УДК 624.012.25 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67003

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Д-р техн. наук В.М. Карпюк, канд. техн. наук О.М. Крантовська,
асп. О.М. Коцюрубенко

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д-р техн. наук В.М. Карпюк, канд. техн. наук Е.Н. Крантовская,
асп. О.Н. Коцюрубенко

STRENGTH ESTIMATE OF INCLINED SECTIONS OF CONTINIOUS RC BEAMS

Doct. of techn. sciences V. Karpiuk, Cand. of techn. sciences O. Krantovska,
PhD Student O. Kotsiurubenko

Розглянуто принципи розрахунку залізобетонних балок на дію зосередженої поперечної сили за нормативними методиками, що закладені у чинні вітчизняні, міжнародні та деякі закордонні нормативні документи. Виконано аналіз розрахункових моделей на основі порівняння результатів розрахунку за нормативними методиками з результатами натурних експериментів, виконаних в лабораторії Одеської державної академії будівництва та архітектури (ОДАБА).

Ключові слова: *залізобетонні елементи, несуча здатність, міцність, експеримент, методи розрахунку, будівельні норми.*

Рассмотрены принципы расчета железобетонных балок на действие сосредоточенной поперечной силы по нормативным методикам, заложенным в действующие отечественные, международные и некоторые иностранные нормативные документы. Выполнен анализ расчётных моделей на основе сравнения результатов расчета по нормативным методикам с результатами натурных экспериментов, выполненных в лаборатории Одесской государственной академии строительства и архитектуры (ОГАСА).

Ключевые слова*: железобетонные элементы, несущая способность, прочность, эксперимент, методы расчета, строительные нормы.*

The principles of calculation of reinforced concrete beams subjected to shear according the methods laid down in the existing ДСТУ Б В.2.6-156:2010, СНБ 5.03.01-2002, СНиП 52-01-2003, Eurocode 2 EN 1992-1-1:2004, ACI 318-2014, and СНиП 2.03.01-84 are considered. The analysis of computational models is done based on comparing the results of the calculation by the codes with the test data fulfilled in the laboratory of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OGASA). The continuous two-span beams were used as study reinforced concrete elements with five studied factors: the shear span to depth ratio, concrete strength, transverse reinforcement, longitudinal upper and lower reinforcement.*

Comparison of test results with the results of calculations showed their unsatisfactory convergence: the coefficient of variation ν is 43 ... 97%. It was revealed with the help of calculations result and test data that the method of inclined sections reflects the physical work of the reinforced concrete element better comparing with the method of analogous truss. Results are

presented in diagrams which show the dependency of bearing capacity of inclined section due to five studied factors.

Theoretical studies of estimation the bearing capacity of continuous reinforced concrete elements completed at this stage did not conclusively assert the computation formulas recommended by the modern design methods of reinforced concrete structures as congruent and require further developments in this direction.

Keywords: *reinforced concrete members; bearing capacity; strength; experiment; calculation methods; building codes.*

Вступ. Як відомо, проблема забезпечення міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій впродовж тривалого часу залишалася поза увагою дослідників серед інших проблем проектування та розрахунку залізобетонних конструкцій, на відміну від, наприклад, дослідження міцності нормальних перерізів. Так, метод похилих перерізів з часу своєї появи вдосконалювався переважно введенням емпіричних і напівемпіричних коефіцієнтів, а модель фермової аналогії, що використовується у багатьох національних і міжнародних нормах, має обмежені напрямки розвитку. На сьогодні склалася ситуація, коли нормативні методи не задовольняють сучасним вимогам, а нові методи розрахунку ще не досягли свого рівня розвитку для впровадження їх як нормативних.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Теорію представлення прогінного залізобетонного елементу, що зазнає дії поперечної сили, як фермової аналогії, розробляли E. Mörsch, W. Ritter, P.E. Regan, F. Leonghardt, T.C. Zsutti. Однак, як показують останні дослідження, модель фермової аналогії, що використовується для розрахунку міцності похилих перерізів у міжнародних нормах, потребує удосконалення, але, в той же час, має обмежені інструменти для цього. Проблема насамперед полягає у врахуванні дійсної роботи бетону у повній мірі, врахуванні поздовжнього армування тощо. Імплементація Єврокодів та введення в дію на їх основі нових національних норм на проектування дозволило ввести останні дослідження, а саме деформаційний метод розрахунку, у нормативні аналітичні моделі. Деформаційний метод розрахунку висвітлюють у своїх працях О.М. Голишев, А.М. Бамбура, О.І. Давиденко.

