

*С.Ф. Пичугін, д.т.н., професор
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

**НАУКОВА ШКОЛА
«НАДІЙНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»:
ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ**

Викладено ймовірнісний метод оцінювання надійності конструкцій. Він враховує випадковий характер навантажень і міцності сталі, сумісну дію навантажень, специфічний характер роботи й відмов сталевих елементів, вузлів і сталевих конструктивних систем у цілому. На основі розробленого методу були виконані чисельні розрахунки надійності широкого кола таких конструкцій, як підкранові балки, ферми, кроквяні балки, колони та рами. У результаті обґрунтовано коефіцієнти норм проектування та досягнуто економічного ефекту.

Ключові слова: надійність, навантаження, сталеві конструкції

*С.Ф. Пичугин, д.т.н., профессор
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

**НАУЧНАЯ ШКОЛА
«НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»:
ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Изложен вероятностный метод оценки надежности конструкций. Он учитывает случайный характер нагрузок и прочности стали, совместное действие нагрузок, специфический характер работы и отказов стальных элементов, узлов и стальных конструктивных систем в целом. На основе разработанного метода были выполнены численные расчеты надежности широкого круга таких конструкций, как подкрановые балки, фермы, стропильные балки, колонны и рамы. В результате обоснованы коэффициенты норм проектирования и достигнут экономический эффект.

Ключевые слова: надежность, нагрузки, стальные конструкции

*S. Pichugin, ScD, Professor
Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University*

**SCIENTIFIC SCHOOL
«RELIABILITY OF BUILDING STRUCTURES»:
ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS**

The article contains the developed probabilistic method of structural reliability estimation. It takes account of the random loads and steel strength, loads joint action, specific character of work and failure of steel elements, nodes and the whole steel structure systems as well. On the base of the determined method the numerical reliability computations of a wide range of steel structures including crane girders, trusses, roof beams, columns and frames were realized. As a result some design coefficients for Codes improvement as well as the reduction of cost have been offered.

Key words: reliability, loads, steel structures.

У статті дано короткий огляд отриманих за 40 років результатів у галузі надійності будівельних конструкцій з виділенням виявлених істотних моментів і невирішених питань, що може виявитися корисним для подальших досліджень.

Вступ. Необхідність забезпечення високого рівня надійності конструкцій будівель і споруд пов'язана з тим, що їх вихід з ладу в процесі експлуатації супроводжується великими економічними втратами, а на небезпечних виробництвах – катастрофами з людськими жертвами і несприятливими екологічними наслідками. Додаткової гостроти вказана проблема набуває в умовах ринкової економіки, коли показники надійності й довговічності будівельної продукції можуть вирішальним чином впливати на результати конкурентної боротьби за замовлення у будівництві. Тому очевидна актуальність досліджень надійності будівельних об'єктів.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Нормативні документи і публікації провідних авторів, огляд яких наводиться в монографії [18], визначають надійність у техніці як властивість технічного об'єкта зберігати в часі, у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Коротше можна сформулювати, що надійність – це якість, розгорнута в часі. Надійність як комплексна властивість технічного об'єкта може включати такі компоненти: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність або поєднання цих властивостей [16].

Усі дослідники вважають, що для будівельних об'єктів безвідмовність (і пов'язана з нею довговічність) є головною складовою, тоді як ремонтпридатність та збережуваність мають підпорядковане значення. При цьому безвідмовність будівельних конструкцій визначається як здатність зберігати задані експлуатаційні якості, тобто не переходити у граничні стани (стани відмови) впродовж певного терміну служби конструкції. Таке трактування об'єднує розрахунок надійності з діючим методом граничних станів.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Протягом вищевказаного періоду часу мав місце певний розрив між відомими теоретичними роботами класиків у галузі надійності, що мають дещо абстрактний характер, і приземленими розробками фахівців-практиків, які мають справу з громіздким первинним статистичним матеріалом, що потребує грамотної обробки та теоретичного узагальнення.

Наукова й технічна оцінка надійності конструкцій передбачає отримання чисельних оцінок показників надійності, наприклад імовірності безвідмовної роботи або відмови, інтенсивності відмов, напрацювання до відмови і т.д. Простіше кажучи, де з'являється цифра, починається надійність. Між тим досить розповсюджені загальні міркування про високу надійність, підвищення надійності й тому подібні твердження не підкріплені конкретними числовими даними, що свідчить лише про надійність у побутовому, якісному сенсі.

