УДК 624.012.45:620:17 DOI https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.9

### Роговий Станіслав Іванович,

доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельних конструкцій, факультет будівництва та транспорту Сумський національний аграрний університет вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9431-5884 E-mail: sirogov555@gmail.com

### Срібняк Наталія Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій, факультет будівництва та транспорту, Сумський національний аграрний університет вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3205-433X Scopus-Author ID: 57203619030 Researcher ID: U-1814-2018 E-mail: nataliya.sribnyak.17@gmail.com

#### Циганенко Людмила Анатоліївна,

кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри будівельних конструкцій факультет будівництва та транспорту, Сумський національний аграрний університет вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6628-3635 Scopus-Author ID: 57215070034 Researcher ID: W-9568-2018 E-mail: tsyganenkola@ukr.net

# Галушка Сергій Анатолійович,

старший викладач кафедри архітектури та інженерних вишукувань, факультет будівництва та транспорту, Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2789-8570 Scopus-Author ID: 57226128223 Research ID: X-8986-2018 E-mail: galushka\_sa@ukr.net

# Волков Дмитро Геннадійович,

асистент кафедри будівельних конструкцій, Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва 160, м. Суми, 40021, Україна ORCID: https://orcid.org /009-0008-9263-4102 E-mail: volkovvdg@gmail.com

# ОЦІНКА ОПОРУ БЕТОНУ СИЛОВОМУ ДЕФОРМУВАННЮ І РУЙНУВАННЮ

Анотація. Проведено критичний аналіз створення та розвитку теорії розрахунку залізобетонних конструкцій, а також обтрунтовано необхідність її удосконалення на основі деформаційно-силової розрахункової моделі, яка реалізується з використанням повних експериментальних діаграм деформування (стану) бетону. Зокрема розглядається низхідна ділянка діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$  (напруга – деформації) з метою виділення деяких критичних значень деформативності бетону. Одне з них – значення **Е<sub>вк</sub>,** яке фіксує початкову точку низхідної гілки. Кінцева точка низхідної частини повної діаграми може бути зафіксована параметром Ев,тах граничною деформацією, яка відповідає найбільшій досягнутій її величині в кінці діаграми деформування бетону, і відповідної цій деформації залишкової міцністю бетону **R**<sub>ь.min</sub>. Як показують численні експерименти, розвиток деформацій бетону і форма діаграми  $\sigma_b$ — $\mathcal{E}_b$  істотно залежать від зміни швидкості деформування при випробуваннях. Встановлено, що характер спадної гілки, зокрема її протяжність, значною мірою залежать від швидкості деформування. Для абсолютно однакових бетонів, змінюючи швидкість деформування, можна отримувати різну граничну деформативність наприкінці діаграми  $\sigma_h - \varepsilon_h$ . Якщо випробовувати високоміцні бетони з невеликою швидкістю деформування, то можна зафіксувати значно більшу таку деформацію в кінці спадної гілки, ніж для бетонів меншої міцності, випробуваних з більшою швидкістю. Обґрунтовано закономірність залежності деформацій у кінці повної діаграми від швидкості силового деформування: якщо така швидкість наближається до нуля, гранична деформація такої діаграми за відповідного рівня зниження напруг буде прагнути нескінченності. Запропоновано також напрями вдосконалення розглянутої моделі шляхом впровадження різних трансформованих діаграм стану бетонних, армованих та посилених конструктивних елементів. Такі діаграми моделюються посередництвом експериментальних залежностей параметрів бетону  $\sigma_h - \varepsilon_h$  з урахуванням впливу різних фізичних, технологічних, силових та інших факторів. Ключові слова: залізобетон, діаграма деформування, граничні деформації, трансформована діаграма, міцність, розрахункова модель.

