

УДК 531

ВПЛИВ ПОВЗУЧОСТІ ТА СТАРІННЯ НА СТІЙКІСТЬ СТРИЖНІВ

Бекірова М. М.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Вирішується задача для однорідних та неоднорідних стрижнів при описі кривих повзучості функціями досить загального вигляду. Прийнято, що граничні умови постійні у всьому проміжку часу.

Розглядається гнучкий залізобетонний стрижень з постійним поперечним перерізом, що має дві осі симетрії. Армування симетричне, стрижень стиснутий постійною у часі силою. Вважається, що недосконалість у вигляді початкового викривлення або ексцентриситету призводить до вигинання стрижня у напрямку однієї осі.

Отримано інтегро-диференціальне рівняння, яке може бути використане при розгляді стрижнів шарнірно-опертих по кінцях. Після подвійного диференціювання це рівняння стає придатним для вирішення задач з будь-якою умовою опирання. У початковий момент часу інтегро-диференціальне рівняння перетворюється на відоме диференціальне рівняння пружно миттєвої задачі.

За подання міри повзучості у вигляді ряду типу, запропонованого Арутюняном Н.Х., інтегро-диференціальне рівняння зводиться до диференціального рівняння сьомого порядку з частинними похідними.

Для стрижнів як з початковим викривленням, так і з позацентрово прикладеним навантаженням отримувалося абсолютно однакове рівняння. Але це не означає, що й розв'язки будуть однаковими, оскільки для цих двох випадків відрізняються як граничні, так і початкові умови.

Отримане диференціальне рівняння - це рівняння руху стрижня. Досліджуючи це рівняння можна встановити тенденції в розвитку переміщень залежно від величини стискаючої сили.

При тривалому впливі навантаження критичною слід вважати силу, яка при часі, що прагне нескінченності, викликає швидкість переміщень стрижня, що прямує до сталої величини, а самі переміщення - до нескінченності. Визначені характеристики переміщень справедливі для будь-якого перерізу стрижня вздовж його довжини. Таким чином можна визначити величину критичної сили в умовах повзучості.

Формули для розрахунку критичних сил справедливі для стрижнів з різними умовами опирання. Досліджуючи отримане рівняння, можна встановити тенденції у розвитку переміщень залежно від величини стискаючої сили.

Ключові слова: стійкість, стрижень, початкова недосконалість, повзучість лінійна, повзучість нелінійна, критична сила, переміщення.

INFLUENCE OF DENSITY AND AGING ON ROD STRENGTH

M. Bekirova¹

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The problem is solved for homogeneous and inhomogeneous rods when describing creep curves by functions of a rather general form. It is assumed that the boundary conditions are constant throughout the time interval.

A flexible reinforced concrete rod with a constant cross-section and two axes of symmetry is considered. The reinforcement is symmetrical, the rod is compressed by a constant force in time. It is assumed that an imperfection in the form of an initial curvature or eccentricity leads to bending of the rod in the direction of one axis.



An integro-differential equation is obtained that can be used when considering rods hingedly supported at the ends. After double differentiation, this equation becomes suitable for solving problems with any resistance condition. At the initial moment of time, the integro-differential equation transforms into the well-known differential equation of the elastic instantaneous problem.

By representing the creep measure in the form of a series of the type proposed by N.H. Arutyunyan, the integro-differential equation is reduced to a seventh-order differential equation with partial derivatives.

For rods with both initial curvature and eccentrically applied load, the exact same equation was obtained. But this does not mean that the solutions will be the same, since both the boundary and initial conditions are different for these two cases.

The resulting differential equation is the equation of motion of the rod. By studying this equation, it is possible to establish trends in the development of displacements depending on the magnitude of the compressive force.

With prolonged exposure to the load, the critical force should be considered to be the force that, with time tending to infinity, causes the velocity of the rod's movements to approach a constant value, and the movements themselves to approach infinity. The determined displacement characteristics are valid for any cross-section of the rod along its length. Thus, it is possible to determine the magnitude of the critical force under creep conditions.