Більшість чинників, які визначають надійність конструкцій, у тому числі навантаження, міцність матеріалів, геометричні розміри та ін., мають випадковий характер і повинні описуватися методами теорії ймовірності та математичної статистики. Це ж загалом стосується і розрахунку надійності конструкцій, що має по суті (але не завжди за формою) ймовірнісний характер. Між тим підготовка вітчизняних інженерів-будівельників у цьому відношенні явно недостатня, що позначається, зокрема, і на рівні дисертацій, які захищають останнім часом. Тому молодим дослідникам, котрі вибирають як науковий напрям надійність конструкцій, треба налаштуватися на серйозне освоєння сучасних ймовірнісних методів.

Фундаментальне поняття в теорії надійності – відмова конструкції, що асоціюється з її руйнуванням, – є випадковою подією, яка має деяку, хоча і дуже малу,

ймовірність реалізації. Унаслідок цього зворотна подія – безвідмовна робота конструкції – повинна мати ймовірність, меншу від одиниці. Між тим досить часто, в основному інженери старшого покоління, ставлять питання: «Хіба можна закладати в розрахунок можливість аварії? Адже конструкції мають бути неруйнівними!». Таке питання видається досить наївним, оскільки вічних конструкцій не існує, і тільки чітке усвідомлення цього положення відкриває можливість для розвитку розрахунку надійності конструкцій.

Отримані раніше оцінки надійності конструкцій базувалися переважно на ймовірнісному представленні навантажень та механічних характеристик матеріалів у вигляді випадкових величин. Такий підхід дає деяке уявлення про початкову надійність конструкцій і може використовуватися, наприклад, при врахуванні малозмінних постійних навантажень та міцності матеріалу. Проте повне уявлення про безвідмовність конструкцій може бути отримане тільки при врахуванні фактора часу й аналізі змін надійності конструкцій упродовж усього їхнього життєвого циклу.

Мета і завдання дослідження. Мета полягає у розробленні загального методу розрахунку надійності металевих конструкцій за критерієм несучої здатності, в якому під надійністю конструкцій мають на увазі її головний компонент – безвідмовність. При такому трактуванні розроблення розрахункової оцінки надійності металевих конструкцій включає розв’язання таких завдань:

- імовірнісний опис навантажень, механічних характеристик матеріалів і з’єднань й інших випадкових параметрів;
- розроблення питань сполучень випадкових навантажень;
- оцінювання надійності елементів металевих конструкцій з урахуванням моделей їх відмов;
- розрахунок надійності конструктивних систем, зокрема складних вузлів та статично невизначних систем (СНС) з урахуванням можливого характеру їх руйнування;
- кількісне оцінювання надійності будівель і споруд різного призначення.

Основний матеріал і результати.

Вивчення навантажень. Було поставлено й розв’язано досить складне і трудомістке завдання побудови узагальнених імовірнісних моделей кранових та атмосферних навантажень на достатньому статистичному матеріалі з урахуванням специфічних особливостей різних навантажень, виду їх розподілів і частотної структури для використання в імовірнісних розрахунках конструкцій різного призначення.

Стохастичну модель *кранових навантажень* побудовано за результатами експериментально-статистичних досліджень, розпочатих наприкінці 60-х років минулого століття [15]. Були досліджені вертикальні і горизонтальні навантаження мостових кранів з жорстким і гнучким підвісом різної вантажопідйомності та режимів роботи, що експлуатувалися в умовах металургійного і машинобудівного виробництва. Обґрунтовані узагальнені числові й частотні характеристики кранових навантажень і можливість застосування для них відомого нормального розподілу [18]. Особлива увага в натурних експериментах була приділена бічним силам мостових кранів, причому обґрунтовано і багаторазово підтверджено розрахункову формулу для чотириколісних кранів та дано рекомендації щодо уточнення бічних сил багатоколісних кранів. У національні норми України ввійшли вказані формули і коефіцієнти, що знижують вертикальне навантаження кранів при обмеженні наближення візка, а також ураховують період повторюваності навантаження. Імовірнісний опис навантажень кранів доповнили у своїх дисертаціях В.О. Северин [22] та Ю.Е. Патенко [12], розгорнутий огляд навантажень мостових і підвісних кранів наведено в монографії автора [20].



Рис. 1. Монографії з проблеми надійності будівельних конструкцій

Повчальним виявилось вивчення історії розвитку мостових кранів, що дозволило намітити напрям підвищення економічності каркасів виробничих будівель. Слід визнати, що далеко не всі особливості навантажень кранів були виявлені досить повно, дослідження в цьому напрямі бажано продовжувати. Проте в сучасних умовах важко очікувати, що будуть проведені натурні дослідження навантажень кранів, подібні до тих унікальних випробувань у діючих цехах, що виконувалися за участю автора Випробувальною станцією МІБІ в 60 – 70-ті роки минулого століття.