#### Rohovyi Stanislav, Sribniak Nataliia, Tsyhanenko Liudmyla, Halushka Serhii, Volkov Dmytro. ASSESSMENT OF THE RESISTANCE OF CONCRETE TO FORCE DEFORMATION AND DESTRUCTION

Abstract. A critical analysis of the creation and development of the theory of calculation of reinforced concrete structures was carried out, and the need for its improvement based on the deformation-force calculation model, which is implemented using full experimental diagrams of the deformation (state) of concrete, was substantiated. In particular, the descending section of the  $\sigma_{b}$ - $\varepsilon_{b}$  (stress-strain) diagram is considered in order to highlight some critical values of concrete deformability. One of them is the  $\varepsilon_{bR}$  value, which fixes the starting point of the descending branch. The end point of the descending part of the full diagram can be fixed by the parameter  $e_{h_{max}}$  - the limit deformation, which corresponds to its largest value reached at the end of the concrete deformation diagram, and the residual strength of concrete  $R_{hmin}$  corresponding to this deformation. As numerous experiments show, the development of concrete deformations and the shape of the  $\sigma_b$ - $\varepsilon_b$  diagram significantly depend on the change in the rate of deformation during tests. It was established that the nature of the descending branch, in particular its length, largely depends on the rate of deformation. For absolutely identical concretes, by changing the rate of deformation, it is possible to obtain different ultimate deformability at the end of the  $\sigma_h$ - $\varepsilon_h$  diagram. If you test highstrength concretes with a low rate of deformation, you can record a much larger such deformation at the end of the descending branch than for concretes of lower strength tested at a higher rate. The regularity of the dependence of the deformations at the end of the complete diagram on the rate of force deformation is substantiated: if this rate approaches zero, the limit deformation of such a diagram at the corresponding level of stress reduction will tend to infinity. Directions for improving the considered model by introducing various transformed diagrams of the state of concrete, reinforced and reinforced structural elements are also proposed. Such diagrams are modeled through experimental dependences of concrete parameters  $\sigma_{b} - \varepsilon_{b}$ , taking into account the influence of various physical, technological, power and other factors.

*Key words:* reinforced concrete, deformation diagram, boundary deformations, transformed diagram, strength, design model.

Вступ. Побудова узагальненої аналітичної залежності  $\sigma_b - \varepsilon_b$  між напругами та деформаціями бетону – одна з ключових проблем теорії залізобетону. Вона окреслює багатоплановий

науковий та практичний інтерес [1], дозволяє об'єктивно оцінювати напружено-деформований стан бетону та залізобетону, однорідно та неоднорідно деформованих перерізів на різних рівнях навантаження, включаючи граничний. При цьому враховується нелінійність [2] деформування бетону та арматури, що найточніше відповідає фізичній сутності оцінки силового опору деформуванню та руйнуванню таких матеріалів. У якості такої залежності може виступати повна діаграма деформування бетону з урахуванням її низхідної гілки. Таку діаграму розглядатимемо як рівняння механічного стану матеріалу, що базується на єдиних фізичних уявленнях про природу деформування матеріалів. Ці рівняння представляються як побудовані на базі експериментальних даних, котрі отримані на дослідних зразках при еталонному напруженому стані та відповідному режимі навантаження [3].

Рівняння механічного стану можуть бути основою загальної теорії розрахунку залізобетону. Вони найбільш повно пояснюють і пов'язують у єдине ціле багато здобутків у галузі експериментальних та теоретичних досліджень фізико-механічних властивостей цього матеріалу [4, 5]. Таким чином з'являється можливість зрозуміти та якісно передбачити ряд важливих явищ механіки деформованого бетону та залізобетону. При цьому відкриваються нові перспективи у практиці інженерних розрахунків за першою та другою групами граничних станів. Також з'являється можливість пояснити ряд суперечливих та неузгоджених даних щодо оцінки граничної деформативності бетону, отриманої в різних експериментах.

Одна з головних проблем моделювання низхідної гілки повної трансформованої діаграми стану бетону – це стандартизація та обмеження її критичних деформацій  $\varepsilon_{bR}$  у вершині діаграми, що відповідають граничній напрузі  $\sigma_{bR}$ , що не перевищує  $R_b$  – межі міцності бетону на стиск. Низхідна гілка таких діаграм моделюється за умови стійкого деформування бетону при інтенсивно наростаючих деструктивних перетвореннях його структури. Напруга бетону на цій ділянці діаграми може зменшуватись до рівня закритих значень  $\sigma_{bu} < R_b$ , відповідних деформаціям у граничному стані  $\varepsilon_{bu}$ .

