

УДК 624.012.45.001

**ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ МЕТОДИКИ З ЕКСТРЕМАЛЬНИМ  
КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ**

**SOFTWARE FOR CALCULATION CONCRETE STRUCTURES BASED  
METHOD WITH EXTREME STRENGTH CRITERION**

**Шкурупій О.А., к. т. н, доцент, Митрофанов П.Б., к. т. н, ст.викл.** (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

**A. Shkurupiy, Ph. D, associated professor, P. Mitrofanov, Ph. D., senior lecturer** (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University)

Стаття присвячена розрахунку несучої здатності стиснутих та зігнутих залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі програмного комплексу який розроблений колективом науковців кафедри будівельної механіки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка на основі інженерної методики з екстремальним критерієм міцності. Алгоритм інженерної методики враховує реальні діаграми роботи матеріалів та широкий спектр класів міцності бетону та арматури й дозволяє розв'язувати задачі міцності та підбору необхідної кількості арматури. Наведено порівняння розрахунків несучої здатності стиснутих залізобетонних колон, обчислених за допомогою даного програмного комплексу та методиками норм Eurocode 2 та ДБН В.2.6-98: 2009. Доведено, що результати розрахунків несучої здатності залізобетонних колон на основі розробленої авторами інженерної методики більш точно співпадають з експериментальними даними в порівнянні з розрахунками за методиками вказаних вище норм.

The article is devoted to the calculation of the bearing capacity of the compressed and curved concrete structures and their elements based software system developed by a team of scientists of the Department of structural mechanics Poltava National Technical University named after Yuriy Kondratyuk based engineering method with extreme strength criterion. Algorithm of the engineering method considers the real diagrams of materials and a wide range of classes of concrete strength and reinforcement and allows to solve the problem of durability and selection of the required number of fixtures. Comparison of calculations of bearing capacity of compressed concrete columns, calculated using this software system and method standards Eurocode 2 and ДБН В.2.6-98: 2009 proved that the results of calculations of

**bearing capacity of reinforced concrete columns based on the authors engineering techniques to more accurately reflect the experimental data compared to calculations using the methods above rules.**

**Ключові слова:** бетон, арматура, міцність, напружено-деформований стан, залізобетонний елемент, гранична деформація, деформаційна модель, інженерна методика, екстремальний критерій, програмний комплекс. Concrete, reinforcement, durability, strain-stress behavior, reinforced concrete element, ultimate deformation, deformation model, engineering method, extreme criterion, software.

**Постановка проблеми.** На сьогодні все активніше проходить процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій (ЗБК) та їх елементів (ЗБЕ) з Eurocode 2 [1].

Методики, які застосовуються у нормах країн Європи, активно розвивались і в Україні [2, 3] та в Росії [4] завдяки дослідженням діаграми стиску бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$  з урахуванням її низхідної гілки.

Нові норми проектування ЗБК [2] обмежені класом міцності бетону на стиск С 50/60. В нормах [1, 4] передбачається клас міцності до С 90/105, а в проєкті fib Model Code 2010 – до С 120/135. Сьогодні в нашій країні є технічні можливості виробництва високоміцних бетонів (ВМБ), використання яких обмежують норми [2] і виключають їх застосування для ЗБК, хоча ВМБ мають значні практичні властивості (підвищена щільність, корозійна стійкість при впливі агресивних середовищ, газо-і водонепроникність, знижені витрати матеріалів і вага конструкцій тощо). Удосконалення інженерних методик розрахунку несучої здатності ЗБК при складних і неоднорідних напружено-деформований стан (НДС) на основі непружних дилатаційних моделей деформування бетону та реальних діаграм роботи бетону та арматурних сталей є нагальною проблемою. Але застосування інженерами-проектувальниками і студентами методик на основі екстремального критерію міцності (ЕКМ) в даний час стримується відсутністю простих інженерних методик та алгоритмів для розрахунків на ПЕОМ. Тому вдосконалення методик розрахунку міцності стиснутих ЗБЕ на основі ЕКМ є актуальною задачею, розв'язок якої дозволить розширити застосування високоміцних бетонів і отримати техніко-економічний ефект у будівництві.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існуючі на сьогодні методики, окрім запропонованої інженерної методики (ІМ) на основі ЕКМ, в своїй основі мають емпіричний характер, тобто потребують експериментальних даних для встановлення граничних значень деформацій найбільш стиснутої фібри бетону  $\varepsilon_{cu1}$ , які в нормах [1, 4] визначаються шляхом випробувань ЗБЕ, що працюють на згин та позакентровий стиск, а в нормах [2], значення цих деформацій приймають шляхом випробувань бетонних призм. У нормах [1, 2, 4] величина  $\varepsilon_{cu1}$  є константою для відповідного класу бетону, значення

якої приймаються за даними, наведеними в довідкових таблицях. Такий підхід не дає можливості точно враховувати напружено-деформований стан (НДС) елементів ЗБК, так як  $\varepsilon_{cul}$  є параметром, що залежить від багатьох факторів (класу бетону, форми перерізу, процента армування тощо). Величина  $\varepsilon_{cul}$  повинна визначатися аналітично з урахуванням наведених вище факторів. Алгоритм запропонованої ІМ розробленої авторами даної статті покладений в основу програмного комплексу «CRC – 12» з урахуванням широкого спектру класів міцності бетонів, визначення механічних характеристик яких виконується за залежностями наведеними в роботі [5].

