

УДК 624.04 (091)

## **КОЕФІЦІЄНТ УМОВ РОБОТИ – ВАЖЛИВИЙ ФАКТОР МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ**

### **THE COEFFICIENT OF WORKING CONDITIONS IS AN IMPORTANT FACTOR OF THE LIMIT STATES METHOD**

**Пічугін С.Ф., д.т.н., професор, ORCID 0000-0001-8505-2130 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)**

**Pichugin S.F., DSc, Professor, ORCID 0000-0001-8505-2130 (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")**

**У статті проведено аналіз еволюції коефіцієнта умов роботи в нормах проєктування сталевих конструкцій. Акцентовано увагу на конструктивній поправці – експериментальній основі цього коефіцієнта. Показано перспективність імовірнісних методів для обґрунтування коефіцієнтів умов роботи конструкцій різного призначення.**

**In the method of calculating structures according to limit states, the coefficient of working conditions must take into account all the features of the work and operation of structures, which are not explicitly taken into account by other coefficients of the method. This coefficient covers all the inaccuracies of the calculation model, which arise as a result of its simplification and idealization. The initial values of the working conditions coefficients were included in the first limit state design codes. In subsequent editions of the codes, the scale of these coefficients was regularly reviewed and supplemented. Probabilistic aspects of substantiating the coefficients of the working conditions of structures of various purposes were developed by researchers of the building structures reliability. The substantiation of the calculated coefficients of the limit state method, in particular the coefficient of working conditions, was in the field of view of leading foreign researchers of reliability. A significant contribution to the interpretation of the constructive correction as an experimental analog of the coefficient of working conditions was achieved by full-scale tests of steel structures of industrial buildings. The analysis of the reliability of compressed-bent elements and statically uncertain systems determined the additional coefficients of the working conditions.**

#### **Ключові слова:**

**Надійність, граничні стани, коефіцієнт умов роботи, конструктивна поправка  
Reliability, limit states, coefficient of working conditions, constructive correction**

**Вступ.** У загальній методиці розрахунку конструкцій за граничними станами коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c$  (попереднє позначення  $m$ ) повинен враховувати всі особливості роботи й експлуатації конструкцій, що не враховані в явному вигляді іншими коефіцієнтами методики. Тому це найбільш навантажений за призначенням і найменш визначений за змістом і величиною коефіцієнт. Можна вважати, що цей коефіцієнт покриває всі неточності розрахункової моделі, що виникають внаслідок її спрощення і ідеалізації, для того, щоб розрахунок можна виконати з необхідною точністю та з розумними працевтратами. Відомо, що у будь-якому розрахунку вводять спрощуючі положення, зокрема, основні гіпотези опору матеріалів та будівельної механіки. Унаслідок цього в будь-якому розрахунку виникають неминучі відхилення, обумовлені неточністю розрахункової моделі, котрі мають або систематичний, або випадковий характер. Для того щоб врахувати (або компенсувати) ці похибки і забезпечити необхідну надійність конструкції, що проєктується, вводять коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c$ . Можна вважати, що він має статистичну природу, в окремих випадках він детально вивчений і обґрунтований. Однак у деяких випадках його значення встановлені експертним методом на основі досвіду проєктування та експлуатації і потребують подальшого вивчення й уточнення.

**Аналіз останніх досліджень.** Деякі аспекти обґрунтування майбутнього коефіцієнта умов роботи розробляли ще в межах методики розрахунку будівельних конструкцій за допустимими напруженнями, яка панувала у проєктуванні до середини ХХ сторіччя [1, 2]. Початкові значення коефіцієнтів умов роботи включили в перші норми проєктування за граничними станами, впроваджені в 1950-і роки. У наступних виданнях норм шкалу цих коефіцієнтів регулярно переглядали і доповнювали. З додатковими змінами коефіцієнти умов роботи перейшли в норми України, зокрема у ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проєктування» [3]. Імовірнісні аспекти обґрунтування коефіцієнтів умов роботи конструкцій різного призначення розробляли дослідники надійності будівельних конструкцій [4, 5] та представники наукової школи «Надійність будівельних конструкцій» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» [6, 7]. Суттєвого внеску в трактування конструктивної поправки як експериментального аналога коефіцієнта умов роботи було досягнуто натурними випробуваннями сталевих конструкцій виробничих будівель [8]. Аналізом надійності стиснуто-зігнутих елементів було визначено додатковий коефіцієнт умов роботи ступінчастих сталевих колон цехів, оснащених мостовими кранами [9, 10]. Наслідком успішного застосування імовірнісного методу граничної рівноваги до оцінювання надійності статично невизначених систем стало розроблення шкали їх коефіцієнтів умов роботи [11 – 13]. Обґрунтування розрахункових коефіцієнтів методики граничних станів, зокрема коефіцієнта умов роботи, було в полі зору ведучих закордонних

