

# ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ І МІЦНІСТЬ БЕТОНІВ ПРИ РОЗТЯЗІ ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ОБТИСНЕННЯ НА ОСНОВІ ЙОГО СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ

Черкаський державний технологічний університет

*Приведені результати теоретичних досліджень на основі структурної теорії тріщиностійкості і міцності бетону при розтягуванні після попереднього тривалого обтиснення різної інтенсивності. Для структурної схеми у вигляді шахового розташування заповнювача в цементній матриці розглянуто напружено деформований стан бетоном при розвантаженні або подальшому розтягуванні до напружень коли цементний камінь вичерпав свою несучу здатність (утворюються тріщини) і руйнування бетону в цілому.*

*Наведено аналітичні залежності визначення зазначених параметрів для різних рівнів попереднього обтиску.*

**Ключові слова:** бетон, січний модуль, розчин, цементний камінь, заповнювач, структурна схема напруги, деформації.

## Вступ

В даний час бетон є основним будівельним матеріалом. Однак його міцнісні та деформативні характеристики, як при короткочасному, так і тривалому прикладанні навантаження, що базуються на міцнісних та деформативних характеристиках його складових, вивчені недостатньо.

Тому важливою є розробка структурної теорії бетону. Розрахункові формули при цьому ґрунтуються на міцнісних та пружнопластичних характеристиках складових бетону, їх кількісному співвідношенні та взаєморозташуванні в одиниці об'єму.

Бетон є конгломератом і має тверді, рідкі та газоподібні включення. Взаємне розташування складових одиниць бетонного елемента здійснюється за допомогою ідеалізованих структурних схем бетону. Справжня структурна схема бетону складна і не піддається статистичній оцінці. Цементний камінь при цьому розглядається як матриця, а заповнювач як включення. Але цементний камінь і заповнювач мають різні фізико-механічні властивості, тому пружно-пластичні характеристики бетону повинні визначатися через реологічні властивості складових, їх кількісне співвідношення та взаємне розташування. Вирішення цього завдання є дуже актуальним.

З цього питання є незначна кількість досліджень. Так, автори [1-2] дають визначення модуля пружності бетону за трьома ідеалізованими структурними схемами.

Деякі інші, при короткочасному центральному стиску, залежності визначення модуля пружності бетону розглянуті в [3-10]. Всі вони стосуються визначення модуля пружності бетону при короткочасному центральному стисканні. Що ж до оцінки його деформативності за ідеалізованими схемами при короткочасному розвантаженні після тривалого стиснення навантаженням різної інтенсивності, визначення його тріщиностійкості  $\sigma_{1,н}$  і міцності при подальшому розтягуванні, то жоден із вищевказаних авторів такої не дає.

**Метою статті** є розробка на основі ідеалізованих структурних схем бетону аналітичних залежностей для визначення його тріщиностійкості та міцності при подальшому розтягуванні після тривалого центрального стиснення навантаженням різної інтенсивності, виходячи з властивостей реологічних складових.

## Основна частина

Оцінку напружено-деформованого стану бетонів при короткочасному та тривалому стисканні за їх складом та реологічними властивостями складових, за ідеалізованими структурними схемами [1; 2], (Рис. 1) наведено в [2; 3].

Оцінку напружено-деформованого стану бетонів при короткочасному розвантаженні після тривалого обтиснення навантаженням різної інтенсивності виконуємо за схемою 2 (Рис. 1), що найбільш точно відображає роботу бетону при короткочасному та тривалому завантаженні.