Існуючі методики, окрім згаданої вище ІМ на основі ЕКМ, потребують даних експериментальних досліджень. Методика з ЕКМ має суттєві переваги над методиками, котрі є основою норм [1-4]. Вона вперше, на основі експериментальних даних, запропонована в роботах [7, 8] та детально аналітично обґрунтована й наведена в працях [9 – 14 та ін.]. Але така методика потребує застосування чисельних та оптимізаційних методів і є складною при інженерних розрахунках. Тому реалізація її засобами обчислювальної техніки (застосування програмного комплексу), дасть можливість автоматизувати інженерам аналітичні розрахунки ЗБК, визначати параметри НДС в характерних перерізах ЗБЕ, в тому числі й  $\varepsilon_{cul}$ , що працюють на стиск та згин тощо.

**Метою роботи** є апробація алгоритму інженерної методики на основі ЕКМ засобами програмного комплексу «CRC – 12» для визначення несучої здатності стиснутих залізобетонних колон та порівняння результатів розрахунків з методиками норм [1-3], а також з експериментальними даними.

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунки на основі ІМ з ЕКМ, яка має суттєві переваги над іншими методиками, дозволяють відмовитися від деяких емпіричних залежностей, отримати розв'язки актуальних прикладних задач при проектуванні ЗБК, що створює передумови вдосконалення та реалізації більш ефективних ЗБК, як простих, так і складних перерізів, які включають різні види і класи бетону та арматури.

Розроблена інженерна методика розрахунку міцності стиснутих ЗБЕ в нормальному перерізі поєднує рівняння механіки деформівного твердого тіла із ЕКМ (1), який виражає основні властивості псевдопластичних матеріалів у граничному стані, приводить до вдосконаленої загальної теорії міцності ЗБЕ в нормальному перерізі. Внаслідок існування строгого максимуму ( $f_{ck,prism}, \varepsilon_{c1}$ ) діаграми стиску бетону й наявності її низхідної гілки в стиснутій зоні ЗБЕ (рис. 1,а) [6], залежність «параметр навантаження  $F$  – деформація стиснутої грані  $\varepsilon_{cm}$ » (рис. 1,б) [6] також має строгий максимум ( $F_u, \varepsilon_{cul}$ ), що обумовлює необхідність застосування ЕКМ

$$F = f(\varepsilon_{cm})_{\varepsilon_{cm}=\varepsilon_{cu}} = \max \cdot \quad (1)$$

Запропонована ІМ на основі ЕКМ завдяки врахуванню впливу багатьох факторів (значну частину яких не враховують існуючі методики, які викорис-

товуються в нормах [1-4]) на граничну деформацію  $\varepsilon_{cu1}$  (властивостей бетону та арматури і її кількості, форми перерізу, характеру його НДС тощо) є більш узагальненою та точнішою.

Критерій (1) відповідає задачі перевірки міцності заданого нормального перерізу. У задачі підбору площі перерізу розтягнутої  $A_s$  і стиснутої  $A'_s$  арматур, як двоїстої по відношенню до задачі перевірки міцності, застосовується критерій

$$A_s + A'_s = A(\varepsilon_{cm}, \dots) = \min. \quad (2)$$

Взаємозв'язок критеріїв (1) і (2) виходить з теорії подвійності математичного нелінійного програмування, якщо врахувати, що методика з ЕКМ із використанням (1) дає можливість розв'язати задачу перевірки міцності нормального перерізу як оптимізаційну, якій повинна відповідати двоїста задача. Останньою є саме задача підбору арматури з критерієм (2). У задачах розрахунку міцності ЗБЕ цільова функція визначається критерієм (1) або (2), а функції-обмеження являють собою систему нелінійних рівнянь МДГТ, при цьому деякі характеристики НДС нормального перерізу ( $\varepsilon_{cu1}$ , положення нульової лінії деформацій і напружень, стан роботи арматури у момент руйнування тощо) визначаються в процесі розв'язку задачі.



Рис. 1 – Загальний вигляд установки ПГ - 125 для випробування колон.