дослідників надійності [14 – 18]. Національними нормами останніх років намічено перспективи розвитку загальної методики розрахунку будівельних конструкцій і шкали розрахункових коефіцієнтів [19 – 20].

**Постановка мети і задач дослідження.** Дані стосовно розрахункових коефіцієнтів методики граничних станів, зокрема коефіцієнта умов роботи, вміщено в численних випусках нормативних документів, затверджених у різні роки. Таким чином створено значний масив інформації, котрий не проаналізовано у достатній мірі. Не систематизовано результати натурних випробувань будівель і конструкцій як основи нормування коефіцієнта умов роботи. Маловідомими залишаються нароби дослідників надійності будівельних конструкцій, які можна залучити до обґрунтування нових коефіцієнтів умов роботи різних конструкцій. Тому метою і задачами дослідження є виконання систематизованого аналітичного огляду нормативних документів і наукових публікацій, починаючи з 1950-х років, з аналізом еволюції норм проектування сталевих конструкцій у частині змін коефіцієнта умов роботи та залученням до цього дослідних експериментальних і статистичних даних.

**Результати досліджень.** Початкові значення коефіцієнта умов роботи було включено в перші норми проектування за граничними станами. Зокрема, в НиТУ 121-55 «Нормы и технические условия проектирования стальных конструкций» (Норми і технічні умови проектування сталевих конструкцій) було вміщено доволі розгорнуту шкалу значень цього коефіцієнта, стосовно деяких із них наведемо пояснення.

- Для корпусів і днищ резервуарів було введено понижений коефіцієнт умов роботи  $m = 0,8$ , який враховує підвищену небезпеку руйнування резервуарів і складний напружений стан листової конструкції резервуару, зокрема, з'єднання корпусу з днищем, де створюється крайовий ефект.

- Коефіцієнт умов роботи, менший ніж одиниця  $m = 0,9$ , регламентовано для колон, ферм і балок громадських будівель, тобто стосовно конструкцій за дією переважно постійного навантаження (з малим коефіцієнтом надійності за навантаженням). Це обґрунтовується тим, що ці відповідальні конструкції можуть зруйнуватися від будь-якого незначного випадкового довантаження.

- Коефіцієнт  $m = 0,9$  віднесено до стиснутих елементів кроквяних ферм, можливе руйнування яких відбувається різко і особливо небезпечно.

- Прийнято до уваги, що стержні, виконані з одиночних кутиків, в місцях приєднання однією з полиць передають зусилля з ексцентриситетом, який знижує їх несучу здатність, що враховано коефіцієнтом умов роботи  $m = 0,75$ .

- Понижені коефіцієнти умов роботи заклепкових і болтових з'єднань  $m = 0,6 – 0,8$  враховують їх специфіку роботи і асоціюються з перехідними коефіцієнтами для допустимих опорів тих же з'єднань [1].

- Суттєво понижений коефіцієнт умов роботи анкерних болтів  $m = 0,65$  враховує їх підвищену відповідальність, оскільки вони забезпечують стійкість

будівлі в цілому, знаходячись при цьому у потайному обетонованому стані; крім того вони мають різьбу і можуть завантажуватися нерівномірно. Такий підхід перейшов у методику граничних станів з розрахунків за допустимим напруженнями [1].

У наступні норми СНиП II-V.3-72 «Стальные конструкции. Нормы проектирования» (Будівельні норми і правила «Сталеві конструкції. Норми проектування») було внесено наступні додаткові коефіцієнти умов роботи.

