



УДК 624.012.45:620.191/192



**ДОРОФЄЄВ В.С.**  
Д-р технічних наук, проф.,  
Одеський національний  
морський університет,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: dorvs@ukr.net,  
тел.: +38 (095) 153-51-07,  
ORCID: 0000-0002-2412-4134



**КАРПЮК В.М.**  
Д-р технічних наук, проф.,  
Одеська державна академія  
будівництва та архітектури,  
e-mail: v.karpiuk@ukr.net,  
тел.: +38 (067) 486-56-74,  
ORCID: 0000-0002-4088-6489



**ПЕТРОВ О.М.**  
Канд. технічних наук, мол.  
науковий співробітник, Одеський  
національний морський  
університет,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: petrov.o.m.1984@gmail.com,  
тел.: +38 (050) 189-24-90,  
ORCID: 0000-0001-6060-6408



**ПЕТРОВ М.М.**  
Канд. технічних наук, доц.,  
Одеська національна академія  
зв'язку ім. О.С. Попова,  
м. Одеса, Україна,  
e-mail: petrov.nikolay.n@gmail.com,  
тел.: +38 (067) 763-06-79,  
ORCID: 0000-0003-0507-5354



**КРАНТОВСЬКА О.М.**  
Канд. технічних наук, доц.,  
Одеська державна академія  
будівництва та архітектури,  
e-mail: elena14122007@gmail.com,  
тел.: +38 (068) 911-76-52,  
ORCID: 0000-0001-6182-7691

## РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕРІЗІВ ПРОГІННИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЇХ ЗГИНІ З КРУЧЕННЯМ ЗА УДОСКОНАЛЕНОЮ ІНЖЕНЕРНОЮ МЕТОДОЛОГІЄЮ

### АНОТАЦІЯ

Аналіз результатів порівняння дослідних і розрахункових значень несучої здатності просторових перерізів прогінних конструкцій, обчислених за рекомендаціями національних норм проектування розвинених країн світу та чисельними авторськими пропозиціями показав як незадовільну їхню збіжність, так і недостатню надійність розрахункових формул.

Різноманітність форм складного напружено-деформованого стану та схем їх руйнування унеможливує створення однієї простої та універсальної розрахункової моделі міцності припорних ділянок конструкцій, що знаходять-

ся в складному напруженому стані, що адекватно відображала б вплив як конструктивних чинників, так і факторів зовнішньої дії на їхню несучу здатність. Спрощення розрахункових моделей вимагає застосування емпіричного підходу. Методи розрахунку конструкцій, що спираються на загальну механіку залізобетону з тріщинами, носять універсальний характер і дозволяють моделювати будь-який напружено-деформований стан та простежити за усіма етапами роботи конструкцій, але їхнє практичне застосування стримується відомими труднощами. Розрахунок припорних ділянок конструкцій за моделлю просторових перерізів пропонується



здійснювати по аналогії з рекомендаціями російських норм за перерізами, утвореними похилими відрізками прямих на трьох розтягнутих гранях елемента і замикаючим відрізком прямої по четвертій стислій грані елемента. Сам розрахунок на дію крутних моментів виконується за міцністю конструкцій між просторовими перерізами і за просторовими перерізами на основі рівнянь рівноваги всіх внутрішніх і зовнішніх силових факторів відносно осі, розташованої в центрі стиснутої зони просторового перерізу. Розрахунок конструкцій на дію поперечної сили при заданих співвідношеннях крутного і згинального моментів здійснювали за рівняннями взаємодії між відповідними силовими чинниками з урахуванням рекомендацій російських норм проектування і уточнюючого коефіцієнта  $k$  впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність елементів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** несуча здатність, напружено-деформований стан, просторові перерізи, приопорні ділянки.

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДОЛОГИИ

**ДОРОФЕЕВ В.С.** Д-р технических наук, проф., Одесский национальный морской университет, г. Одесса, Украина, e-mail: dorvs@ukr.net, тел.: +38 (095) 153-51-07, ORCID: 0000-0002-2412-4134

**КАРПЮК В.М.** Д-р технических наук, проф., Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: v.karpiuk@ukr.net, тел.: +38 (067) 486-56-74, ORCID: 0000-0002-4088-6489

**ПЕТРОВ А.Н.** Канд. технических наук, мл. научный сотрудник, Одесский национальный морской университет, г. Одесса, Украина, e-mail: petrov.o.m.1984@gmail.com, тел.: +38 (050) 189-24-90, ORCID: 0000-0001-6060-6408

**ПЕТРОВ Н.Н.** Канд. технических наук, доц., Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, г. Одесса, Украина, e-mail: petrov.nikolay.n@gmail.com, тел.: +38 (067) 763-06-79, ORCID: 0000-0003-0507-5354

**КРАНТОВСКАЯ Е.Н.** Канд. технических наук, доц., Одесская государственная академия

строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина, e-mail: elena14122007@gmail.com, тел.: +38 (068) 911-76-52, ORCID: 0000-0001-6182-7691

## АННОТАЦИЯ

Анализ результатов сравнения исследовательских и расчетных значений несущей способности пространственных сечений пролетных конструкций, рассчитанных по рекомендациям национальных норм проектирования развитых стран мира и многочисленными авторскими предложениями показал, как неудовлетворительную их сходимость, так и недостаточную надежность расчетных формул.