Як вихідна інформація для побудови ймовірнісної моделі **вітрового навантаження** були зібрані метеорологічні дані для території України. Аналіз стохастичної природи статичної складової вітрового навантаження виявив її квазістаціонарний характер з повільною зміною впродовж року математичного очікування і постійними числовими характеристиками та частотними параметрами. Підтверджено, що розподіл ординати вітрового навантаження добре описується розподілом Вейбулла [13, 16, 22]. Пульсаційна складова вітрового навантаження поглиблено досліджена в дисертації А.В. Махінька [7], який разом з автором статті опублікував монографію, присвячену вітровому навантаженню [17].

Вихідним статистичним матеріалом для побудови ймовірнісної моделі **снігового навантаження** також були метеорологічні дані для території України. Показано, що подібно до вітрового навантаження, снігове навантаження має квазістаціонарний характер із сезонним трендом математичного очікування і постійним коефіцієнтом варіації, асиметрією та частотними параметрами. Дослідні розподіли снігового навантаження для території України мають складний характер, визначений нестійким характером українських зим. Для їх опису було вперше застосовано двомодальний поліномо-експоненційний розподіл [13, 18]. Надалі в ПолНТУ були виконані дослідження відкладень снігу на покриттях з перепадами висот (дисертація Ю.В. Дрижирука [4]), практичним результатом яких є обґрунтування зниженого коефіцієнта сполучень, що дорівнює 0,8 для снігових мішків на території України. Вплив теплотехнічних характеристик покриття на величину снігового навантаження досліджений у дисертації І.В. Мольки [9], основні результати котрої наведено у формі диференційованого коефіцієнта експлуатації покриття C_e . Дисертація Н.М. Попович [21] дозволила встановити розрахункові значення снігового навантаження на холодні покрівлі будівель з додатними внутрішніми температурами повітря. Узагальнений опис снігових і ожеледних навантажень наведений у монографії [19].

Підсумком досліджень атмосферних навантажень стала побудова узагальнених інформаційно забезпечених ймовірнісних моделей вітрового та снігового навантажень, для яких визначені середньорайонні ймовірнісні характеристики для території України. Таким чином, разом з ймовірнісною моделлю кранового навантаження сформований статистичний базис для розрахунку надійності різних конструкцій. Узагальнення методологічних принципів нормування навантажень дозволило В.А. Пашинському після захисту кандидатської дисертації [13] підготувати й успішно захистити докторську дисертацію.

Для подальших досліджень надійності конструкцій дуже бажано доповнити наявні статистичні ряди даними вітрового і снігового навантажень останніх років, а також пов'язати ймовірнісні моделі атмосферних навантажень з районуванням України за ДБН.

Системне порівняння ймовірнісних моделей навантажень. Найбільш поширені випадкові навантаження вперше досліджено системно з єдиних позицій з урахуванням фактора часу. Навантаження були розглянуті в таких найбільш характерних ймовірнісних формах.

1. Стаціонарний і квазістаціонарний диференційовані випадкові процеси (ВП), частотно-часовою характеристикою яких є ефективна частота ω .

2. Абсолютні максимуми випадкового процесу, розподіл котрих визначається хвостовою частиною розподілів викидів відповідних ВП, розташованих вище рівня характеристичного максимуму γ_0 , визначуваного як рішення рівняння $N_+(\gamma_0; 0 \leq \tau \leq t) = 1$ (N_+ – кількість викидів ВП).

3. Випадкова послідовність незалежних випадкових навантажень (схема незалежних випробувань), частотну структуру яких описує інтенсивність навантаження λ , що дорівнює кількості навантажень за одиницю часу.

4. Дискретне представлення навантажень, частотним параметром котрого є середня тривалість перевантаження \bar{A} .

5. Екстремуми, що підкоряються подвійному експоненціальному розподілу, з вибірок значень навантажень, що описуються різними початковими законами.

6. Корельована випадкова послідовність навантажень (на основі методу узагальненої коваріації, розробленого А.П. Кудзисом).