- Понижений коефіцієнт  $m = 0,8$  стосовно стиснутих елементів решітки ферм. Це було пов'язано з тим, стиснуті стержні, що знаходились зазвичай у середніх частинах ферм, підбирали за невеликими зусиллями, мали малі перерізи і були занадто гнучкими; вони легко пошкоджувалися при транспортуванні, монтажі і експлуатації, могли достроково втрачати стійкість і призводити до аварій ферм (такі випадки дійсно траплялися в 1960 –1970 роки минулого століття). Введення даного коефіцієнта у певній мірі зняло вказану проблему.

- Коефіцієнти  $m = 0,75 \dots 0,9$  регламентували специфічні особливості роботи стержнів просторових решітчастих конструкцій з одиночних кутиків.

- Понижений коефіцієнт умов роботи  $m = 0,9$  мав за мету підвищити надійність сталевих підкранових балок, котрі у важких умовах експлуатації одержували масові пошкодження.

У нормах СНиП II-23-81 «Стальные конструкции. Нормы проектирования» (Будівельні норми і правила «Сталеві конструкції. Норми проектування») таблицю коефіцієнтів умов роботи, з якої було вилучено понижений коефіцієнт для підкранових балок, суттєво поповнили новими пунктами.

- Понижуючий коефіцієнт  $\gamma_c = 0,95$  для перевірок загальної стійкості суцільних балок, котрий враховує характер цього виду руйнування, що відбувається різко і небезпечно.

- Зменшений коефіцієнт  $\gamma_c = 0,9$ , який враховує наявність різьби в розтягнутих елементах у розрахунку за основним перерізом.

- Коефіцієнти стосовно елементів стержневих конструкцій: понижений  $\gamma_c = 0,95$  для стиснутих елементів при перевірці стійкості і розтягнутих у зварних конструкціях; одночасно щодо тих самих конструкцій, що мають болтові з'єднання, у розрахунках на міцність регламентовано підвищений коефіцієнт  $\gamma_c = 1,05$ .

- Підвищені коефіцієнти  $\gamma_c = 1,05 - 1,1$  стосовно конструкцій, з'єднаних болтами, чим враховується більш сприятливий характер роботи і можливого руйнування таких конструкцій порівняно зі зварними конструкціями.

Крім наведених коефіцієнтів  $\gamma_c$ , які можна вважати «основними», норми СНиП II-23-81 містили шкали коефіцієнтів умов роботи з'єднань  $\gamma_b = 0,75 - 1,0$ ;

	елементів	опор	ЛЕП
$\gamma_c =$	$0,75 - 0,95$ ;	конструкцій	антенних споруд зв'язку
	$0,55 - 1,10$	і окремо –	визначення коефіцієнтів умов роботи для розтягнутого одиночного кутика, який кріпиться однією полицею болтами.

З додатковими змінами шкалу коефіцієнтів умов роботи перевели в норми України ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування» [3]. Із попереднього варіанту норм було вилучено зменшений коефіцієнт до розрахунку суцільних балок на загальну стійкість та збільшений коефіцієнт для перевірки на міцність суцільних балок і колон з болтовими з'єднаннями при статичному навантаженні.

Разом з тим у ДБН було внесено нові пункти таблиці коефіцієнтів умов роботи.

- Коефіцієнт  $\gamma_c = 1,05$  для колон виробничих споруд з мостовими кранами, який частково враховує підвищений рівень надійності колон у порівнянні з іншими конструкціями внаслідок сумісної дії на них кількох випадкових навантажень (інформацію з цього питання наведено нижче та більш детально у монографії [4]).

- Групу підвищених коефіцієнтів умов роботи  $\gamma_c = 1,10 - 1,20$  стосовно опорних плит різної товщини при дії статичного навантаження, що враховують, очевидно, відносно сприятливі умови роботи під навантаженням цих конструктивних елементів.