Разнообразие форм сложного напряженно-деформированного состояния и схем их разрушения делает невозможным создание одной простой и универсальной расчетной модели прочности приопорных участков конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии, которая адекватно отражала бы влияние как конструктивных факторов, так и факторов внешнего воздействия на их несущую способность. Упрощение расчетных моделей требует применения эмпирического подхода. Методы расчета конструкций, опирающихся на общую механику железобетона с трещинами, носят универсальный характер и позволяют моделировать любое напряженно-деформированное состояние и проследить за всеми этапами работы конструкций, но их практическое применение сдерживается известными трудностями. Расчет приопорных участков конструкций по модели пространственных сечений предлагается осуществлять по аналогии с рекомендациями российских норм по сечениям, образованными наклонными отрезками прямых на трех растянутых гранях элемента и замыкающим отрезком прямой по четвертой сжатой грани элемента. Сам расчет на действие крутящих моментов выполняется по прочности конструкций между пространственными сечениями и по пространственным сечениям на основе уравнений равновесия всех внутренних и внешних силовых факторов относительно оси, расположенной в центре сжатой зоны пространственного сечения. Расчет конструкций на действие поперечной силы при заданных соотношениях крутящего и изгибающего моментов осуществляли по уравнениям взаимодействия между соответствующими силовыми факторами с учетом рекомендаций российских норм проектирования и уточняющего коэффициента  $k$  влияния конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия на несущую способность элементов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** несущая способность, напряженно-деформированное состояние, пространственные сечения, приопорные участки.



## THE IMPROVED METHOD OF BENDING WITH TORSION STRENGTH CALCULATION FOR THE REINFORCED CONCRETE SPAN STRUCTURES SPATIAL SECTIONS

**DOROFEEV V.S.** Dr, Prof., Odessa National Maritime University,  
Odessa, Ukraine,  
e-mail: dorvs@ukr.net,  
tel.: + 38 (095) 153-51-07,  
ORCID: 0000-0002-2412-4134

**KARPIUK V.M.** Dr, Prof., Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Odessa, Ukraine,  
e-mail: v.karpiuk@ukr.net,  
tel.: +38 (067) 486-56-74,  
ORCID: 0000-0002-4088-6489

**PETROV O.M.** PhD, Junior research worker, Odessa National Maritime University,  
Odessa, Ukraine,  
e-mail: petrov.o.m.1984@gmail.com,  
tel.: +38 (050) 189-24-90,  
ORCID: 0000-0001-6060-6408

**PETROV M.M.** PhD, Ass. Prof., O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,  
Odessa, Ukraine,  
e-mail: petrov.nikolay.n@gmail.com,  
tel.: +38 (067) 763-06-79,  
ORCID: 0000-0003-0507-5354

**KRANTOVSKA O.M.** PhD, Ass. Prof., Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Odessa, Ukraine,  
e-mail: elena14122007@gmail.com,  
tel.: +38 (068) 911-76-52,  
ORCID: 0000-0001-6182-7691

### ABSTRACT

The analysis of the results of comparing the span structures spatial sections load-bearing capacity experimental and design values calculated according to the national design codes of world developed countries and numerous author's developments showed their unsatisfactory convergence and calculation formulas insufficient reliability.

The variety of the complex stress-strain state forms and their destruction schemes makes it impossible to create a unified simple and universal strength calculation model for the complex-stressed structures supporting areas, which would adequately reflect the influence of constructive factors as well as of external impacts factors on their load-bearing capacity. The calculation models simplification requires the use of an empirical approach. The methods of structures calculation based on the general mechanics of reinforced concrete with cracks are universal. They allow modeling the various stress-strain states and tracing all stages of structures behavior, but their practical application is constrained by the known difficulties. Therefore, the authors suggest to conduct the structures supporting areas calculation by the spatial sections model according to the Russian standards

recommendations by means of the sections formed by inclined segments of straight lines on the three stretched faces of the element and the closure straight line segment on the fourth compressed element face. The torque action calculation should be carried out according to the strength of structures between the spatial sections and to the spatial sections based on the equilibrium equations of all internal and external force factors relatively to the axis located in the center of the spatial section compressed zone. The structures calculation for the transverse force effect with the predetermined ratios of torque and bending moment should be carried out on the basis of equations of interaction between the corresponding force factors, taking into account the Russian design standards recommendations and the specifying coefficient  $k$  of the influence of constructive factors and external action factors on the elements load-bearing capacity.

**KEY WORDS:** load-bearing capacity, stress-strain state, spatial cross-sections, supporting areas

### ВСТУП

Опір залізобетонних елементів сумісній дії поздовжніх і поперечних сил, згинальних і крутних моментів є однією з найбільш важливих і не до кінця вивченою проблемою як у теорії залізобетону, так і в реальному проектуванні. У зв'язку з цим виконання систематизованих експериментально-теоретичних досліджень з метою вдосконалення існуючих і розробки сучасних розрахункових моделей приопорних ділянок залізобетонних елементів є важливим завданням.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДЖЕРЕЛ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Пріоритетним напрямком досліджень і публікацій з вказаної теми в останні роки є розвиток нормативної бази в області будівельних конструкцій, впровадження деформаційного методу розрахунку їхньої несучої здатності. При цьому, якщо вивченню несучої здатності нормальних перерізів присвячені чисельні праці вітчизняних та зарубіжних дослідників, то несуча здатність похилих перерізів вказаних елементів залишається ще недостатньо вивченою. Разом з тим, руйнування залізобетонних конструкцій за похилими перерізами є дуже небезпечним, а тому і вкрай небажаним.

