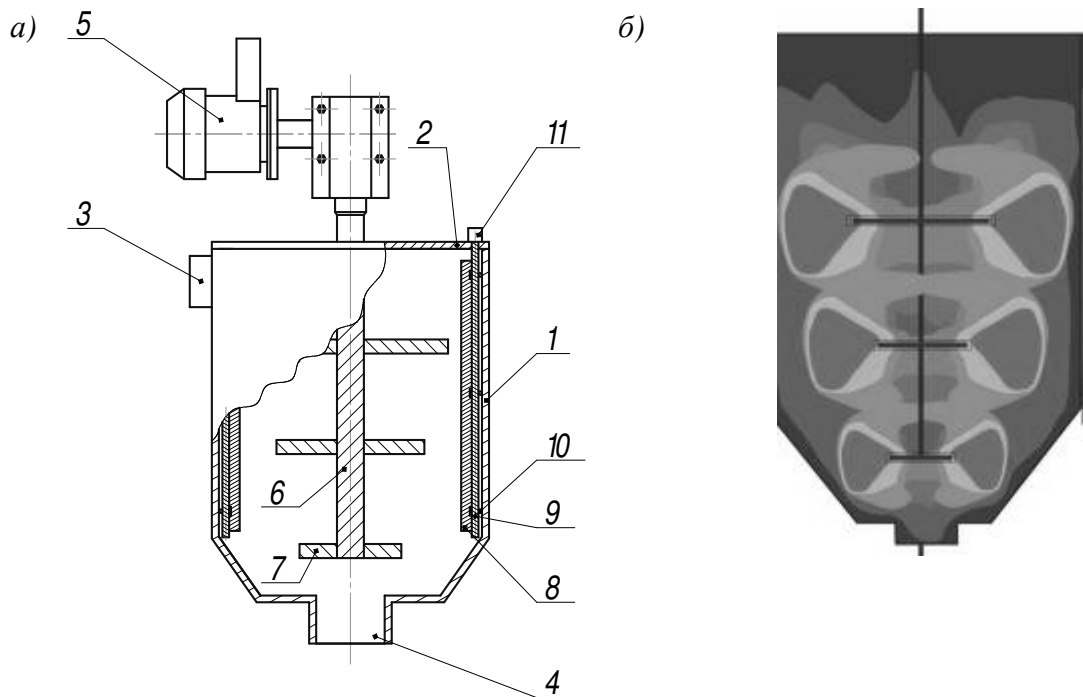


Рисунок 3 – Лопатева мішалка «Turbotron»:

- а) розріз: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – ввідний патрубок; 4 – вивідний патрубок; 5 – привід; 6 – вертикальний обертовий вал; 7 – лопатеві робочі органи; 8 – обертові пластини; 9 – стрижні; 10 – кріпильні вушки; 11 – фіксатори;
 б) поле швидкостей гідросуміші при перемішуванні бурового розчину в мішалці «Turbotron», одержане за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation

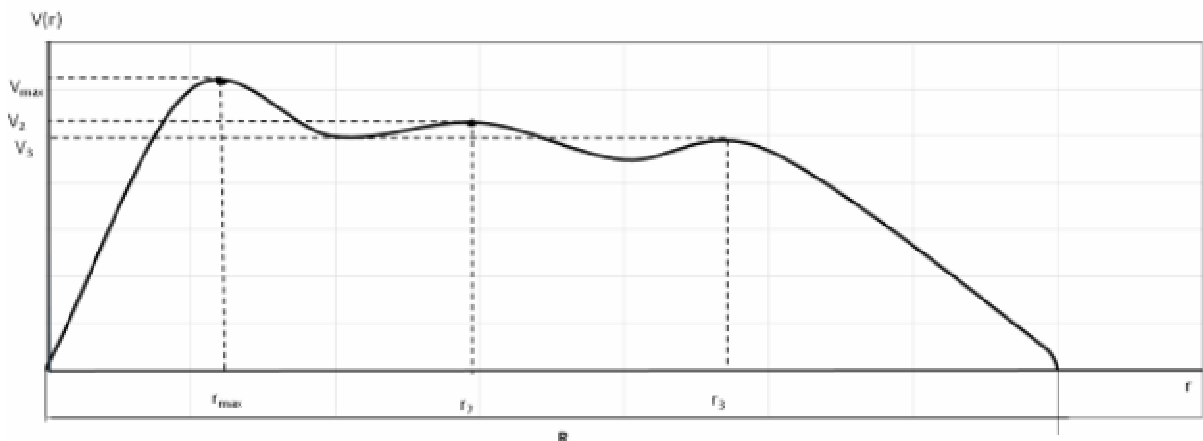


Рисунок 4 – Крива зміни колової швидкості бурового розчину в робочій зоні мішалки «Turbotron»

Статичні змішувачі. Крім того, перспективними для використання в системі приготування бурового розчину є статичні (нерухомі) змішувачі середовищ, які конструктивно являють собою вставку різної конструкції у трубі, по якій подається пульпа бурового розчину. Міксери відрізняються один від одного за конфігурацією, довжиною, діаметром і дозволяють змішувати великий спектр дво- й багатокомпонентних матеріалів різної в'язкості, густини, хімічної природи і практичного призначення [16] (рис. 5).

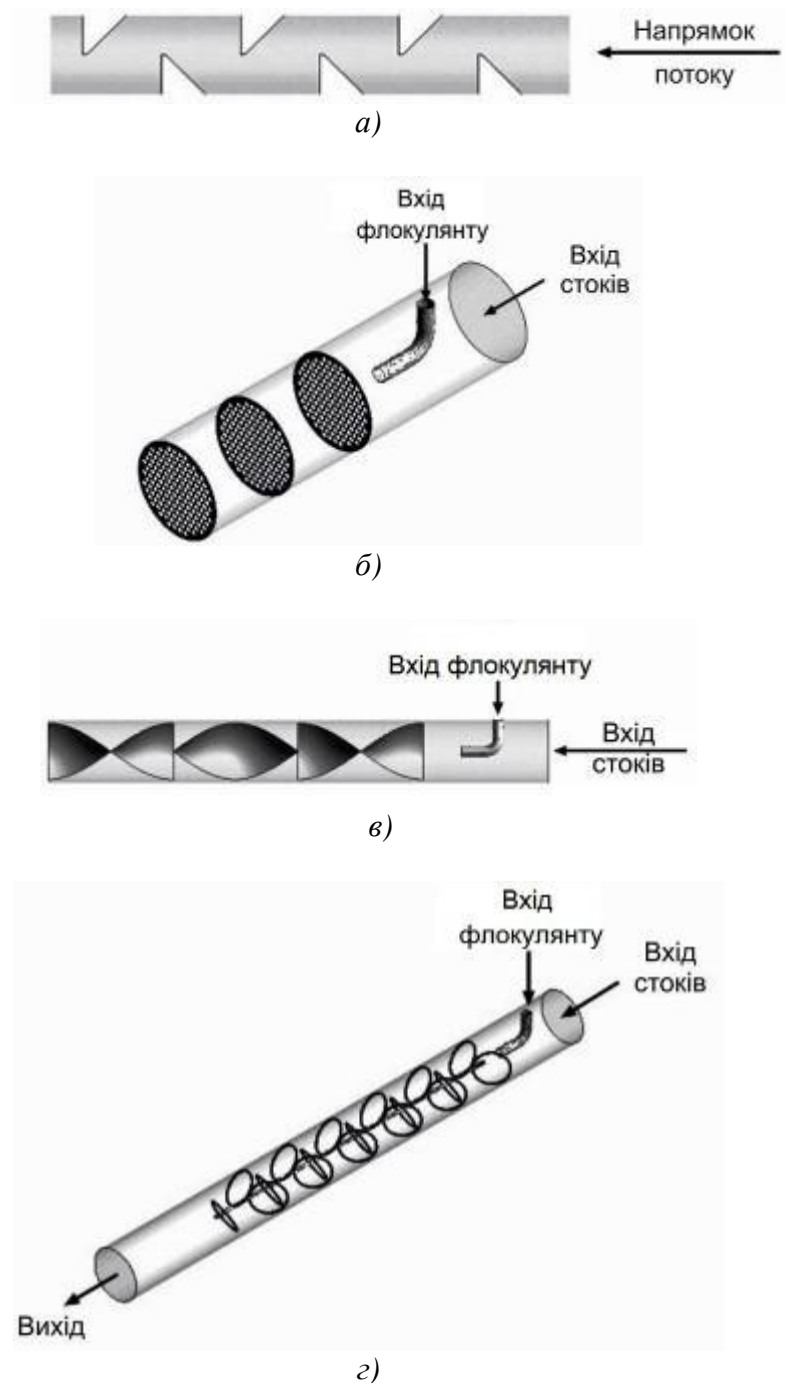


Рисунок 5 – Варіанти конструкції статичного змішувача:

- a* – йоржовий змішувач; *б* – змішувач «труба із системою розподільних ґраток»;
в – змішувач «труба з гвинтовою вставкою»;
г – змішувач «труба зі вставкою hiTRAN®»

Завдання статичного міксеру – гомогенізувати матеріал, вирівняти градієнт в'язкості, не допустити попадання в суміш повітряних включень, суттєво підвищити турбулентність потоку. Дослідження роботи та оптимізація конструкції статичних змішувачів, як і у випадку з лопатевими мішалками, можливі шляхом моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation.

Результати фізичного моделювання статичних змішувачів [16] показано у таб. 1. Припускалося, що втрати енергії на тертя рідини об стінки відсутні (ідеально гладенький трубопровід).

**Таблиця 1 – Порівняння ефективності перемішування
за допомогою статичних змішувачів**

Конструкція змішувача	Робоча довжина змішувача L від внутрішнього діаметра трубопроводу	Гідродинамічний опір на ділянці L перемішування, Па	Розрахункове число Re в робочій зоні статичного міксеру	
			$\bar{V}_{сер}$	$\bar{V}_{сер}$
Йоржовий змішувач	16,5D	5633	478261,35	447727,00
Розподільна гратка (перфорований диск)	>7,5D	54800 ($L=7D$)	1459362,74	1428828,38
Гвинтова вставка	8D	2078	296475,66	265941,31
Турбулізуюча вставка hiTRAN® Cal Gavin	>6,5D	3819 ($L=6,5D$)	396491,39	365957,04

Отримані розрахункові дані числа Re знаходяться в межах 10^5 – 10^7 , що збігається з наведеними у роботі [17] для різних конструкцій статичних змішувачів. Такий рівень турбулізації гідросуміші відповідає так званій «розвиненій турбулентності», яка забезпечує високу ефективність гомогенізації та швидке розчинення реагентів – тобто процеси, які детермінують якість бурового розчину.

Висновки:

1. За період 1990 – 2015 рр. відбулося переоснащення циркуляційних систем сучасним устаткуванням, що забезпечує розв'язання технологічних і екологічних проблем у галузі промивання свердловин. Його якість та надійність зростають, як наслідок – зміцнюється тенденція закупівлі буровими компаніями дешевших виробів вітчизняного виробництва. Крім цінових питань, для бурових компаній тим самим розв'язується і проблема запасних частин, сервісу та кваліфікації обслуговуючого персоналу.

2. Наведено інформацію щодо сучасного стану і можливих напрямів удосконалення циркуляційних систем та їх комплектуючого устаткування при оснащенні нових бурових установок і модернізації існуючих. Визначено перспективні напрями: блочне виконання циркуляційної системи, вибір і оптимізація конструкції змішувача.

3. Запропоновано базисні варіанти змішувачів і перспективи їх модернізації:

а) гідравлічні змішувачі. Істотне підвищення ефективності може бути досягнуто при значному збільшенні числа Рейнольдса в робочій зоні змішування, що можливо при переході від компактного струменя до диспергованого, який утворюється при використанні багатоствольного сопла;

б) високоефективні лопатеві мішалки типу «Turbotron». Запропоновано їх моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation і варіант модернізації – додатково встановлено обертові вертикальні пластини. Таке вдосконалення дозволяє вирівняти епіюру швидкостей по робочому простору мішалки, що підвищує ефективність її використання для гомогенізації гідросумішей;

в) статичні змішувачі. Отримані розрахункові дані числа Re , які знаходяться в межах 10^5 – 10^7 , кореспондують із закордонними дослідженнями і відповідають «розвиненій турбулентності», що забезпечує високу ефективність гомогенізації та швидке розчинення реагентів, які визначають якість бурового розчину.

Можна припустити, що завдяки наведеним в цій роботі інформації, бурові компанії зможуть вибрати найбільш прийнятний варіант циркуляційної системи та комплектуючого устаткування при оснащенні нових бурових установок і модернізації існуючих.

Література

1. Булатов А. И. Тампонажные материалы и технология цементирования скважин / А. И. Булатов. – М. : Недра, 1991. – 86 с.
2. Булатов А. И. Справочник по промывке скважин / А. И. Булатов, П. П. Макаренко, Ю. М. Проселков. – М. : Недра, 1984. – 317 с.
3. Мильштейн В. М. Крепление скважин в различных условиях бурения / В. М. Мильштейн. – Краснодар: ООО «Просвещение-Юг», 2007. – 130 с.
4. Мильштейн В. М. Цементирование буровых скважин / В. М. Мильштейн. – Краснодар: ООО «Просвещение-Юг», 2003. – 375 с.
5. Мищенко В. И. Приготовление, очистка и дегазация буровых растворов / В. И. Мищенко, А. В. Кортунов. – Краснодар: АртПресс, 2008. – 336 с.
6. Мищенко С. В. Модернизация оборудования и совершенствование технологии приготовления тампонажных растворов: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы / С. В. Мищенко. – Краснодар, 2015. – 22 с.
7. Цегельский В. Г. Двухфазные струйные аппараты / В. Г. Цегельский. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 408 с.
8. Baumgarten C. Mixture Formation in Internal Combustion Engines / C. Baumgarten. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – 294 p.
9. Robertson J. O. Surface operations in petroleum production / J. O. Robertson, G. V. Chilingarian, S. Kumar. – New York : Elsevier Science, 1989. – 562 p.
10. Mills D. Handbook of Pneumatic Conveying Engineering / D. Mills, M. G. Jones, V. K. Agarwal. – Marcel Dekker Inc., Basel, 2004. – 676 p.
11. Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach / G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L. S. Leung // Springer Dordrecht. – Heidelberg, London, New York, 2010. – 561 p.
12. Pump Handbook / Edited by I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald. – 3-rd Edition. – New York : McGRAW-HILL, 2001. – 1768 p.
13. Robertson J. O. Surface operations in petroleum production / J. O. Robertson, G. V. Chilingarian, S. Kumar. – New York : Elsevier Science, 1989. – 562 p.
14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
15. Заявка на Патент України № u201601985 МПК(2016.01) B01F 7/04. Лопатева мішалка / В. С. Білецький, Ю. С. Міщук; заявник і патентовласник – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюк; заявл. 29.02.2016.
16. Білецький В. С. Застосування статичних змішувачів для селективної агрегації тонкодисперсного вугілля / В. С. Білецький, Н. В. Сургова // Вісник Донецького гірничого інституту. – 2011. – № 2 (30). – С. 56 – 59.
17. Bakker A. Modeling of the Turbulent Flow in HEV Static Mixers / A. Bakker, R. LaRoche [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.bakker.org/cfmbook/turbhev.pdf>.