Як і в попередньому варіанті норм проектування сталевих конструкцій, ДБН В.2.6-198:2014, крім загальних коефіцієнтів умов роботи, регламентує відповідні коефіцієнти для специфічних видів сталевих конструкцій:

- для болтових з'єднань – у вигляді розгорнутої таблиці;
- для конструкцій опор повітряних ліній електропередавання, конструкцій відкритих пристроїв і ліній контактних мереж електротранспорту –  $\gamma_c = 0,75 - 0,95$ ;
- для конструкцій антенних споруд зв'язку заввишки до 500 м  $\gamma_c = 0,55 - 1,10$ ;
- для конструкцій річкових гідротехнічних споруд –  $\gamma_c = 0,55 - 1,10$  в основних сполученнях навантажень;  $\gamma_c = 0,70 - 1,50$  в особливих сполученнях навантажень.

Експериментальною оцінкою коефіцієнта умов роботи можна вважати конструктивну поправку  $k$  – відношення фактичного напруження або прогину від вибраного навантаження до умовного розрахункового напруження (або прогину) від того ж навантаження:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{\text{експер}}}{\sigma_{\text{теор}}}; \quad k_f = \frac{f_{\text{експер}}}{f_{\text{теор}}}. \quad (1)$$

Величина конструктивної поправки є характеристикою наближення прийнятих розрахункових припущень до дійсних умов роботи споруди, вона показує, наскільки умовна розрахункова схема наближена до її дійсної схеми. Таке трактування конструктивної поправки практично співпадає з наведеним вище визначенням змісту коефіцієнту умов роботи, тому можна вважати, що конструктивна поправка – це експериментальна оцінка коефіцієнта умов роботи. Зважаючи на структуру граничної нерівності граничних станів першої

групи, коефіцієнт умов роботи є величиною, оберненою конструктивній поправці, тобто

$$\gamma_c = 1/k_\sigma; \quad k_\sigma = 1/\gamma_c. \quad (2)$$

Отже, конструктивні поправки, менші одиниці, відповідають значенням коефіцієнта умов роботи, більшим одиниці, що свідчить про сприятливі особливості роботи і можливі запаси несучої здатності конструкції. Навпаки, конструктивні поправки, більші одиниці, свідчать про недооцінку вибраними розрахунковими моделями дійсних напружень, що потребує введення коефіцієнтів умов роботи, менших одиниці і відповідного підсилення конструкції.

Досвід натурних випробувань реальних конструкцій, зокрема сталевих, переконливо свідчить, що конструктивні поправки у більшості випадків не дорівнюють одиниці. Д.т.н. Г.О. Шапіро, який провів масштабні дослідження дійсної роботи сталевих конструкцій промислових цехів в 1936...1951 рр. [8], наступним чином розгорнув наближену структуру конструктивної поправки сталевих конструкцій:

$$k = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_7 \alpha_8, \quad (3)$$

де  $\alpha_1$  – загальна поправка на розрахункову схему;  $\alpha_2$  – поправка на геометричну схему;  $\alpha_3$  – поправка на конструктивні елементи;  $\alpha_4$  – поправка на перерізи робочих елементів;  $\alpha_5$  – поправка на просторову роботу;  $\alpha_6$  – поправка на осадку і поворот опор;  $\alpha_7$  – поправка на навантаження: його величину, взаємне положення і зміну;  $\alpha_8$  – поправка на жорсткість вузлів.

Як бачимо, цей ще неповний перелік складових наглядно свідчить про досить складну структуру та зміст конструктивної поправки і відповідно коефіцієнта умов роботи.

У роки, що передували Другій світовій війні, ЦНІПС і Гинсталмост виконали випробування 300 легких кроквяних ферм [8], що дозволило побудувати дослідну криву розподілу конструктивної поправки за напруженнями з числовими характеристиками: середнє значення  $\bar{k} = 0,90$ , стандарт  $\hat{k} = 0,11$ . Дослідну криву було апроксимовано В.В. Кураєвим нормальним розподілом. Для розуміння природи конструктивної поправки сталевих кроквяних ферм нагадаємо, що за визначення зусиль ферми представляють ідеалізованою системою з прямолінійними стержнями, що сходяться в одній точці (центрі вузлів) і з'єднані **шарнірами**. **Зазвичай**

вважається, що стержні виконуються з ідеально пружного матеріалу, а сама схема не деформується. Тому конструктивні поправки за прогинами виявляються меншими одиниці (табл. 1) внаслідок впливу жорсткості вузлів і нерозрізності поясів. Ці особливості менше впливають на величини осьових зусиль у стержнях: конструктивна поправка за напруженнями дорівнює  $\kappa = 0,96$  для зварних ферми легкого типу (табл.1). Ця тенденція в меншій мірі проявляється для важких ферм з Н-подібними перерізами стержнів, а також для клепанних ферм.