Відмова від так званих методів аналогій при розрахунку міцності похилих перерізів, в тому числі фермової, основним недоліком якої є відмінність прийнятих розрахункових моделей від реальних умов роботи і яка входить в нині діючий європейський стандарт EC-2 [4], вивела у другій половині ХХ століття вітчизняні норми на передові рубежі науки по цьому питанню. Але, разом з тим, як слушно підкреслено у роботі В.В. Тура і А.А. Кондратчика [19], недостатньо обгрунтоване зменшення запасу міцності приопорних ділянок і нехтування впливом цілого ряду конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії призвело до суттєвого



зменшення надійності розрахунку за СНиП 2.03.01-84\* [16]. На думку авторів [2] найбільшу точність і надійність мають розрахункові формули норвежських норм NS 3473E, що базуються на положеннях модифікованої теорії "стиснутих полів" і канадські норми CSA 23, засновані на загальній теорії розрахунку на зріз. Результати оцінки надійності розрахункових формул EC-2 показали, що вони займають деяке проміжне положення між американськими ACI Code 318 і норвежськими NS 3473E нормами.

У зв'язку з цим під час перегляду СНиП 2.03.01-84\* автори (О.С. Залесов, О.І. Звездов, Т.А. Мухамедієв, Є.А. Чистяков та ін.) ввели в Росії з 2003 і 2004 років [17, 18] норм стверджують, що існуючі методи розрахунку міцності похилих перерізів залізобетонних елементів за дії поперечних і поздовжніх сил, згинального і крутного моментів внаслідок відсутності системного підходу і урахування достовірного впливу цілого ряду факторів, в тому числі складного напружено-деформованого стану елементів, ще не досягли такого рівня, щоб їх можна було б прийняти у якості нормативних методів. Тому у нових російських нормах [17] у бік створення додаткового запасу міцності було прийнято спрощену розрахункову схему приопорної ділянки прогінного залізобетонного елемента.

Вигідно в цьому плані відрізняються роботи А.М. Бамбури, О.Б. Голишева, О.І. Давиденка та ін. [8 - 11], що за допомогою деформаційного методу спроможні через міцність нормальних перерізів задовільно визначати міцність похилих перерізів звичайних і попередньо напружених стержневих елементів.

Знайшов впровадження у практику проектування також метод Л.О. Дорошкевича, Б.Г. Демчини, С.Б. Максимович, Б.Ю. Максимовича [12], що також пов'язує розрахунок міцності похилих і нормальних перерізів. При цьому, розрахунок поперечної арматури, як вважають автори [12], є однаковою для балок, коротких консолей та плит, що виконується на так зване "продавлювання".

Разом з тим, характер напружено-деформованого стану, роботи та руйнування прогінних залізобетонних елементів, завантажених окрім поперечних ще й поздовжніми стискаючими або розтягуючими силами, прикладеними з ексцентриситетами, згинальними та крутними моментами, суттєво відрізняється від такого, що описаний у роботах [4 - 12].

### МЕТА РОБОТИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета даної роботи – розвиток інженерного методу розрахунку міцності приопорних ділянок складнонапружених прогінних елементів з урахуванням дії крутних моментів. Задачі досліджень полягають у розкритті особливостей характеру деформування, тріщиноутворення та руйнування прогінних залізобетонних елементів зі складним напружено-

деформованим станом їхніх приопорних ділянок, виявленні механізмів та нових схем руйнування цих ділянок у залежності від співвідношення зазначених факторів.

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення поставленої мети в академії була розроблена спеціальна методологія виконання системних натурних і числових експериментів зі звичайними, попередньо напруженими, нерозрізними, позацентрово розтягнутими і стиснутими прогінними залізобетонними елементами, а також з урахуванням дії на них крутних моментів та тривалого навантаження, використання спеціального лабораторного устаткування. Усі зазначені експерименти були трирівневими і виконані за майже Д-оптимальними планами типу Хартлі На5.

При вивченні впливу крутних моментів дослідні прогінні елементи представляли собою шарнірно обперті балки прямокутного перерізу висотою 200 мм з довжиною прольотів балок, що дорівнювали  $9h_0$ . Вони були армовані двома плоскими каркасами. Нижня і верхня поздовжня арматура прийнята класу А500С, поперечна – Вр-І.

Для виготовлення дослідних зразків-балок використали важкий бетон класів С12/15, С20/25, С30/35 на гранітному щебені та кварцовому піску з використанням звичайного портландцементу марки 400 без добавок.

У розрахункових деформаційних моделях використовували осереднені апроксимуючі діаграми деформування бетонних призм ДП НДІБК з низпадаючими гілками, відомі ідеалізовані дволінійні та більш складної форми діаграми деформування арматурної сталі, а також різні феноменологічні критерії міцності бетону та залізобетону.