The formulas for calculating critical forces are valid for rods with different resistance conditions. By studying the obtained equation, it is possible to establish trends in the development of displacements depending on the magnitude of the compressive force.

Keywords: stability, rod, initial imperfection, eccentricity, linear creep, non-linear creep, critical force, crack, critical displacement.

1 ВСТУП

У дослідженнях з будівельної механіки питання стійкості займають важливе місце. При деформуванні стислих і стисло-вигнутих стрижнів рівновага між зовнішнім навантаженням і внутрішніми зусиллями може бути стійкою або нестійкою. В першому випадку стрижень, відхилений від положення рівноваги на достатньо малу величину, після усунення причини, що викликала відхилення, повертається в початковий стан рівноваги. В другому випадку відхилення після усунення причини, що його викликала, не зникає, а, навпаки, зростає. Навантаження, при перевищенні якого навіть на нескінченно малу величину, виникає втрата стійкості даного виду деформації, називається критичним. Порушення стійкості тіла, яке деформується, при якому первинна деформація переходить в інший, якісно новий вид деформації, є втратою стійкості першого роду. Порушення стійкості тіла, яке деформується, при якому первинна деформація не переходить в інший вид деформації, а починає зростати при постійному навантаженні, або, навіть, при навантаженні, яке зменшується, є втратою стійкості другого роду. Наприклад, втрата стійкості першого роду характерна для центрально-стиснутого пружного стрижня, втрата стійкості другого роду – для стисло-вигнутого стрижня, який має початкові недосконалості.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перше теоретичне рішення задачі про стійкість пружного центрально-стиснутого стрижня одержано в 1744 році Леонардом Ейлером [3]. Це рішення наведено в численній літературі з стійкості стрижнів, з якої особливо відзначимо [5-6]. Але випробування показали, що це рішення не можна застосувати для реальних стрижнів, що пов'язано з неминучими викривленнями осі елемента у процесі виготовлення і транспортування та недосконалістю центровки в процесі монтажу. В зв'язку з цим були отримані різні рішення для стрижня під дією осьової стискаючої сили, яка прикладена з ексцентриситетом. [6]. Одна з перших публікацій, в якій був досліджений вплив початкових недосконалостей на стійкість, є монографія Ржаніцина О. Р. [1]. Початкові геометричні недосконалості найбільш суттєво впливають на стійкість тонкостінних елементів відкритого перерізу [7]. У статті [8] при описі форми початкових недосконалостей використовують поліном четвертого ступеню. Ю. М. Работнов [10] та С. А. Шестеріков [11, 12] запропонували новий підхід – зв'язали питання стійкості при повзучості з класичним визначенням стійкості. Взявши за основу закон зміцнення, вони провели його лінеаризацію з урахуванням небагатьох прогинів, а потім виконали аналіз руху стрижня при дії збурень. Не можна не відзначити роботи вчених Одеської школи теорії повзучості на чолі з І.С. Прокоповичем [13-15]. Усі роботи, у яких розглядаються питання стійкості стрижнів з урахуванням повзучості, можна розбити на два напрямки. При першому, класичному підході припускають існування зміни стійких змін рівноваги – після проходження деякого часу, що називається критичним, відбувається перехід прямолінійної форми в викривлену. Вважається, що процес повзучості в стрижні веде до зменшення його жорсткості, внаслідок чого відбувається втрата стійкості.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є отримання формул для знаходження критичних сил при тривалій дії навантаження, формул для отримання переміщень (вигинів) в будь-який момент часу, виразів для визначення напруженого стану.



4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розрахунках на стійкість при тривалому впливі навантажень необхідно визначати сили, за яких швидкість переміщень монотонно затухає. Розв'язання задачі в такій постановці є прийнятним для систем, розвиток переміщень яких у часі призводить до зміни напруженого стану. Ця умова для стиснутого стрижня виконується за наявності початкових недосконалостей (позацентрове прикладання стискальної сили, початкова викривленість тощо).

Розв'язання задачі про стійкість однорідних і неоднорідних (зокрема залізобетонних) стрижнів виконано за припущенням лінійної повзучості і відсутності тріщин.