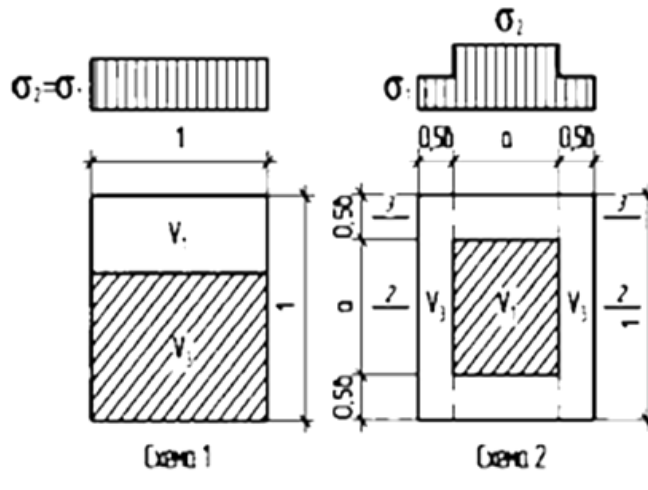


Рисунок 1 – Ідеалізовані структурні схеми бетону

### Тріщиностійкість у процесі короткочасного розвантаження чи подальшого розтягування бетонів.

Мікротріщини розриву в бетоні за перерізами 2-2 схеми 2 (Рис. 1) після зняття постійного стискаючого навантаження інтенсивності  $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{c,\tau}$ , що діяло протягом часу  $(t-\tau)$ , виникають при досягненні в цементному камені (розчині), в процесі короткочасного розвантаження або розтягнення граничних напружень  $f_{1,t,\tau}$ , тобто:

$$\sigma_{1,t,\tau} = f_{1,t,\tau} \quad (1)$$

У момент утворення мікротріщин розриву по цементному каменю (розчину) рівняння рівноваги запишеться в такому вигляді:

$$f_{1,t,\tau} A_1 + (\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} A_3 = (\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} \quad (2)$$

де  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}}$ ,  $(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}}$  відповідно напруження в бетоні (тріщиностійкість) і заповнювачі після зняття постійного стискаючого навантаження інтенсивності  $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd,\tau}$  що діє протягом часу  $t-\tau$ , при досягненні в цементному камені (розчині) в процесі короткочасного розвантаження або досягненні граничних напружень розтягування.

Для моменту тріщиноутворення рівняння спільності деформацій буде виражена через збільшення відносних деформацій, з моменту коли напруга в цементному камені (розчині) в процесі розвантаження або розтягування змінювалися від нуля до граничних напружень  $(\sigma_{1,t,\tau} = f_{1,t,\tau})$  і буде записана так:

$$\begin{aligned} (\Delta \varepsilon_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} &= (\Delta \varepsilon_{1,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} = (\Delta \varepsilon_{3,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} = \\ &= \frac{(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} - (\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0}{(E_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{c,t,\tau}}} = \frac{f_{1,t,\tau} - (\sigma_{1,\eta,t,\tau})_1^0}{E_{f1,t,\tau}} = \\ &= \frac{(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} - (\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0}{E_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2 і 3) і використавши кореляційну залежність 8 [4], отримуємо значення напруги в бетоні, при яких утворюються мікротріщини розриву по цементному каменю (розчину) в перерізі 2-2 схема 2.

$$(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}} = f_{1,t,\tau} A_1 + A_3 \left\{ \frac{-f_{1,t,\tau} E_3}{E_{f1,t,\tau} (1 - \lambda_{f1,t,\tau})} + (\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0 \right\} \quad (4)$$

В рівняннях (3) – (4)

$E_3$  – модуль пружності заповнювача;

$A_1$  і  $A_3$  – відповідно відносна площа перерізу цементного каменю та заповнювача.

Значення величин  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0$ ,  $(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0$  і  $E'_{f_{1,t,\tau}}$  визначаються відповідно по формулам (3-5) і [4].

Теоретичні значення тріщиностійкості бетону в системі "розчин-бетон", отримане за наведеними вище формулами в перерізі 2-2 для ідеалізованої структурної схеми 2 в залежності від інтенсивності тривалого обтиснення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Тріщиностійкість бетону в системі розчин-бетон**

Рівень обтиснення	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t,\tau}}$	-3,35	-1,57	-0,97	-0,21	+2,69	+4,47	+5,26	+6,72

Примітка: Знак (мінус) означає напруження розтягу.

Як видно з таблиці 1, з рівня тривалого обтиснення стискаючого навантаження  $\eta_t = 0,5$  і більше утворюються поперечні розвантажувальні мікротріщини розриву. До рівня  $\eta_t = 0,5$  ці тріщини утворюються при розтягуючих напруженнях (навантаженнях) у бетоні.