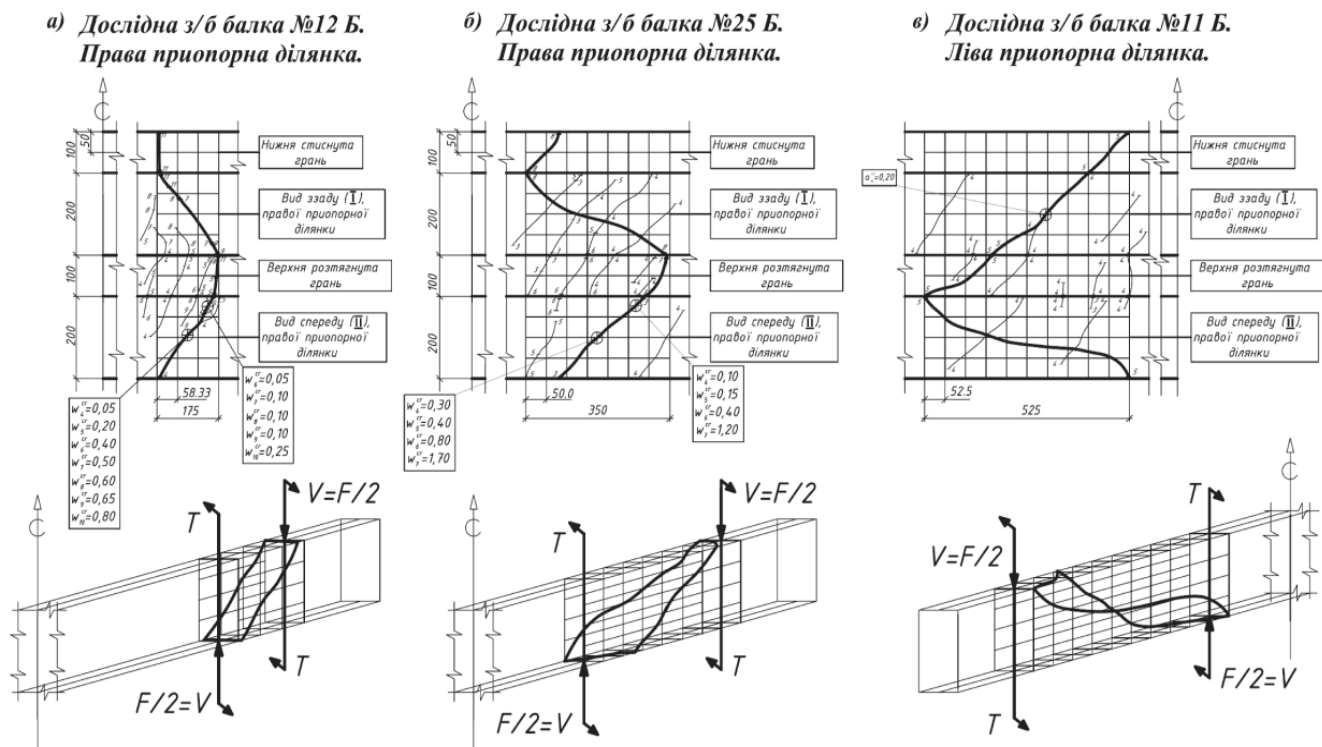
Для створення заданого виду деформації та випробування дослідних зразків-балок була запроєктована та виготовлена спеціальна універсальна силова установка. Деформації бетону та арматури дослідних зразків у процесі випробувань вимірювали за допомогою тензорезисторів з контролем цих даних індикаторами годинникового типу.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

У процесі експериментальних досліджень були розкриті особливості деформування, тріщиноутворення та руйнування (рис. 1) прогінних залізобетонних конструкцій за дії поперечних сил згинальних та крутних моментів, визначено системний вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність, виявлено механізм та нові схеми руйнування цих ділянок, отримані адекватні математичні моделі міцності, тріщиностійкості, деформативності та інші параметри несучої здатності дослідних елементів, що були представлені авторами у попередніх публікаціях.

Для виявлення ступеню достовірності про-





**Рис. 1.** Характер тріщиноутворення та руйнування дослідних балок з малим (а), середнім (б) і великим (в) прольотами зрізу при стисненому крученні їх приопорних ділянок

гнозу несучої здатності просторових перерізів дослідних залізобетонних елементів проведено порівняння експериментальних величин з результатами розрахунків, виконаних за старими СНиП 2.03.01-84\*, ДСТУ Б В.2.6.-156-2010, російськими СНиП 52.101-03: СП 63.13330-2012, європейськими EUROCODE-2, американськими АСІ 318-14, японськими АІJ Code, 2007, канадськими CSA А 23.3-04 та німецькими DIN 1045-1.12.2008 нормами (табл. 1).

Аналіз рекомендацій зазначених національних норм проектування показав, що побудова загальної розрахункової моделі, що змогла б адекватно змоделювати напружено-деформований стан та достовірно описати опір конструкції дії зрізу в комбінації зі згинном, розтягом, стиском та крученням, є однією з найбільш складних задач у теорії залізобетону. У зв'язку з цим у практичних розрахунках міцності похилих перерізів залізобетонних елементів фахівці користуються умовними моделями, так званими, інженерними методиками, побудованими, як правило, на софістських аналогіях [19].

Методи розрахунку міцності приопорних ділянок залізобетонних конструкцій національних норм проектування різних країн, опираючись на метод граничних зусиль, класичну модель фермової аналогії W. Ritter-E. Mörsh, арочну аналогію або поєднання фермової та арочної моделей, передбачають, як правило, окремий розрахунок похилих перерізів на дію поперечних сил і нормальних перерізів - на дію згинальних моментів.

В останні роки у міжнародній практиці знову відновився інтерес до вивчення питань, пов'язаних з міцністю похилих перерізів та приопорних ділянок, в цілому. За даними [19] за кожні п'ять останніх років в АСІ Journal розміщується 800 - 1000 публікацій з питань зрізу залізобетонних конструкцій. Проте, розрахункові методи, що вносяться у норми проектування більшості країн світу, залишаються, як і раніше, консервативними. Так, наприклад, якщо у EUROCODE-2, вітчизняних ДБН В.2.6-98:2009, і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 внесені суттєві корективи у багато розділів норм, то положення, що відносяться до розрахунку приопорних ділянок прогінних конструкцій, залишаються на позиціях моделі фермової аналогії зі змінним кутом нахилу бетонного підкосу. У німецьких нормах DIN 1045-1.12.2008 [3] міститься розрахункова модель, що базується на положеннях модифікованої фермової аналогії [6], що урахує складову поперечної сили, що сприймається похилим перерізом за рахунок сил зчеплення на берегах діагональної тріщини.