Подальше зменшення напруги бетону (з деформаціями  $\varepsilon_b > \varepsilon_{bu}$ ) характеризується

його деформуванням за умов більш інтенсивного розвитку деструктивних перетворень. При цьому рівень деформацій  $\varepsilon_b$  може збільшуватися до максимально можливих значень  $\varepsilon_{b,lim}$ , за межами яких бетон як матеріал перестає задовольняти необхідним експлуатаційним якостям, таким як водопоглинення, пов'язана з ним морозостійкість, антикорозійні захисні властивості та ін.

Багаторічний досвід створення, удосконалення та розвитку теорії залізобетону, а також упровадження сучасної деформаційно-силової моделі розрахунку показує, що існує низка важливих нагальних проблем, які потрібно вивчати та вирішувати. Такі проблеми в різних аспектах слід розглядати за двома напрямками досліджень: перший – удосконалення методики випробувань та стандартизація способів отримання повних експериментальних діаграм стану, що дозволяють з високою достовірністю моделювати залежність  $\sigma_b - \varepsilon_b$ аналітичною функцією для її реалізації при розрахунках різних конструктивних елементів; другий – удосконалення розрахункової деформаційної моделі з використанням трансформованих діаграм деформування, а також уточненням деяких передумов та положень, прийнятих у різних існуючих стандартах для розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій. У даному дослідженні розглядається сутність вирішення названих актуальних проблем.

Матеріали та методи. Дані досліджень стосуються розрахунку та проектування бетонних і залізобетонних елементів конструкцій, що виготовляються з важкого бетону. В основу досліджень покладено математичне моделювання різних характеристик таких елементів і конструкцій загалом та аналітичними і числовими методами математичного аналізу.

**Результати.** Розглядаючи повну діаграму як узагальнену залежність  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , її можна відтворити як результат апроксимації відповідних експериментальних діаграм деформування, отриманих при випробуваннях з регульованим (штучно або природно) режимом деформування. Такі залежності моделюються у вигляді двох частин: – висхідної та низхідної. Існує значна кількість даних експериментального характеру, що дозволяють досить достовірно моделювати висхідну гілка такої діаграми, і трохи складніше справа з уявленням низхідної її частини (рис. 1).



Рис. 1. Повна діаграма залежності  $\sigma_b - \varepsilon_b$ стисненого бетону

Деформування бетону, що має неоднорідну структуру з численними дефектами, супроводжується деструктивними процесами, які сприяють розвитку існуючих дефектів, появі та розвитку нових пошкоджень структури. Такі процеси починаються при відносно невисоких рівнях напруги бетону і надалі прогресують у міру підвищення цього рівня, аж до настання граничного стану.

Таким чином, на висхідній ділянці діаграма  $\sigma_b - \varepsilon_b$  може представлятися проміжними критичними точками, які характеризують рівень напруг і рівень деструктивних процесів структури бетону, пов'язаних з його рівнем навантаження. Проміжні критичні точки на низхідній частині діаграми (рис.) умовно не показані, вони будуть розглянуті пізніше.

При моделюванні низхідної ділянки діаграми мають місце певні проблеми. Є різні тлумачення понять і фізичної сутності деяких параметричних точок цієї частини діаграми, зокрема такого поняття, як «гранична деформація». На низхідній ділянці діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$ слід розрізняти кілька критичних значень деформативності бетону.

Одне з таких значень **Е**в. які дають близькі значення цієї величини в залежності від міцності, природи складових бетону, швидкості його деформування, тривалості дії навантаження та ін.

Кінцева точка повної діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$  може фіксуватися різними параметрами в залеж-

ності від різновиду такої діаграми та її призначення. Однією з таких точок може розглядатися значення  $\varepsilon_{b,lim}$  – гранична деформація в кінці низхідної гілки, що відповідає залишковій міцності бетону  $R_{b,min}$  (рис.). В експериментах такі значення отримують при заданому режимі (швидкості) деформування [4].

Розвиток деформацій бетону та форма низхідної гілки істотно залежать від швидкості деформування. При збереженні певної швидкості в експериментах спостерігається низхідна ділянка діаграми, у межах якої збільшення деформацій супроводжується зменшенням величини напруги бетону. При недотриманні постійної швидкості деформування складно виділити і контролювати таку спадну (низхідну) ділянку діаграми.