Отриманий теоретично початковий рівень тривалого обтиснення  $\eta_t = 0,5$ , у якому утворюються розвантажувальні мікротріщини, підтверджує викладені раніше пояснення граничної деформативності бетонів при розтягуванні після тривалого обтиснення.

Вище наведені залежності теоретичного визначення внутрішнього напруженого стану в процесі розвантаження після тривалого обтиснення стискаючим навантаженням різної інтенсивності справедливі і при розвантаженні після короткочасного обтиснення різної інтенсивності.

Внутрішньо напружено-деформований стан бетонного елемента по перерізу 3-3 рис. 2 визначається за наведеними формулами [4]. При цьому, у цих формулах необхідно замінити площу перерізу  $A_1$  на  $A_1+0,5 A_3$ , і переріз  $A_3$  на  $0,5 A_3$ , що видно з рис. 2. Отримані дані про тріщиностійкість бетону за розчином у перерізі 3-3 (таблиця 2).

Таблиця 2

**Тріщиностійкість бетону по перерізу 3-3**

Рівень обтиснення	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^{f_{1,t}}$ , МПа	-2,63	-1,58	-1,40	-1,22	-0,97	-0,91	-0,93	-0,77

Як видно з таблиці 2, утворення тріщин по розчину в перерізі 3-3 відбувається при дії тільки розтягуючих напружень в бетоні.

### Міцність бетонів на розтяг після тривалого обтиснення різної інтенсивності.

Відповідно до схеми напруженого стану бетону, приведеної на рис. 2, а також його тріщиностійкості по розчинній частині в характерних перерізах 2-2 і 3-3, міцність бетону на розтяг при відсутності обтиснення, визначиться тріщиностійкістю його по перерізу 3-3.

Після обтиснення бетону міцність його на розтягування визначиться опором зрізу  $f_c$  по контакту заповнювача та розчинної частини заввишки  $h_c=0,5$  (а-в) по периметру  $S_c=2a$  рис. 2 тобто:

$$f_{c,t} = f_{c,1,t} \cdot h_c \cdot S_c \quad (5)$$

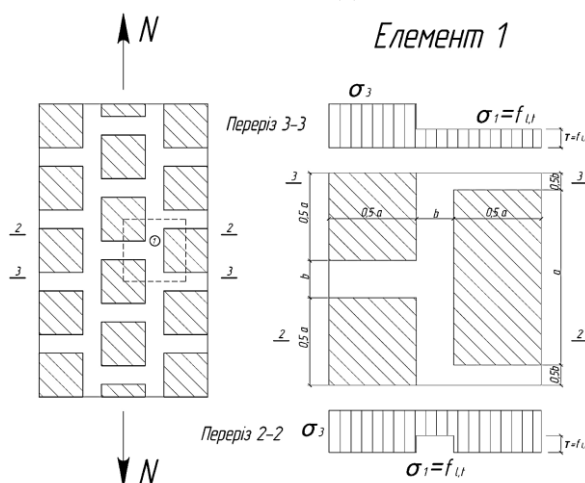


Рисунок 2 – Схема напруженого стану бетону

При  $f_{c,t}=2,5 f_{1,t}$ , міцність бетону на розтяг дорівнює

$$f_{c,t} = 2,5a(a-b)f_{1,t} \quad (6)$$

Експериментальні значення міцності розчинної частини на розтяг  $f_{1,t}$  в залежності від рівня попереднього обтиснення наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

**Експериментальні значення міцності розчину при розтягуванні залежно від рівня попереднього обтиснення**

Рівень тривалого обтиснення	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$f_{ct}$	1,92	1,84	1,78	1,68	1,64	1,60	1,49	1,45

Експериментальні та теоретичні значення міцності бетону на розтяг, обчислені по тріщиностійкості (таблиця 2,  $\eta_r = 0$ ) та формула (5), наведені в таблиці 4. Тут же дано відхилення теоретичних значень від експериментальних.