Зазвичай при вивченні впливу повзучості на стійкість стиснутих стрижнів розглядають стрижні, шарнірно закріплені на кінцях, міра повзучості матеріалу $C(t, \tau)$ описується найпростішими функціями, що дозволяють розв'язувати відповідні інтегральні рівняння в аналітичному вигляді, але не завжди достатньо повно описують експериментальні криві повзучості [13].

У статті таку задачу розв'язано для однорідних і неоднорідних стрижнів при описі кривих повзучості функціями досить загального вигляду. Прийнято, що граничні умови залишаються сталими протягом усього розглянутого проміжку часу.

Прийнято залежність

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{t_0}^t \sigma(t) \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad \delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau). \quad (1)$$

Розглядається гнучкий залізобетонний стрижень з постійним поперечним перерізом, що має дві симетрії y і z . Армування симетричне. Довжина стрижня l . Стрижень стиснутий постійною у часі силою F . Вважається, що недосконалисть у вигляді початкового викривлення або ексцентриситету призводить до випинання стрижня у напрямку осі y . Випинання в напрямку осі z виключається.

Використовуючи співвідношення

$$\frac{1}{\rho(x, t)} = \frac{\varepsilon_1(x, t) - \varepsilon_2(x, t)}{h} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho(x, t)} = \begin{cases} -\frac{\partial^2 [y(x, t) - y_0(x)]}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (3)$$

а також рівняння рівноваги та залежності (1) отримаємо інтегро-диференціальне рівняння повзучості осі стрижня

$$(1+r) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + \frac{F}{EY_b} y(x, t) - \int_{t_0}^t \left[rE \frac{\partial^2 y(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{F}{Y_c} y(x, \tau) \right] \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau =$$

$$= \begin{cases} [1 + E\delta(t, t_0)] \frac{\partial^2 y_0(x)}{\partial x^2} \\ -\frac{F}{Y_b} s\delta(t, t_0) \end{cases} \quad (4)$$

Тут

$$r = \frac{h_1^2 A_s E_s}{I_b E}, \quad E(t) = E(t_0) = E = \text{Const},$$

A_s - площа арматури,

I_b - момент інерції бетонної складової перерізу,

h_1 - відстань між центрами ваги перерізу та арматури,

$y_0(x)$ - початковий напруг (викривлення),

s - ексцентриситет.

Верхні вирази в (3) і (4) стосуються стрижня з викривленням, а нижні стосуються стрижня з позакентровим навантаженням.

У наведеному вигляді інтегро-диференціальне рівняння (4) може використовуватися при розгляданні стрижнів, шарнірно опертих по кінцях.

Після подвійного диференціювання по x це рівняння стає придатним для вирішення задач з будь-якою умовою спирання.

$$\begin{aligned} (1+r) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{F}{EI_c} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - \int_{t_0}^t \left[rE \frac{\partial^4 y(x,\tau)}{\partial x^4} + \frac{F}{I_b} \frac{\partial^2 y(x,\tau)}{\partial x^2} \right] \frac{\partial \delta(t,\tau)}{\partial \tau} = \\ = \begin{cases} [1+rE\delta(t,t_0)] \frac{\partial^4 y_0(x)}{\partial x^4} \\ 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

При $t = t_0$ інтегро-диференціальне рівняння (5) перетворюється на відоме диференціальне рівняння пружно миттєвої задачі. [6]

За подання міри повзучості $C(t,\tau)$ у вигляді ряду типу, запропонованого Н. Х. Аругюняном [16],

$$\begin{aligned} C(t,\tau) = \sum_{i=1}^{i=k} \Theta_i(\tau) [1 - e^{-\gamma_i(t-\tau)}], \\ \frac{\partial \Theta_i(\tau)}{\partial \tau} < 0, \quad \Theta_i(\tau)|_{t \rightarrow \infty} \rightarrow C_i. \end{aligned} \quad (6)$$

і прийнятого $K = Z$, інтегро-диференціальне рівняння (5) зводиться до диференціального рівняння сьомого порядку з частинними похідними

$$\begin{aligned} B_1(t) \frac{\partial^7 y(x,t)}{\partial t^3 \partial x^4} + B_2(t) \frac{\partial^6 y(x,t)}{\partial t^2 \partial x^4} + B_3(t) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial t \partial x^4} + \\ + B_4(t) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial t^3 \partial x^2} + B_5(t) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + B_6(t) \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial t \partial x^2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

$B_1(t), B_2(t), \dots, B_6(t)$ - функції t , пов'язані з відомими функціями та сталими, що входять у (5), включаючи величину стискальної сили F .