Були ув'язані частотні характеристики різних імовірнісних моделей навантажень, розроблений аналітичний і обчислювальний апарат, що дозволив порівнювати ймовірнісні параметри різних моделей та виражати одні моделі через інші [16, 18]. Вибір моделей навантажень залежить від специфіки розв'язуваних завдань: складніші з них розв'язуються в техніці ВП, які, проте, більш трудомісткі в описі й обробці. Разом з тим було показано, що простіші та доступніші моделі (п.п. 2 – 6) на базі випадкових величин і відповідних частотних характеристик при належному обґрунтуванні забезпечують не менш точні рішення задач надійності.

Модель у вигляді випадкових процесів, незважаючи на її відносну складність, є на сьогодні найбільш вивченою, вона була розроблена й успішно використана в роботах [13, 16, 22], модель абсолютних максимумів випадкових процесів дала можливість отримати цікаві наукові результати в роботі [7]. Слід зазначити, що інші перспективні моделі, особливо випадкові послідовності незалежних і корельованих перевантажень, а також дискретне представлення навантажень, виявилися поки недостатньо затребуваними і рекомендуються для використання в подальших дослідженнях надійності конструкцій.

Методика оцінювання надійності конструкцій. У найбільш простій постановці відмова елемента вважалася перевищення випадковим напруженням (зусиллям) від зовнішнього навантаження $\tilde{S}(t)$ випадкового рівня міцності (несучої здатності) елемента \tilde{R} . Для випадкової функції $\tilde{Y}(t)$, залежної від часу t , яку для узагальнення було названо резервом несучої здатності,

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{R} - \tilde{S}(t), \quad (1)$$

відмовою елемента вважався перехід у негативну область.

Зокрема, при представленні навантажень у вигляді стаціонарних і квазістаціонарних випадкових процесів функція $\tilde{Y}(t)$ також є випадковим процесом, кількість викидів якого в негативну область дає оцінку ймовірності відмови у вигляді

$$Q(t) = \omega_q f_Y(\beta) t / (\beta_\omega \sqrt{2\pi}), \quad (2)$$

де ω_q , $f_Y(\beta)$ – ефективна частота і щільність розподілу ординати випадкового процесу $\tilde{Y}(t)$; $\beta = \bar{Y}/\hat{Y}$ – характеристика безпеки, \bar{Y} – математичне сподівання, \hat{Y} – стандарт резерву несучої здатності елемента; t – напрацювання елемента (відмінне від його терміну

служби); β_ω – коефіцієнт широкосмуговості випадкового процесу, що враховує спектр частот реальних навантажень.

Як видно з наведених формул, для отримання оцінок надійності необхідно будувати спільні розподіли навантажень і міцності, а також визначати частотні характеристики сполучень навантажень та функції $\tilde{Y}(t)$.

Спільні розподіли будувалися на основі формул згортання, які для застосованих розподілів навантажень не беруться в замкненому вигляді й повинні інтегруватися чисельно. Заздалегідь загальні вирази для згортань були спрощені та перетворені для ув'язки параметрів поєднуваних розподілів, зменшення їх кількості, представлення спільних розподілів у єдиній порівнянній формі. Були розроблені композиції та різниці розподілів різного виду: нормального, Вейбулла, Гумбеля I типу, поліномо-експоненційного і довільного. Отримані формули та приклади побудованих розподілів наводяться в роботах [7, 18, 22], розподіли можуть істотно відхилитися від широко розповсюдженого нормального закону. Без урахування цього чинника оцінки надійності конструкцій можуть мати помітну неточність.



Рис. 2. Закордонні публікації з проблеми надійності

Частотна характеристика сполучення навантажень, представлених у формі квазістаціонарних випадкових процесів, унаслідок постійності їх частотної структури визначалася як

$$\omega_{12} = \frac{1}{\sqrt{1+K^2}} \left[(\omega_1 \cdot K_{tr1})^2 + (\omega_2 \cdot K \cdot K_{tr2})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_{12}$ – ефективні частоти окремих ВП і їх суми; $K = \hat{x}_2 / \hat{x}_1$ – відношення стандартів навантажень, що складаються; K_{tr1}, K_{tr2} – коефіцієнти тренда, що враховують відносно повільні сезонні зміни атмосферних навантажень.

Для сполучення навантажень, представлених іншими ймовірнісними моделями, були введені нові частотні характеристики, незалежні від рівня навантажень: ефективна інтенсивність навантаження λ_μ , ефективна середня тривалість перевантаження \bar{A}_μ , ефективний об'єм екстремальної вибірки n_a . Наведені тут співвідношення були поширені на суму трьох випадкових навантажень у роботі [22].