Таблиця 1

Конструктивні поправки сталевих ферм різних типів

Тип ферми	Конструктивні поправки	
	за прогинами	за напруженнями посередині ферми в поясах
Зварні легкого типу	0,89	0,96
Зварні більш важкого типу	0,79	0,79
Клепані легкого типу	0,76	0,68
Клепані більш важкого типу	0,59	0,55

Під час згаданих вище досліджень [8] дослідили дійсну роботу деяких сталевих підкранових балок, одержані конструктивні поправки було знайдено в інтервалі 0,955 – 1,47. Досить незвичні значення поправок, що перевищують одиницю, є наслідком доволі складної роботи підкранових балок. Це поясняли наявністю двовісного напруженого стану у стінці балок, ранньою появою пластичності, впливом викривлення стінки балок. Фактично на роботу підкранових балок діють ще багато інших факторів, котрі на момент виконання випробувань (1936...1951 рр.) дослідили недостатньо. Отже, це приклад того, як величини конструктивної поправки віддзеркалювали рівень досліджень конструкцій.

У період переходу від методу допустимих напружень до методу граничних станів (50...60-ті роки ХХ-го століття) активізували натурні експериментальні дослідження конструкцій з уточнення їх дійсної роботи і виявлення конструктивних поправок. Випробування сталевих конструкцій кількох металургійних заводів дали наступні величини конструктивних поправок:

- кранові та підкранові ферми (за прогинами) –  $\kappa = 0,67...1,00$ ;
- підкранові балки (за прогинами) –  $\kappa = 0,53...1,07$ ;
- підкранові балки (за напруженнями) –  $\kappa = 0,51...0,87$ .

При цьому очевидні великі труднощі натурних досліджень у діючих цехах, особливо металургійних з їх виключно інтенсивним режимом роботи і сильноагресивним внутрішнім середовищем (високі температури, загазованість, динамічні кранові впливи тощо). Зазначимо, що більшість одержаних конструктивних поправок виявилася меншою ніж одиниця, тобто

мала характер, протилежний даним Г.О. Шапіро. Можливо, що це свідчило про наявні запаси у досліджених балках і можливість деякого збільшення коефіцієнту умов роботи. За даними Московського інженерно-будівельного інституту (МІБІ), одержаними дещо пізніше в 60-і роки минулого століття, конструктивна поправка за прогинами зварних підкранових балок знаходиться в інтервалі 0,85...1,00.

Найбільш повні дані щодо конструктивних поправок поперечних рам одержали під час масштабних натурних випробувань виробничих будівель (ОВБ) у 30...50 роки минулого століття [8]. Деякі з одержаних результатів наведено у табл. 2 для двох мартенівських цехів. Конструктивні поправки за поперечними зміщеннями виявилися дуже малими у порівнянні з розрахунком плоскої окремо стоячої рами, що наочно свідчить про суттєву наближеність цієї розрахункової моделі. Після врахування просторової розрахункової моделі конструктивна поправка значно збільшили, хоча вона ще не досягає одиниці, що свідчить про неповну досконалість просторової моделі ОВБ 1940..1950 років.

Таблиця 2

Конструктивні поправки рам ОВБ за поперечними зміщеннями

№ цеха	Відмітка місця заміру зміщення, м	Поперечне гальмування мостового крана		Горизонтальна сила на відмітках низу ферм або головки рейки	
		Плоска рама	Просторова система	Плоска рама	Просторова система
Цех №1	25,7	0,12	0,60	0,21	0,80
	18,5	0,16	0,80	0,15	0,58
Цех №4	15,2	0,09	1,00	0,08	0,51
	12,4	0,06	0,90	0,10	0,57

Як показали натурні випробування сталевих колон ОВБ, теоретичні і експериментальні значення нормальних сил відрізняються незначно, конструктивні поправки близькі до одиниці. Конструктивні поправки колон за моментами значно менші внаслідок більш складної їх природи (невизначеність бічних сил кранів, ексцентричність спирання підкранових балок, складна конструкція в'язей і робочих майданчиків тощо).