References

1. Bulatov A. I. Tamponazhnye materialy i tehnologiya tsementirovaniya skvazhin / A. I. Bulatov. – M. : Nedra, 1991. – 86 s.
2. Bulatov A. I. Spravochnik po promyvke skvazhin / A. I. Bulatov, P. P. Makarenko, Yu. M. Proselkov. – M. : Nedra, 1984. – 317 s.
3. Milshteyn V. M. Kreplenie skvazhin v razlichnykh usloviyah bureniya / V. M. Milshteyn. – Krasnodar: ООО «Prosveshchenie-Yug», 2007. – 130 s.
4. Milshteyn V. M. Tsementirovanie burovyyh skvazhin / V. M. Milshteyn. – Krasnodar: ООО «Prosveshchenie-Yug», 2003. – 375 s.
5. Mishchenko V. I. Prigotovlenie, ochistka i degazatsiya burovyyh rastvorov / V. I. Mishchenko, A. V. Kortunov. – Krasnodar: ArtPress, 2008. – 336 s.

6. Mishchenko S. V. *Modernizatsiya oborudovaniya i sovershenstvovanie tehnologii prigotovleniya tamponazhnykh rastvorov: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.02.13 – mashiny, agregaty i protsessy* / S. V. Mishchenko. – Krasnodar, 2015. – 22 s.
7. Tsegelskiy V. G. *Dvuhfaznye struynye apparaty* / V. G. Tsegelskiy. – M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2003. – 408 s.
8. Baumgarten C. *Mixture Formation in Internal Combustion Engines* / C. Baumgarten. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – 294 p.
9. Robertson J. O. *Surface operations in petroleum production* / J. O. Robertson, G. V. Chilingarian, S. Kumar. – New York : Elsevier Science, 1989. – 562 p.
10. Mills D. *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering* / D. Mills, M. G. Jones, V. K. Agarwal. – Marcel Dekker Inc., Basel, 2004. – 676 p.
11. *Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach* / G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L. S. Leung // Springer Dordrecht. – Heidelberg, London, New York, 2010. – 561 p.
12. *Pump Handbook* / Edited by I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald. – 3-rd Edition. – New York : McGRAW-HILL, 2001. – 1768 p.
13. Robertson J. O. *Surface operations in petroleum production* / J. O. Robertson, G. V. Chilingarian, S. Kumar. – New York : Elsevier Science, 1989. – 562 p.
14. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* / A. A. Alyamovskiy. – M. : DMK Press, 2010. – 464 s.
15. *Zayavka na Patent Ukrayini № u201601985 MPK(2016.01) B01F 7/04. Lopateva mishalka* / V. S. Biletskiy, Yu. S. Mishchuk; *zayavnik i patentovlasnik – Poltavskiy natsionalniy tehnicniy universitet imeni Yuriya Kondratyuk; zayavl. 29.02.2016.*
16. Biletskiy V. S. *Zastosuvannya statichnih zmishuvachiv dlya selektivnoyi agregatsiyi tonkodispersnogo vugillya* / V. S. Biletskiy, N. V. Surgova // *Visti Donetskogo girnichogo institutu.* – 2011. – № 2 (30). – S. 56 – 59.
17. Bakker A. *Modeling of the Turbulent Flow in HEV Static Mixers* / A. Bakker, R. LaRoche [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.bakker.org/cfmbook/turbhev.pdf>.

© Білецький В.С., Ткаченко М.В.
Надійшла до редакції 11.04.2016

Soloviev V., DSc, Professor
Mykhaylovskaya O., PhD, Associate Professor
Yermakova I., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

TECHNOLOGY DESCENT IN ONE STEP INTERMEDIATE COLUMN, WEIGHT OF WHICH EXCEEDS LOAD CAPACITY OF DRILLING RIGS

Decrease quantity of sections of the casing saves time and money in the process of fastening of the well. The need to use the sectional descent columns caused by a not sufficient capacity drilling rigs, mainly. In addition, casings domestic and imported can not withstand the loads created by the weight of its own huge casing. In general, to address the issue of development reduce the quantity of sections descent columns are developing in two directions: increasing the carrying capacity of drilling rigs, the creation of special jacks for running casing; increasing buoyancy force acting on the column in the wash liquid. The first way allows for the descent into the well casing heavy and has only one limitation on unscrews loads in threaded connections. In applying of welded columns is limiting the tensile stresses along the pipe. The second way is more technically difficult and needs of additional equipment casing and introduces additional limitations. The first method shutter casing at one time is limited and the real unscrew load. In the second method sectional casing shutter is reduced by 30 – 60%.

Keywords: drilling column, borehole, drilling fluid, centralizer.

Соловійов В.В., д.т.н., професор
Михайловська О.В., к.т.н., доцент
Єрмакова І.А., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ТЕХНОЛОГІЯ СПУСКУ В ОДИН ПРИЙОМ ПРОМІЖНИХ КОЛОН, ВАГА ЯКИХ ПЕРЕВИЩУЄ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЬ БУРОВИХ УСТАНОВОК

Розглянуто спосіб спуску проміжних колон, котрий дозволяє подолати обмеження за вантажопідйомністю бурових установок за рахунок перенесення ваги колони, яка спускається на зацементовану колону як на фундамент. Зокрема, розроблено технологію, коли кожна додаткова вага колони при її нарощуванні еквівалентна додатковим силам тертя, які виникають на нарощеній ділянці. Така технологія спуску не залежить від вантажопідйомності бурової установки, не створює навантажень на основу веж, а також додаткових розтяжних навантажень у колоні при збільшенні її довжини. Доведено, що якщо така умова виконується, то всі відомі обмеження для спуску проміжних колон будь-якої довжини в один прийом знімаються. Авторами встановлено вагу обсадної колони, що спускається, котра розподіляється на раніше встановлену і зацементовану колону.

Ключові слова: колона, свердловина, буровий розчин, центратор.

Introduction. Reducing sectional casing makes saving time and resources in the mounting wells. The need for launching a sectional columns caused mainly insufficient carrying capacity drilling rigs. In addition, used casings domestic and imported sometimes can not withstand loads generated by its own weight long casing.

Today technology known descent of heavy casing using hydraulic jacks that are installed on the orifice. However, with only solved part of the problem because it does not limit removed the maximum allowable length for the string buoyancy load.

Analysis of recent research and publications of sources. In economically developed countries, deep drilling is the use of drilling rigs, heavy-duty, allowing lower heavy columns at once. For example, well № 1 Rozhers Bertha (USA) lowered 426-millimeter casing weight of 6580 kN at a depth of 4202 m [1].

In case of excess weight carrying capacity of columns using special mobile equipment, is equipped with powerful hydraulic jacks with a large swing its load-bearing supports. With this facility in the well № 1 Medoip (USA) was successfully lowered at once 508-millimeter casing length 3800 m and weighing in air kN 9500 [2]. Limit the depth and weight of the column that descends on this equipment are determined buoyancy load threaded connections.

In our country developed and applied methods of launching heavy casing through facilitation mainly due to increased pushing power. There are a number of technologies descent heavy casing afloat.

The simplest of these is the descent casing replacing drilling mud in it for simplified partial emptying of liquid. However, in this case the recovery of circulation of drilling fluid is a violation of hydrostatic balance well. In the annulus drilling fluid density decreases, and the presence productive horizons, the conditions of formation fluid inflow and passing it to the surface, and therefore water gas oil manifestation conditions and related complications. With this inevitably linked infringement stability of the borehole walls.

Given the fact that the weight of the column increases the weight pour fluid volume, while moving up the resistance added (10 – 15% for vertical wells). There are difficulties undermining the column at the time of build-up another pipe. Leaving the carrying capacity of the drilling rig, necessary after the circulation again empty column to the values previously achieved using a compressor and tubing down [3].

Valid values emptying the descent of columns not full fill limited by fourfold safety factor pipes to jam. These limitations do not allow you to lower the heavy columns below the load in one step.

Bold still unsolved aspects of the problem. To reduce the weight of the column offered to hook the device to create additional friction forces when lowering the string into the hole [4]. Friction is governed by backfilling sand or other granular material that fills the annular space between the casing that goes down and the cylinder. Sand is poured into the open top of the cylinder funnel and poured at the lower end of the range through narrow openings. Speed is regulated by eruptions of sand compressed air. At the top of the cylinder is provided hydraulically operated telescopic possible to reduce the cross section annular space, if the rate of descent of the column increases.

Creating a considerable friction forces provides the necessary downforce [5].

At its compliance with the weight of the column adaptation must be considerable length, which is difficult to achieve.

Significant reduction of sectional casing made laboratory equipment and technology mounting holes State Research Institute of drilling technology. So spent downhill 340-millimeter intermediate column to a depth of 4600 meters in three sections instead of five for the project. Summarized and analyzed the existing methods of facilitating casing during their descent into the well and cementing options. Custom-designed technologies descent

columns, whose implementation is promising but technically challenging and has some limitations [6, 7]. These technologies include «pontoon» method of launching heavy casing and down the column by increasing the density of the fluid in the annulus.

Setting objectives. In general, the development on reducing sectional descent columns developed in two directions:

- Increasing capacity drilling rigs, creating special jacks for launching casing;
- Increasing the buoyancy force acting on a column of drilling fluid.

The first way allows you to perform difficult descent into the well casing and has only one restriction on buoyancy load in threaded connections. When using welded columns - is stretching the limit stress on the pipe.

The second way is technically complex and requires additional equipment casing, which introduces additional restrictions.

The first method shutter casing in one step is a real buoyancy and limited loads. In the second method sectional shutter casing is reduced by 30 – 60%.

Basic research and results. We suggested another way of lowering intermediate columns, which can overcome the limit load capacity drilling rigs by transferring the weight of the column that descends on cemented column as the foundation.

This approach to the task in one step downhill intermediate columns whose weight exceeds capacity drilling rigs, there are no restrictions on carrying capacity as drilling rigs and for buoyancy loads. Thus, the weight of the column hook may be only some portion of its actual weight.

The implementation of such technology can be implemented by various technical means.

The essence of the technology is that each extra weight of the column in its capacity equivalent to additional friction forces that arise in the area of extension. This technology does not depend on descent-duty drilling rig, does not create pressures on the basis of the towers, as well as additional tensile stress in the column by increasing its length. If this condition is met, all the known limitations for the descent intermediate columns of any length in one step removed.

In this approach, the weight of the casing, which descends allocated to previously established and cemented column buoyancy action moves down under load clog previously installed larger diameter columns. Changes diagrams of tensile stresses in the column.

Consider the technology of launching heavy casing on the example of a hypothetical well.

In the well to a depth of 6800 meters must pull a column diameter of 245 mm with wall thickness of 12 mm group Strength M, whose weight in the air 4760 kN. The column consists of a casing OTTM1 normal diameter couplings, acceptable load 3870 kN tensile and limit weighing thrilled 4350 kN. The descent is carried out drilling machine with capacity of 2000 kN installed in a borehole 324-millimeter casing at a depth of 3600 m.

Descent 245-millimeter column weighing 700 kN in the air performed by standard technology in depth, such as 1000 m.

Further down is performed on hard elastic centralizer (Fig. 1), each of which calculations show that the gap in columns with diameters of 245 and 324 mm is able to keep the weight of 12 – 16 kN with a coefficient of friction «metal – metal» 0.17.

Centrators setting while building columns, the rest can relieve the weight on 324-mm column.

To make it possible disruption columns with wedges set telescopic connection of 245-mm column with the progress of up to 0.5 m. The weight of the column in the telescope must be zero or less than the estimated depth, that column has quite hang on centralizers.

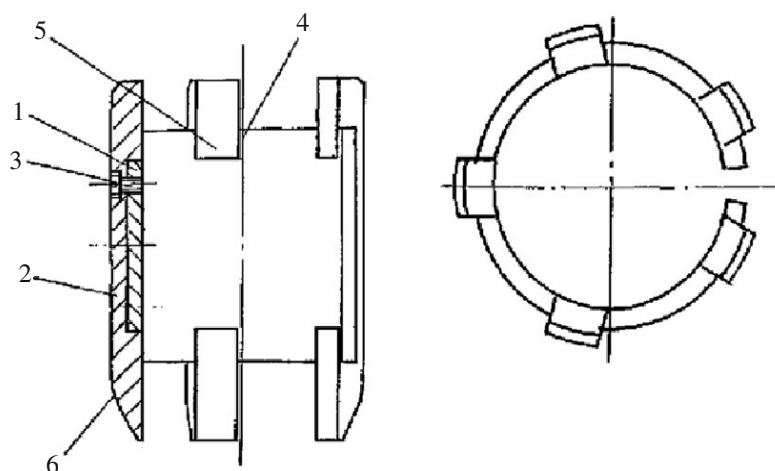


Figure 1 – Centralizer discharge pipe for the columns in the well:

1 – a spring element; 2 – guides cover; 3 – screw; 4 – grooves; 5 – performances; 6 – trim [6].

You can not install a telescopic pipe connection and use string tension for removal of wedges due to its extension. This will only lengthen the part of the column, the weight of which is on the hook, and the lower part will be unloaded at centralizers.