У залізобетонних елементах армування може виступати природним регулятором та стабілізатором швидкості деформування у процесі навантаження та витримки під напруженням. Арматура, маючи надійне зчеплення з бетоном, працює з ним спільно, є жорсткою внутрішньою в'яззю, яка обмежує деформування даного твердого тіла. Це сприяє перерозподілу напруги з бетону на арматуру в процесі його пластичного деформування. Арматура таким чином стримує розвиток деформацій бетону, виступаючи природним регулятором (демпфером) швидкості деформування.

Вплив арматури на деформативність бетону при досить великій її кількості може бути досить суттєвою і мати місце на різних рівнях навантаження, включаючи граничний. У процесі такого деформування відбувається релаксація і перерозподіл напруги з бетону на арматуру, яка більш ефективно включається в роботу, і напруги в ній можуть суттєво зростати. Арматура впливає на роботу бетону, може суттєво знижувати швидкість його деформування та суттєво підвищувати деформативність армованого перерізу.

Експериментально встановлено, що характер спадної гілки, зокрема її протяжність, визначальною мірою залежать від швидкості деформування. Для абсолютно однакових бетонів, змінюючи швидкість деформування, можна отримувати різну граничну деформативність наприкінці діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$ . Якщо випробовувати високоміцні бетони з невеликою швидкістю деформування, то можна зафіксувати значно більшу деформацію в кінці спадної гілки, ніж для бетонів меншої міцності, випробуваних з більшою швидкістю. Таким чином, можна вважати обґрунтованою наступну закономірність залежності деформацій наприкінці повної діаграми від швидкості силового деформування: якщо така швидкість прагне до нуля, гранична деформація наприкінці такої діаграми за відповідного рівня зниження напруг буде прагнути нескінченності.

Виникає необхідність обмеження повної трансформованої діаграми певною критичною деформацією, що відповідає граничному стану елемента та обмежує область його стійкого деформування. Тільки така трансформована діаграма може використовуватися для моделювання напружено-деформованого стану неоднорідно та однорідно стиснутих бетонних та залізобетонних елементів, виступаючи як загальне рівняння механічного стану бетону та залізобетону.

Надалі будемо мати на увазі дві різновидності повних діаграм деформування  $\sigma_b - \varepsilon_b$ . Перші – еталонні – отримані під час випробування еталонних зразків з еталонним режимом завантаження [2] для однорідно деформованого бетонного перерізу; другі – трансформовані – отримані перетворенням відповідних параметричних точок еталонної діаграми для заданих вихідних параметрів.

Такі трансформовані діаграми призначені для моделювання характеру деформування інших стрижневих елементів та іншого виду деформування, які відрізняються від еталонного. Відмінною особливістю трансформованих діаграм є те, що деформації  $\varepsilon_{bR}$  у вершині кривої  $\sigma_b - \varepsilon_b$  можуть бути не критичні. Критичними для таких діаграм є деформації  $\varepsilon_{bu}$ , які фіксують на повній трансформованій діаграмі її кінцеву точку стійкого деформування, а також граничний стан перерізу, обмежуючи при цьому низхідну гілку такої діаграми параметричною точкою  $\varepsilon_{bu} \ge \varepsilon_{bR}$  та відповідною їй міцністю  $R_{bu} \le R_b$ . Трансформована діаграма деформування бетону на спадній ділянці може фіксуватися параметричними точками, що відповідають деформації  $\varepsilon_{bR}$  та вищезгаданої критичної  $\varepsilon_{bR}$ , а також законом зміни залишкової міцності бетону  $\mathbf{R}_{bu}$ , що відповідає деформації <sub>bu</sub>. Для різних випадків значення такої критичної деформації наприкінці діаграми можуть змінюватися у значних межах і визначатися за рядом факторів: характером напружено-деформованого стану, фізико-механічними характеристиками перерізів бетону та арматури.