Обґрунтування коефіцієнтів умов роботи, крім оцінки конструктивних поправок, може базуватися також на імовірнісних дослідженнях і оцінках надійності конструкцій.

Розглянемо обґрунтування коефіцієнта умов роботи сталевих ступінчастих колон. Особливістю конструкцій колон є, зокрема, те, що на них діють кілька випадкових навантажень, котрі мають різну імовірнісну природу (постійні, атмосферні, кранові). Тому оцінка надійності таких конструкцій досить складна, її одержано в дослідженнях, що проводили на кафедрі КМДіП



ПолтНТУ протягом кількох років [9, 10]. Ці дослідження дозволили, зокрема, оцінити резерви несучої здатності сталевих колон ОБВ, що не враховували діючі норми, і запропонувати новий коефіцієнт умов роботи.

З метою одержання конкретних результатів було перевірено ряд характерних ступінчастих колон виробничих будівель, запроєктованих за нормами [3]. Було розглянуто колони в широкому діапазоні параметрів: з жорсткими і шарнірними сполученнями колон з ригелями, для рам з прольотами 24...36 м і кроками 6 і 12 м, з теплою і холодною покрівлею з профільованим настилом і залізобетонними панелями, з мостовими кранами вантажопідйомністю 30/5...125/20 тс режимів 4К-6К і 7К, зі сніговими і вітровими навантаженнями I, II і III районів; всі колони підбрано за розрахунком без запасу. Одержані дані свідчать про те, що верхні частини ступінчастих колон мають імовірності відмови одного порядку з колонами постійного перерізу і кроквяними балками при важкій покрівлі, тому можна говорити за приблизно рівну забезпеченість цієї групи сталевих конструкцій. У той же час систематично, як при жорсткому, так і при шарнірному сполученні ригелів з колонами надійність нижніх частин виявилася значно більшою, ніж верхніх. Це є слідством прикладення до нижньої частини більшої кількості випадкових навантажень, зокрема, вертикального кранового навантаження.

Таке положення дало можливість оцінити резерви надійності нижніх частин колон, знайти зменшену площу перерізу і коефіцієнт умови роботи, що дорівнював для перевірених варіантів колон  $\gamma_c = 1,15 \dots 1,53$ . Цей коефіцієнт, визначений на основі критерію рівнонадійності частин, можна рекомендувати ввести в розрахункові формули для суцільних і наскрізних нижніх ділянок ступінчастих колон ОБВ, оснащених мостовими кранами. Одержані дані дозволили у першому наближенні призначити із запасом за нижніми обчисленими значеннями коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c = 1,15$  для нижніх частин сталевих ступінчастих колон і рекомендувати його у норми проектування і підсилення сталевих конструкцій. При розробці ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування» [3] цю рекомендацію обережно враховано в формі  $\gamma_c = 1,05$  для колон ОБВ, оснащених мостовими кранами.

Перейдемо до обґрунтування коефіцієнта умов роботи статично невизначених рам. У теорії надійності будівельних конструкцій розрахунок статично невизначених систем (СНС) (окремих балок і рам, багатопверхових і багатопролітних поперечників будівель) вважають однією із найскладніших проблем. Причиною цього є складний характер руйнування статично невизначених систем (СНС), котрий відрізняється від характеру руйнування статично визначеної системи тим, що після відмови одного або навіть кількох елементів СНС може зберігати працездатний стан. Тому руйнування статично невизначеної системи може відбуватися, по мірі відмов окремих елементів, шляхом переходу через різні працездатні стани, відповідні до різних схем та імовірнісних параметрів системи. Внаслідок цього оцінка надійності СНС

являє собою досить громіздку задачу, ступінь складності якої швидко зростає відповідно до складності системи. Дослідженнями, проведеними на кафедрі КМДіП ПолтНТУ [11 – 13], вдалося у певній мірі розв’язати цю проблему, розробити методики оцінки надійності СНС, придатні до практичного застосування, та запропонувати нову шкалу коефіцієнтів умов роботи стосовно таких систем. Повну оцінку імовірності відмови СНС з випадковою міцністю і навантаженням одержали в результаті розробки імовірнісного методу граничної рівноваги. Із застосуванням розроблених методик і програм було виконано числовий експеримент з визначення надійності 140 статично невизначених рам різного призначення і конфігурації, причому кількість поверхів варіювали від одного до трьох, кількість прольотів – також від одного до трьох. Кількісно підтверджено, що пружно-пластичний розрахунок розглянутих СНС призводить до економії матеріалу в межах 10...15% порівняно з пружним розрахунком.