When you exit the clog 245-millimeter column of 324-millimeter trunk in the open weight 245-millimeter column to increase the value of the column that hangs on centralizers. Centrators not work in the trunk with a nominal diameter of 295 mm.

Increasing the column with the installation center tors can compensate for the weight of the column in the open barrel length of 3200 m and left hook column weight, easy to operate, of 200 – 300 kN.

It should be noted that the actual depth of the descent of the 245-millimeter column is buoyancy exercise in the open trunk from the 324-millimeter column.

In the case under consideration we can pull in one step 245-mm column weight of 6390 kN in the air (3870 kN clog from the 324-millimeter columns plus 2,520 kN to 324-mm column) length 9100 m.

In addition, due to the strength eject drilling fluid density of 1200 kg/m^3 length of the column can be increased by 15,28%. If you use a pipe steel grades P-110 in the open trunk, the weight of the column, launched at once drilling rigs carrying capacity of 2000 kN, 8710 kN can be up in the air, the equivalent of 12,443 meters.

In the Kola ultradeep wells could pull the 245-mm column at once to a depth of 14,344 meters drilling fluid with a density of 1200 kg/m^3 .

A necessary and sufficient condition for launching columns at once resistance is the borehole during descent.

Conclusions. This method allows lower hard casing into the well in one step. Limit the weight of the column is independent of duty rigs. Weight buoyancy columns limited load in threaded connections of the column, which is in the open trunk, plus the weight of the column to the bottom launched earlier column.

The benefits of lowering casing in one step include: no need to use permissible tool that restricts its weight weight section; no need to equip the column docking devices and the use of disconnectors; reduce wear columns in docking areas, where it reaches the highest value; alignment of columns create normal conditions for cementing; change diagram buoyancy loads in the column; favorable conditions to ensure the tightness of the column; no need for tension columns; shortening the mounting hole. A major shortcoming is the lack of opportunities «walking» column. A necessary condition for success is preparedness mounting hole to shutter columns.

References

1. Рекордный спуск 14" обсадной колонны // *Oil and Gas*. – 1973. – № 206. – P. 54.
Rekordniy spusk 14" obsadnoyi koloni // Oil and Gas. – 1973. – № 206. – R. 54.
2. Досвід проектування, випробування і планування рекордного спуску обсадної колонні діаметром 508 мм // *SPE, Drill, End*. – 1988-3. – № 2. – P. 187 – 194.
Dosvid proektuvannya, viprobuvannya i planuvannya rekordnogo spusku obsadnoyi koloni diametrom 508 mm // SPE, Drill, End. – 1988-3. – № 2. – P. 187 – 194.
3. Мильштейн В. М. Цементирование буровых скважин / В. М. Мильштейн. – Краснодар : ОАО «НПО «Бурение», 2003. – 286 с.
Milshiteyn V. M. Tsementirovanie burovyyh skvazhin / V. M. Milshiteyn. – Krasnodar : ОАО «NPO «Burenie», 2003. – 286 s.
4. Мильштейн В. М. Трехсекционная универсальная цементировочная головка с приставным коллектором ЗУЦГК-168-40 / В. М. Мильштейн, В. Б. Лазарев // *Строительство нефтяных скважин на суше и на море*. – 2005. – № 5. – С. 26 – 27.
Milshiteyn V. M. Trehseksionnaya universalnaya tsementirovochnaya golovka s pristavnym kollektorom ZUTsGK-168-40 / V. M. Milshiteyn, V. B. Lazarev // Stroitelstvo neftyanyh skvazhin na sushe i na more. – 2005. – № 5. – S. 26 – 27.
5. Патент 439112 США МКИ E21 В 33/16. Устройство для спуска обсадной колонны в скважину; опубликовано 31.12.1968, Бюл. № 2. – 4 с.
Patent 439112 SShA MKI E21 V 33/16. Ustroystvo dlya spuska obsadnoy kolonny v skvazhinu; opublikovano 31.12.1968, Byul. № 2. – 4 s.
6. Світалка П. І. Опис до деклараційного патенту України на винахід 48623 E21B17/10 Центратор розвантажувальний для колонні труб в свердловині / П. І. Світалка, І. Й. Рибич, В. В. Невежін, В. В. Соловйов; опубліковано: 18.08.2002, Бюл. № 8. – 2 с.
Svitalka P. I. Opis do deklaratsiynogo patentu Ukrayini na vinahid 48623 E21B17/10 Tsentratror rozvantazhuvalniy dlya koloni trub v sverdlovini / P. I. Svitalka, I. Y. Ribchich, V. V. Nevezhin, V. V. Solovyov; opublikovano: 18.08.2002, Byul. № 8. – 2 s.
7. Robert C. Smith. Amoco Production. Co. Tulsa. Checklist aids successful primary cementing / Robert C. Smith. Amoco Production. Co. Tulsa // *Oil and Gas Journal*. – 2008. – № 1. Vol. 80. – P. 30 – 33.

© Soloviev V., Mykhaylovskaya O., Yermakova I.
Received 25.05.2016

*Dorokhov M., assistant
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
Kostriba I., PhD, Associate Professor
Mychayluk V., PhD, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of oil and gas*

HERMETIZATION ABILITY ANALYSIS OF RUBBER SEALS OF TEST PACKERS IN THE FRAMEWORK OF CAE-SYSTEMS

The problems of test process of wellhead and preventer equipment during the construction and underground repair of wells are considered. The effects of extrusion of seal material into the gap to hermetization ability of self-sealing packer and quality test of wellhead and preventer equipment as a whole was analyzed and the need for serious research of self-sealing rubber cuffs was justified. The conditions of application of the model physics of themooney-rivlin material behavior in the implementation of computer simulation of stress-strain state of a rubber self-sealing cuff are analyzed. The major operational factors influencing the ability hermetization of self-sealing cuff during the test are described. The stages and results of computer simulation of stress-strain state of self-sealing rubber cuffs taking into account operational factors were determined. Comparison of the research results of hermetization ability cuff in the quantitative simulation and experimental study was done.

Keywords: *wellhead test packer, self-sealing cuffs; computer simulation, stress-strained state.*

*Дорохов М.А., асистент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
Костриба І.В., к.т.н., доцент
Михайлюк В.В., к.т.н., доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

АНАЛІЗ ГЕРМЕТИЗАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ПАКЕРІВ У РАМКАХ САЕ-СИСТЕМ

Розглянуто проблематику процесу випробування устєвого та противикидного обладнання під час спорудження та підземного ремонту свердловин. Виділено наявність множини конструкцій пакерів для проведення випробування та їх недоліки. Виявлено важливість вузла ущільнення пакера в розрізі герметизаційної здатності устєвого випробувального пакера та якості проведення процесу випробування в цілому. Проведено аналіз літературних джерел і публікацій у сфері дослідження герметизаційної здатності свердловинних пакерів. Висвітлено етапи та результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану гумової самоущільнювальної манжети з урахуванням експлуатаційних факторів.

Ключові слова: *устєвий випробувальний пакер, самоущільнювальна манжета, комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан.*

Introduction. During the construction and repair of underground oil and gas wells wellhead and preventer equipment must to be a subject to hydraulic test for checking the hermetization ability:

- To establish at the well;
- After each mounting at the well;
- After repairs (replacing preventer rams, replacing cylinder rod seal of ram preventer, etc.);
- Before opening productive horizon;
- Periodically in accordance with the requirements of drilling company or the company (in accordance with the requirements of API R 53 at intervals of not more than three weeks) [1].

When drilling it is often necessary to test the preventers in the case of open borehole. Creating an excess pressure in the well during test may lead to fluid absorption by the wells, and sometimes even to hydraulic fracturing. In this case it is not possible to comply with regulated requirements to test of mounted preventers.

Today to separate the borehole from the wellhead and preventer equipment during their test down hole packers are used. To test it should be used packer, with ease of operation and high hermetization ability. Such requirements today are corresponded to packer on the basis of self-sealing cuffs. To achieve hermetization it isn't necessary for external forces because the rubber seal of packers in the basis of self-sealing cuffs automatically trigger when the appearance of excess pressure of the test fluid in packer space.

The modern market of equipment for the construction or operation of oil and gas wells is characterized by a variety of packer design on the basis cuffs. The most successful design is the UHF test packer type manufactured by special rescue service «LIKVO» of PJSC «Ukrigasvydobuvannya» (Fig. 1) [2].

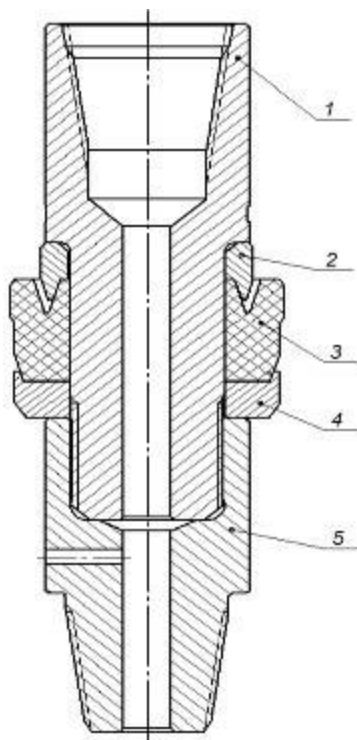


Figure 1 – Wellhead packer UHF 168x50:

1 – case; 2 – bearing sleeve; 3 – self-sealing cuff; 4 – retainer; 5 – selector

The main element of test packer construction is seal assembly on the basis of self-sealing cuff. This structural element determines hermetization of the borehole separation, and therefore the quality of the whole process of test wellhead and preventer equipment.

Given the importance of seal assembly in the system of the entire packer, a special place is development of its rational design. Today, there is no scientific and methodological basis for designing self-sealing cuffs. Some recommendations make it impossible to implement the system design principle, not take into account a number of factors that occur during operation of packers.

In connection with the above, a number of outstanding scientific and technical problems that require mandatory solution through additional research are appeared.

Analysis of recent publications. Currently, there are a large number of scientific papers about research of packer hermetization ability based on cylindrical cuffs [3]. The principle of this type of seal packers consists in application of additional axial external force for packer removal and imposes appropriate restrictions on the use of analytical dependences in developing self-sealing cuffs of wellhead test packers.

In the works [4, 5] the constructive design of test packer on the basis of self-sealing cuff with some practical recommendations to improve hermetization during the test wellhead and preventer equipment is highlighted. In [4] short information about rational cuff tension is given. In [5] recommendations on the radial clearance between the seal assembly retainer and casing pipe wall are given. In [4, 5] there are no experimental or theoretical confirmation of these recommendations.

Given the absence of clearly defined criteria to ensure the hermetization of rubber self-sealing cuffs of down hole packers, a critical analysis of scientific papers on research of self-sealing cuffs structures was conducted in the field of general engineering. The principle of the operation of self-sealing cuffs of down hole packers are absolutely the same principle of the cuffs used for locking the working fluid in movable and immovable joints of various hydraulic and pneumatic systems units or devices.

In the scientific work [6] the dependence of previous contact pressures of self-sealing cuffs on the value of pretension is highlighted. Work [7] presents a scheme of distribution of specific contact pressures on the conjugate cuff surface "outer lip - cylinder". Analytical equation for determining the contact pressures that occur in the process of hydraulic device work on contact sealing surfaces is derived. The authors of [8] classified the factors that determine hermetization of hydraulic cylinders.

Revealing still unsolved aspects of the problem. The results of the works [4 – 8] in theoretical and experimental studies of rubber self-sealing cuffs in the field of general machinery can't fully be used for research of hermetization ability and design of wellhead cuffs for test packers because of a completely different configuration of the latter. Proof of this is relevant study [9], indicating that the performance and value of stresses that occur during operation essentially primarily depend on the size, shape, material and operating temperature of the seal. Comparing the above configuration components of self-sealing cuffs of wellhead test packers and cuffs of general machinery, it can be argued that, apart from the principle of work, they have nothing in common.

In these scientific works there are no studies on the effect of deformation and strength characteristics of self-sealing cuffs such as pressure modulus or shear modulus on the seal. Practice has shown that soft and pliable material with a lower shear modulus, faster, easier and with less energy fills irregularities and hollows of seal surface. Seal surface of well can be represented as corrosive caverns, mud, clay crust of varying thickness and so on. This dramatically increases the extrusion of the material, which also has significant disadvantages (Fig. 2).

Rubber extrusion in irrational radial gap between the seal retainer and casing pipe leads first to a significant extrusion of the material as a result of tensile strength and of redistribution of operate contact pressures on the conjugate surface in the direction of reducing to zero, and then to depressurization due to violation of hermetization conditions. A solid material with

greater shear modulus leads to reduce of cuff flexibility. Lack of cuff flexibility has a negative impact during the initial test pressure when installing a packer into casing pipe with significant out-of-roundness on fit completeness of the operation cuff surface to seal surface of casing pipe. This greatly affects the seal and should be taken into account.

The analysis of research in this area shows that today there is no information on research of rubber self-sealing cuffs of wellhead test packers in terms of comprehensive action of power, geometrical parameters and material properties on the latest. There is no systematic distribution base of unit contact pressures under conditions of different levels of the stress state of the seal element at different values of the test pressure, radial clearance and tension.

Summarizing the above information, the authors decided to conduct hermetization ability of seal assemblies of self-sealing packers, taking into account a number of the most influential factors.

The aim of the work. The research was aimed to: identify the stress-strain state of seal assembly cuff in the test conditions for evaluating hermetization ability with the purpose of fundamentalization of development-constructing works with self-sealing cuffs of wellhead test packers.

Basic material and results. The priority is the study of experimental researches on specimens of cuffs of well-head test packers in conditions close to real.

Given the relatively high cost of experimental researches taking into account all factors and possible technical and design parameters of the cuff, search for alternative methods was conducted. An alternative method was analytical and numerical methods.

a)



b)



Figure 2 – Results of seal material extrusion:

- a – deformation of the cuff support after raising packer from the well;
- b – destruction of the packer cuff support due to rubber extrusion

For more complex structures and boundary conditions many numerical (computer) methods of solving problems are used that allow approximately describe nonlinear geometric forms and methods of application of an external load. A system with a large number of equations, whose solution requires significant computational power, is created for obtaining results with small precision. However, the development of modern computers is not an obstacle.

