

Дешко В.І., д.т.н., професор
Буяк Н.А., аспірант
Національний технічний університет України «КПІ»

КОМФОРТНІ УМОВИ У ПРИМІЩЕННІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ

Проведено аналіз різних підходів щодо оцінки комфортних умов у будівлі та визначення середньої радіаційної температури. Представлено математичну модель кімнати, що враховує вплив сонячної радіації, а також власного теплового випромінювання огорожувальних конструкцій та приладу опалення. Запропоновано визначати середню радіаційну температуру приміщення на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення. Проаналізовано зміну середньої радіаційної температури при зміні теплового захисту огорожувальних конструкцій та при врахуванні власного теплового випромінювання приладу опалення і без нього. Оцінено вплив ефективних потоків теплової та сонячної радіації приладу опалення на комфортну температуру повітря у приміщенні. Визначено чутливість комфортної температури до параметрів приладу опалення, огорожувальних конструкцій та до надходження сонячної радіації. Отримано результати, котрі дозволяють знизити комфортну температуру у приміщенні та сумарне енергоспоживання.

Ключові слова: комфортні умови, ефективний потік теплового випромінювання, прилад опалення, радіаційна температура.

Дешко В.И., д.т.н., профессор
Буяк Н.А., аспирант
Национальный технический университет Украины «КПИ»

КОМФОРТНЫЕ УСЛОВИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Проведен анализ различных подходов к оценке комфортных условий в здании и определению средней радиационной температуры. Представлена математическая модель комнаты, которая учитывает влияние солнечной радиации, а также собственное тепловое излучения ограждающих конструкций и прибора отопления. Предложено определять среднюю радиационную температуру на базе эффективных потоков внутренних поверхностей ограждений и прибора отопления. Проанализировано изменение средней радиационной температуры при изменении тепловой защиты ограждающих конструкций при учете собственного теплового излучения прибора отопления и без него. Оценено влияние эффективных потоков тепловой и солнечной радиации прибора отопления на комфортную температуру воздуха в помещении. Определена чувствительность комфортной температуры к параметрам прибора отопления, ограждающих конструкций и к солнечной радиации. Получены результаты, которые позволяют снизить комфортную температуру в помещении и суммарное энергопотребление.

Ключевые слова: комфортные условия, эффективный поток теплового излучения, прибор отопления, радиационная температура.

*Deshko V., ScD, Professor
Buyak N., post-graduate
National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute*

THE IMPACT OF SOLAR RADIATION ON HUMAN THERMAL COMFORT

A central issue of the article is the impact assessment of solar and heat radiation of building envelope and heat radiator on comfortable inside room air temperature. In recent years, researchers have become increasingly interested in reducing building energy consumption and providing human comfort conditions. Many recent studies have focused on mean of radiant temperature, as the main and the most difficult to measurement dimension. There are developed different approaches to determining the average radiation temperature, allowing to consider placing man in the room and gains direct and diffuse solar radiation into the room. The paper looks at recent research dealing with human comfort models, which based on energy or exergy models. Energy human comfort model were applied to determination and planning room air temperature.

The author describes a model study – room building of the 80-th. It gives mathematical model of virtual room, which take into account sun radiation and own radiation of building envelope and radiator. The analysis was conducted for the four type of building envelope and for steel heating device. This study proposes to calculate the mean radiant temperature on the base of effective heat flow of building envelope and radiator. The mean radiant temperature have been calculated for model with and without radiator and for different characteristics of building envelope. The analysis testifies a small impact of traditional heating appliance on the mean radiant temperature. The need is stressed to employ modern radiators for human comfort conditions.

The article analyses comfort room temperature for different outdoor temperature and for model which considers influence of effective heat flow of radiator. It gives a detailed analysis of room comfort temperature for heating appliance and building envelope characteristics and for solar radiations gains. Comfortable room temperature primarily depends on human activity, type of clothes. Incoming of solar radiation should be taken into account, because it reduces the comfortable temperature in the room about $0,7^{\circ}\text{C}$, and therefore the total energy consumption.