Таблиця 4

**Експериментальні та теоретичні значення міцності бетонів при розтягуванні після тривалого обтиснення різної інтенсивності**

Рівень обтиснення $\eta_r = \sigma_r / f_{cd}$	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$f_{ct}$ теор. МПа	2,63	1,88	1,81	1,71	1,66	1,62	1,51	1,48
$f_{ct}$ ОПЫТН. МПа	2,25	2,08	1,87	1,80	1,64	1,50	1,40	1,27
$\Delta\%$	+16,9	-9,6	-3,2	-5,0	+1,2	+8,0	+7,8	+15,9

Аналіз інших можливих схем руйнування бетону під час розтягування показав, що значення міцності бетону при розтягуванні за цими схемами вище значень її за таблицею 4. Так, після утворення тріщин у бетоні по розчинній частини в перерізах 2-2 і 3-3 міцність бетону визначається міцністю заповнювача. При цьому за перерізом 2-2 вона становитиме

$$f_{t,3} A_3 = 3,8 \text{ МПа, по перерізу 3-3} - 0,5 f_{t,3} A_3 \cdot F_3 = 1,9 \text{ МПа.}$$

Таким чином, проведені теоретичні дослідження з оцінки міцності бетону на розтяг після тривалого обтиснення різної інтенсивності отримали експериментальне підтвердження. Екстремальна розбіжність експериментальних та теоретичних значень міцності не перевищує +16,9%; -9,6%.

**Висновки**

Структурна теорія опору бетонів силовим впливом виходить з ідеалізації їх структурних схем. Найбільш повно відображає роботу бетону при стисканні та розтягуванні ідеалізована структурна схема у вигляді шахового розташування кубічних зерен заповнювача в розчинній частині бетону.

Прийнята ідеалізована структурна схема бетонів дозволила оцінити за заданим їх складом і реологічними властивостями складових тріщиностійкість і міцність бетонів при подальшому розтягуванні після тривалого центрального стиснення (модуль деформацій і відносні деформації).

Отримані та запропоновані до практичного застосування теоретичні залежності оцінки тріщиностійкості та міцності бетонів на розтягування після тривалого прикладання навантаження дають виходячи з його складу та властивостей складових.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Ахвердов М.Н. Механизм усадки и ползучести бетона в свете современных представлений реологии и физики твердого тела. Бетон и железобетон, 1970, №10. С.21-23.
2. Битько Н.М., Кузнецова О.В., Бойко В.В. Напряженно деформированное состояние бетонов при кратковременном центральном сжатии, исходя из его идеализированных структурных схем. Вісник ЧДТУ № 3.2016, Черкаси. С. 84-89.

3. Битько Н.М., Архангельская Н.А., Кузнецова О.В., Бойко В.В. Напряженно деформированное состояние цементного камня при длительном центральном сжатии нагрузкой различной интенсивности. Вісник ЧДТУ № 2.2009, Черкаси. С. 7-13.
4. Битько М.М., Кузнецова О.В., Иванова Л.В. Напружено-деформований стан бетонів при розвантаженні після попереднього обтиснення на основі його структурної теорії сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, Випуск 14, Луцьк 2020. Ст. 36-46.
5. Гансен Т., Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне (перевод с английского), М., Госстройиздат, 1963, с.124.
6. Гегасян С.Г. Собственные колебания вязкоупругой модели наследственного старения. Бетон и железобетон, 2001 №5, с.6-8.
7. Горохов Е.В., Югов А.М., Веретенников В.Н. и др. Учет явления систематической неоднородности свойств тяжелого бетона «Безопасность эксплуатации зданий и сооружений. Монография. М.,2011, с.146-167.
8. Дмитриев А.С. Влияние крупного заполнителя на прочность и деформативность высокопрочного бетона, Сб. НИИЖБ "Вопросы общей технологии и ускорение твердение бетона" под редакцией Миронова С.А., М., Стройиздат, 1970, с.58-63.
9. Зайцев Ю.В. Современное состояние механики бетона в России и за рубежом (строительные материалы, оборудования, технологии XXI века №1, 2003, с.18-19.
10. Крылов С.Б., Гончаров Е.Е. Использование реологических моделей при моделировании ползучести бетона. Промышленное и гражданское строительство, 2013, №2, с.32-33.
11. Макаренко Л.П., Битько Н.М. Экспериментально-статистические исследования напряженно-деформированного состояния цементного камня и бетона при двух режимах центрального сжатия с постоянной скоростью роста загрузки и продольных деформаций. Сборник Вопросы надежности железобетонных конструкций под редакцией А.С. Лычева, Куйбышев, 1977, с. 89-92.
12. Макаренко Л.П., Битько Н.М. Экспериментально-статистические исследования зависимости «Напряжение деформаций в цементном камне и бетонах, при длительном центральном сжатии постоянной нагрузкой различной интенсивности сборник «Вопросы надежности железобетонных конструкций» под редакцией А.С. Лычева, Куйбышев, 1976, с.106-109.
13. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Влияние ползучести и усадки при длительном обжатии бетонов на их трещиностойкость и прочность при последующем растяжении. Сборник "Ползучесть и усадка бетона" подготовленный НИИСК Госстрой СССР (Материалы совещания союзной комиссии РИЛЕМ), Киев, Будівельник, 1969.
14. Фенко Г.А. Влияние собственных напряжений на свойства бетона. Кандидатская диссертация. Полтавский ИСИ, Полтава, 1972.
15. Овсянко В.М. Компьютерный анализ электронных моделей, объектов реологии. Изв. вузов. Строительство, 2003, № 4, с. 26-34.