Вдосконалення нормативних методів проектування у галузі залізобетонних конструкцій, особливо із впровадженням деформаційного методу розрахунку, передбачає активні наукові пошуки для запобігання перевитратам матеріалів разом із забезпеченням необхідного рівня надійності, закладеного у нормативні документи. Це можливо реалізувати шляхом аналізу розрахункових формул, що закладені у різні національні нормативні документи, і зіставленням результатів розрахунку із експериментальними даними для виявлення шляхів подальшого удосконалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню міцності похилих перерізів залізобетонних елементів присвячені роботи сучасних вчених О.С. Залесова, I. Ramirez, I. Breen, О.Б. Голишева, А.М. Бамбури, В.М. Карпюка, В.В. Тура, Т.М. Пецольда, М.Б. Карпенка Б.Г. Демчини, Л.О. Дорошкевича. Втім, питання напружено-деформованого стану похилих перерізів нерозрізних залізобетонних елементів залишається нерозкритим.

Мета дослідження. Проаналізувати нормативні методи розрахунку міцності похилих перерізів нерозрізних залізобетонних елементів, порівняти результати із експериментальними даними та дослідити їхню збіжність.

Основна частина дослідження. Розглянемо методи розрахунку залізобетонних балок на дію поперечних сил, наведених у деяких сучасних нормативних документах [1, 2, 3, 4, 5].

У нині діючих українських [1], гармонізованих білоруських [3], міжнародних європейських [2] і американських [5] нормах розрахунок елементів на дію поперечної сили ґрунтується на «фермовій моделі», яка складається з розтягнутих і стиснутих стержньових елементів. Втім, застосування фермової аналогії у нормативних документах різних країн має свої особливості [6]. Наприклад, як зазначається у [7], при всій подібності використовуваних методів існують істотні відмінності між положеннями ДБН та відповідного Eurocode 2, на які слід звертати увагу при порівнянні результатів розрахунків за цими нормами між собою.

Проаналізуємо деякі особливості цих методів на прикладі розрахунку несучої здатності похилих перерізів на дію поперечної сили дослідних зразків балок, поданих в роботах [8, 9]. Для наочного зображення порівняння методів вказаних нормативних документів було прораховано 27 дослідних зразків балок, кожна з яких являє собою нерозрізну залізобетонну балку прямокутного профілю на дію поперечної сили.

Дослідні зразки нерозрізних двопрогінних балок в V серії [9] були запроектовані шириною *b*=100 мм і висотою *D*=180 мм. Робоча висота перерізу прийнята сталою d=155 мм. Величина прогонів балок становить 8·d+8·d=1240+1240 мм. Балки заармовані двома плоскими каркасами. Арматура нижня і верхня прийняті 2Ø10, 12, 14 класу А500С; поперечна в прогонах зрізу, на ділянках біля середньої опори, – 2Ø3, 4, 5 ВрІ, на інших ділянках – 2Ø6А240С. Елементи були виконані з бетону класу С12/15, 20/25, 30/35. Довжина прогонів зрізу варіюється: *1d, 2d, 3d*. Детальний опис методики виконання експериментального дослідження даної серії і використаних установок й обладнання наведені у роботах [8, 9].