Для визначення зв'язку параметра навантаження  $F$  з деформаціями й напруженнями бетону стиснутої зони, розтягнутої і стиснутої арматури в перерізі ЗБЕ використовується розрахункова схема, що наведена на рис. 2 [6].

Для підтвердження розробленої інженерної методики розрахунку несучої здатності стиснутих залізобетонних колон та визначення  $\varepsilon_{cu1}$  було виготовлено й випробувано три серії дослідних зразків (рис. 1) з різних класів бетону ( $f_{cm,cube} = 61\text{МПа}$ ,  $f_{cm,cube} = 69\text{МПа}$ ,  $f_{cm,cube} = 75\text{МПа}$ ) при різних ексцентриситетах прикладення навантаження (табл. 1) [15].

За наведеним у роботах [9 – 14] алгоритмом розрахунку несучої здатності стиснутих елементів ЗБК на основі ІМ з ЕКМ були виконані розрахунки несучої здатності залізобетонних колон, що працюють на центральний і позацентровий стиск, та визначено параметри їх НДС в граничній стадії, в тому числі і  $\varepsilon_{cu1}$ . Результати цих розрахунків порівняні з методиками норм [1] і [2] та експериментальними даними (в т.ч. отриманими й авторами статті) і наведені на рисунку 3.

Алгоритми розрахунку ЗБК за розробленою інженерною методикою були реалізовані у спеціально розробленому програмному комплексі для ПЕОМ «CRC – 12» на базі операційної системи OS Windows (рис. 2).

Для зразків першої серії ( $f_{cm,cube} = 61\text{МПа}$ ) проведено порівняння отриманих результатів з методиками норм [1-3]. Результати співставлень розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Порівняння значень деформацій та міцності стиснутих ЗБЕ в стадії руйнування**

Методика розрахунку	Деформація найбільш стиснутої фібри бетону ЗБЕ при зміні ексцентриситету прикладання поздовжньої сили, $\varepsilon_{cu1}$ , ‰			Граничне навантаження стиснутих ЗБЕ при зміні ексцентриситету прикладання поздовжньої сили, $N_u$ , кН		
	$e_0=0$	$e_0=0,03\text{ м}$	$e_0=0,12\text{ м}$	$e_0=0$	$e_0=0,03\text{ м}$	$e_0=0,12\text{ м}$
ДБН В.2.6.-98:2009	2,29	2,29	2,29	839	365	96
Eurocode 2	3,5	3,5	3,5	802	461	112,4
ДМ з ЕКМ (інженерна методика)	2,44	3,19	3,25	882	438	112
Експеримент	2,4	3,24	3,46	870	440	110,9

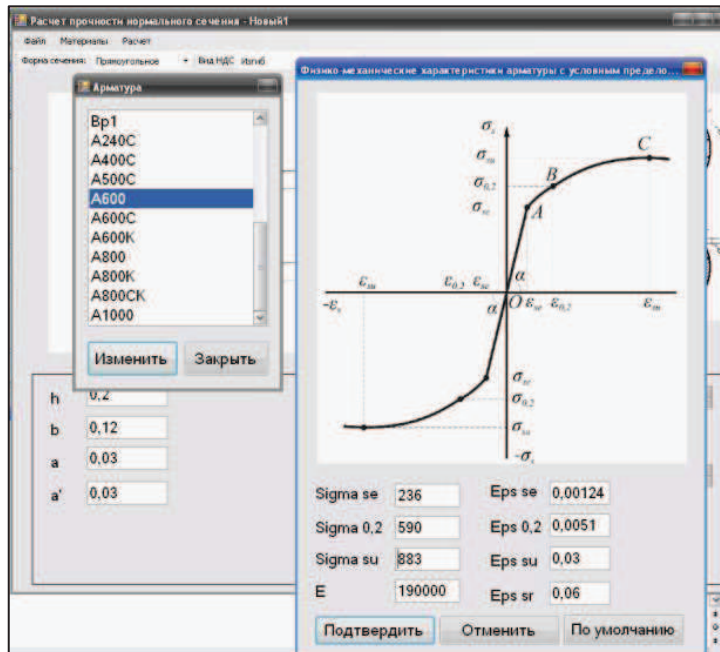
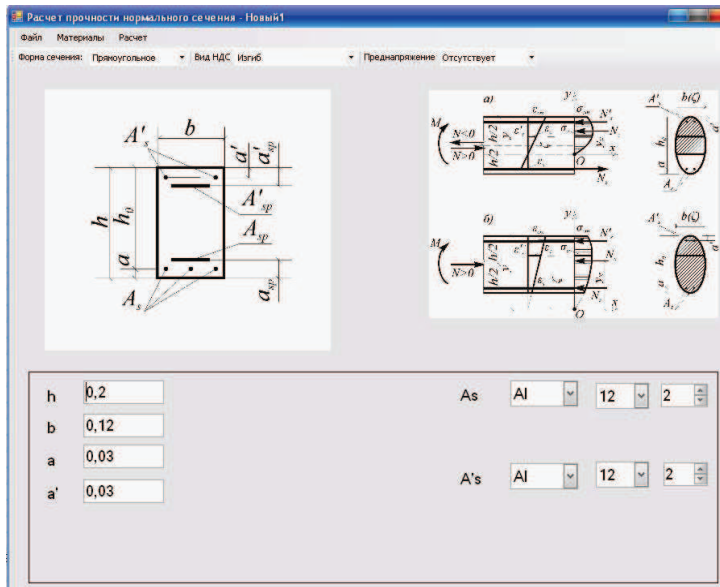