The study presents a picture of total heat loses model for different indoor temperature. Consideration comfort conditions reduces model total heat loses by 2 and 3% in the model with and without heating appliance, respectively.

The method of determination the radiation temperature can improve the quality of calculations and ensure appropriate human comfort conditions in the room. These calculations show that this approach can reduce a comfortable temperature in a room and the total power of heat loss models for 2 – 3%. The major task of this study is to provide construction of low energy consumption building and human comfort conditions for different human activities.

The subject of further studies will be to analyze the effect of different heating devices on comfort temperature and on total heat consumption, and determining the economic benefits of such a reduction of a comfortable temperature.

Keywords: *comfort conditions, effective radiation heat flow, heating appliance, radiation temperature, comfort temperature.*

Вступ. Проектування будівель з низьким споживанням енергії та належними умовами перебування людини у них є важливою проблемою сучасного будівництва.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Сучасні європейські та українські норми [1] аналізують комфортні умови перебування людини, виходячи із припущення, що середня радіаційна температура дорівнює температурі повітря в кімнаті. Такі спрощення погіршують якість розрахунків. Розвиваються різні підходи до визначення середньої радіаційної температури, які дозволяють урахувати розміщення людини у кімнаті, надходження прямої та розсіяної сонячної радіації [2, 3]. Авторами розроблено методіку визначення середньої радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень [4].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Вплив ефективного теплового потоку та сонячної радіації від приладу опалення на комфортну температуру у приміщенні раніше не досліджувався. Тому до складу моделі включено опалювальний прилад.

Постановка завдання. Завдання полягає в оцінюванні впливу опалювального приладу на комфортну температуру повітря та на сумарне енергоспоживання у сукупності з впливом сонячної та теплової радіації.

Основний матеріал і результати. В основі математичної моделі приміщення – стаціонарний тепловий баланс для кімнати з однією зовнішньою стіною та вікном. Приймається, що сонячна радіація, яка потрапила у приміщення, має дифузний характер і температура внутрішніх огорожувальних конструкцій дорівнює температурі повітря у приміщенні.

Рівняння балансу енергії для опалювального приладу:

$$Q_{o\Sigma} = Q_o' + Q_o'' ; \quad (1)$$

$$Q_o' = Q_{ок}' + Q_{оп}' ; \quad (2)$$

$$Q_o'' = Q_{ок}'' + Q_{оп}'' ; \quad (3)$$

$$Q_o' = F_o \cdot \alpha_o \cdot (t_o - t_{вн}) + A_{np} \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_{вн}^4) ; \quad (4)$$

$$Q_{ок}'' = F_o \cdot \frac{t_o - t_{оз}}{R_{озо}} ; \quad (5)$$

$$Q_{оп}'' = A_{np} \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_{зо}^4) ; \quad (6)$$

$$A_{np} = \frac{1}{\frac{1}{A_{o1}} + \frac{1}{A_1} - 1} . \quad (7)$$

Рівняння теплопереносу назовні від внутрішньої поверхні стіни за приладом опалення:

$$Q_3''' = F_o \cdot \frac{t_{зо} - t_3}{R_{оз3} + R_3} ; \quad (8)$$

$$Q_o''' = Q_3''' , \quad (9)$$

де $Q_{o\Sigma}$ – теплонадходження від опалювального приладу, Вт;

Q_o' – кількість теплоти, що надходить від опалювального приладу в кімнату, Вт;

Q_o'' – кількість теплоти, що віддає опалювальний прилад зовнішній стіні, Вт;

$Q_{ок}'$, $Q_{ок}''$ – кількість теплоти, яка передається через конвективний теплообмін, Вт;