Основною відмінністю методики у європейських нормах [2] від інших методик, розглянутих у даній статті, є визначення несучої здатності перерізу, а саме, між собою порівнюються опори поперечній силі у поперечній арматурі $V_{Rd,\,s}$ і у бетонному підкосі $V_{Rd,\,max}$; за основу приймається менше із значень. Дані величини зазначеної методики для розглянутих елементів, при дослідженні залежності міцності від відносного прольоту зрізу, становлять $V_{Rd,s}$ = 15 кН (Б-18, *a/d*=1); 29,4 кН (Б-27, *a/d*=2); 37,70 кН (Б-17, *a/d*=3); $V_{Rd,max}$=106,748 кН (Б-18); 86,47 кН (Б-27); 74,03 кН (Б-17); при експериментально отриманих значеннях критичної поперечної сили V=125,3 кН (Б-18); 79,1 кН (Б-27); 63,9 кН (Б-17). Як бачимо, це не відповідає законам будівельної механіки та опору матеріалів.

Варто відзначити, що параметр, який характеризує залежність міцності бетону від прогону зрізу, в різних методах змінюється по-різному. Аналіз розрахункових формул, наведених у роботі [10], показав, що у формулах визначення міцності бетону наявний множник, який у розрахунковому апараті відображає відмінність методів: у методі фермової аналогії – $\frac{1}{ctg\theta + tg\theta}$, у методі похилих перерізів – $\frac{\eta_{c2} \cdot d}{l_{inc}}$ або $\frac{\varphi_{b2} \cdot h_0}{c}$. Надалі ці виявлені множники будемо називати параметром міцності бетону. Очевидно, що при однаковому наборі основних змінних у виразах обох методів (міцності бетону f_{ctd}, R_{bt}; ширини поперечного перерізу b, b_w; висоти поперечного перерізу h_0, d), закон зміни виявлених параметрів обумовлює закон зміни шуканої величини міцності бетону V_c чи Q_b. Згідно з розрахунками за нормами EN 1992-1-1:2004 [2], параметр

$\frac{1}{ctg\theta + tg\theta}$ змінюється за законом, близьким до лінійного (рис. 1), у той час, як графічне зображення параметра *1/C* в нормах СНБ 5.03.01-02 (модель похилих перерізів) [3], СНиП 52-01-2003 [4] і СНиП 2.03.01-84 * [11], відповідного $\frac{1}{ctg\theta + tg\theta}$ у нормах EN 1992-1-1:2004 [2], являє собою гіперболу (рис. 2, 3).

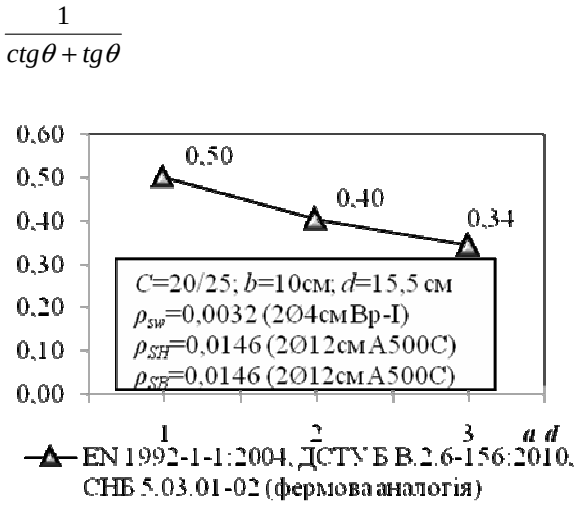

Рис. 1. Зв'язок параметра міцності бетону $\frac{1}{ctg\theta + tg\theta}$ та відносного прогону зрізу ***a/d*** за ДСТУ Б В.2.6-156:2010, EN 1992-1-1:2004, **СНБ 5.03.01-02** (фермова аналогія)