При однорідному (осьовому) стисканні бетонних перерізів з досягненням деформації **Ев***к*, відповідної напруг  $R_b$ , подальше збільшення рівномірних по всьому перерізу деформацій бетону призведе до зниження в ньому напруг, а значить, і несучої здатності. Отже, для таких випадків критичні деформації перерізу, що фіксують його граничний стан, визначаться рівністю **Е**bu = **Е**bR

Для однорідно стисненого залізобетонного, а також для неоднорідно стисненого бетонного та залізобетонного перерізу, в яких використовується арматура з критичними деформаціями  $\mathcal{E}_{Su} > \mathcal{E}_{bR}$ , повинні дотримуватися умови:  $\mathcal{E}_{bR} < \mathcal{E}_{bu} \leq \mathcal{E}_{b,max}$  (тут  $\mathcal{E}_{su}$  – критична деформація арматури, відповідна її граничному стану). При досить високих рівнях навантаження таких елементів у перерізах спостерігаються перерозподіл напруг: у неоднорідно стиснених бетонних – з більш деформованих на менш деформовані фібри перерізу, у залізобетонних однорідно та неоднорідно стиснутих – ще й з бетону на арматуру.

На неоднорідній епюрі напруг бетону максимальні їх значення  $\sigma_b = R_b$  у процесі деформування зміщуватимуться з крайніх, найбільш деформованих фібр, у глиб неоднорідно стисненого перерізу, наближаючись до нейтральної осі. Такі фібри будуть працювати за законом низхідної гілки кривої  $\sigma_b - \mathcal{E}_b$ , зазнавати при цьому значних деформацій, які супроводжуються деструктивними перетвореннями структури бетону, аж до руйнування.

Для однорідно стисненого залізобетонного перерізу у всіх однорідно деформованих фібрах бетону напруги можуть досягати максимальних значень  $R_b$ , а арматура може використовуватися не повністю. З подальшим збільшенням навантаження напруги в арматурі таких перерізів можуть збільшуватися, а в бетоні, який працює за законом низхідної гілки діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , дещо знижуватися. По досягненню в перерізі критичних деформацій бетону  $\varepsilon_{bu}$  і напруг, що відповідають його залишковій міцності  $R_{bu}$ , настає граничний стан такого однорідно деформованого перерізу.

Розглядаючи низхідну ділянку діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$  визначення її параметричних точок, виділимо деякі критичні значення деформативності бетону. Одне з них – значення  $\varepsilon_b R$ , яке фіксує початкову точку низхідної гілки. Кінцева точка низхідної частини повної діаграми може бути зафіксована параметром  $\varepsilon_{b,max}$  граничною деформацією, яка відповідає найбільшій досягнутій величині в кінці діаграми деформування бетону, і відповідної деформації залишкової міцністю бетону  $R_{b,min}$ . При цьому слід враховувати, що розвиток деформацій бетону і форма діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , зафіксувати, як правило, не вдається.

Змінюючи режим навантаження та підтримуючи постійну швидкість деформування при випробуванні зразків різної міцності, можна фіксувати на кривих  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , низхідні ділянки різної довжини. Забезпечення постійної швидкості деформування зменшує швидкість руйнування, що дає можливість фіксувати низхідну ділянку діаграми. І чим менша швидкість деформування, тим більшою мірою зменшується швидкість руйнування і тим більшу деформацію  $\varepsilon_{b,max}$  і меншу міцність  $R_{b,min}$  вдається зафіксувати при випробуваннях.

Для високоміцних бетонів, оскільки їх руйнування на останньому етапі відбувається при більш високих енергетичних рівнях (стосовно бетонів меншої міцності), а значить, з великою швидкістю, низхідна ділянка спостерігається відносно короткою. Для бетонів меншої міцності має місце зворотна закономірність, спостерігається довша спадна ділянка, так як їх руйнування відбувається при більш низьких енергетичних рівнях, плавніше і з меншою швидкістю. Таким чином, у дослідах із бетонами різної міцності при однакових швидкостях деформування дійсно спостерігаються низхідні ділянки різної довжини. Великі значення деформацій наприкінці діаграм мають місце для бетонів меншої міцності та менші – для бетонів більшої міцності.

Враховуючи суттєвий вплив швидкості деформування на величину найбільших деформацій, які одержані в дослідах, слід мати на увазі, що зменшення швидкості деформування та підтримання її постійною дає можливість зменшити швидкість руйнування і отримати при цьому довшу низхідну ділянку, а значить, і більше значення граничних деформацій. Таким чином, змінюючи швидкість деформації *Єр,тах* для бетонів різної міцності.