Q_{op}' , Q_{op}'' – кількість теплоти, яка передається через радіаційний теплообмін, Вт;
 Q_3''' – тепловтрати через зовнішню стіну за приладом опалення, Вт;
 t_{z0} – температура на поверхні зовнішньої стіни вікна з внутрішньої сторони, °С;
 t_{o3} – температура на поверхні зовнішньої стіни за приладом опалення, °С;
 t_o – температура на поверхні приладу опалення, °С;
 $t_{вн}$, t_3 – температура внутрішнього й зовнішнього повітря відповідно, °С;
 R_3 – термічний опір теплопровідності зовнішньої стіни, м²·°С/Вт;
 R_{o3} – термічний опір тепловіддачі пристінного прошарку, м²·°С/Вт;
 α_o – коефіцієнт тепловіддачі опалювального приладу Вт/(м²·°С);
 A_{o1} , A_1 – коефіцієнти поглинання теплового випромінювання для приладу опалення та зовнішньої стіни відповідно;
 A_{np} – приведений коефіцієнт поглинання для приладу опалення й зовнішньої стіни;
 σ – постійна Стефана – Больцмана.

Значення ефективних та результуючих потоків теплової та сонячної радіації, а також власний тепловий потік для приладу опалення:

$$Q_{рез.o.1} = Q_{эф.o.1} - Q_{eo.1} \cdot \varphi_{eo-o} ; \quad (10)$$

$$Q_{рез.o.2} = Q_{эф.o.2} - Q_{eo.2} \cdot \varphi_{eo-o} ; \quad (11)$$

$$Q_{эф.o.1} = Q_{рез.o.1} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{o1}}\right) + \frac{Q_{e.o.1}}{A_{o1}} ; \quad (12)$$

$$Q_{эф.o.2} = Q_{рез.o.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{o2}}\right) ; \quad (13)$$

$$Q_{e.o.1} = F_o \cdot \sigma \cdot A_{o1} \cdot T_o^4 , \quad (14)$$

де $Q_{рез.o.1}$ – результуючий потік теплового випромінювання приладу опалення, Вт;
 $Q_{рез.o.2}$ – результуючий потік сонячної радіації від приладу опалення, Вт;
 $Q_{эф.o.1}$ – ефективний потік теплового випромінювання від приладу опалення, Вт;
 $Q_{эф.o.2}$ – ефективний потік сонячної радіації приладу опалення, Вт;
 $Q_{e.o.1}$ – власний потік теплового випромінювання від приладу опалення, Вт;
 A_{o2} – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання для приладу опалення.

Подібні рівняння ефективних, власних і результуючих потоків теплової та сонячної радіації сформульовані для зовнішньої стіни, вікна й внутрішніх стін, зведені в енергобалансі, який слугує для визначення температур поверхонь [5].

Для врахування впливу відбиття сонячної радіації та теплового випромінювання ми розробили методику визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення [6]:

$$t_i = ((t_{im} + 273)^4 + \frac{0,179 \cdot 10^8 \cdot Q_{эф.2i}}{F_i})^{0,25} - 273 ; \quad (15)$$

$$t_R = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n F_i} , \quad (16)$$

де t_R – середньозважена радіаційна температура приміщення, °С;
 t_i – температура огорожувальної конструкції й приладу опалення, °С;
 F_i – площа огорожувальних конструкцій та приладу опалення;

t_{im} – температура огорожувальної конструкції, що визначається на основі моделі, яка враховує власний теплообмін огорожувальних конструкцій тепловим випромінюванням та сонячною радіацією, °С;

$Q_{ef,2i}$ – ефективний потік сонячної радіації для і-ої огорожувальної конструкції та приладу опалення, Вт; для вікна враховується випромінювання, яке потрапляє ззовні.

Параметри моделі дослідження відповідають кімнатам будинку в м. Києві, побудованому у 80-х роках ХХст, з орієнтацією на південь (Пд) з однією зовнішньою стіною та вікном. Комфортні умови в приміщенні розраховуються на основі підходу [7] для людини, що знаходиться у стані спокою.