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнтів умов роботи  $\gamma_S$  статично невизначених сталевиx рам

Кількість прольотів	Кількість поверхів		
	1 поверх	2 поверхи	3 поверхи
1 проліт	1,18	1,21	1,21
2 прольоти	1,19	1,26...1,27	–
3 прольоти	1,24	–	–

Вперше було кількісно оцінено резерв надійності СНС порівняно з окремими елементами і статично визначеними системами. Цей резерв пропонують враховувати вперше введеним «коефіцієнтом схемної надійності  $\gamma_S$ », аналогічним коефіцієнту умов роботи діючих норм. В основу обґрунтування значень цього коефіцієнта покладено врахування його імовірнісної природи та умова рівнонадійності СНС, за якою імовірність відмови системи в цілому дорівнює імовірності відмови окремих елементів.

Аналіз показав, що по мірі наближення механізму руйнування СНС до балочного механізму коефіцієнт  $\gamma_S$  зменшується, а до зсувного механізму – збільшується; максимальні значення коефіцієнта  $\gamma_S$  отримано стосовно повних механізмів руйнування, частковий механізм призводить до зменшення коефіцієнта  $\gamma_S$ . Одержані коефіцієнти схемної надійності знаходяться в інтервалі  $\gamma_S = 1,18...1,27$  (табл.3), тобто свідчать про суттєві резерви несучої здатності СНС, що не враховують діючі норми. Цей коефіцієнт умов роботи СНС призначено до використання у розрахунках несучої здатності перерізів елементів СНС з урахуванням пластичної стадії роботи.

**Висновки.** Статтю присвячено питанням обґрунтування і нормування коефіцієнта умов роботи – важливого фактору методики розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами. Проведено системний аналіз змін у нормуванні цього коефіцієнта в нормах проектування сталевих конструкцій, починаючи з 50-х років до теперішнього часу. Акцентовано увагу на конструктивній поправці – експериментальній основі коефіцієнта умов роботи, наведено результати відповідних натурних випробувань сталевих конструкцій діючих цехів. Показано перспективність імовірнісних методів для обґрунтування коефіцієнтів умов роботи ступінчастих колон і статично невизначених систем.

1. Pichugin Sergii. The allowable stress method is the basis of the modern method of calculating building structures according to limit states // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. Вип. 1 (58). С. 17–32. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3078>.

2. Баженов В.А., Ворона Ю.В., Перельмутер А.В. Будівельна механіка і теорія споруд. Нариси з історії. К.: Каравела, 2016. 428 с. ISBN 978-966-222-968-8/

Bazhenov V.A., Vorona Yu.V., Perelmuter A.V. Budivelnna mekhanika i teoriia sporud. Narysy z istorii. K.: Karavela, 2016. 428 s. ISBN 978-966-222-968-8/

3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 205 с

DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010. 205 s

4. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2016. 520 с.

Pichuhin S.F. Rozrakhunok nadiinosti budivelnnykh konstruktsii. Poltava: TOV «ASMI», 2016. 520 s.

5. Pichugin, S.F. Reliability Estimation of Industrial Building Structures // Magazine of Civil Engineering, 2018. 83(7). P. 24–37. DOI: 10.18720/MCE.83.3

6. Пічугін С.Ф. Наукова школа «Надійність будівельних конструкцій»: досягнення і перспективи // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2015. Вип. 1 (43). С. 3–6.

Pichuhin S.F. Naukova shkola «Nadiinist budivelnnykh konstruktsii»: dosiahnennia i perspektyvy // Zbirnyk naukovykh prats «Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo». Poltava: PoltNTU imeni Yurii Kondratiuka, 2015. Vyp. 1 (43). S. 3–6.

7. Pichugin Sergiy. Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2019. Вип. 2 (53). С. 5 – 12. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1880>.