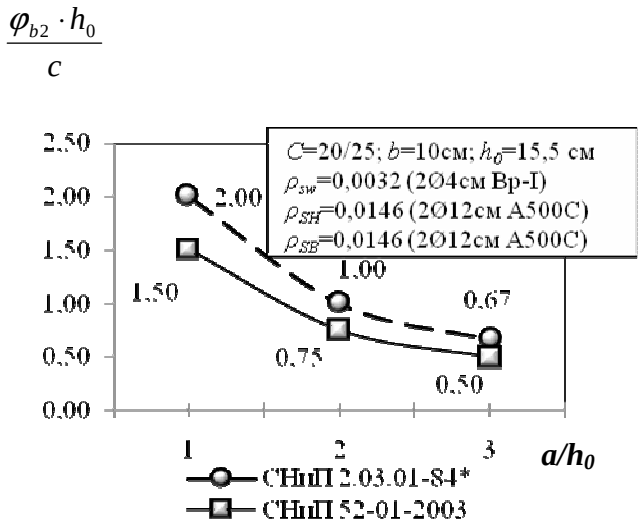

Рис. 2. Залежність параметра міцності бетону $\frac{\varphi_{b2} \cdot h_0}{c}$ від відносного прогону зрізу ***a/h₀*** за СНиП **2.03.01-84***, СНиП 52-01-2003

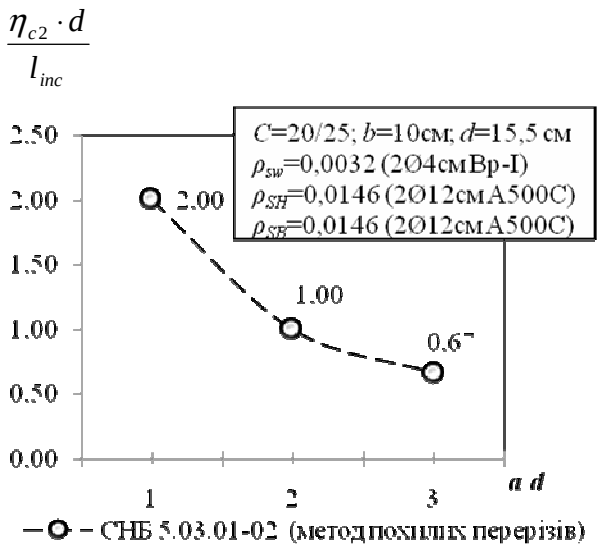

Рис. 3. Залежність параметра міцності бетону $\frac{\eta_{c2} \cdot d}{l_{inc}}$ від відносного прогону зрізу ***a/d*** за СНБ 5.03.01-02 (модель похилих перерізів)

Такий характер підтверджено дослідженнями В.П. Митрофанова [12] та інших, де так само встановлено, що залежність міцності похилих перерізів від відносного прогону зрізу змінюється за законом гіперболічної кривої.Для побудови графіків виконано розрахунки дослідних зразків серії V № 18, 27, 17, де дослідні фактори $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{\rho_{SW}}$, $\boldsymbol{\rho_{SB}}$, $\boldsymbol{\rho_{SH}}$ мають нульові кодовані значення, а кодоване значення фактора $\boldsymbol{a/d}$ змінюється від «-1» до «+1» і відповідає значенням 1, 2, 3 на осі $\boldsymbol{a/d}$ (рис. 1, 3) та $\boldsymbol{a/h_0}$ (рис. 2).

Для оцінки несучої здатності похилих перерізів нерозрізних залізобетонних балок та порівняння їх експериментальних значень з розрахунковими за різними нормативними методами [1, 2, 3, 4, 5, 11] побудовані графіки залежності міцності $\boldsymbol{V}$ від досліджуваних факторів, а саме відносного прогону зрізу $\boldsymbol{a/d}$ (рис. 4,а), класу бетону $\boldsymbol{C}$ (рис. 4,б), армування поперечного $\boldsymbol{\rho_{SW}}$ (рис. 4,в), поздовжнього верхнього $\boldsymbol{\rho_{SB}}$ (рис. 4,г) і нижнього $\boldsymbol{\rho_{SH}}$ (рис. 4,д).

Графік на рис. 4,а демонструє розбіжність результатів розрахунку за різними методиками, а також з результатами експериментів щодо врахування впливу відносного прогону зрізу $\boldsymbol{a/d}$ на міцність похилого перерізу $\boldsymbol{V}$. Так, норми СНиП, СНБ (метод похилих перерізів), хоча і не збігаються з експериментальними, але слідують тенденції – зі збільшенням величини прогону зрізу несуча здатність елемента зменшується. За нормативними документами, розрахунки яких ґрунтуються на моделі фермової аналогії, результати не відповідають експериментальним даним. Це говорить про недосконалість закладеної моделі, в тому числі чіткого уявлення про вибір варіативних параметрів ($\boldsymbol{ctg\theta}$), а також про доцільність вивчення можливості застосування інших методик розрахунку з сімейства методів стержньових систем, а саме "*strut-and-tie model*" при малих величинах відносного прогону зрізу. Дослідження і розвиток зазначеної методики входять до кола інтересів багатьох зарубіжних дослідників [13, 14].