Розміри кімнати – 4×4 м, висота – 2,5 м, площа вікна $F_i = 3,75 \text{ м}^2$. Моделювалися три варіанти огорожувальних конструкцій:

Пр. 1 – термічний опір відповідає нормам 80-х років ХХ ст;

Пр. 2 – відповідає сучасним нормам;

Пр. 3 – поліпшений на 20 %.

Температура зовнішнього повітря становить - 1°С, кратність повітрообміну – 1; показник середнього надходження сонячної радіації – 30 Вт/м^2 . Характеристики сталюого панельного приладу опалення: $A_{o1} = 0,8$; $A_{o2} = 0,2$; $\alpha_o = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$.

На рис. 1 наведено графіки зміни середньої радіаційної температури для Пр. 1, Пр. 2 та Пр. 3, $t_{вн} = 22 \text{ °С}$ для моделі, яка враховує власний теплообмін огорожувальних конструкцій тепловим випромінюванням та сонячною радіацією, та для моделі, у котрій враховано ще й власний теплообмін приладу опалення тепловим випромінюванням та сонячною радіацією. Із включенням приладу опалення до складу моделі середня радіаційна температура приміщення зростає незначним чином на 0,39; 0,21 та на 0,19 °С для Пр.1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно. Середня радіаційна температура приміщення є дещо вищою від $t_{вн}$, що пояснюється врахуванням ефективних потоків сонячної радіації від поверхонь.

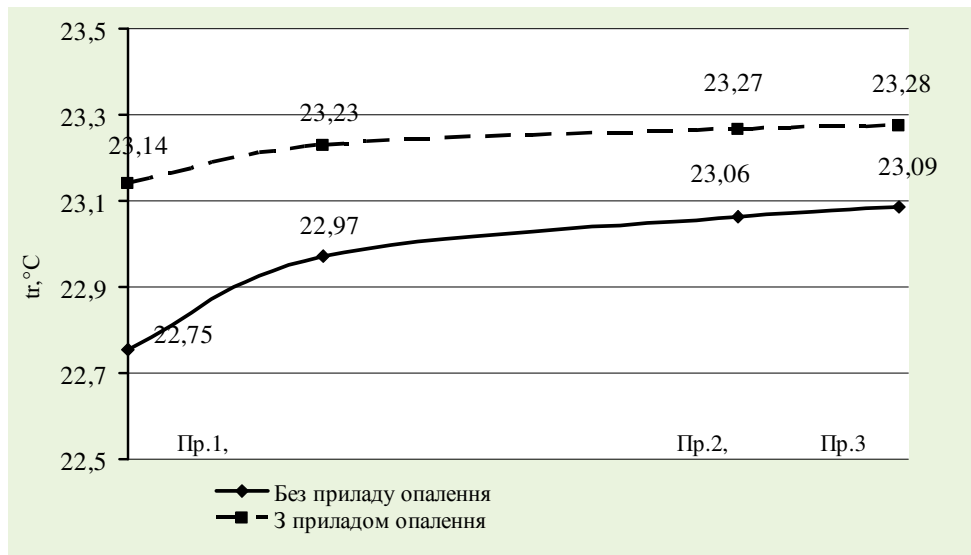


Рисунок 1 – Значення середньої радіаційної температури приміщення

На рис. 2 наведено значення комфортної температури у приміщенні для моделі із приладом опалення, без приладу опалення та значення $t_R = t_{вн}$. Урахування ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень дозволяє знизити комфортну температуру повітря порівняно з нормативною $t_{вн} = 22 \text{ °С}$ на 0,41; 0,6; 0,61 °С для Пр. 1, Пр. 2 і Пр. 3 відповідно. Врахування приладу опалення в моделі знижує $t_{вн}$ на 0,24; 0,13; 0,13 °С для Пр.1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно, а якщо порівнювати з нормованим значенням $t_{вн} = 22 \text{ °С}$, то на 0,65; 0,73; 0,74 °С для Пр. 1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно.