One method of computer simulation is the finite element method. It is based on replacing the freeform studying area by finite elements with simpler configuration and known properties that are interconnected in the assemblies. Parameters in any internal point are found with the known values of the field at the model borders (boundary conditions) point. Today this method is the most common because of the universality of approach [10].

The problem of the strain and stress patterns with different geometric dimensions and material properties, contact interactions of diverse bodies depending on the applied loads and conditions of interaction with contacting bodies are well solved using the finite element method in CAE-system.

Finite element method was selected to study stress-strain state of the cuffs and according of hermetization ability.

Computer simulation was performed as follows:

- Building a geometric model of seal assemblies;
- Choice of behavior for seal material;
- Splitting cuffs on finite elements;
- Definition of boundary conditions and loads during operation of wellhead test packer;
- Research to obtain relevant diagrams of strain and stress state.

In terms of the first and most critical stages for proper construction of finite-element model is the choice of seal material behavior model. That is necessary to determine the physical model of deformation and a number of physical parameters inherent in the existing model. The physical characteristics and the relationship between stress and deformation of rubber are set by hyperelastic models.

To represent the physics behavior of the material was selected Mooney – Rivlin model used to describe the behavior of low-compressible rubber during stretching and compression and is based on the expression of strain energy density for functions, which allows accounting up to nine parameters in the form of combinations of strain tensor invariants, whose values were established experimentally.

Finite element mesh was created after building geometric models (Fig. 3 a) and the appropriate boundary conditions on the kinematics of seal assemblies during the action of the test pressure were set (Fig. 3, B).

To simulate the cuff was following dimensions: inner diameter d is 81 mm; outside diameter D_M – 149.1 mm; height h - 70 mm. The inner diameter of 168-millimeter test casing pipe is 147,1mm.

The task of simulation within the CAE-system was to obtain the maximum equivalent stress (von Mises) and analysis of their distribution through the cuff body under load. Knowing the distribution of the maximum equivalent stress is very important in terms of research of extrusion process of cuffs in the test of wellhead equipment in radial clearance between the cuff support and the inner wall of the casing pipe d .

Practical experience shows that extrusion is the cause of destruction of the cuff support and packer depressurization during operation.

Simulation was performed on the basis of the most influential factors: the shear modulus of the material σ_{sh} (obtained experimentally), the value of the test pressure P , the value of the radial clearance δ between seal assembly support and the inner wall of the casing pipe and cuff tension Δ .

Fig. 4 shows an intermediate result of simulation in the form of diagrams of stress-strain state of the cuff indicating the restrictions.

The research result is related graphic dependences. One of them is shown in Figure 5.

Obtained dependencies were compared with experimental results. The discrepancy between the results of computer simulation and experimental study was 8%.

Identified simulation results made it possible to rationalize them in improving wellhead test packer and implement it into production.

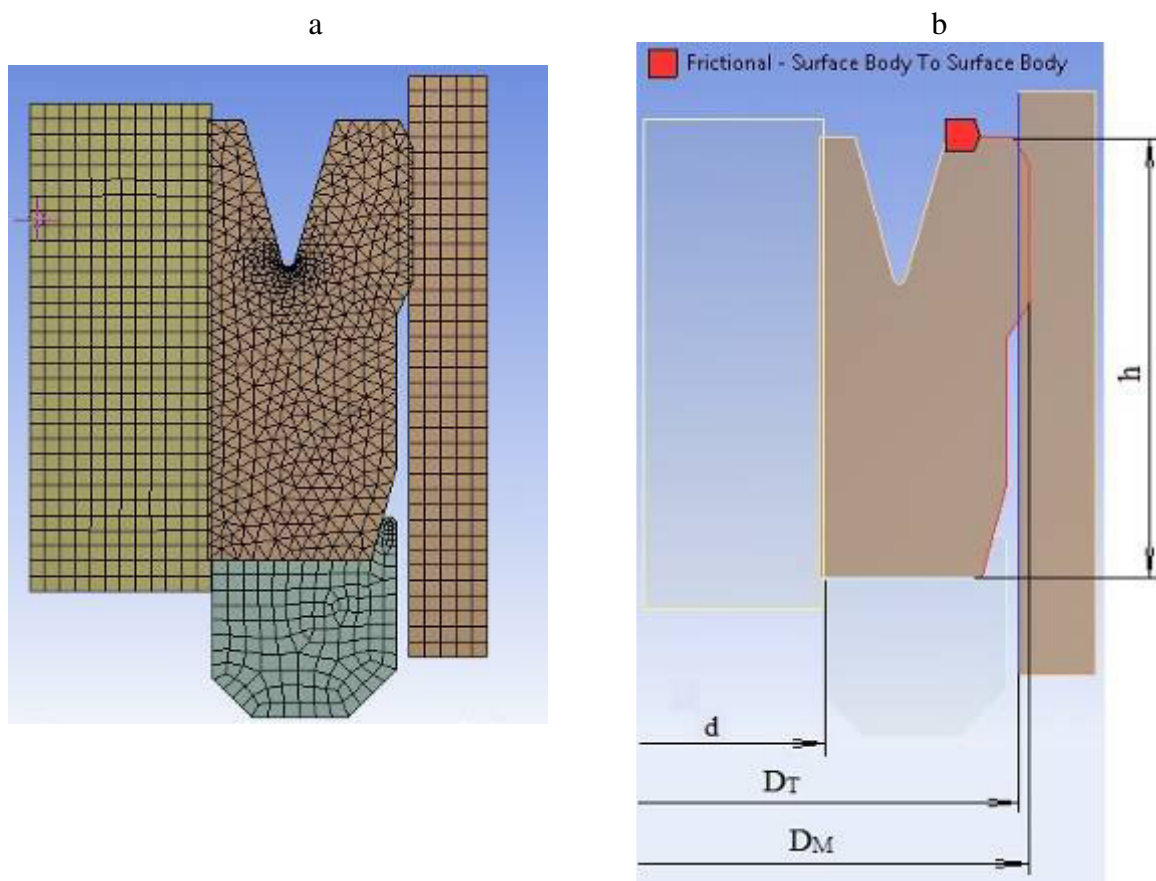


Figure 3 – Preparatory stages of finite element simulation:

a – creating finite element mesh; b – setting the boundary conditions
(d – inner cuff diameter; D_T – inner pipe diameter;
 D_M – outer cuff diameter; h – cuff height)

Research of advanced cuffs has been conducted considering similar impacts. Fig. 6 shows intermediate simulation results in the form of diagrams of stress-strain state of the cuff indicating the restrictions.

Improvement of stress-strain state is obvious after comparing the results of the study. Fig. 6 shows that the area of the radial clearance is no longer the stress raiser. This was achieved due to the increasing the height of the cuff support and the angle of inclination in contact point with packer support.

Research make it possible to argue that numerical simulation is an effective research tool and creates rational design of seal assemblies of down hole test packers.

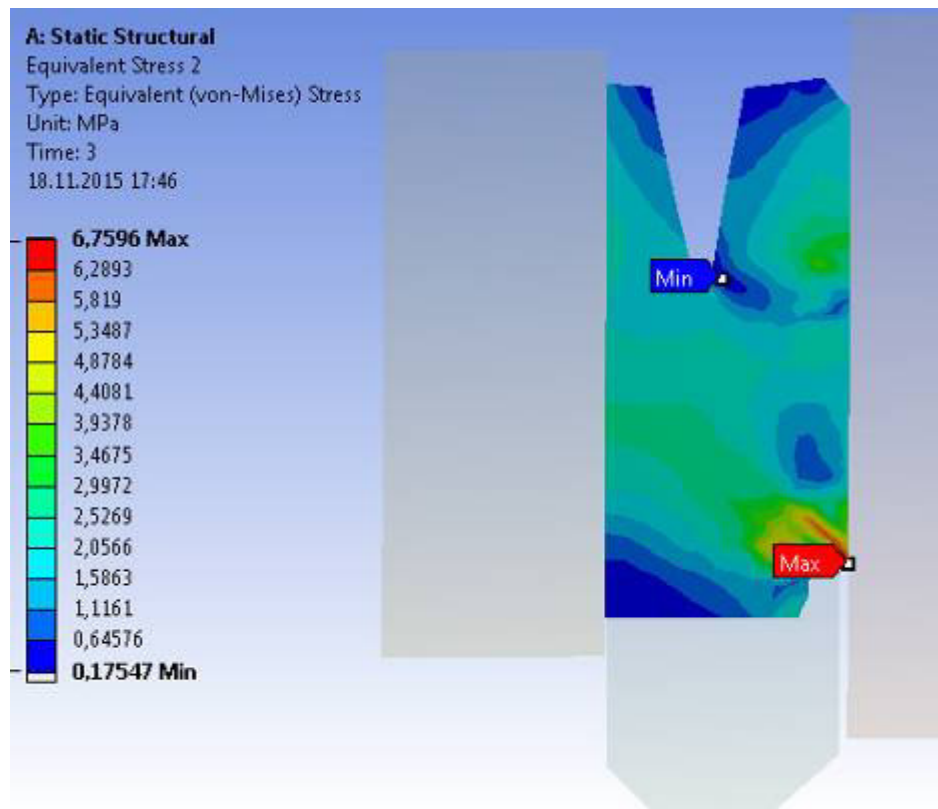


Figure 4 – Distribution of equivalent stress (von Mises) under the following conditions:
 $\Delta = 2 \text{ mm}$; $\delta = 1 \text{ mm}$; $\sigma_{sh} = 2.47 \text{ MPa}$; $P = 30 \text{ MPa}$

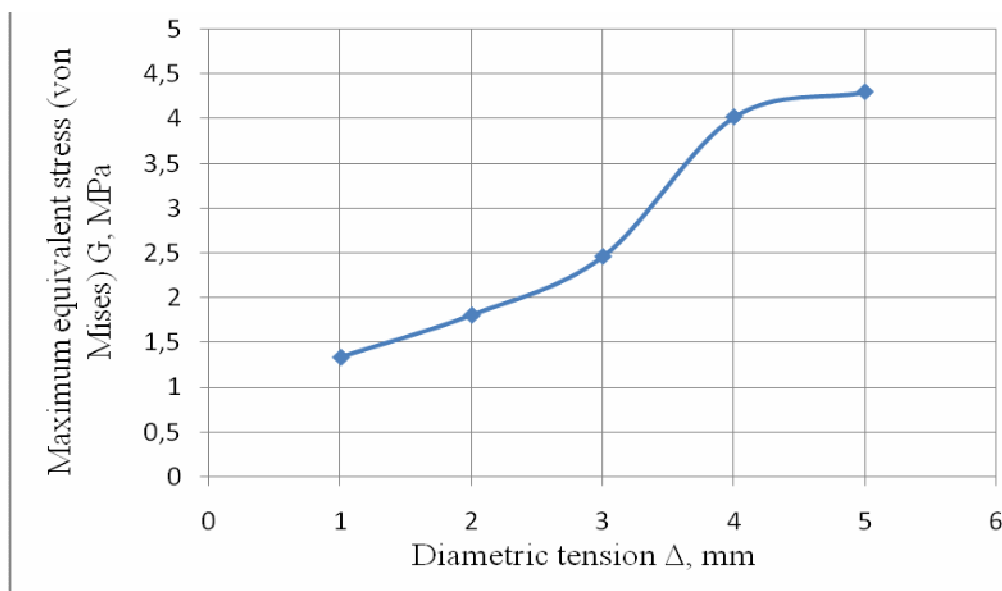


Figure 5 – Dependence of maximum equivalent stress G on the tension Δ of self-sealing cuff

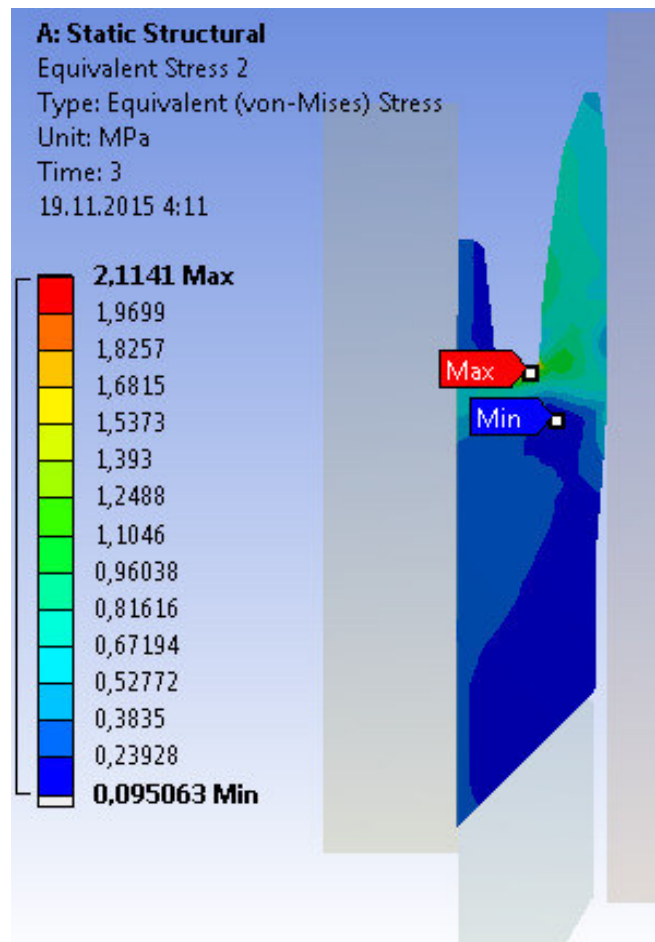


Figure 6 – Distribution of equivalent stress (von Mises) under the following conditions:
 $\Delta = 2 \text{ mm}$; $\delta = 1 \text{ mm}$; $\sigma_{sh} = 2.47 \text{ MPa}$; $P = 30 \text{ MPa}$

Conclusions. Computer simulation of the stress-strain state of self-sealing cuffs of wellhead test packer has allowed concluding the next.

The most dangerous zone of stress concentration is lower zone of the cuff support at the border with radial clearance.

The intensity of increasing maximum equivalent stress increases with radial gap of 4 mm and above.