Для стрижнів як з початковим викривленням, так і з позакентрово прикладеним навантаженням отримувалося абсолютно однакове рівняння (7). Але це не означає, що й розв'язки будуть однаковими, оскільки для цих двох випадків відрізняються як граничні, так і початкові умови.

Диференціальне рівняння (7) - це рівняння руху стрижня. Досліджуючи (7), можна встановити тенденції в розвитку переміщень залежно від величини стискаючої сили.

Якщо переміщення при $t \rightarrow \infty$ прямують до кінцевої величини, то стан стрижня слід вважати стійким, і навпаки - якщо ні, то стан стрижня є нестійким.

При тривалому впливі навантаження критичною слід вважати силу, яка при $t \rightarrow \infty$ викликає швидкість переміщень стрижня, що прямує до сталої величини, а самі переміщення до нескінченності.

Ураховуючи це, а також те, що прийняті в наведеному вище визначені характеристики переміщень справедливі для будь-якого перерізу стрижня вздовж його довжини, можна визначити величину критичної сили в умовах повзучості, виходячи з умов

$$\begin{aligned} y(x,t) \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \rightarrow Const, \\ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial t^3} \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (8)$$

а також

$$A_3(t) \rightarrow \gamma_1 \gamma_2 [1 + r(1 + c)], \quad A_6(t) \rightarrow \gamma_1 \gamma_2 (1 + c) \frac{F}{EI_6},$$

де $c = E(C_1 + C_2)$ - гранична характеристика нестаріючої, повністю зворотної частини деформацій повзучості.

За виконання умов (8) з рівняння (7) можна отримати диференціальне рівняння в звичайних похідних

$$\frac{d^4 y(x,t)}{dx^4} + \frac{F}{EI_6} \frac{1+c}{1+r(1+c)} \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} = 0. \quad (9)$$

Із розв'язку рівняння (9), враховуючи, що при $t \rightarrow \infty$ $y(x,t) \rightarrow \infty$, завжди можна отримати критичні сили при тривалому впливі навантаження.

$$F_{mp} = F_E \left(r + \frac{1}{1+c} \right); \quad F_{kp} = F_e (1+r), \quad (10)$$

де F_{mp} - критична сила при тривалій дії навантаження, F_{kp} - критична сила при короткочасній дії навантаження, F_E - Ейлерова сила для неармованого стрижня.

Якщо стрижень однорідний, то $r = 0$.

Залежності (10) справедливі для стрижнів з різними умовами опирання. Аналіз інтегро-диференціального рівняння (9) показує, що формули (10) справедливі не лише при $K = Z$ у ряді (6), але й при будь-якій кількості членів цього ряду. У загальному випадку

$$c = E \sum_{i=1}^{i=k} C_i.$$

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В результаті дослідження були отримані формули для знаходження критичних сил при тривалій дії навантаження і формули для підрахування переміщень у будь-який момент часу. Задача була розв'язана для однорідних та неоднорідних стрижнів при описі кривих повзучості функціями достатньо загального вигляду. В такій постановці було отримано інтегро-диференціальне рівняння повзучості осі стрижня (4), яке

стосується стрижнів з викривленням осі, а також стрижнів з позацентровим навантаженням. У наведеному вигляді інтегро-диференціальне рівняння може використовуватися при розгляданні стрижнів шарнірно-опертих по кінцях. Після подвійного диференціювання по x це рівняння стає придатним для вирішення задач з будь-якою умовою опирання (5). Якщо зробити деякі зміни, інтегро-диференціальне рівняння (5) зводиться до диференціального рівняння сьомого порядку з частинними похідними (7). Таким чином було отримано рівняння руху стрижня. При його дослідженні можна встановити тенденції в розвитку переміщень в залежності від величини стискаючої сили і отримати критичну силу, яка залежить від швидкості переміщень. У результаті дослідження були одержані формули, за допомогою яких можна знайти як переміщення, так і критичні сили за будь-яких умов опирання і початкових недосконалоствях.