Рис. 2. Програмный комплекс «CRC – 12»

### Висновки:

1. Розроблена інженерна методика розрахунку несучої здатності стиснутих і зігнутих залізобетонних елементів на основі екстремального критерію міцності є більш точною та загальною в порівнянні з відомими методиками.

2. На основі розробленої інженерної методики запропоновані алгоритми та створений програмний комплекс «CRC – 12» перевірки міцності й визначення необхідної кількості арматури стиснутих залізобетонних елементів із урахуванням впливу високоміцних бетонів, що дозволить інженерам реалізацію цієї методики засобами обчислювальної техніки.

3. Проведена оцінка достовірності розробленої інженерної методики на основі екстремального критерію для розрахунку міцності стиснутих залізобетонних елементів підтверджена статистичним аналізом порівняння співвідношень експериментальних і теоретичних даних, що свідчить про їх хорошу збіжність ( $\bar{X} = 0,992$ ,  $C_v = 2,74 \%$ ,  $ексцес = -0,552$ ,  $асиметрія = 0,998$ ).

4. Хороша збіжність теоретичної міцності і граничних деформацій бетону з відповідними експериментальними величинами дозволяють зробити висновок про можливе відхилення граничних деформацій бетону, рекомендованих Eurocode 2, від більш ймовірних розрахункових до 1,4 рази, внаслідок неврахування ряду факторів. Неточність рекомендацій Eurocode 2 по визначенню граничних деформацій бетону призводить до відхилення розрахункової міцності по Eurocode 2 від експериментальної до 21% при осьовому стисканні.

1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p. 2. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. - [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с. 3. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с. 4. СП 63.1330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 161 С. 5. Шкурупій О.А. Аналітичне визначення фізико-механічних характеристик бетону / О.А.Шкурупій, Бабич Є.М.// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 401–407. 6. Шкурупій О.А. Міцність залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А.Шкурупій// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. - Київ, ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 1. - Київ, ДП НДІБК, 2011. – С. 605-614. 7. Залесов, А.С. Деформационная расчётная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил / А.С. Залесов, Е.А. Чистяков, И.Ю. Ларичева // Бетон и железобетон. – 1996. – № 5. – С. 16–18. 8. Байков, В.Н. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям напряжения – деформации бетона и арматуры / В.Н. Байков, С.В. Горбатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 6. – С. 13–14. 9. Митрофанов, В.П.

Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. Вып. 60. – К.: Техника, 2004. – С. 29 – 48. – 250 пр. ISBN 978-966-2283-13-6. **10.** Шкурупій, О.А. Застосування деформаційної моделі з екстремальним критерієм для розрахунку міцності залізобетонних елементів із високоміцних бетонів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – № 46. – С. 377 – 387. **11.** Митрофанов, В.П. Алгоритмы решения задач прочности нормальных сечений железобетонных элементов на основе экстремальных критериев / В.П. Митрофанов, П.Б. Митрофанов // Науковий вісник будівництва.– Вип. 69.– Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2012. – С. 137 – 149. **12.** Шкурупій, О.А. Граничний напружено-деформований стан і міцність стиснутих залізобетонних елементів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2013. – Вип. 25. – С. 480 – 487. **13.** Шкурупій, О.А. Розрахунок несучої здатності позацентрово стиснутих залізобетонних колон / О.А. Шкурупій, О.В.Семко // Коммунальное хозяйство городов : Сб. науч. трудов. – К.: Техника, 2008. – Вып. 81.– С. 27–33. **14.** Шкурупій, О.А. Розрахунок міцності залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі екстремального критерію / О.А Шкурупій, П.Б. Митрофанов, О.М. Лазарева // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, ДП НДІБК, 2013. – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 2. – Київ, ДП НДІБК. – С. 34 – 39. **15.** Митрофанов, П.Б. Експериментальні дослідження міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів / П.Б. Митрофанов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 29. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 74 – 79.