Слід зазначити, що досліджені випадкові навантаження істотно різняться за частотним складом: ефективна частота снігового навантаження складає всього $\omega_c = 0,073 - 0,141$ 1/добу, помітно більша частота статичної складової вітрового навантаження – $\omega_b = 5,42 - 6,58$ 1/добу і значно вища ефективна частота більш мінливого навантаження крана – $\omega_k = 71 - 215$ 1/год. Тому для коректного використання наведеної вище оцінки надійності (2) на основі формул викидів ВП слід урахувувати міру широкосмуговості як окремих навантажень, так і особливо їх поєднання. Для цього використовувався коефіцієнт широкосмуговості β_ω , що дорівнює відношенню середньої частоти ВП по екстремумах до ефективної частоти ВП. Як показав аналіз, унаслідок істотної різниці частот навантажень, що враховуються, коефіцієнти широкосмуговості β_ω їх сполучення можуть бути значними. Це є відображенням того, що спільна дія кількох навантажень стає дво- і більше частотною. Такий висновок був підтверджений методом статистичного моделювання в роботі [22] й уточнений у роботі [7]. Цю особливість необхідно враховувати в розрахунках надійності конструкцій, щоб уникнути серйозних похибок результатів.

Розрахунок надійності елементів. Рекомендації щодо розрахунку надійності сформульовані у вигляді послідовних алгоритмів, що дало можливість оцінити надійність сталевих елементів різного призначення при дії як окремих навантажень, так і їх комбінації [16, 18].

Так, для елементів, що сприймають багатокomпонентне постійне навантаження, стохастична модель у вигляді суми випадкових величин дозволяє ввести знижений коефіцієнт сполучень $\psi = 0,90 \dots 0,95$.

Серед сталевих елементів, що сприймають в основному одне навантаження крана (балок кранових колій, елементів кранових естакад), аналіз виявив недостатньо надійні елементи, що працюють на навантаження чотириколісних мостових кранів невеликої вантажопідйомності при переважаючій дії одного крана. В інших випадках надійність сталевих елементів за критерієм загального напруженого стану під дією навантажень кранів виявилася достатньою. Також достатню надійність мають розраховані за чинними нормами елементи, що сприймають вітрове навантаження.

У той же час конструкції, розраховані на снігове навантаження згідно з нормами СНиП, що діяли на території України до 2006 року, мають явно недостатню надійність. Таке положення наочно підтвердило заниженість розрахункових значень снігових навантажень у СНиП і нагальну необхідність їх підвищення, що й було виконано в національних ДБН В.1.2:2-2006 «Навантаження і впливи» за рекомендаціями фахівців наукової школи.

При спільному врахуванні снігового, вітрового та кранового навантажень обґрунтовані знижені значення коефіцієнтів сполучень $\psi = 0,70 - 0,90$, диференційовані залежно від часток навантажень. Подальший розвиток це питання отримало в роботах [7, 18].

Оцінювання надійності стиснуто-зігнутих елементів. На основі викладених вище загальних підходів розроблений розрахунок надійності найменш вивчених сталевих стиснуто-зігнутих елементів постійного перерізу і ступінчастих. Компактні рішення для таких елементів, що розглядаються як системи з кількома степенями вільності, отримані на основі методу Бубнова – Галеркіна й енергетичного методу Рітца. Рішення враховують особливості впливу поперечних навантажень на форму зігнутої осі стержня, допускають зміну поздовжньої сили. Отримані також оцінки надійності для пружно-пластичних стиснуто-зігнутих стержнів [25], причому виправдав себе прийом з підстановкою випадкових аргументів в апробовані детерміністичні рішення завдань стійкості. Перспективним виявився перший досвід використання в цьому напрямі методу скінченних елементів [14].



Рис. 3. Навчально-методичні посібники

Виконані розробки дали можливість оцінити надійність реальних сталевих колон у широкому діапазоні параметрів: при жорсткому та шарнірному сполученні колон з ригелями, для рам із прольотами 24...36 м і кроком 6...12 м, з теплою та холодною покрівлею по профільованому настилу і залізобетонних панелях, з мостовими кранами вантажопідйомністю від 30/5 до 125/20 тс груп режимів роботи 4К...7К для різних снігових та вітрових районів. У результаті обґрунтовано загальний висновок про достатню надійність сталевих колон виробничих будівель з мостовими кранами, запроєктованих за чинними нормами.

Як завдання для подальших досліджень можна назвати пошук прямих імовірнісних рішень задач стійкості стиснутих і стиснуто-зігнутих елементів та подальше розроблення ймовірнісної версії методу скінченних елементів.