The angle of inclination of the support cuff and the angle of inclination in contact point with packer support are essential.

Material elasticity and the value of material extrusion material in the gap increase with decreasing shear modulus. The simulation showed that rational shear modulus can be considered value $\sigma_{sh} = 2.47 \text{ MPa}$.

Significant influence on stress distribution is the value of the cuff tension. Rational tension with minimum required values of contact pressures is the range of 3 - 4 mm.

The research results of improved form of self-sealing cuff showed a significant decreasing stress in the area of stress raiser - radial gap.

References

1. Костриба І. В. Розроблення та дослідження пакерів для випробування протівикидного обладнання / І. В. Костриба, М. А. Дорохов // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика – 2013»: тези доповідей. – І.-Фр., 2013. – С. 54 – 56.
Kostriba I. V. Rozroblennya ta doslidzhennya pakeriv dlya viprobuvannya protivikidnogo obladnannya / I. V. Kostriba, M. A. Dorohov // Materiali Mizhnarodnoyi naukovno-tehnichnoyi konferentsiyi «Naftogazova energetika – 2013»: tezi dopovidey. – I.-Fr., 2013. – S. 54 – 56.
2. Дорохов М. А. Дослідження механічних властивостей гумових ущільнень свердловинних пакерів / М. А. Дорохов // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2014. – № 2(37). – С. 27 – 31.
Dorohov M. A. Doslidzhennya mehanichnih vlastivostey gumovih ushchilnen sverdlovinnih pakeriv / M. A. Dorohov // Naukoviy visnik Ivano-Frankivskogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu nafti i gasu. – 2014. – № 2(37). – S. 27 – 31.
3. Яковлев А. С. Исследование работы манжетных уплотнителей пакеров в режиме самоуплотнения / А. С. Яковлев, С. С. Яковлев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 9. – С. 44 – 46.
Yakovlev A. S. Issledovanie raboty manzhetnyh uplotniteley pakerov v rezhime samouplotneniya / A. S. Yakovlev, S. S. Yakovlev // Stroitelstvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. – 2006. – № 9. – S. 44 – 46.
4. Ледяшов О. А. Пакеры для опрессовки устья скважин типа ПОУ / О. А. Ледяшов, В. Г. Никитченко, Е. Н. Штахов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – № 1. – С. 25 – 27.
Ledyashov O. A. Pakery dlya opressovki ustya skvazhin tipa POU / O. A. Ledyashov, V. G. Nikitchenko, E. N. Shtahov // Stroitelstvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. – 2008. – № 1. – S. 25 – 27.
5. Римчук Д. В. Нові технічні засоби ДП «ЛІКВО» для забезпечення фонтанної та газової безпеки під час буріння та капітального ремонту свердловин / Д. В. Римчук // Нафтогазова галузь України. – 2015. – № 6. – С. 37 – 40.
Rimchuk D. V. Novi tehnichni zasobi DP «LIKVO» dlya zabezpechennya fontannoyi ta gazovoyi bezpeki pid chas burinnya ta kapitalnogo remontu sverdlovin / D. V. Rimchuk // Naftogazova galuz Ukrayini. – 2015. – № 6. – S. 37 – 40.
6. Buyalich G. D. Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation / G. D. Buyalich, K. G. Buyalich // Presented at Mining 2014: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control: Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety, China, Qingdao (17 – 20 October 2014). – Amsterdam – Paris – Beijing: Atlantis Press, 2014. – P. 167 – 170.
7. Boart P. On the Normal Stress Effect in Grease-Lubricated Bearing Seals // P. Boart, M. Lugt, B. Procash // Tribology Transactions. – 2014. – Vol. 57. – Issue 5. – P. 939 – 943.
8. Huang Y. Simulation of the Effects of a Plunge Ground Rod on Hydraulic Rod Seal Behavior // Y. Huang, R. Slant // Tribology Transactions. – 2013. – Vol. 56. – Issue 6. – P. 986 – 996.
9. Лепетов В. А. Расчет и конструирование резиновых изделий / В. А. Лепетов, Л. Н. Юрцов. – М.: Химия, 1977. – 408 с.
Lepetov V. A. Raschet i konstruirovaniye rezinovykh izdeley / V. A. Lepetov, L. N. Yurtsov. – M.: Himiya, 1977. – 408 s.
10. Дорохов М. А. Чисельний метод у дослідженні вузлів ущільнень випробувальних свердловинних пакерів / М. А. Дорохов // Матеріали 68-ї наукової конференції Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка: тези доповідей. – Полтава, 2016. – С. 54 – 57.
Dorohov M. A. Chiselniy metod u doslidzhenni vuzliv ushchilnen viprobuvalnih sverdlovinnih pakeriv / M. A. Dorohov // Materiali 68-yi naukovoї konferentsiyi Poltavskogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu imeni Yuriya Kondratyuka: tezi dopovidey. – Poltava, 2016. – S. 54 – 57.

© Dorokhov M., Kostriba I., Mychayluk V.
Received 15.06.2016

Dryuchko A., PhD, Associate Professor
Storozhenko D., PhD, Associate Professor
Bunjakina N., PhD, Associate Professor
Ivanytska I., PhD, Associate Professor
Nikiforova L., senior teacher
Kulchii O., laboratory chief
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

USING THE CONFORMITY COMPLEXATION REE IN NITRATE SYSTEMS IN FORMATION OF OXIDE OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS ON THEIR BASIS

Using the complex of physico-chemical methods the studied the nature and special features of chemical interaction, thermal transformations (25 – 1000 °C) of structural components in a model system of neodymium and potassium nitrates – systems of nitrates of rare-earth elements and elements of periodic system IA group, ammonium, that at present are widely used in syntheses, technological regulations of creation on their base constructional materials of different designation with the assigned complex of structurally sensitive characteristics. A number of special features and regularities in their joint behavior were discovered.

Keywords: neodymium, potassium, nitrates, complexion, coordination compounds, thermal transformations, property.

Дрючко О.Г., к.х.н., доцент
Стороженко Д.О., к.х.н., доцент
Бунякіна Н.В., к.х.н., доцент
Іваницька І.О., к.х.н., доцент
Нікіфорова Л.І., ст. викладач
Кульчій О.М., зав. лабораторії

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВИКОРИСТАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ РЗЕ У НІТРАТНИХ СИСТЕМАХ ПРИ ФОРМУВАННІ ОКСИДНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Із застосуванням комплексу фізико-хімічних методів вивчено природу й особливості хімічної взаємодії, теплових перетворень (25 – 1000°C) структурних компонентів у модельній системі нітратів неодиму і калію – систем нітратів рідкісноземельних елементів та елементів ІА групи періодичної системи, амонію, що нині широко використовуються у синтезах, технологічних регламентах створення на їх основі конструкційних матеріалів різного призначення із заданим комплексом структурно-чутливих характеристик. Виявлено низку особливостей і закономірностей у їх сукупній поведінці.

Ключові слова: неодим, калій, нітрати, комплексоутворення, координаційні сполуки, термічні перетворення, властивості.

Statement of the problem. Considerable attention that now is being paid to the study of nanoscale materials, primarily, is due to significant differences of their properties from the properties of bulk materials of the same composition and is the result of detection by them of quantum effects.

For obtaining the nanosized inorganic materials on oxides of transition and rare earth elements, the most promising is the use of methods of «soft chemistry» based on synthesis from aqueous or non-aqueous solutions at relatively low temperatures. Their key advantages are: the possibility of obtaining products with controlled composition and micromorphology, efficiency, environmental acceptance and so on. Unfortunately, the vast majority of the currently known studies does not make it possible to formulate general principles for creation of nanomaterials possessing the assigned composition, micro and mesostructure, functional characteristics. The main reason for this is that the mechanism of nanoparticles formation in these conditions is rather complex from physico-chemical point of view and may include parallel processes of hydration (solvation), association, complexation, formation and transformation of heterophases, laws of which are poorly understood. In this regard, one of the main challenges in the development of reproducible methods for the directed synthesis of nanodispersed materials using approaches of «soft chemistry» is a detailed study of mechanisms and dynamics of processes taking place during formation of nanoparticles. Such fundamental study envisages a systematic study of the composition and micromorphology of intermediate compounds, that in most cases determine the microstructure and structure-sensitive characteristics of the final polifunctional nanomaterials.

Modern REE oxides-containing polifunctional materials are extremely diverse. A common uniting point for all of them is the structure. Transition metals in structure of complex oxides coordinate oxygen polyhedra of different configurations. The structure of substances is formed by various combinations between polyhedra, which in different combinations can be united by vertices, edges, faces. In cavities formed by fragments of polyhedra rows the larger cations of alkali, alkaline earth, rare-earth elements are placed. Many properties of complex oxides depend not only on their composition and structure but also on defect structure that purposefully allows to influence their target parameters.

Analysis of major studies and publications which initiate the problem solution. At present, the search of new methods and complex technologies for the synthesis of special, functional REE oxide-containing materials with a liquid multi-component nitrate systems [1 – 15] is being carried out. Such technological schemes are based on the production of fine powder materials by chemical homogenization of initial components in joint selection of products from the liquid phase by sequential or joint deposition followed by heat treatment in the form of their hydroxides or other insoluble compounds; the use of a thermolysis method of a solvent, ionic and molecular coordination precursors; replacement of a solvent; a spray drying; cryochemical crystallization, sol-gel processes, etc. The synthesis of nanocrystalline materials is a complex scientific and technological problem.

The information about the condition and possible ways of improvement of creation technologies of REE oxide-containing polifunctional materials is available [16]. The existing requirements to their stability and reproducibility properties initiated our study.

The results of these studies become particularly relevant when using such multicomponent REE-containing zirconate and molybdate, as a stable and sustainable over time immobilizer, liquid radioactive waste and the study of the processes of their absorption, adsorption in similar frame matrices.

Problem formulation and solution methods. The aim of this work is a basic research of cooperative processes proceeding upon obtaining the oxide rare earth-containing functional materials using nitrates of elements of various electronic structure and finding the possible methods of influence on liquid-phase and solid-phase systems based on thermal activation of

reagents for reproducing their structure-sensitive characteristics. In the work to assess the management of these processes and to obtain materials with the desired properties as model it was studied the system $KNO_3 - Nd(NO_3)_3 - H_2O$, components of which specify the technical characteristics of the synthesis product or modify its physical properties. The choice for studies of neodymium nitrate (as representative of the rare earth elements of cerium subgroup) is determined by existing statistical data about the most probable changes in composition or structure of the compounds created by neodymium while passing from lanthanum to lutetium in a natural number. The choice of values for the temperature section 50°C for studying the solubility isotherms of the system is determined by instability of hexahydrate of neodymium nitrate and start point of its melting in crystalization water at 68°C, above which it is in a liquid highly viscous metastable condition.

To solve this problem, our research were focused on:

- solid analytical literature review of the available scientific information on the subject of the work;

- the choice of methods and means of physico-chemical studies of a model system;

- mastering the methods and techniques of preparation and conduct of the experiment;

- experimental study of chemical interaction of components, heterogeneous equilibria in water-salt system $KNO_3 - Nd(NO_3)_3 - H_2O$ (50°C) with the application of complex physico-chemical methods;

- building the isothermal solubility chart system. Determination of concentration limits of original compounds crystallization and identified of complex salts in the system;

- identification of optimal growth conditions and performing the synthesis of coordinating neodymium nitrates and potassium examination of their properties and confirmation of identity;

- thermographic study of solid phases produced in the system of neodymium nitrate and potassium from solutions, solutions-melts, melts;

- clarification the nature and peculiarities of sequential thermal transitions in the rare earth-containing nitrate multicomponent systems in different aggregate states during the heat treatment;

- using the acquired knowledge to justify the preparatory processes in the production of REE-containing functional materials for various purposes, development of possible ways to control them.

To clarify the nature of chemical interactions and phases equilibria in water-salt system of the studied nitrates (precursors of multicomponent oxide functional materials) in full concentration ratios in a temperature range of solutions existence the method of solubility, described in [17, 18], was used.

The method allows to find the limits of self-development, to which in specific conditions in equilibrium state the isolated system of this composition aims.

The transformations nature of solid phases, crystallizing in the investigated ternary system was studied using the method of thermal analysis on derivatograph Q – 1500 D, the developed thermoanalytical complex, as well as methods of elemental and X-ray analysis.

The experimental part. In this work as source salts there were used hydrated and anhydrous nitrates of these elements of the brand «p.f.a.», additionally purified by recrystallization.

Heterogeneous equilibria in aqueous system of nitrate salts was studied isothermally at 50 °C in dry air thermostat, with continuous mixing using the mixing electromagnetic multi-device. The equilibrium of phases was established within 1 – 2 days. Sampling of liquid and solid phases of the investigated mixtures for preventing crystallization and maximum separation of mother mix were carried out by a special samplers in the same isothermal conditions using the forvacuum pump.

The chemical analysis of liquid and solid phases, the «leftovers», were tested on the content of Nd^{3+} ions, they were determined trigonometrically; ions K^+ were calculated according to the difference concerning the total content of nitrates in dry residue. The obtained experimental data from the studied system for individual ions were calculated according to their salt content, generalized, summarized in table 1 and according to the correspondent principles were applied to the solubility chart (Fig. 1).

**Table 1 – Data of phase equilibria study
in the system $KNO_3 - Nd(NO_3)_3 - H_2O$ at 50 °C**

Points of composition	Saturated solution				Composition of «leftovers», wt. %		Solid phases*
	Composition, wt. %		Properties				
	KNO_3	$Nd(NO_3)_3$	$d \cdot 10^3$ кг/м ³	n	KNO_3	$Nd(NO_3)_3$	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
1 A	44,88	0,00	1,223	1,3748	100,00	0,00	A
2	40,12	8,67	1,391	1,3862	97,93	1,25	Also
3	35,21	20,31	1,514	1,4014	95,68	1,72	« - »
4	28,46	38,81	1,602	1,4406	94,51	3,22	« - »
5	26,80	48,65	1,858	1,4659	94,03	4,36	« - »
6					91,54	5,56	« - »
7					74,51	23,07	A + G
8 } D	27,26	51,82	2,092	1,4781	37,95	52,73	Also
9 }					33,84	56,49	G
10	24,08	53,28	2,064	1,4764	34,07	57,16	Also
11					34,58	57,29	« - »
12 } E	21,34	54,91	2,068	1,4791	31,95	60,97	G + H
13 }					29,82	65,46	H
14	17,03	57,09	1,960	1,4772	30,12	66,91	Also
15	13,94	61,08	1,969	1,4778	29,23	66,65	« - »
16					29,61	67,07	« - »
17 } F	11,49	63,31	2,124	1,4822	15,17	70,18	H + B
18 }					8,01	70,76	Also
19	4,44	66,02	1,964	1,4726	1,76	72,49	B
20 C	0,00	66,16	1,974	1,4667	0,00	75,28	« - »

* A – KNO_3 ; B – $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$; G – $K_2[Nd(NO_3)_5(H_2O)_2]$; H – $K_3[Nd_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$

Graphical display of composition of solid phases formed in the system was carried out according to Schreinemakers [17, 18]. Their identity was confirmed by chemical, X-ray phase, thermal and other methods of analysis.