Графіки на рис. 4,б і 4,в демонструють виконання результатами розрахунків за нормативними методами закону зміни експериментальних даних, а саме, збільшення несучої здатності похилого перерізу $\boldsymbol{V}$ зі збільшенням класу бетону $\boldsymbol{C}$ і поперечного армування $\boldsymbol{\rho_{SW}}$. Ця залежність чітко відображена в аналітичному визначенні міцності похилого перерізу за різними методиками, де величини міцності бетону і площі поперечної арматури знаходяться у чисельнику формули (13) [10].

Графіки на рис. 4,г і 4,д демонструють невідповідність аналітичних моделей, закладених в нормативні документи різних країн, реальній роботі досліджуваних елементів на дію поперечної сили. Результати експериментів свідчать про зростання несучої здатності $\boldsymbol{V}$ похилого перерізу при збільшенні поздовжнього армування, в той час як розрахункові дані свідчать про незалежність міцності від поздовжнього армування як у верхній стислій (рис. 4,г), так і в нижній розтягнутій (рис. 4,д) зонах. Це пояснюється тим, що розрахункові формули не містять змінних, які б прямо враховували величини $\boldsymbol{\rho_{SB}}$ і $\boldsymbol{\rho_{SB}}$ при перевірці похилого перерізу на руйнівну силу, хоча у багатьох зарубіжних дослідженнях, наприклад в [15], зазначено, що зміна поздовжнього армування впливає на регулювання міцності похилого перерізу через зміну співвідношення поздовжньої і поперечної арматури, що аналітично виражається у варіюванні кута $\boldsymbol{\theta}$. Втім, щодо вітчизняних норм це питання ще потребує уточнення.