Надійність статично невизначних систем. Істотні результати отримані у вивченні статично невизначних конструкцій, що є системами із залежними елементами, ймовірнісний розрахунок яких є одним з найбільш складних і трудомістких в теорії надійності будівельних об'єктів. Унаслідок цього оцінювання надійності СНС є завданням досить високої складності, ступінь якої швидко зростає зі збільшенням розмірності системи. Знизити складність та впорядкувати розрахунок надійності СНС вдалося за допомогою логіко-ймовірнісного методу з використанням матричних представлень і перетворень. Успішним виявився досвід застосування цього методу, зокрема, до аналізу надійності вузлів металоконструкцій [6, 27].

Особливості процесу руйнування й оцінювання надійності СНС значною мірою визначаються характером відмов їх елементів – крихким або пластичним. Були опрацьовані обидві моделі відмов, причому пластичну модель вивчено для систем елементів, що згиналися та працюють пружно-пластично за діаграмою Прандтля, процес руйнування яких характеризується появою шарнірів пластичності в найбільш навантажених (небезпечних) перерізах. Повна оцінка ймовірності відмови пружно-пластичної СНС з випадковою міцністю і навантаженням отримана в результаті застосування ймовірнісного методу граничної рівноваги. Кінематичний варіант цього методу ґрунтується на методі комбінованих механізмів, які складаються з основних можливих механізмів руйнування системи: балкових, поверхових (зсувних) і вузлових [26]. Розроблена також статична версія ймовірнісного методу граничної рівноваги [3]. Проведені дослідження дозволили розробити ефективні підходи до обчислення практичних оцінок надійності СНС, а отримані чисельні значення коефіцієнта схемної надійності $\gamma_s = 1,08 \dots 1,27$ дали можливість оцінити резерви несучої здатності сталевих пружно-пластичних рам.

Серед питань, пов'язаних з оцінкою надійності СНС, які залишилися невирішеними, слід назвати формалізацію та переведення на ЕОМ методу станів і логіко-ймовірнісного методу, а також ранжування елементів СНС за критерієм надійності.

Оцінювання надійності об'єктів різного призначення. Плідним виявилось поширення розроблених імовірнісних підходів на сталезалізобетонні конструкції (докторські дисертації О.В. Семка й О.П. Воскобійник, кандидатські дисертації їх аспірантів) і на будівельні матеріали (роботи аспірантів д.т.н. В.А. Пашинського). Розроблений загальний метод розрахунку надійності був доповнений урахуванням ризиків у будівництві [10], а також успішно застосований для сталевих ферм [3, 25], пружно-пластичних балок з розпором (жорстких вант) [1], сталевих балок з вирізами і вигинами [23], балок із гофрованою стінкою [27], вузлів сталевих конструкцій [6], несучих конструкцій підвісних канатних доріг [24], сталевих підземних магістральних трубопроводів [5], висотних опор систем зв'язку [8], каркасів промислових будівель, оснащених мостовими кранами [12], при проектуванні ряду сталевих конструкцій промислових і цивільних об'єктів.



Рис. 4. Нормативні документи, розроблені за участю фахівців ПолтНТУ

Апробація і публікація результатів. Наукові результати з проблеми надійності стали основою для виконання й успішного захисту п'яти докторських дисертацій (С.Ф. Пічугін, В.А. Пашинський, О.В. Семко, А.В. Махінько, О.П. Воскобійник) і більше 20 кандидатських дисертацій (див. список у кінці статті).

Дослідники надійності конструкцій підготували більш ніж 600 публікацій, у тому числі 20 монографій (рис. 1) (список джерел обмежений виданнями, підготовленими з участю автора статті). Слід особливо виділити колективну монографію [2], у котрій викладені результати багаторічних досліджень у галузі будівництва, проведених у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка, за які автори (серед них С.Ф. Пічугін та О.В. Семко) удостоєні Державної премії України в галузі науки і техніки (2011 р.). Можна відмітити також колективну монографію з навантажень та впливів на будівлі й споруди (співавтори С.Ф. Пічугін, В.А. Пашинський, А.В. Махінько) [10], яка впродовж 2005 – 2014 рр. витримала чотири видання і стала справжнім бестселером серед фахівців-будівельників як у країнах СНД, так і за кордоном. У монографії вперше системно описані практично всі навантаження, що можуть діяти на будівельні об'єкти, причому достатньо повно враховані багаторічні

напрацювання фахівців ПолтНТУ в галузі навантажень. Монографія автора статті [18], у котрій системно викладений метод розрахунку надійності будівельних конструкцій, що є основою полтавської наукової школи, вийшла двома виданнями (2009 р., видавництво «АСМІ», Полтава; 2011 р., видавництво АСВ, Москва) і широко розповсюджується у книжкових та Інтернет-мережах країн СНД і зарубіжжя.