The study of mutual behavior of structural components in a liquid phase and phase of equilibria in the system of potassium nitrate - neodymium nitrate - water, the building of its solubility isotherms allow to determine the concentration boundaries of separation into the solid phase of potassium coordinating neodymium nitrates. The obtained data allowed to make the choice of optimal conditions of separation of complex nitrates and carry out their synthesis by isothermal evaporation of the solvent. In slightly supersaturated mother mixture isometric crystals of binary potassium nitrates were obtained. The habitus of crystals $K_2[Nd(NO_3)_5(H_2O)_2]$ (Fig. 2, a), $K_3[Nd_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$ (Fig. 2, b) is determined by the composition of compounds, the nature and content of their constituent cations, conditions of crystallization and is their diagnostic sign.

The chemical analysis of the synthesized compounds confirms the mass ratio of elements in the above formulas. The conducted x-ray phase analysis of samples indicates that the compounds are characterized by individual set, position and intensity of lines in the diffraction charts (see Fig. 3) and it confirms their individuality. Thermographic examination of initial nitrates KNO_3 , $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$; solid phases formed in the system of neodymium nitrates and potassium; synthesized potassium coordinating nitrates of REE were conducted on the developed thermoanalytical complex for differential thermal analysis and on derivatograph of F. Paulik, I. Paulik, L. Erdei Q – 1500 D system.

The used tools made it possible to investigate physical and chemical transformations in the resulting compounds under the influence of heat and confirmed their identity.

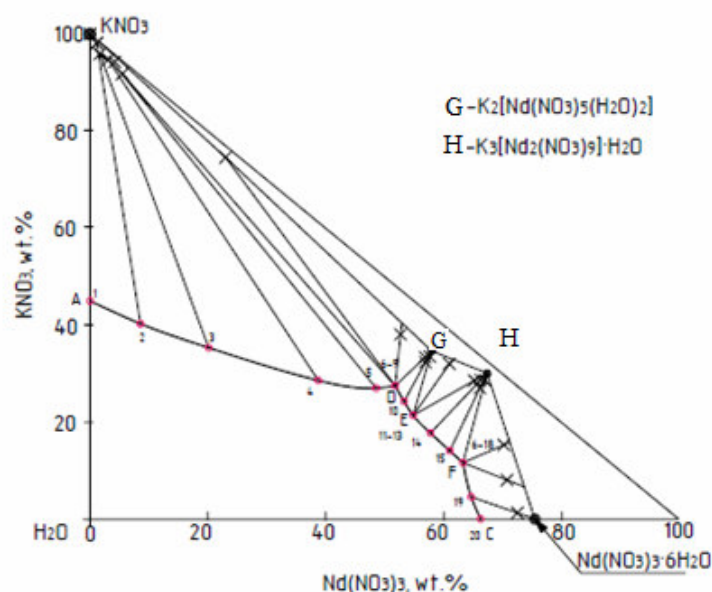


Figure 1 – Solubility system isotherm $KNO_3 - Nd(NO_3)_3 - H_2O$ at 50 °C

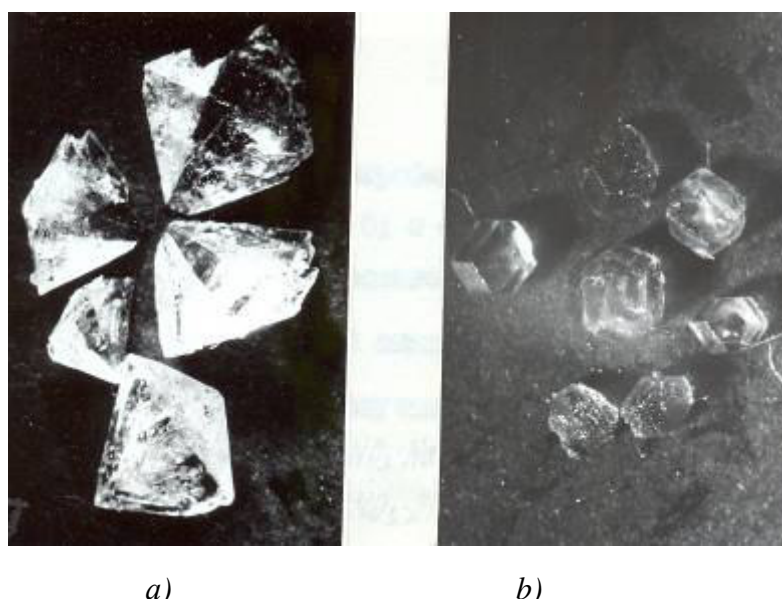


Figure 2 – Microphotos of crystals
a) $K_2[Nd(NO_3)_5(H_2O)_2]$; b) $K_3[Nd_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$

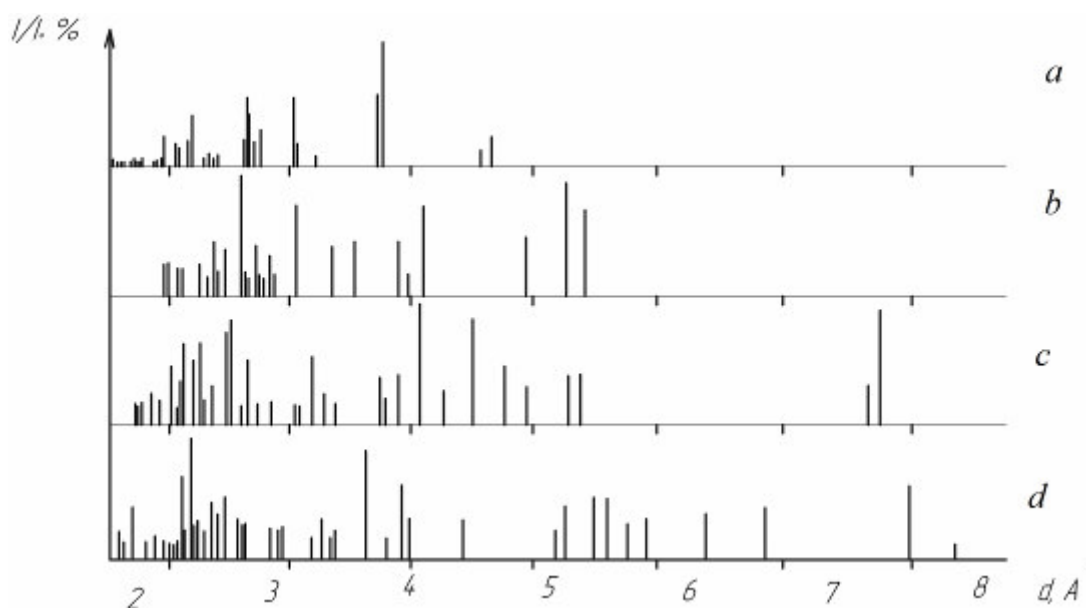


Figure 3 – A stroke X-ray chart of initial salts of nitrates
a) potassium, d) neodymium and identified coordination compounds
b) $K_2[Nd(NO_3)_5(H_2O)_2]$, c) $K_3[Nd_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$

The results of the research. By physical and chemical methods in water-salt system of neodymium nitrates and potassium at 50°C between structural components there were found the exchange interactions with the formation of 2 new anionic coordination compounds. The number, composition, concentration limits of crystallization phases coexisting in the system, the nature of their solubility were studied. The phase diagram of solubility was built. Concentration limits of saturated solutions from which the complex nitrates appear coincide with compositions of nonvariant points of solubility isotherms. All possible types of compounds were found. They are all synthesized in a single crystal form. The systematic study of some of their properties was carried out.

In the studied water-salt systems with the increase of the activation energy of heating the complexometric ability of Ln increases. Competing processes of substitution of H_2O molecules on NO_3 -group in presence of Ln^{3+} create conditions for formation of corresponding high symmetric complexes. The different ways of their spatial packing with other structural elements in the crystallization process leads to separation from a liquid phase of anionic coordination compounds of definite composition and structure. The processes of complex formation are affected by the nature of the central atom-complexformer, directed effect on the solutions structure of available singly charged cations (e.g., K^+), the concentration and character of thermal motion of structural elements. A significant effect of the temperature factors, the need for some activation energy for such transformations and their staging were found. The found peculiarities of the aggregate behavior of structural elements in the studied system indicate that the leaky competing reactions are strong technological factors significantly affecting the changes of the lanthanides structural forms activity.

The authors have also studied thermography of the solid phases formed in the system of neodymium nitrates and potassium to explain some regularities that occur in the studied processes of synthesis of oxide rare earth-containing functional materials, as well as for comparison characteristics that confirms the identity of the received new coordination compounds. The given information of KNO^3 behavior is based on references data [19 – 22]; $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (Fig. 4), $K_2[Nd(NO_3)_5(H_2O)_2]$, $K_3[Nd_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$ -on data from our own studies (Fig. 5, tables 2, 3).

Thermal decomposition of $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ is of a complex character (Fig. 4).

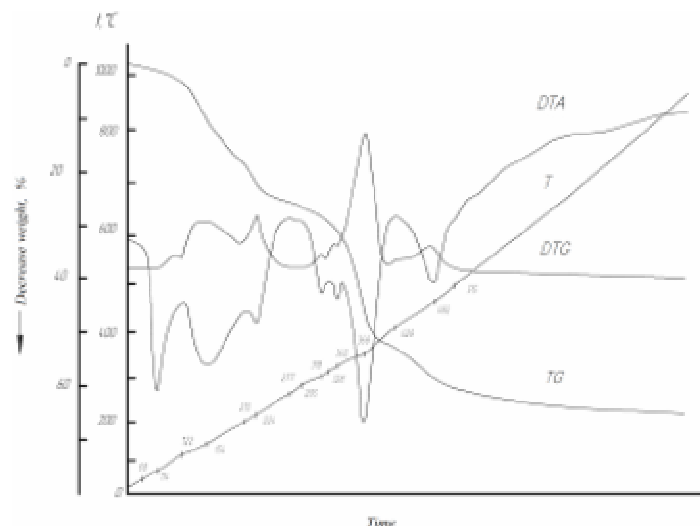
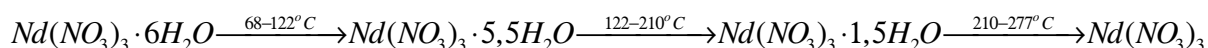
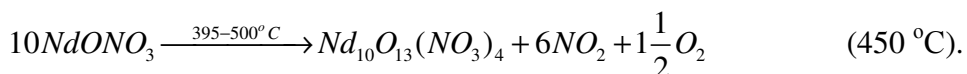
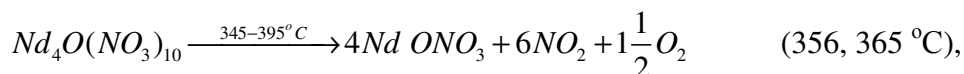
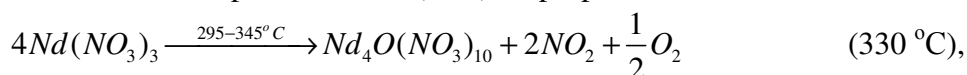


Figure 4 – Derivatograph $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

The obtained results are consistent with the data given in a work [23]. At 74°C $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ it melts in crystallization water (start melting point is 68°C). In temperature range of $74 - 224^\circ\text{C}$ conversions happen in viscous liquid metastable phase, due to instability of its crystalhydrate forms. The peaks on the curves DTA, DTG with extremes $154, 224^\circ\text{C}$ correspond to end effects that overlap and are linked with dehydration of a sample according to the scheme:



Anhydrous neodymium nitrate exists in the temperature interval $277 - 295^\circ\text{C}$. This is indicated by the dominance of relations $\text{Nd} - \text{ONO}_2$ in the melt crystalhydrate forms of neodymium nitrate in spectroscopic studies [24] and clear stoichiometry and composition of complex oxynitrates formed at later stages of decomposition. The fact of existence of $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ simplifies elemental analysis of studied samples and allows to do analytical determinations according to dry residue. In [23] on the base of data from chemical, thermal analyses the scheme of further decomposition of $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ is proposed



According to our data, Nd_2O_3 is formed above 515°C . Thermal transformations identified in water-salt system of potassium coordination compounds of neodymium (representative of the cerium subgroup) and terby (representative of yttrium subgroup) [25] were studied up to 1000°C and shown in (Fig. 5).

The temperature values of the identified effects, their character and nature are systematized and summarized in tables 2, 3. The obtained data allow the identification of phases. A number of characteristics and laws was found. Their justification from the positions of competing processes is being done.

Based on the characteristics of obtaining process of oxide REE-containing functional materials there is an interest to limits of concentration ratios of components to which in phase diagrams the crystallization fields of initial nitrates of rare-earth elements, coordination compounds and their mixtures correspond.

The results of thermal transformations studies of new solid phases found in the model system (see Fig. 5, tables 2, 3) indicate the different nature of the processes of transformation of compounds of rare-earth elements of cerium and yttrium groups, low and high - temperature of compounds forms of «light lanthanides». Thermograms of elements compounds in the first subgroup are characterized by the formation of anhydrous nitrates. Among compounds with the same name and outer sphere cation the nitrates with a high content of lanthanotus are more heat resistant.