6 ВИСНОВКИ

З усього сказаного очевидно, що отримані висновки є загальними, і критична сила при тривалому впливі навантаження залежить тільки від нестаріючої частини деформацій повзучості. Останнє пов'язано з умовністю прийнятого формулювання поняття критичної сили, відповідно до якого величина цієї сили визначається за характером руху стрижня при , тобто коли завершиться процес старіння матеріалу.

Зрозуміло, що формули (10) дозволяють перевіряти тільки стійкість стрижнів. Міцність стрижнів, навіть при , повинна перевірятися додатково, з урахуванням розвитку переміщень у часі.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Ржаніцин А. Р. Деякі питання механіки систем, що деформуються у часі. М.: Держтехвид, 1949.
2. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела. М: Наука. 1979. 744с.
3. Эйлер Л. Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума либо минимума. Гостехиздат. 1934. 600 с.
4. Крутий Ю. С., Лазарева Д. В., Сур'янінов М. Г. Механіка деформованого твердого тіла. Одеса: ОДАБА, 2017. 260 с.
5. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. Москва: ГИТТЛ, 1955. 567с.
6. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Наука, 1967. 984 с.
7. Wang Y. C., Nethercot D. A. Bracing requirements for elate-rally unrestrained beams. J.Constr.Steel Res. 1990.№4. pp.305-315.
8. Mohler K., Schelling W. Zur Bemessung von Knickverbänden und Knickaussteif ungen im Holzbau. Bauingenieur. 1968. №2. pp. 43-48.
9. Чепурненко А. С., Литвинов С. В., Филенко М. А. Расчёт стержней на продольнопоперечный изгиб с учётом деформаций ползучести и начальных несовершенств. Строительство-2013: РГСУ, 2013. 1995 с.
10. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций.М.: Наука, 1966. 752с.
11. Шестериков С. А. Динамический критерий устойчивости при ползучести для стержней. Прикладная механика и техническая физика, 1961. №1. С.68-71.
12. Шестериков С. А. О критерии устойчивости при ползучести. Прикладная математика и механика. 1959. Т.XXIII. Вып.6. С.1101-1106.
13. Прокопович И. Е. Влияние ползучести на устойчивость тонкостенных стержней. Строительство и архитектура,1969. №12. С.33-38.

14. Прокопович И. Е. О влиянии ползучести на устойчивость сжатых стержней. Строительная механика и расчёт сооружений, 1967. №1. С.5-9.
15. Орлов А. Н. Определение критических сил при длительном действии нагрузки для гибких стержней с опорными закреплениями, обладающими ползучестью. «Известия АН Арм.ССР.Механика». Ереван, 1977. XXX. №3.
16. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М. Гостехиздат, 1952.
17. Бамбура А. М., Безбожна М. С., Гурківський О. Б. Експериментальні дослідження напруженодеформованого стану згинних залізобетонних елементів при тривалій дії навантаження. Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-тех. зб. 2002. № 57. С. 21-30.
18. Pang Chen a, Geng Zhang, Shaojun Cao, Xueyuan Lv, Bin Shen. Creep and post-creep mechanical properties of reinforced concrete columns. Journal of Building Engineering. Volume 63, Part A, 2023, 105521
19. Pierre Rossi, J.L. Tailhan, F. Le Maou. Creep strain versus residual strain of a concrete loaded under various levels of compressive stress. Cement and Concrete Research. Volume 51, 2013, pp.. 32-37