Дослідження надійності конструкцій виявилось дуже плідним та перспективним науковим напрямом, завдяки якому автор і його однодумці здійснили вихід на міжнародну наукову арену і відкрили можливості брати участь у представницьких міжнародних конференціях, спілкуватися із зарубіжними колегами, публікуватися в міжнародних наукових виданнях (рис. 2): з вітрових навантажень (wind engineering) – в Італії (Генуя), Чехії (Прага), Польщі (Варшава, Люблін, Краків); зі снігових навантажень (snow engineering) – у Норвегії (Тронхейм), Швейцарії (Давос), Канаді (Ванкувер); з кранових навантажень (crane loads) – в Польщі (Криниця), з надійності конструкцій (reliability of structures) – на Мальті (Ла-Валетта), в Литві (Вільнюс), Білорусі (Брест), Росії (Москва), Угорщині (Мішкольц) та інших містах.

Питання надійності системно включені у навчальний процес ПолтНТУ, впроваджені в магістерські роботи, склали основу єдиних в Україні навчальних курсів «Надійність технічних систем», «Надійність будівель і споруд», «Сучасні проблеми надійності у будівництві» (рис. 3).

Упровадження у нормативні документи. Результати досліджень ПолтНТУ в галузі навантажень і надійності одержали високу оцінку й були включені у низку державних нормативних документів (рис. 4):

1. ДБН 362-92 «Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації» (учасники розробки С.Ф. Пічугін та В.А. Пашинський).
2. ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» (учасники розробки С.Ф. Пічугін та В.А. Пашинський).
3. ДБН В.2.6-163:2010 «Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу» (учасники розробки С.Ф. Пічугін та В.А. Пашинський).
4. ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності й конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ» (учасники розробки С.Ф. Пічугін та В.А. Пашинський).
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013 «Визначення класів наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва» (учасники розробки С.Ф. Пічугін, О.В. Семко, А.В. Махінко, О.П. Воскобійник).
6. ДСТУ-Н Б В.2.6-XXX:20XX «Оцінка технічного стану будівельних сталевих конструкцій, що експлуатуються» (проект) (учасники розробки С.Ф. Пічугін, В.А. Пашинський, О.П. Воскобійник, В.О. Семко).

Коли розгорнулася підготовка до імплементації положень вітчизняних норм проектування в норми Євросоюзу (Єврокоди), фахівці ПолтНТУ активно включились у цю важливу роботу і взяли участь у розробленні національних додатків до кількох розділів Єврокоду:

1. Єврокод 0. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT) (учасники розробки С.Ф. Пічугін, А.В. Махінко).
2. Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 1-3: Загальні дії. Снігові навантаження (EN 1991-1-3:2003, IDT) (учасники розробки С.Ф. Пічугін, А.В. Махінко, Ю.В. Дрижирук).
3. Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 1-4: Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, IDT) (учасники розробки С.Ф. Пічугін, А.В. Махінко).
4. Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 3: Дії, що викликані кранами та обладнанням (EN 1991-3:2006, IDT) (учасники розробки С.Ф. Пічугін, А.В. Махінко, Ю.Е. Патенко).

Висновки. У результаті багаторічної роботи школи надійності ПолтНТУ розроблений загальний метод розрахунку надійності металевих конструкцій за критерієм несучої здатності, який ураховує випадковий характер навантажень і міцності матеріалу, особливості спільної дії навантажень, специфіку роботи й відмов металевих елементів і вузлів, характер роботи та можливого руйнування статично невизначених систем. Розроблений метод дозволив отримати нові дані про надійність сталевих конструкцій виробничих будівель і обґрунтувати на його основі пропозиції щодо вдосконалення норм проектування й реконструкції. Отримані загальні залежності поширені на конструкції з інших матеріалів (сталезалізобетонні і залізобетонні), а також на конструкції широкого кола будівель та споруд різного призначення.