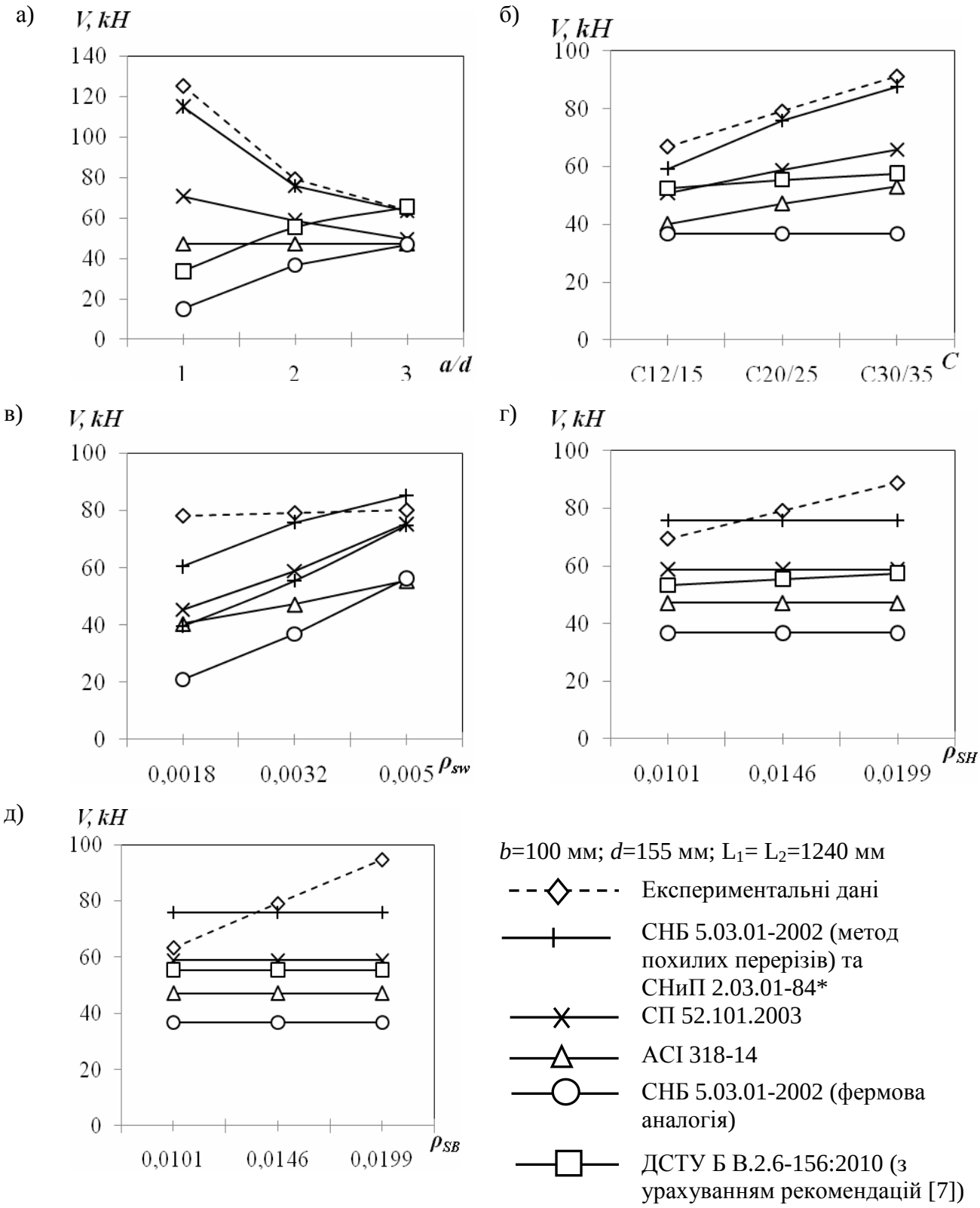

Рис. 4. Графіки залежності несучої здатності похилих перерізів дослідних елементів ***V***, розрахованих за різними національними нормами, від (а) відносного прогону зрізу ***a/d***,(б) класу бетону на стиск ***C***, (в) коефіцієнта поперечного армування ρ_{sw}, (г) коефіцієнта нижнього поздовжнього армування ρ_{SH}, (д) коефіцієнта верхнього поздовжнього армування ρ_{SB}

Висновки. Порівняння результатів розрахунку за нормативними методами різних країн показує незадовільну збіжність несучої здатності похилих перерізів дослідних зразків-балок з експериментальними значеннями (коефіцієнт варіації ν = 43 ... 97%).

Аналіз залежності міцності похилих перерізів від досліджуваних факторів (*a/d*, *C*, ρ_{sw}, ρ_{SH}, ρ_{SB}) на основі графіків залежності та порівняння результатів розрахунку з експериментальними показав, що метод похилих перерізів більш точно відображає реальну поведінку залізобетону при зовнішньому навантаженні у вигляді зосередженої поперечної сили в порівнянні з методом фермової аналогії, в якій закладені великі коефіцієнти надійності.

Встановлено, що параметр міцності бетону у методі фермової аналогії $\frac{1}{ctg\theta + tg\theta}$ змінюється за законом, близьким до лінійного; у методі похилих перерізів $\frac{\eta_{c2} \cdot d}{l_{inc}}$ або $\frac{\varphi_{b2} \cdot h_0}{c}$ – за кривою, що близька до гіперболи. При цьому розрахунки за нормативними документами, де закладено модель фермової аналогії, дають підстави стверджувати, що вклад бетону занижено на 0,6…25 %. Очевидно, недооцінка несучої міцності бетону призводить до перевитрат матеріалів.

Подальші дослідження спрямовані на розробку рекомендацій щодо розрахунку нерозрізних залізобетонних балок з урахуванням сучасного стану розвитку теорії бетону та залізобетону. Також для створення універсального апарату доречно було б змоделювати балки об'ємно-кінцевими елементами. Це сприятиме відходу від умовних і недосконалих методів розрахунку міцності залізобетонних конструкцій за нормальними, похилими і просторовими перерізами і каркасно-стержньовими моделями.