Аналогічний розрахунок проведений для температури зовнішнього повітря $t_p = -22\text{ }^\circ\text{C}$, комфортна $t_{\text{вн}}$ зростає на 0,27; 0,1; 0,06 $^\circ\text{C}$ для моделі без приладу опалення та зменшується на 0,14; 0,1; 0,1 $^\circ\text{C}$ для моделі з приладом опалення і для Пр. 1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно. Зменшення комфортної $t_{\text{вн}}$ для моделі з приладом опалення при зменшенні зовнішньої температури обумовлене зростанням середньої температури приладу опалення, а отже, і середньої радіаційної температури приміщення.

На рис. 3 наведено сумарну потужність теплових втрат моделі з урахуванням приладу опалення та без нього, а також для комфортної температури й для $t_{\text{вн}} = 22\text{ }^\circ\text{C}$. Для Пр.1 і $t_{\text{вн}} = 22\text{ }^\circ\text{C}$ $Q_{0\Sigma}$ зростає на 3,9% при врахуванні приладу опалення, а для комфортної температури – на 3,6%. Урахування комфортних умов дозволяє знизити $Q_{0\Sigma}$ на 2 і на 3% у моделі без та з приладом опалення відповідно.

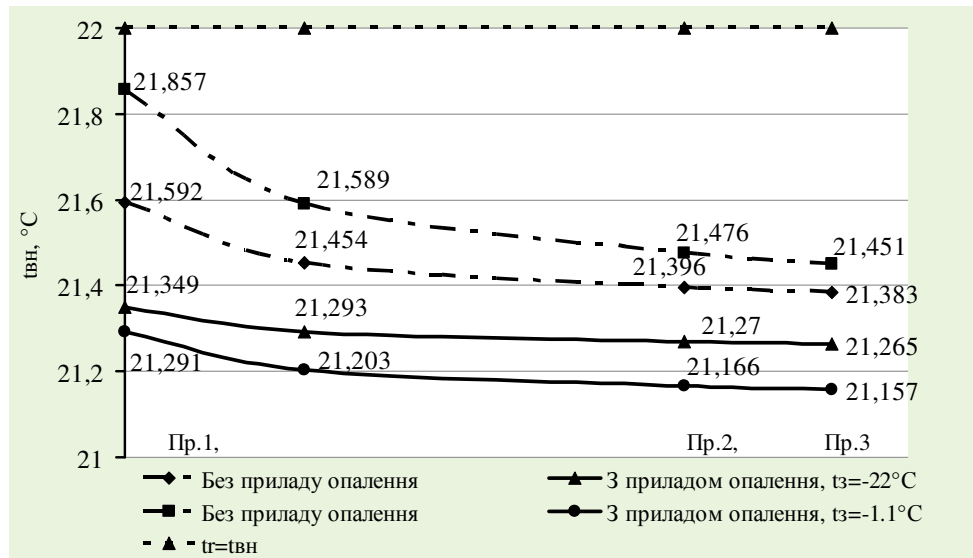


Рисунок 2 – Значення комфортної температури повітря в приміщенні

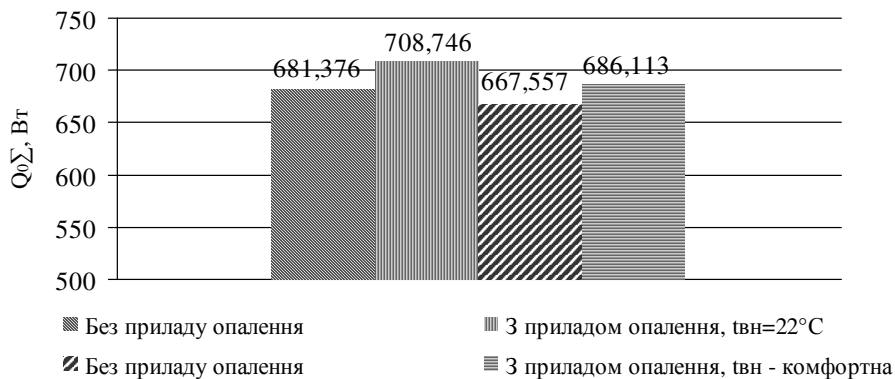


Рисунок 3 – Сумарна потужність теплових втрат моделі

Аналіз чутливості комфортної температури в приміщенні наведено у табл.1. Параметри базової моделі: огорожувальні конструкції відповідають Пр.1, $\alpha_o = 10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, $t_o = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $I_{\text{ins}} = 30\text{ Вт}/\text{м}^2$. Отже, найвищий вплив на температуру комфорту має інтенсивність сонячної радіації. Вплив характеристики приладу опалення, а саме його температури та коефіцієнта тепловіддачі, є значно нижчим і становить 0,0044 та 0,0042 відповідно. Найнижчий вплив огорожувальних конструкцій – 0,0015 і 0,0007 для зовнішньої стіни та вікна відповідно, це обумовлено вузьким діапазоном зміни цих параметрів. Комфортна температура у приміщенні у першу чергу залежить від активності людини, типу одягу [5], при проектуванні

будівель потрібно враховувати надходження сонячної радіації, що дозволяє знизити комфортну температуру повітря у приміщенні приблизно на 0,7 °С, а отже, і сумарне енергоспоживання.

Таблиця 1 – Чутливість комфортної температури t_{en}