Table 2 – Temperature representatives transformations of the coordinating group of REE nitrates

Compounds	Representatives	Dehydration	Melting in crystallization water	Polymorph transfer	Melting of anhydrous form	Note
$K_2[Ln(NO_3)_5(H_2O)_2]$	La – Nd	95,111	95	219	314	cerium subgroup, values for coord. compounds Nd
$K_3[Ln_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$	La – Sm	126	–	–	347	cerium subgroup, values for coord. compounds Nd
$K[Ln(NO_3)_4(H_2O)_2]$	Y, Gd – Lu	138,172	138	–	–	yttrium subgroup, values for coord. compounds Yb

Table 3 – The composition of thermolysis products (air, 980 °C) of coordination nitrates REE, Y and potassium according to the XRD

Compounds	Representatives	Composition of transfer products
$K_2[Ln(NO_3)_5(H_2O)_2]$	<i>La – Nd</i>	$KLnO_2$, Ln_2O_3
$K_3[Ln_2(NO_3)_9] \cdot H_2O$	<i>La – Sm</i>	Ln_2O_3
$K[Ln(NO_3)_4(H_2O)_2]$	<i>Y, Gd – Lu</i>	Ln_2O_3

The fact of existence of polymorphism in crystals of composition $K_2[Ln(NO_3)_5(H_2O)_2]$ ($Ln - La - Nd$) was found. This phenomenon can be explained by the fact that in crystals the disorder occurs due to implementation availability of several distinctive orientations of ions NO_3^- . This kind of disorder is possible due to symmetry of flat NO_3^- -ligand, the way of coordinating them by central atom (Ln^{3+} $_{3+}$ -complexing agents), as well as the method of packing complexes into spatial structure.

The temperature properties of yttrium subgroup compounds are characterized by the absence of stable anhydrous forms of nitrates, low melting temperatures, dehydration from the molten state, the formation of Ln_2O_3 (980°C). The composition of thermal conversion products (about 980°C) compounds of cerium subgroup depends on the composition of initial nitrates, the degree of volatility of oxides of corresponding alkali metals. In products of thermolysis the compounds $K_2[Ln(NO_3)_5(H_2O)_2]$, except oxides K_2O , contain also their dioxolanthanides $KLnO_2$.

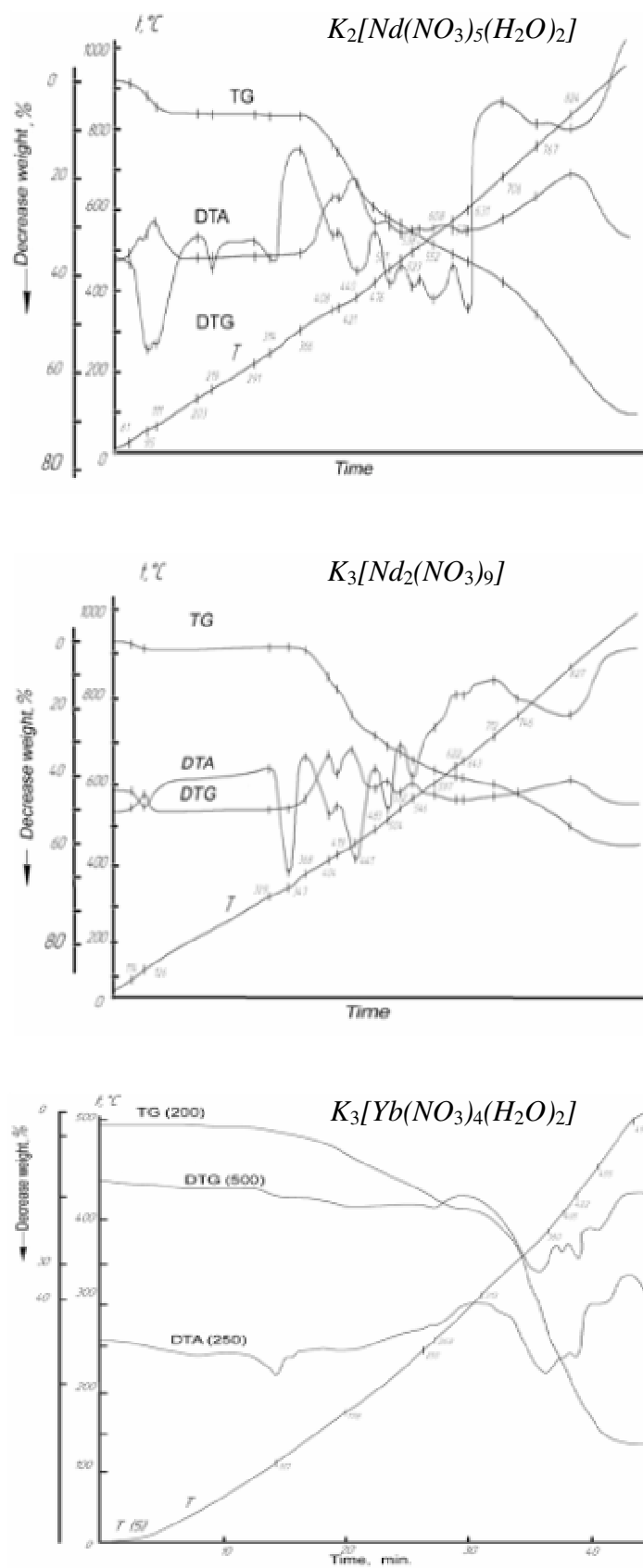


Figure 5 – Derivatograph chart of potassium coordination neodymium and terbium

Analysis of the research results with the study of model systems and system analysis of information obtained from scientific publications on the topic of this paper evidents that a positive feature of the use of these REE-containing nitrate systems compared to other soluble systems of chlorides, oxalates is in that, that competing ion exchange interaction leads to easy formation of a whole class of anionic coordination compounds Ln^{3+} with oxygen atoms (electron donors) NO_3^- -groups (ligands) of the entire natural range of rare earth elements with all cations of alkali metals, and still stable both in solutions and melts. This allows to carry out technological transformations with a low energy cost (due to low activation energy of the processes of complexation Ln^{3+} with planar small NO_3^- -groups). Complex compounds are fusible, little aggressive, elements of cerium subgroup are non-volatile. It allows to work at lower temperatures, the temperature range of stability of complex particles increases.

Conclusions:

The results of the study indicate that processes of obtaining REE oxide-containing structural and functional materials for various purposes using nitrates with various elements of electronic structure by chemical mixing the initial components in joint selection of products from the liquid phase by sequential or joint deposition followed by heat treatment happen stage by stage through the formation of several intermediate phases. Their structure, content and behaviour, in each case, require systematic empirical knowledge about their joint behavior in full concentration ratios in a given temperature interval.

The differences in the behavior of structural components in systems lanthanides of cerium and yttrium subgroups, the nature of interaction, stages, characteristics and regularities of flow were found.

New knowledges are the basis for:

- search of ways of increasing the activity of Ln -forms;
- clarification of the nature of serial thermal transformations of nitrate REE containing multicomponent systems of different aggregate states in the course of their thermal treatment; conditions of formation and existence, properties of intermediate phases; influencing factors; possible methods of control;
- for creation of modern, perfect low-cost technologies for the synthesis of constructional various purposes materials with reproducible properties.

References

1. Anosov V. Y. *Fundamentals of physico-chemical analysis* / V. Y. Anosov, M. I. Ozerova, Yu. Y. Fialkov. – M.: Nauka, 1976. – 503 p.
2. *The influence of the method of obtaining of phase transformations, structure and magnetoresistive properties of manganites $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$* / A. G. Belous, E. V. Pashkova, O. I. Vunov and other // *Ukr. chem. Journ.* – 2005. – Vol. 71, № 5. – P. 17 – 23.
3. Belous A. G. *Complex metal oxides for high-frequency and high-permeability dielectrics* / A. G. Belous // *Ukr. chem. Journ.* – 2008. – Vol. 74, № 1. – P. 3 – 21.
4. Gavrilenko O. M. *Crystallochemical features and properties of Li^+ , $\{Na^+, K^+\}$ -substituted lanthanum niobates and defect-perovskite structure* / O. M. Gavrilenko, O. V. Pashkova, A. G. Belous // *Ukr. chem. Journ.* – 2005. – Vol. 71, № 8. – P. 73 – 77.
5. Gavrilenko O. M. *Li leading materials based on niobates and lanthanum tantalates: synthesis, structure, properties* / O. M. Gavrilenko // *Ukr. chem. Journ.* – 2004. – Vol. 70, № 9. – P. 31 – 34.
6. Goroshenko Y. G. *Physico-chemical analysis of homogeneous and heterogeneous systems* / Y. G. Goroshenko. – K.: Naukova Dumka, 1978. – 490 p.
7. *The use of features of temperature transformations of coordination nitrates REE in production of electronics products.* / A. G. Dryuchko, D. A. Storozhenko, N. V. Bunyakina and other // *New technology / Scientific Herald of KWAITO.* – 2004. – № 1 – 2 (4 – 5). – P. 53 – 57.
8. *Synthesis, structure and properties of solid solutions $La_{0.7}Ca_{0.3-x}Na_xMnO_3$* / A. A. Durilin, A. H. Yanchevskii, A. I. Tovstolytkin and other // *Ukr. chem. Journ.* – 2004. – Vol. 70, № 9. – P. 34 – 37.

9. Kobylanska S. D. *Synthesis of nanoscale systems (Li, La){Ti, Nb}O₃ by Sol-gel method* / S. D. Kobylanska, S. D. Gavrilenko, Y. P. Gomza // *Ukr. chem. Journ.* – 2010. – Vol. 76, № 4. – P. 84 – 88.
10. Kudrenko E. A. *Structure of precursors of complex oxides REE obtained by thermolysis of solvent* / E. A. Kudrenko, I. M. Shmitko, G. K. Strukova // *Physics of solid body.* – 2008. – Vol. 50, № 5. – P. 924 – 930.
11. *Coordination compounds of metals, precursors of functional materials* / E. A. Mazurenko, A. I. Gerasimchuk, E. K. Trunov and other // *Ukr. chem. Journ.* – 2004. – Vol. 70, № 7. – P. 32 – 37.
12. Mittra R. *Critical look at metamaterials* / R. Mittra // *Radio engineering and electronics.* – 2007. – Vol. 52, № 9. – P. 1051 – 1058.
13. Parsonidg N. *Disorder in crystals. P. 1.* / N. Parsonig, L. Stably. – M.: Mir, 1982. – 434 p.
14. Pashin C. F. *Influence of cation substitution in solid solutions of YBa_{2-x}Sr_xCu₃O_y temperature superconductivity* / C. F. Pashin, E. V. Antipov, L. M. Kovba // *Superconductivity: physics, chemistry, engineering.* – 1990. – Vol. 3, № 10. – P. 2386 – 2389.
15. *Synthesis and properties of composite structures based on ferroelectric and magnetic phases* / S. O. Solopan, O. I. Vunov, L. L. Kovalenko and other // *Ukr. chem. Journ.* – M., 2006. – Vol. 72, № 1. – P. 28 – 31.
16. *Thermal constants of substances. Vol. X. Ch. Tables of accepted values.* – M.: Nauka, 1978. – 442 p.
17. *Feature means of creation of layer scandates SrLn_nSc_nO_{3n+1} from systems of crystallized nitrates* / Yu. O. Titov, M. S. Slobodyanik, Y. A. Kraevska and others. // *Ukr. chem. Journ.* – 2010. – Vol. 76, № 5. – P. 11 – 16.
18. Turceva T. I. *Spectroscopic study of aqueous solutions of nitrates of rare-earth elements* / T. I. Turceva, V. I. Gliserman // *Vestnik St. Petersburg University. Mosk. Univ. Chemistry.* – 1973. – Vol. 14, № 1. – P. 51 – 54.
19. Smitko I. M. *Initiating continuous action of heating on the phase formation during solid-phase synthesis of complex oxides of rare earth elements* / I. M. Smitko, E. A. Kudrenko, G. K. Strukova // *Letters in GTAF.* – 2007. – Vol. 86, № 7. – P. 544 – 548.
20. Shurov V. G. *Thermal graphical studies of decomposition of lanthanide nitrates in range of lanthanum – samarium* / V. G. Shurov, O. M. Alekseeva – *In the book: Thermal analysis and phase equilibria.* Perm: Publishing house of Perms. state University. – 1982. – P. 38 – 45.
21. Carling R. W. *Heat capacities of NaNO₃ and KNO₃ from 350 to 800 K* / R. W. Carling // *Thermochim. Acta.* – 1983. – Vol. 60, № 3 – P. 265 – 275.
22. Melcher C. L. *High energy resolution scintillators for reflective layer on a Gd₃Ga₃Al₂O₁₂:Ce scintillation crystal* / C. L. Melcher // *Nucl. Instr. Methods in Phys. Res.* – 2005. – V. 1, A 537. – P. 6 – 14.
23. Nissen D. A. *Thermophysical properties of the equimolar mixture NaNO₃ – KNO₃ from 300 to 600°C.* / D. A. Nissen // *J. Chem. and Eng. Data.* – 1982. – Vol. 27, № 3. – P. 269 – 273.
24. *Nonlinear-laser $\chi^{(3)}$ -effects in novel garnet-type fine-grained ceramic-host {YGd₂}[Sc₂](Al₂Ga)O₁₂ for Ln³⁺ lasants* / A. A. Kaminskii, S. N. Bagaev, K. Ueda and other // *3rd Laser Ceramics Symp.* – October 8-10, 2007, Paris, 2007. – P. IO-C-1.
25. Yanagida T. *Emergent electroweak symmetry breaking with composite W, Z bosons* / T. Yanagida, T. Roh // *Nucl. Instr. Methods in Phys. Res.* – 2007. – Vol. 1, №. 579. – P. 23 – 26.

© Dryuchko A., Storozhenko D., Bunjakina N., Ivanytska I., Nikiforova L., Kulchii O.