Список використаних джерел

1. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – [чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 164 с. – (Національний стандарт України).
2. Eurocode 2 EN 1992-1-1:2004: Design of Concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. – Brussels, 2004. – 225 p.
3. Конструкции бетонные и железобетонные [Текст]: СНБ 5.03.01-02. – [Дата введения 2003–07–01]. – Минск: Минстройархитектуры, Стройтехнорм, 2002. – 274 с. (Національний стандарт Білорусії).
4. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 [Текст]: СП 63.13330-2012. – [введены 2013–01–01]. – Минрегион РФ. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 155 с. (Національний стандарт Російської Федерації).
5. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14). American Concrete Institute. – [First Printing March 2014]. – American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.– 520 p. (Національний стандарт Сполучених Штатів Америки).
6. Карпюк, В.М. До питання про необхідність вдосконалення нормативних методів розрахунку міцності похилих перерізів залізобетонних конструкцій [Текст] / В.М. Карпюк, О.М. Крантовська, О.М. Коцюрубенко // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2015. – Вип. 57. – С. 182-188.
7. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 в порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [Текст] /

В.М. Бабаев, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова [та ін.]; за заг. ред. В.С. Шмуклера. – Харків: Золоті сторінки, 2015. – 208 с.

8. Карпюк, В.М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану [Текст]: монографія / В.М. Карпюк. – Одеса: ОДАБА, 2014. – 352 с.

9. Дорофеев, В.С. Прочность, трещиностойкость и деформавтиность неразрезных железобетонных балок [Текст]: монография / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Е.Н. Крантовская; Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса: Эвен, 2010. – 175 с.

10. Коцюрубенко, О.М. Надійність розрахункових формул міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій у національних нормах проектування розвинених країн [Текст] / О.М. Коцюрубенко, О.М. Крантовська, В.М. Карпюк // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К.: ДП НДІБК, 2015. – Вип. 82. – С. 166-175.

11. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]: СНиП 2.03.01-84*. – [введен в действие 1986–01–01]. – ГОССТРОЙ СССР, 1989. – 80 с. (Державний стандарт СРСР).

12. Митрофанов, В.П. Напряженно-деформированное состояние, прочность и трещинообразование железобетонных элементов при поперечном изгибе [Текст]: автореф. дис… канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / В.П. Митрофанов. – М., 1981. – 21 с.

13. Ahmed B. Shurain. Behavior and shear design provisions of reinforced cocncrete D-region beams / Ahmed B. Shurain // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2013. – 25. – pp. 65-74. (Журнал входить до бази даних SCOPUS: http://scimagojr.com/ journalsearch.php?q=86891&tip=sid&clean=0).

14. Umer Farooq. Study of Shear Bahavior of RC Beams: Non Linar Analysis / Umer Farooq and K.S. Bedi // Conference: Structural Engineering Convention 2014 (SEC 2014). – Dec 24th 2014, Delhi. – pp. 3477 – 3488.

15. Guidelines and Rules for Detailing of Reinforcement in Concrete Structures. A Compilation and Evaluation of Ambiguities in Eurocode 2: Master of Science Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building Technology / Anneli Dahlgren, Louise Svensson // CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden.–2013.–302 p.

Карпюк Василь Михайлович, д-р техн. наук, професор, кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. E.mail: v.karpiuk@ukr.net.
Коцюрубенко Ольга Миколаївна, аспірант, кафедра опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. E.mail: olha.kom@ogasa.org.ua.
Крантовська Олена Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри опору матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. E.mail: elena14122007@gmail.com.

Karpiuk Vasil , Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa (Ukraine). E.mail: v.karpiuk@ukr.net.
Kotsiurubenko Olha Mykolaivna, Postgraduate Student at the Department of Strength of Materials, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa (Ukraine). E.mail: olha.kom@ogasa.org.ua.
Krantovska Olena Mykolaivna Mykhailovych, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Docent, Associate Professor at the Department of Strength of Materials, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa (Ukraine). E.mail: elena14122007@gmail.com.

Прийнята 22.02.2016 р.