Напруги в момент фіксації однакової величини  $\mathcal{E}_{b,max}$  для бетонів різної міцності будуть різні. Такі напруги для відповідного бетону визначають рівень його залишкової міцності  $R_{b,min}$ , а поточні значення деформацій бетону  $\mathcal{E}_b$  і напруги  $\sigma_b$  фіксують загальний характер низхідної гілки діаграми  $\sigma_b - \mathcal{E}_b$ .

Оскільки експериментальні значення Ев, тах можуть змінюватися в широких межах для бетонів однакової міцності, що випробовувались із різною швидкістю деформування, при побудові експериментальних діаграм  $\sigma_{b}$ -  $\mathcal{E}_{b}$  їх необхідно обмежувати деформацією  $\mathcal{E}_{b,max} \leq \mathcal{E}_{b,n}$ , нормуючи останню величину. За нормативне значення деформації Ев, п, яка певною мірою може характеризувати фізикомеханічні властивості бетону, можна приймати найбільше значення деформації цього матеріалу, за якої він у зв'язку з деструктивними змінами не перестає задовольняти необхідні експлуатаційні якості. Такими, наприклад, можуть бути антикорозійні захисні властивості, проникність, морозостійкість, зовнішній вигляд бетону та ін.. У цьому плані необхідні спеціальні дослідження для широкого спектру різних видів бетону, їх складових, технологічних особливостей виробництва, тощо.

До проведення таких досліджень для визначення параметрів *Е*<sub>b,max</sub> і *R*<sub>b,min</sub> можна

скористатися рекомендаціями Міжнародної Системи об'єднаних технічних норм щодо будівельних конструкцій. У цих рекомендаціях для повної діаграми деформування бетону приймається гранична його деформативність від 3,5х10<sup>-3</sup> до 7х10<sup>-3</sup> та відповідні цим деформаціям напруги в бетоні, що працює за законом низхідної гілки діаграми, в межах 0,75  $R_b \ge R_{b,min} \ge 0,25 R_b$ .

При трансформуванні загальної діаграми деформування бетону для конкретних перерізів із заданими параметрами необхідно створювати таку її модель, для якої виконувалася б умова  $\mathcal{E}_{bR} \leq \mathcal{E}_{bu} \leq \mathcal{E}_{b,max}$ , де  $\mathcal{E}_{bu}$  – гранична критична деформація бетону в момент вичерпання несучої здатності нормального перерізу навантаженого елемента.

Для визначення такої деформації надалі, задаючи аналітичний вираз функції напруг бетону  $\sigma_b$  ( $\varepsilon_b$ ) відповідно до повної діаграми  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , розглядатимемо рівняння рівноваги статики. Значення критичних деформацій  $\varepsilon_b u$ , що відповідають граничному стану перерізу, будуть знаходитись відповідно до рекомендацій з таких рівнянь після їх диференціювання та визначення екстремального значення функції несучої здатності сили  $N(\varepsilon_b u)$  або моменту  $M(\varepsilon_b u)$ .

#### $dN/d\varepsilon_b = 0$ ,

відповідатимуть критичним  $_{bu}$ . Такі значення, фіксуючи на діаграмі  $\sigma_b$ -  $\mathcal{E}_b$  граничний стан елемента, будуть обмежувати кінець цієї кривої при її трансформуванні для заданого перерізу, що розглядається при вирішенні різних інженерних задач.

Висновки. Розглядаючи різні аспекти удосконалення та розвитку нелінійної деформаційно-силової моделі розрахунку бетонних і залізобетонних елементів, можна стверджувати, що вона є найбільш об'єктивною у порівнянні з іншими методами розрахунку, які використовуються на сьогодні.