Фактор	$R_3, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wm}$	$R_6, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wm}$	$\alpha_o, \frac{Wm}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$t_o, ^\circ C$	$I_{ins}, \frac{Wm}{m^2}$
Чутливість	0,0007	0,0015	-0,0042	0,0045	0,035

Примітки: I_{ins} – інсоляційні теплонадходження, Вт/м²;
 R_6 – термічний опір теплопровідності вікна, (м²·°С)/Вт.

Висновки. Для підвищення якості розрахунків та забезпечення належних умов перебування у приміщенні розроблено методику визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення. Таке уточнення дозволяє знизити комфортну температуру в приміщенні в середньому на 0,7 °С, а сумарну потужність теплових втрат моделі на 2 – 3%. Урахування втрат тепла огорожувальною конструкцією за приладом опалення зумовлює зростання сумарної потужності теплових втрат на 3 – 4%.

Подальші дослідження полягатимуть в аналізі впливу різних приладів опалення та визначенні економічних переваг такого зниження комфортної температури.

Література

1. *Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD та критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2011, IDT): ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. – [чинний від 01.07.2013]. – К. : Мінрегіон України, 2012. – 64 с. (Національний стандарт України).*
2. Wai Leung Tse. *A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings / Wai Leung Tse, Wai Lok Chan // Sensors and Actuators. – 2008. – V. 144. – P. 394 – 402.*
3. *Ergonomics of the thermal environment–Instruments for measuring physical quantities: BS EN ISO 7726: 2001. – [Execute Date 2001/11/6]. – British Standards, 2001. – P. 62 (Adopted International Standard).*
4. Дешко В. І. *Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту / В. І. Дешко, Н. А. Буяк // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Х. : УДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 121 – 128.*
5. Дешко В. І. *Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень будівлі / В. І. Дешко, І. Ю. Білоус, І. О. Суходуб // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К. : КНТУТД, 2015. – Вип. 5(90). – С. 24 – 31.*
6. Дешко В. І. *Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі / В. І. Дешко, А. А. Буяк, І. Ю. Білоус // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К. : КНТУТД, 2015. – Вип. 5(90). – С. 71 – 80.*
7. Богословский В. Н. *Отопление / В. Н. Богословский, А. Н. Сканава. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.*

© Дешко В.І., Буяк Н.А.
 Надійшла 17.12.2015