8. Перельмутер А.В., Пічугін С.Ф.. Метод граничних станів. Загальні положення та застосування в нормах проектування. К.: «Софія-А», 2024. 252 с.

Perelmuter A.V., Pichuhin S.F.. Metod hranychnykh staniv. Zahalni polozhennia ta zastosuvannia v normakh proektuvannia. K.: «Sofiiia-A», 2024. 252 s.

9. Пічугін С.Ф., Пашенко А.М. Імовірнісний розрахунок сталевих колон методом статистичного моделювання // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 2000. Вип. 6. Ч. 2. С. 115–118.

Pichuhin S.F., Pashchenko A.M. Imovirnisnyi rozrakhunok stalevykh kolon metodom statystychnoho modeliuvannia // Zbirnyk naukovykh prats «Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo». Poltava: PDTU imeni Yurii Kondratiuka, 2000. Vyp. 6. Ch. 2. S. 115 – 118.

**10.** Пічугін С.Ф., Харченко Ю.А. Алгоритм імовірнісного розрахунку сталевих стиснуто-зігнутих елементів на ПЕОМ // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 2000. Вип.6. Ч.2. С. 90–93.

Pichuhin S.F., Kharchenko Yu.A. Alhorytm imovirnisnoho rozrakhunku stalevykh stysnuto-zihnutykh elementiv na PEOM // Zbirnyk naukovykh prats «Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo». Poltava: PDTU imeni Yurii Kondratiuka, 2000. Vyp.6. Ch.2. S. 90–93.

**11.** Pichugin S.F. Probabilistic Analysis of Redundant Steel Structures // XLII Konferencja Naukowa KILIW PAN i KN PZITB «Krynica 1996». Krakow-Krynica, 1996. Tom 8. P. 85–92.

**12.** Пічугін С.Ф., Гнітько О.В. Дослідження пластичного руйнування статично невизначених сталевих рам методом граничної рівноваги // Збірник наукових праць: Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Львів: «Каменяр», 1998. Вип. 3. С. 181–186.

Pichuhin S.F., Hnitko O.V. Doslidzhennia plastychnoho ruinuvannia statychno nevyznachenykh stalevykh ram metodom hranychnoi rovnovahy // Zbirnyk naukovykh prats: Mekhanika i fizyka ruinuvannia budivelykh materialiv i konstruktsii. Lviv: «Kamieniar», 1998. Vyp. 3. S. 181–186.

**13.** Пічугін С.Ф., Гнітько О.В. Імовірнісна оцінка резервів несучої здатності статично невизначених сталевих рам // Збірник наукових праць: Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Львів: «Каменяр», 2000. Вип.4. С. 167–170.

Pichuhin S.F., Hnitko O.V. Imovirnisna otsinka rezerviv nesuchoi zdatnosti statychno nevyznachenykh stalevykh ram // Zbirnyk naukovykh prats: Mekhanika i fizyka ruinuvannia budivelykh materialiv i konstruktsii. Lviv: «Kamieniar», 2000. Vyp.4. S. 167–170.

**14.** Lemaire M. Structural Reliability. London: ISTE-Wiley, 2009. 488 p.

**15.** Elishakoff I. Safety Factors and Reliability: Friends or Foes? Berlin: Springer Science & Buisness Media, 2012. 296 p.

**16.** Elishakoff I. Probabilistic Methods in the Theory of Structures. Singapore: World Scientific, 2017. 524 p.

**17.** Doorn N., Hansson S.O. Factors and Margins of Safety // Handbook of Safety Principles. New York: Wiley, 2018. P. 87–114.

**18.** Raizer Vladimir, Elishakof Isaac. Philosophies of Structural Safety and Reliability. London, New York: CRC Press of Taylor & Francis Group, 2022. 287 p.

**19.** ДБН В.1.2.-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Мінрегіон України, 2018. 33 с.

DBN V.1.2.-14:2018. Zahalni pryntsyupy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. K.: Minrehion Ukrainy, 2018. 33 s.

**20.** ДБН В.1.2.-6:2022. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. – К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 56 с.

DBN V.1.2.-6:2022. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Mekhanichnyi opir ta stiikist. – K.: Ministerstvo rozvytku