Література

1. Бібік М.В. *Міцність і деформативність розтягнуто-зігнутих сталевих елементів з урахуванням пластичної стадії роботи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / М.В.Бібік. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 20 с.*
2. *Високоєфективні технології та комплексні конструкції в промисловому й цивільному будівництві: Монографія / В.О. Онищенко, О.Г. Онищенко, С.Ф. Пичугін, Л.І. Стороженко, О.В. Семко, Ю.С. Слюсаренко, І.А. Ємельянова. – Вид. 2-ге, доп. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2011. – 520 с.*
3. Гнітько О.В. *Імовірнісний розрахунок і оцінка ступеня відповідальності елементів сталевих статично невизначених конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О.В. Гнітько. – Полтава: ПДТУ, 1999. – 19 с.*
4. Дрижирук Ю.В. *Імовірнісний опис снігового навантаження на покрівлі будівель з перепадами висот: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Ю.В. Дрижирук. – Полтава: ПолтНТУ. – 2011. – 23 с.*
5. Зима О.Є. *Надійність сталевих конструкцій магістрального трубопроводу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О.Є. Зима. – Полтава: ПолтНТУ. 2014. – 21 с.*
6. Корх О.О. *Напружено-деформований стан і надійність зварних вузлів сталевих рам: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О.О. Корх. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 20 с.*
7. Махінько А.В. *Надійність елементів металоконструкцій під дією випадкових змінних навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А.В. Махінько. – Полтава: ПолтНТУ. 2006. – 24 с.*
8. Махінько А.В. *Надійність металевих баитових опор зв'язку: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А.В. Махінько. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 40 с.*
9. Молька І.В. *Вплив теплотехнічних характеристик покриття на величину снігового навантаження: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / І.В. Молька. – Полтава: ПолтНТУ. 2012. – 21 с.*
10. *Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / А.В. Перельмутер, В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, А.В. Махінько, В.А. Пашинский, С.Ф. Пичугин. Под общей ред. А.В. Перельмутера. – 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, изд-во АСВ, изд-во «ДМК Пресс», 2014. – 596 с.*
11. *Надежность строительных конструкций. Работа научной школы проф. Пичугина С.Ф.: сб. науч. тр. – Полтава: ООО «АСМІ», 2010. – 434 с.*

12. Патенко Ю.Е. Надійність сталевих каркасів одноповерхових виробничих будівель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Ю.Е. Патенко. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 25 с.
13. Пашинский В.А. Сочетания усилий от атмосферных и крановых нагрузок, действующих на стальные каркасы одноэтажных производственных зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / В.А. Пашинский. – М.: МИСИ, 1986. – 18 с.
14. Пащенко А.М. Імовірнісний розрахунок стиснутих елементів будівельних конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А.М. Пащенко. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 20 с.
15. Пичугин С.Ф. Статистическое исследование горизонтальных и вертикальных силовых воздействий мостовых кранов на конструкции промышленных зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / С.Ф. Пичугин. – М.: МИСИ, 1969. – 13 с.
16. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / С.Ф. Пичугин. – К.: КГТУСА, 1994. – 34 с.
17. Пичугин С.Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции: Монография / С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько. – Полтава: Изд-во «АСМИ», 2005. – 342 с.
18. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Монография / С.Ф. Пичугин. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 456 с.
19. Пичугин С.Ф. Снеговые и гололедные нагрузки на строительные конструкции: монография / С.Ф. Пичугин, А.В. Махинько. – Полтава: ООО «АСМИ», 2012. – 460 с.
20. Пичугин С.Ф. Крановая нагрузка на строительные конструкции: монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава: ООО «АСМИ», 2014. – 504 с.
21. Попович Н.М. Імовірнісний аналіз природно-кліматичних навантажень на холодні покрівлі виробничих будівель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Н.М. Попович. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – 22 с.
22. Северин В.О. Імовірнісний розрахунок сталевих конструкцій на сумісну дію випадкових навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / В.О. Северин. – Полтава: ПДТУ, 2001. – 23 с.
23. Семко В.О. Оцінка надійності сталевих балок з дефектами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / В.О. Семко. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 20 с.
24. Склярєнко С.О. Надійність конструкцій буксирувальних канатних доріг: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / С.О. Склярєнко. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – 19 с.
25. Харченко Ю.А. Оценка параметров надежности стальных сжато-изогнутых элементов постоянного поперечного сечения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Ю.А. Харченко. – Полтава: ПолтНТУ, 1994. – 20 с.
26. Чичулин В.П. Вероятностный расчет стальных поперечных рам производственных зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / В.П. Чичулин. – Полтава: ПолтНТУ, 1995. – 24 с.
27. Чичуліна К.В. Надійність вузлів сталевих балок з профільованою стінкою: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / К.В. Чичуліна. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 25 с.

Надійшла до редакції 28.11.2014
© С.Ф. Пичугін