References

1. Rzhantsyn A. R. (1949). Deiaki pytannia mekhaniky system, shcho deformuiutsia u chasi. M.: Derzhtekhvyd. [in Russian].
2. Rabotnov Yu. N. (1979). Mekhanyka deformyruemoho tverdogo tela. M: Nauka. [in Russian].
3. Eiler L. (1934). Metod nakhozheniya kрyvykh lyny, obladaushchykh svoystvamy maksimuma lybo mynimuma. Hostekhyzdat. [in Russian].
4. Krutii Yu.S., Lazarieva D.V., Surianinov M.H. (2017). Mekhanika deformovanoho tverdogo tila. Odesa: ODABA. [in Russian].
5. Tymoshenko S. P. (1655). Ustoichyvost upruhykh system. Moskva: HYTTL. [in Russian].
6. Volmyr A.S. (1967). Ustoichyvost deformyruemykh system. Moskva: Nauka. [in Russian].
7. Wang Y.C., Nethercot D.A. (1990). Bracing requirements for elate-rally unrestrained beams. J.Constr.Steel Res. 4. 305-315.
8. Mohler K., Schelling W. (1968). Zur Bemessung von Knickverbanden und Knickaussteif ungen im Holzbau. Bauingenieur. 2. 43-48.
9. Chepurnenko A.S., Lytvynov S.V., Fylenko M.A. (2013). Raschet sterzhnei na prodolnopoperechnyy yzghyb s uchetom deformatsyi polzuchesty y nachalnykh nesovershenstv. Stroytelstvo-2013: RHSU. [in Russian].
10. Rabotnov Yu.N. (1966). Polzuchest elementov konstruktsyi.M.: Nauka. [in Russian].
11. Shesterykov S.A. (1961). Dynamicheskyy kryteryi ustoichyvosty pry polzuchestvy dlia sterzhnei. Pрыkladnaia mekhanika y tekhnicheskaiа fizyka. 1. 68-71. [in Russian].
12. Shesterykov S.A. (1959). O kryteryu ustoichyvosty pry polzuchesty. Pрыkladnaia matematika y mekhanika. XXIII. 6. 1101-1106. [in Russian].
13. Prokopovych Y.E. (1969). Vlyaniye polzuchesty na ustoichyvost tonkostennykh sterzhnei. Stroytelstvo y arkhitektura9. 12. 33-38. [in Russian].
14. Prokopovych Y.E. (1967). O vlyaniyu polzuchesty na ustoichyvost szhatykh sterzhnei. Stroytelnaia mekhanika y raschet sooruzheniy. 1. 5-9. [in Russian].
15. Orlov A. N. Determination of critical forces under long-term load action for flexible rods with support fastenings that have creep. "Izvestia of the Academy of Sciences of the Arm.SSR.Mechanics." Yerevan, 1977. XXX. No. 3.
16. Arutyunyan N.Ch. (1952). Nekotorye voprosy teorii polzuchesti. M. Gostexizdat. [in Russian].
17. Bambura A. M., Bezbozhna M. S., Gurkivsky O. B. Experimental investigation of the stressdeformed steel of molded reinforced concrete elements under extreme conditions. Building structures. Interdepartmental scientific-technical zb. 2002. No. 57. P. 21-30.
18. Pang Chen a, Geng Zhang, Shaojun Cao, Xueyuan Lv, Bin Shen. Creep and post-creep mechanical properties of reinforced concrete columns. Journal of Building Engineering. Volume 63, Part A, 2023, 105521



19. Pierre Rossi, J.L. Tailhan, F. Le Maou. Creep strain versus residual strain of a concrete loaded under various levels of compressive stress. Cement and Concrete Research. Volume 51, 2013, pp. 32-37.

Стаття надійшла до редакції 03.09.2025

Стаття прийнята до друку 03.12.2025

Дата публікації статті 26.03.2026

Бекірова Маріам Мамбетівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,

к.т.н., доцент

вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

bekirova@odaba.edu.ua

bekirova.ogasa@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6162-9967

Для посилань:

Бекірова М. М. Вплив повзучості та старіння на стійкість стрижнів. Механіка та математичні методи, 2026. Т. VIII. № 1 С. 115–124.

For references:

M. Bekirova. (2026). Influence of density and aging on rod strength. Mechanics and Mathematical Methods. VIII (1). 115–124.

[Вплив повзучості та старіння на стійкість стрижнів](#) © 2026 by [Бекірова М.М.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)