Received 11.04.2016

ЗМІСТ

1.	Пижов І. М., Клименко В. Г. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ГРЕБІНЦІВ ПРИ БАГАТОПРОХІДНІЙ СХЕМІ ТОРЦЕВОГО ШЛІФУВАННЯ З НАХИЛОМ ОСІ ШПИНДЕЛЯ	5
2.	Гнітько С.М., Шпилька А.М. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСАХ ШЛІФУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ	14
3.	Гурко А.Г. СИНТЕЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТРАЕКТОРИЙ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРНОГО ТИПА	21
4.	Коробко Б. О., Вірченко В. В. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СТРІЧКОВО-ЛОПАТЕВОГО РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА	32
5.	Zhyhylii S., Reznichenko A. CREATION AND RESEARCH OF MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED MECHANICAL CENTRIFUGAL UNBALANCE VIBRATION EXCITER UVV-04	39
6.	Ковальчук Р.А. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ З ТРИПОРШНЕВИМ НАСОСОМ	47
7.	Тарасов Ю.В. ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ НОРМАТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЛЬМІВНОЇ ДИНАМІЧНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	56
8.	Vorontsov O., Tulupova L., Vorontsova I. GEOMETRIC MODELING OF SPATIAL COVERINGS OF BUILDINGS CONSTRUCTIONS BY CHAINS OF SUCCESSIVE SUPERPOSITIONS	65
9.	Sorokovyi O., Shokalo A. REVERSE ENGINEERING OF COMPLEX SHAPED PARTS	74
10.	Storozhenko L., Gasii G. ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE RIBBED SLAB AS A PART OF THE SPATIAL GRID-CABLE SUSPENDED STRUCTURE	81
11.	Избаиш М.Ю., Крутова Н.А АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ ШПАНГΟΥТАМИ	87
12.	Pavlikov A., Pinchuk N., Garkava O. INDUSTRIAL UNCAPITAL UNGIRDER FRAME STRUCTURE FOR RESIDENTIAL BUILDINGS	96
13.	Semko O., Dmytrenko T., Dmytrenko A., Derkach T. SOFTWARE FOR CALCULATING NODE CONNECTIONS MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BEAMLESS NON-CAPITAL OVERLAP WITH THE COMPOSITE REINFORCED CONCRETE COLUMN	104

14.	Бондар В.О., Бондар Л.В., Горшеніна А.О., Гвоздь А.В. УЛАШТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ ІЗ ЗБІРНИХ РЕБРИСТИХ ПЛИТ	117
15.	Kolchunov V., Yakovenko I., Dmitrenko E. THE ANALYTICAL CORE MODEL FORMATION OF THE NONLINEAR PROBLEM BOND ARMATURE WITH CONCRETE	125
16.	Dovzhenko O., Pogribnyi V., Chursa Yu. VARIATIONAL METOD APPLIED IN CALCULATION OF KEY JOINT'S STRENGTH IN THE CURRENT CONSTRUCTION SYSTEMS	133
17.	Єрмоленко Д.А., Іщенко М.С. МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ КЛЕСНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРНОЮ СІТКОЮ	140
18.	Bondar V., Akhmednabiyev R.M., Akhmednabiyev R.R. INFLUENCE OF FLY ASH AND SLAGS OF BOILER WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED ON PROPERTIES OF CONCRETE	148
19.	Fenko O., Krupchenko O., Yurko I. THE INFLUENCE OF ITS OWN STRESSES ON CONCRETE STRENGTH UNDER COMPRESSING	155
20.	Nyzhnyk O., Dryzhyruk Yu., Boyko A. ORGANIZATION AND TECHNOLOGICAL STUDIES ON BUILDING RECONSTRUCTION USING CONVENTIONAL AND MODERN METHODS .	162
21.	Самедов А.М., Сницарь М.А. МНОГОСЛОЙНАЯ ТЕПЛО- И ГИДРОЗАЩИТА ОСНОВАНИЙ ИЗ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ	170
22.	Пічугін С.Ф., Кінаш Р.І., Гук Я.С. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ВІТРОВОГО ТИСКУ В ЛИПНІ І СІЧНІ ДЛЯ ДЕВ'ЯТИ ВЕРШИН КАРПАТ ЗАКАРПАТСЬКОЇ ОБЛАСТІ	178
23.	Дорофеев В.С., Пушкар Н.В., Пашинський В.В. МЕТОДИКИ НОРМУВАННЯ СИЛОВОГО ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ	188
24.	Писаренко О.М., Вілінська Л.М. МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ВОЛОГИ В БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ	198
25.	Новохатний В.Г., Ландар О.М., Гах Д.О. УПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ В ІНЖЕНЕРНОМУ ОБЛАДНАННІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ	206
26.	Usenko I., Usenko D. THE SELECTION OF RESERVED STRUCTURE AND THE CREATION OF THE FUNCTION FOR RELIABILITY	215

27.	Kutnyi B. MATHEMATICAL MODELING OF TRANSITION HEAT AND HYDRAULIC PROCESSES IN THE WATER TUBE HEATING SYSTEM WITH RADIATOR THERMOSTATS	221
28.	Nesterenko S. SOLAR ENERGY APPLICATION FOR FARM ENTERPRISES ELECTRICAL MAINTENANCE	228
29.	Vynnykov Yu., Lytvynenko T. QUALITATIVE RELATIONSHIPS OF WATER MIGRATION IN HIGHWAY EMBANKMENT CLAY SOILS BY THE RESULTS OF LABORATORY AND FIELD RESEARCH	234
30.	Павлюк Д.О., Шур'яков М.В., Гладун С.А. ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ УЩІЛЬНЕННЯ ГРУНТІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	241
31.	Павлюк Д.О., Шуляк І.С. СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ КОЛІЄСТІЙКОСТІ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ	255
32.	Lytvynenko T., Ivasenko V. STREET AND ROAD NETWORK'S PLANNING PRINCIPLES FOR NEEDS OF PERSONS WITH DISABILITIES	269
33.	Краюшкіна К.В., Химерик Т.Ю., Скрипченко О.В. РОЗРАХУНОК АРМУВАННЯ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ	278
34.	Чановський В.С. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ КОЛІЙНОСТІ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ	290
35.	Білецький В.С., Ткаченко М.В. СУЧАСНІ НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПРИГОТУВАННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ	301
36.	Soloviev V., Mykhaylovskaya O., Yermakova I. TECHNOLOGY DESCENT IN ONE STEP INTERMEDIATE COLUMN, WEIGHT OF WHICH EXCEEDS LOAD CAPACITY OF DRILLING RIGS	311
37.	Dorokhov M., Kostriba I., Mychayluk V. ANALYSIS HERMETIZATION ABILITY OF RUBBER SEALS OF TESTING PACKERS IN THE FRAMEWORK OF CAE-SYSTEMS	316
38.	Dryuchko A., Storozhenko D., Bunjakina N., Ivanytska I., Nikiforova L., Kulchii O. USING THE CONFORMITY COMPLEXATION REE IN NITRATE SYSTEMS IN FORMATION OF OXIDE OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS ON THEIR BASIS	325

CONTENTS

1.	Pyzhov I., Klimenko V. THEORETICAL STUDY OF FORMATION OF RESIDUAL SCALLOPS AT MULTIPLE-PASS SCHEME OF FACE GRINDING WITH SLOPE OF SPINDLE AXIS	5
2.	Gnitko S., Shpilka A. SIMILARITY THEORY APPLICATION FOR PARAMETERS ANALYSIS OF THE OSCILLATION SYSTEMS IN POLISHING TREATMENT PROCESSES ..	14
3.	Gurko A. SYNTHESIS OF ENERGY EFFICIENT TRAJECTORIES OF MANIPULATOR-LIKE WORKING EQUIPMENT	21
4.	Korobko B., Virchenko V. TAPE-PADDLE MORTAR MIXER WORK PROCESS MODELLING	32
5.	Zhyhylyi S., Reznichenko A. CREATION AND RESEARCH OF MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED MECHANICAL CENTRIFUGAL UNBALANCE VIBRATION EXCITER UVV-04	39
6.	Kovalchuk R. RESEARCH PROCESS OF STARTING THE PUMP UNIT WITH THREE-PISTON PUMP	47
7.	Tarasov Yu. DETERMINATION OF LIMITING NORMATIVE PARAMETERS OF VEHICLE BRAKE DYNAMICS	56
8.	Vorontsov O., Tulupova L., Vorontsova I. GEOMETRIC MODELING OF SPATIAL COVERINGS OF BUILDINGS CONSTRUCTIONS BY CHAINS OF SUCCESSIVE SUPERPOSITIONS	65
9.	Sorokovyi O., Shokalo A. REVERSE ENGINEERING OF COMPLEX SHAPED PARTS	74
10.	Storozhenko L., Gasii G. ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE RIBBED SLAB AS A PART OF THE SPATIAL GRID-CABLE SUSPENDED STRUCTURE	81
11.	Izbash M., Krutova N. THE ANALYSIS OF AN INTENSE DEFORMABLE CONDITION OF THE CYLINDRICAL SHELL SUPPORTED WITH BULKHEADS	87
12.	Pavlikov A., Pinchuk N., Garkava O. INDUSTRIAL UNCAPITAL UNGIRDER FRAME STRUCTURE FOR RESIDENTIAL BUILDINGS	96
13.	Semko O., Dmytrenko T., Dmytrenko A., Derkach T. SOFTWARE FOR CALCULATING NODE CONNECTIONS MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE BEAMLESS NON-CAPITAL OVERLAP WITH THE COMPOSITE REINFORCED CONCRETE COLUMN	104

14.	Bondar V., Bondar L., Gorshenina A., Gvozd A. DESIGN AND CALCULATION OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF REINFORCEMENT CORROSION FOR PREFABRICATED REINFORCED CONCRETE OVERLAP CONSISTIN OF RIBBED PLATES	117
15.	Kolchunov V., Yakovenko I., Dmitrenko E. THE ANALYTICAL CORE MODEL FORMATION OF THE NONLINEAR PROBLEM BOND ARMATURE WITH CONCRETE	125
16.	Dovzhenko O., Pogribnyi V., Chursa Yu. VARIATIONAL METOD APPLIED IN CALCULATION OF KEY JOINT'S STRENGTH IN THE CURRENT CONSTRUCTION SYSTEMS	133
17.	Yermolenko D., Ischenko V. THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF GLUED LAMINATED WOODEN BEAMS WITH FABRIC REINFORCEMENT	140
18.	Bondar V., Akhmednabiyev R.M., Akhmednabiyev R.R. INFLUENCE OF FLY ASH AND SLAGS OF BOILER WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED ON PROPERTIES OF CONCRETE	148
19.	Fenko O., Krupchenko O., Yurko I. THE INFLUENCE OF ITS OWN STRESSES ON CONCRETE STRENGTH UNDER COMPRESSING	155
20.	Nyzhnyk O., Dryzhyruk Yu., Boyko A. ORGANIZATION AND TECHNOLOGICAL STUDIES ON BUILDING RECONSTRUCTION USING CONVENTIONAL AND MODERN METHODS ..	162
21.	Samedov A., Snitsar M. MULTILAYER HEAT- AND HYDROPROTECTION GROUNDS OF SWELLING SOIL UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS	170
22.	Pichugin S., Kinash R., Huk Ya. DETERMINING OF CHARACTERISTIC VALUES OF WIND PRESSURE IN JULY AND JANUARY FOR 9 CARPATHIAN PEAKS OF TRANSCARPATHIAN REGION	178
23.	Dorofeev V., Pushkar N., Pashinsky V. NORMALIZATION METHODS OF POWER IMPACT FROM AIR TEMPERATURE	188
24.	Pysarenko A., Vilinskaya L. UNSTEADY TEMPERATURE FIELD SIMULATION IN VIEW OF HUMIDITY CONTENT IN BUILDING MATERIALS	198
25.	Novokhatniy V., Landar A., Gakh D. ENGINEERING EQUIPMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS INNOVATION IMPLEMENTATION	206
26.	Usenko I., Usenko D. THE SELECTION OF RESERVED STRUCTURE AND THE CREATION OF THE FUNCTION FOR RELIABILITY	215

27.	Kutnyi B. MATHEMATICAL MODELING OF TRANSITION HEAT AND HYDRAULIC PROCESSES IN THE WATER TUBE HEATING SYSTEM WITH RADIATOR THERMOSTATS	221
28.	Nesterenko S. SOLAR ENERGY APPLICATION FOR FARM ENTERPRISES ELECTRICAL MAINTENANCE	228
29.	Vynnykov Yu., Lytvynenko T. QUALITATIVE RELATIONSHIPS OF WATER MIGRATION IN HIGHWAY EMBANKMENT CLAY SOILS BY THE RESULTS OF LABORATORY AND FIELD RESEARCH	234
30.	Pavlyuk D., Shuryakov M., Gladun S. COMPARISON OF METHODS AND MEANS FOR SOIL COMPRESSION CONTROL AT SUBGRADE BUILDING	241
31.	Pavliuk D., Shulyak I. ASSESSMENT METHOD OF RESISTANCE TO RUTTING OF ROAD CONSTRUCTION	255
32.	Lytvynenko T., Ivashenko V. STREET AND ROAD NETWORK'S PLANNING PRINCIPLES FOR NEEDS OF PERSONS WITH DISABILITIES	269
33.	Krayushkina K., Khymyrik T., Skrypchenko O. ESTIMATION OF REINFORCEMENT OF NON-RIGID ROAD STRUCTURES	278
34.	Chapovskiy V. IMPROVING THE METHODS AND TOOLS FOR EVALUATION OF RUTTING PAVEMENT	290
35.	Biletskyy V., Tkachenko M. MODERN TRENDS OF IMPROVEMENT OF PREPARATION AND CLEANING MUD	301
36.	Soloviev V., Mykhaylovskaya O., Yermakova I. TECHNOLOGY DESCENT IN ONE STEP INTERMEDIATE COLUMN, WEIGHT OF WHICH EXCEEDS LOAD CAPACITY OF DRILLING RIGS	311
37.	Dorokhov M., Kostribi I., Mychayluk V. ANALYSIS HERMETIZATION ABILITY OF RUBBER SEALS OF TESTING PACKERS IN THE FRAMEWORK OF CAE-SYSTEMS	316
38.	Dryuchko A., Storozhenko D., Bunjakina N., Ivanytska I., Nikiforova L., Kulchi O. USING THE CONFORMITY COMPLEXATION REE IN NITRATE SYSTEMS IN FORMATION OF OXIDE OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS ON THEIR BASIS	325