Разом з тим, при розрахунку поперечного армування кут нахилу стиснутого бетонного підкосу рекомендовано приймати сталим ( $\theta=40^\circ$ ). Це значення близьке до нижнього значення кута нахилу стиснутого підкосу, при якому згідно з рекомендаціями [4] можна очікувати, що напруження у поперечній арматурі дійсно будуть близькими до границі текучості. Такий підхід дещо покращив розрахункову модель, але надійність



Таблиця 1. Порівнювальні значення несучої здатності приопорних ділянок балки при згині з крученням

№ досліджу	Експериментальні дані, $Q_u = V_u$ , кН	Розрахункові значення руйнуючої поперечної сили $Q_u = V_u$ , кН							
		EUROCODE-2	Японські норми АІЈ CODE, 1988	Американські норми АСІ CODE 318-08	Німецькі норми DIN 1045-1.12.2008	Канадські норми CSA 23.3-04	СНиП2.03.01-84*	СНиП52.01 (Росія)	Уточнена інженерна методика
1	56,00	85,461*	163,713*	76,17*	91,89*	101,96*	78,14	55,13	57,58
2	164,00	74,861	94,721	76,17	73,51	101,96	133,89	94,50	163,93
3	63,00	53,298	66,985	56,75	38,97	59,29	113,39	55,13	67,56
4	28,00	53,298*	62,936*	56,75*	48,72*	59,29*	58,54	94,50	26,53
5	104,00	53,298	66,985	56,75	38,97	59,29	113,39	55,13	103,93
6	42,00	53,298*	62,936*	56,75*	48,72	59,29*	58,54	94,50	52,80
7	31,00	85,461*	163,713*	76,17*	91,89*	101,96*	78,14	55,13	33,09
8	112,00	74,861	94,721	76,17	73,51*	101,96	133,89	94,50	117,31
9	124,00	74,861	94,721	76,17	73,51	101,96	133,44	55,13	126,06
10	74,00	85,461*	163,713*	76,17	91,89*	101,96*	78,59	94,50	68,25
11	10,00	53,298*	62,936*	56,75*	48,72*	59,29*	58,09	55,13	10,95
12	103,00	53,298	66,985	56,75	38,97	59,29	113,84	94,50	101,86
13	106,00	74,861	94,721	76,17	73,51	101,96	133,44	55,13	106,82
14	59,00	85,461*	163,713*	76,17*	91,89*	101,96*	78,59	94,50	71,33
15	14,00	53,298*	62,936*	56,75*	48,72*	59,29*	58,09	55,13	18,32
16	110,00	53,298	66,985	56,75	38,97	59,29	113,84	94,50	119,14
17	39,00	85,461*	107,141*	65,48*	68,13*	78,48*	68,55	74,81	37,69
18	111,00	74,861	80,902	65,48	54,51	78,48	123,85	74,81	113,98
19	63,00	82,539*	93,749	65,48	54,51	78,48	82,15	55,13	63,28
20	87,00	82,539	80,902	65,48	54,51	78,48	82,60	94,50	86,27
21	91,00	82,539*	143,249*	76,17	73,51	101,96*	92,19	74,81	95,28
22	67,00	53,298	63,948	56,75	38,97	59,29	72,14	74,81	62,53
23	86,00	82,539	93,749	65,48	54,51	78,48	82,37	74,81	87,57
24	64,00	82,539*	80,902*	65,48	54,51	78,48	82,37	74,81	64,11
25	80,00	82,539	93,749*	65,48	54,51	78,48	82,37	74,81	81,65
26	70,00	82,539*	80,902*	65,48	54,51	78,48	82,37	74,81	70,03
27	75,00	82,539	93,749*	65,48	54,51	78,48	82,37	74,81	75,84
$\vartheta$		44,2	57,7	53,2	76,7	43,2	29,7	46,7	5,9
$\sum(\hat{Q}_u - Q_u)^2$		34613	75976	31538	45453	29940	15583	31726	524,6
$\sigma$		36,5	54,1	34,8	41,8	33,9	24,5	34,9	4,5

Примітка\*: розрахункові значення несучої здатності приопорних ділянок дослідних елементів, що більше, ніж на 10% перевищують фактичні дані



розрахункових формул залишилися на попередньому рівні.

Як правило, вдосконалення розрахункових методів, що базуються на моделі фермової аналогії, призводить до все більшої кількості розрахункових формул, в основному, емпіричного походження. У якості прикладу можна навести останню версію американських норм [1]. Норми ACI CODE 318-08 [1] містять у собі 43 формули, що ураховують різні умови навантаження і застосовуються для проектування окремих типів елементів однієї і тієї ж конструкції. Фахівці приходять до висновку, що вдосконалення розрахунків на зріз у рамках методів фермової аналогії має досить скромні перспективи. Проте, ця модель, як і раніше, залишається привабливою для проектувальників завдяки своїй простоті. Аналіз вітчизняних публікацій за вказаною темою показує, що у своїй більшості ці роботи, включаючи останню редакцію російських норм [17, 18], направлені не на створення нового загального методу розрахунку, а на вдосконалення методів, закладених в старих нормах.

Разом з тим, починаючи з середини 70-х років минулого століття інтенсивно розвиваються так звані "точні" методи в рамках загальної теорії розрахунку залізобетонних конструкцій при деформації зрізу в комбінації зі згином та поздовжніми силами. Практично всі методи цього напрямку використовують раціональну деформаційну модель, у якій розглядаються рівняння рівноваги, сумісності деформацій та залежності, що пов'язують напруження та деформації залізобетонного елемента з тріщинами. Системні дослідження залізобетонних панелей, що піддані деформації зрізу, а також зрізу в комбінації з нормальними напруженнями, дозволили сформулювати положення модифікованої теорії полів стиску, покладені в основу загального розрахункового методу, норвезьких норм NS 3473 E [5] та канадського стандарту [2].