Наявний досвід створення та вдосконалення деформаційної моделі розрахунку, отриманої на основі повних діаграм деформування, показує, що в цьому напрямку необхідно вирішувати ряд важливих проблем, таких як:

– удосконалення та стандартизація методів дослідження повних експериментальних діаграм напружено-деформованого стану, які дозволяють достовірно моделювати залежність  $\sigma_b - \varepsilon_b$  аналітично функція для її реалізації в розрахунках різних елементів будівельних конструкцій;

удосконалення аналітичної деформаційно-силової моделі на основі трансформованих діаграм стан бетону, арматури та різних інших композиційних елементів армування з урахуванням різних фізичних, механічних та інших факторів, які не відображаються у раніше відомих аналітичних моделях;

Зазначені напрямки досліджень тісно пов'язані між собою, а їх реалізація може стати основою для подальшого вдосконалення теорії залізобетону, яка повинні базуватися на експериментальній основі і достовірно моделювати напружено-деформований стан, міцність і надійність різних конструктивних елементів будівель і споруд.

Розглянута розрахункова модель дозволяє відмовитися від ряду емпіричних залежностей, які диктують ДБН [6] при моделюванні та оцінюванні напружено-деформованого стану різних конструкції, що у кінцевому результаті сприяє об'єктивним можливостям розрахунку і проектування будівель і споруд більш надійними і економічними.

#### Список використаних джерел:

1. Роговий С.І. Проблеми дослідження і реалізації діаграм стану бетону в теорії розрахунку залізобетонних конструкцій. *Будівельні конструкції*. Київ: Будівельник, 2003. Вип. 59 С. 137–142.

3. Спосіб визначення механічних характеристик матеріалів. Патент на корисну модель № 150898, Україна; заявл. 17.11.2021; опубл. 04.05.2022. Бюл. № 18. 3 с.

4. Ромашко В.М. Основи розрахунку залізобетонних елементів та конструкцій за деформаційносиловою моделлю їх опру. *Зб. наук. праць УДУЗТ.* 2017. Вип. 168. С. 103–110.

<sup>2.</sup> Крусь Ю.О., Крусь О.Ю. Вплив фізичної нелінійності й режиму завантажування на окреслення та формалізоване представлення діаграми деформування бетону. *Дороги і мости*. Київ, 2008. Вип. 8. С. 169–183.

5. Ромашко В.М., Ромашко О.В Основні положення загальної теорії деформування залізобетонних елементів і конструкцій. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019. Вип. № 75. С. 61–69.

6. ДБН-09.01.2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 97 с.

#### **References:**

1. Rohovyi, S.I. (2003). Problemy doslidzhennia i realizatsii diahram stanu betonu v teorii rozrakhunku zalizobetonnykh konstruktsii [Problems of research and implementation of state diagrams of concrete in the theory of calculation of reinforced concrete structures]. *Budivelni konstruktsii – Building structures*. Kyiv: Budivelnyk, Vol. 59. P. 137–142 [in Ukrainian].

2. Krus, Yu.O., & Krus, O.Iu. (2008). Vplyv fizychnoi neliniinosti y rezhymu zavantazhuvannia na okreslennia ta formalizovane predstavlennia diahramy deformuvannia betonu [The effect of physical nonlinearity and loading mode on the delineation and formalized representation of the concrete deformation diagram]. *Dorohy i mosty – Roads and bridges*. Kyiv, Vol. 8. P. 169–183 [in Ukrainian].

3. Sposib vyznachennia mekhanichnykh kharakterystyk materialiv. Patent na korysnu model [The method of determining the mechanical characteristics of materials. Utility model patent]. № 150898, Ukraine; declared on 17.11.2021; published on 05/04/2022. Bul. No. 18. 3 p. [in Ukrainian].

4. Romashko, V.M. (2017). Osnovy rozrakhunku zalizobetonnykh elementiv ta konstruktsii za deformatsiinosylovoiu modelliu yikh opru [Basics of calculation of reinforced concrete elements and structures according to the deformation-force model of their support]. *Coll. of science works of UDUZT*. Issue 168. P. 103–110 [in Ukrainian].

5. Romashko, V.M., & Romashko, O.V. (2019). Osnovni polozhennia zahalnoi teorii deformuvannia zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii[Basic provisions of the general theory of deformation of reinforced concrete elements and structures]. *Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*, Issue №. 75. P. 61–69 [in Ukrainian].

6. DBN-09.01.2009 (2009). Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions of design]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. 97 p. [in Ukrainian].