Активно проводили дослідження з метою створення загального методу розрахунку за дії поперечних і поздовжніх сил, а також згинальних моментів наукові школи професорів О.С. Залесова, П.І. Васильєва, Ю.А. Климова, О.А. Рочняка та інших. Загально відомими є праці О.С. Залесова та Ю.А. Климова [13], А.М. Бамбури, О.В. Голишева [8], О.І. Давиденка [9] та інших.

Використання числових методів, що базуються на загальній механіці залізобетону, дозволили М.І. Карпенку та його учням (С.Ф. Клованичу, В.С. Кукунаєву, О.Ф. Яременко, Т.Н. Азізову та ін.) з єдиних позицій описувати складний напружено-деформований стан конструкцій, розраховувати їх в цілому, включаючи нормальні та похилі перерізи. Проте, на сьогоднішній день ця робота ще не завершена.

Аналіз результатів порівняння дослідних і розрахункових значень несучої здатності припор-

них ділянок прогінних конструкцій, обчислених за рекомендаціями національних норм проектування економічно розвинених країн світу (табл. 1), з одного боку, показав, в цілому, незадовільну їхню збіжність, а, з іншого боку, недостатню надійність розрахункових формул цих норм, оскільки для великої кількості дослідних зразків (особливо з великими прольотами зрізу) розрахункова міцність приопорних ділянок на 10% і більше перевищує їх несучу здатність, що загрожує створенням аварійних ситуацій і передчасним руйнуванням прогінних конструкцій.

Різноманітність форм складного напружено-деформованого стану та схем руйнування унеможлиблює створення простої і, в той же час, універсальної розрахункової моделі приопорних ділянок для різних типів конструкцій, що адекватно відображала б вплив як конструктивних чинників, так і факторів зовнішньої дії на їх несучу здатність. Спрощені розрахункові моделі вимагають застосування емпіричного підходу.

Практика показала, що чисельні методи розрахунку конструкцій, що спираються на загальну механіку залізобетону з тріщинами, носять універсальний характер, дозволяють моделювати будь-який напружено-деформований стан та простежити за усіма етапами роботи конструкції, включаючи її руйнування. Проте, їх практичне застосування стримується відомими труднощами. Тому розглянемо удосконалену інженерну методику розрахунку міцності приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій, що базується на вітчизняних нормах проектування.

Розрахунок приопорних ділянок елементів за моделлю просторових перерізів здійснюється по аналогії з російськими нормами [17] за перерізами, утвореними похилими відрізками прямих на трьох розтягнутих гранях елемента і замикаючим відрізком прямої по четвертій стислій грані елемента.

Розрахунок залізобетонних елементів на дію крутних моментів виконуються за міцністю елемента між просторовими перерізами і за міцністю просторових перерізів.

Міцність по бетону між просторовими перерізами характеризується максимальним значенням крутного моменту, що визначається опором бетону осьовому стиску з урахуванням напруженого стану в бетоні між просторовими перерізами.

Розрахунок за просторовими перерізами здійснюють на основі рівнянь рівноваги всіх внутрішніх і зовнішніх силових факторів відносно осі, розташованої в центрі стиснутої зони просторового перерізу елемента. Внутрішні моменти включають момент, що сприймається арматурою, розташованою уздовж осі елемента, і поперечною арматурою, яку перетинає просторовий переріз в розтягнутій зоні просторового перерізу, а також на розтягнутій грані елемента, протилежній



стислій зоні просторового перерізу. При цьому зусилля, що сприймаються арматурою, визначають відповідно з розрахунковим значенням опору розтягу поздовжньої і поперечної арматури. При розрахунку розглядають всі положення просторового перерізу, приймаючи стислу зону просторового перерізу у нижній, бічний і верхній гранях елемента.

Розрахунок на спільну дію крутних і згинальних моментів, а також крутних моментів і поперечних сил здійснюють, виходячи з рівнянь взаємодії між відповідними силовими чинниками [17].

У зв'язку з вищевикладеним, на даному етапі пропонується вдосконалити інженерну методику для визначення поперечної сили за наступним виразом:

$$Q = Q_o \left(1 - \frac{T}{T_o}\right) k, \quad (1)$$

де  $Q$  - поперечна сила від зовнішнього навантаження в нормальному перерізі;  $T$  - сталі значення крутного моменту згідно плану експерименту чи співвідношення  $T/M$ ;  $Q_o$  - гранична поперечна сила, що сприймається бетоном між похилими перерізами;

$$Q_o = \varphi_{bl} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot h, \quad (2)$$

де  $\varphi_{bl}$  - коефіцієнт, що дорівнює 0,3;  $b$  і  $h$  - відповідно, менший і більший розміри поперечного перерізу елемента;  $T_o$  - граничний крутний момент, що сприймається елементом між просторовими перетинами:

$$T_o = 0,1 f_{cd} \cdot b^2 \cdot h, \quad (3)$$

$k$  - уточнюючий коефіцієнт впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів, математична модель якого за дослідними даними має вид:

$$\hat{Y}(k) = 1,01 - 0,51X_1 + 0,12X_2 + 0,22X_3 + 0,16X_4 + 0,08X_5 + 0,02X_2^2 + 0,04X_3^2 - 0,14X_1X_2 - 0,05X_1X_4 + 0,06X_2X_3 + 0,04X_2X_4, \vartheta = 5,2\%, \quad (4)$$

де

$X_1$  - відносний прогін зрізу,  $a/h_0 = 1, 2, 3$ ;

$X_2$  - величина крутного моменту,  $T = 1,50; 2,25; 3,00$  кНм;

$X_3$  - коефіцієнт поперечного армування,  $\rho_w (B_p/D) = 0,0016; 0,0029; 0,0044$ ;

$X_4$  - коефіцієнт нижнього поздовжнього армування,  $\rho_f = 0,0129; 0,0176; 0,0230$ ;

$X_5$  - коефіцієнт нижнього поздовжнього армування,  $\rho'_f = 0,0058; 0,0090; 0,0129$ .

Емпіричний вираз для коефіцієнта  $k$ , отриманий з відповідної математичної моделі шляхом

заміни кодованих змінних на натуральні значення дослідних факторів, може бути представлений виразом:

$$k = 1,01 - 0,51 \left( \frac{a/h_0 - 2}{1} \right) + 0,12 \left( \frac{T - 2,25}{0,75} \right) + 0,22 \left( \frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right) + 0,16 \left( \frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right) + 0,08 \left( \frac{\rho'_f - 0,0090}{0,00355} \right) + 0,02 \left( \frac{T - 2,25}{0,75} \right)^2 + 0,04 \left( \frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right)^2 - 0,14 \left( \frac{a/h_0 - 2}{1} \right) \left( \frac{T - 2,25}{0,75} \right) - 0,05 \left( \frac{a/h_0 - 2}{1} \right) \left( \frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right) + 0,06 \left( \frac{T - 2,25}{0,75} \right) \left( \frac{\rho_w - 0,0029}{0,00145} \right) + 0,04 \left( \frac{T - 2,25}{0,75} \right) \left( \frac{\rho_f - 0,0176}{0,00505} \right). \quad (5)$$

Вираз (5) є справедливим у межах зміни конструктивних чинників та фактора зовнішньої дії  $T$  з допустимою їх екстраполяцією на 25% від інтервалу зміни як у бік зменшення, так і збільшення відносно крайніх значень дослідних факторів.

## ВИСНОВКИ

1. Порівняння результатів розрахунку несучої здатності приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням дії крутних моментів за нормативними методами розвинених країн світу показало незадовільну збіжність міцності похилих перерізів дослідних зразків-балок з експериментальними даними (коефіцієнт варіації  $v = 29,7 - 57,7\%$ ).

Аналіз залежності міцності похилих перерізів від дослідних факторів на основі порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними показав, що вітчизняний метод більш точно відображає реальну міцність залізобетонних балок при зовнішньому навантаженні у вигляді зосередженої поперечної сили в порівнянні з методом фермової аналогії. Розрахунки за нормативними документами, в яких закладено модель фермової аналогії, дають підстави стверджувати, що вклад бетону в міцність похилих перерізів занижено на 0,6 - 25%. Очевидно, недооцінка цього чинника призводить до перевитрат матеріалів.

2. Моделювання напружено-деформованого стану дослідних елементів та його аналіз підтвердили і доповнили раніше отримані експериментальні дані про їх характер деформування та руйнування, показали можливість використання з цією метою сучасних обчислювальних комплексів, що базуються на деформаційному методі з використанням реальних діаграм стану матеріалів та сучасних феноменологічних критеріїв міцності. Таке моделювання дозволяє простежити за змінами складного напружено-деформованого стану елементів на всіх етапах їх роботи аж до руйнування.
3. Вдосконалена авторами інженерна методика





розрахунку міцності просторових перерізів дозволяє здійснити достовірний прогноз їх несучої здатності у визначеному діапазоні зміни дослідних факторів з мінімальними затратами часу.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. American Concrete Inst. (2008). ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-95 and Commentary (318-08R), American Concrete Inst., Farmington Hills, Mich., 369 p.
2. Canadian Standards Association. (2004). Design of Concrete Structures. CSA A 23. 3-04. Dec. 2004. – 200 p.
3. DIN 1045-1.12.2008 (Entwurf) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. - P. 513-614.
4. EN 1992-1:2001 Eurocode-2: Desing of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building. – Brussels, 2002. – Oktober. – 230 p.
5. Norwegian Council for Building Standardization. (1992). Norwegian Standard NS 3473 E, 4<sup>th</sup> ed., Nov. 1992.
6. Randan B.V. Web Grushing of Reinforced and Prestressed Concrete Beams / ACI Struct. Journ., V. 88, №1, Jan. – Feb., 1991. – pp. 12-16.
7. Барзилович Д.В. Тенденції розвитку української нормативної бази проектування залізобетонних конструкцій / Д.В. Барзилович, Ю.С. Слюсаренко, А.М. Бамбура // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону / Буд. конструкції: зб. наук. пр. - Вип. 59, кн. 1. – Київ.: НДІБК, 2003. – С. 30-33.
8. Голишев О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку будівельних конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.М. Бамбура. – Київ : Логос, 2004. – 340 с.
9. К расчету прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента с использованием полной программы деформирования бетона / [А.И. Давыденко, А.Н. Бамбура, С.Ю. Беляева, Н.Н. Присяжнюк] // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: зб. наукових пр. фіз-мех. ін-ту ім. Г.В. Карпенка НАН України – Львів: Каменяр, 2007. – № 7. – С. 209-216.
10. Вдосконалений деформаційний метод розрахунку міцності приопорних ділянок неперерармованих прогінних залізобетонних конструкцій / [В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Ф.Р. Карп'юк, О.М. Крантовська, Н.М. Ярошевич] // Буд. конструкції: зб. наукових пр. - Вип. 70. – Київ : НДІБК, 2008. – С. 103-116.
11. Деформаційний метод розрахунку міцності приопорних ділянок залізобетонних конструкцій / [В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Ф.Р. Карп'юк, Н.М. Ярошевич]// Вісн. Одеської

держ. акад. буд-ва та архітектури. – Вип. № 31. – Одеса : ТОВ. "Зовнішрекламсервіс", 2008. – С. 141-150.

12. Пропозиції до розрахунку міцності похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів (до розділу 4.11.2. ДБН В.2.6.) / Л.О. Дорошкевич, Б.Г. Демчина, С.Б. Максимович, Б.Ю. Максимович // Буд. конструкції: зб. наукових пр. - Вип. 67. – Київ : НДІБК, 2007. – С. 601-612.
13. Залесов А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – Київ : Будівельник, 1989. – 105 с.
14. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С.Ф. Клованич, И.Н. Мироненко. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.
15. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6 – 156: 2010. – [Чиний від 2011 – 06 – 01]. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – V, 118 с. – (Нац. стандарт України).
16. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
17. СП52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры – М. : ГУП "НИИЖБ", ФГУП ЦПП, 2004. – 54 с.
18. СП52-102-2004 "Предварительно напряженные железобетонные конструкции". – М. : ГУП "НИИЖБ" Госстроя России, 2004. – 49 с.
19. Тур В.В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В.В. Тур, А.А. Кондратчик. Монография. – Брест: БГТУ, 2000. – 400 с.

#### REFERENCES

1. American Concrete Inst. (2008). ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-95 and Commentary (318-08R), American Concrete Inst., Farmington Hills, Mich., 369 p.
2. Canadian Standards Association. (2004). Design of Concrete Structures. CSA A 23. 3-04. Dec. 2004. – 200 p.
3. DIN 1045-1.12.2008 (Entwurf) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. - P. 513-614.
4. EN 1992-1:2001 Eurocode-2: Desing of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building. – Brussels, 2002. – Oktober. – 230 p.
5. Norwegian Council for Building Standardization. (1992). Norwegian Standard NS 3473 E, 4<sup>th</sup> ed., Nov. 1992.



6. Randan, B.V. Web Crushing of Reinforced and Prestressed Concrete Beams / *ACI Struct. Journ.*, V. 88, №1, Jan. – Feb., 1991. – pp. 12–16.
7. Barzylovich, D.V., Slyusarenko, Yu.S. & Bambura, A.M. (2003). Trends in the development of the Ukrainian normative base for the design of reinforced concrete structures. Scientific and technical problems of modern reinforced concrete: col. scientific proc., iss. 59, book 1. – K.: NDIBK. – P. 30-33.
8. Golyshev, O.B. & Bambura, A.M. (2004). Course of lectures on the basics of calculation of construction structures and reinforced concrete resistance. – K.: Logos, – 340 p.
9. Davydenko, A.I. Bambura, A.N., Beliaeva, S.Yu. & Prysiazhniuk, N.N. (2007). On strength calculation of the cross sections inclined with respect of the axis of the element with the use of a full program of concrete deformation. Coll. of scientific proc. "Mechanics and physics of construction materials and structure destruction", NASU G.V. Karpenko Physical & Mech. Institute. – Lviv : Kameniar, – No.7. – pp. 209-216.
10. Dorofeev, V.S., Karpiuk, V.M., Karpiuk, F.R., Krantovska, O.M., & Yaroshevych N.M. (2008). Improved deformation method to calculate strength of support areas in not overreinforced spanned reinforced concrete structures. Building constructions: coll. of scientific proc., iss. 70. – K.: NDIBK. – pp. 103-116.
11. Dorofeev, V.S., Karpiuk, V.M., Karpiuk, F.R. & Yaroshevych, N.M. (2008). Deformation method to calculate strength of support areas in reinforced concrete structures. Proc. of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, iss. No. 31. – Odessa: TOV "Zovnishreklamservice". – pp. 141-150.
12. Doroshkevych, L.O., Demchyna, B.G., Maksymovych, S.B. & Maksymovych, B.Yu. (2007). Proposals for strength calculation of inclined shears in bending reinforced concrete elements (to section 4.11.2. of DBN B.2.6.). Building constructions: coll. of scientific proc., iss. 67. – K.: NDIBK. – pp. 601-612.
13. Zalesov, A.S. & Klimov Yu.A. (1989). Strength of reinforced concrete structures under the impact of transverse forces. – K.: Budivelnyk. – 105 p.
14. Klovanich, S.F. & Mironenko, I.N. (2007). Method of finite elements in mechanics of reinforced concrete. – Odessa: publ. by ONMU. – 110 p.
15. Construction of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures with heavy concrete. Design rules: DSTU B V.2.6 – 156: 2010. – [National Standard of Ukraine of January 06, 2011]. – K.: DP "Ukrarkhbudinform", 2011. – V, 118 p.
16. SNiP 2.03.01-84\*. Concrete and reinforced concrete structures. – M.: CITP of Gosstroï of the USSR, 1989. – 80 p.
17. SP 52-101-2003 "Concrete and reinforced concrete structures without pre-stressed reinforcement". – M.: GUP "NIIZHB" of Gosstroï of Russia, 2004. – 55 p.
18. SP 52-102-2004 "Pre-stressed reinforced concrete structures". – M.: GUP "NIIZHB" of Gosstroï of Russia, 2004. – 49 p.
19. Tur, V.V. & Kondratchyk A.A. Calculation of reinforced concrete structures under the action of shearing forces: Monograph. – Brest: BGTU Publishing House, 2000. - 400 p.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2018 р.