## REFERENCES

1. Akhverdov, M. N. (1970) The mechanism of concrete shrinkage and creep in the light of current ideas on rheology and solid-state physics. Beton i zhelezobeton, (10), pp. 21–23 [in Russian].
2. Bitko, N. M., Kuznetsova, O. V., Boyko, V. V. (2016) Stress-strain state of concrete under short-term central compression, based on its idealized structural schemes. Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky, No. 3, pp. 84–89 [in Russian].
3. Bitko, N. M., Arkhangelskaya, N. A., Kuznetsova, O. V., Boyko, V. V. (2009) Stresstrain state of cement stone with long-term central compression load of varying intensity. Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky, No. 2, pp. 7–13 [in Russian].
4. Bytko M.M., Kuznetsova O.V., Ivanova L.V. (2020). Stressed
5. -deformed condition of concrete when unloading after preliminary compression based on its structural theory. Modern technologies and calculation methods in construction, Issue 14, Lutsk. p. 36-46.
6. HGansen, T. (1963) Creep and stress relaxation in concrete. Moscow: Gosstroyizdat, p. 124 [in Russian].
7. Gegasyan, S. G. (2001) Characteristic oscillations of viscous-elastic model of hereditary aging. Beton i zhelezobeton, (5), pp. 6–8 [in Russian].
8. Gorokhov, Ye. V., Yugov, A. M., Veretennikov, V. N. et al. (2011) Accounting of the phenomenon of systematic heterogeneity of heavy concrete features. In: Bezopasnost ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy. Moscow, pp. 146–167 [in Russian].
9. Dmitriyev, A. S. (1970) Coarse aggregate impact on the strength and stress-strain behavior of high-precision concrete. Voprosy obshchey tekhnologiyi i uskoreniye tverdeniya betona: coll. NIIZhB, pod red. S. A. Mironova. Moscow: Stroyizdat, pp. 58–63 [in Russian].
10. Zaytsev, Yu. V. (2003) Current state of concrete mechanics in Russia and abroad. Stroyitel'nye materialy, oborudovaniye, tekhnologiyi XXI veka, (1), pp. 18–19 [in Russian].
11. Krylov, S. B., Goncharov, Ye. Ye. (2013) The use of rheological models at concrete creep simulation. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroyitel'stvo, (2), pp. 32–33 [in Russian].
12. Makarenko, L. P., Bitko, N. M. (1977) Experimental and statistic studies of deflected mode of cement stone and concrete at two modes of axial compression with constant speed of loading and longitudinal strain growth. Voprosy nadyezhnosti zhelezobetonnykh konstruktсий, pod. red. A. S. Lycheva. Kuybyshev, pp. 89–92 [in Russian].
13. Makarenko, L. P., Bitko, N. M. (1976) Experimental and statistic studies of the dependence of deformation strain in cement stone and concrete at sustained axial compression by constant loading of various intensity. Voprosy nadyezhnosti zhelezobetonnykh konstruktсий, pod. red. A. S. Lycheva. Kuybyshev, pp. 106–109 [in Russian].
14. Makarenko L.P., Fenko G.A. (1969). The effect of creep and shrinkage during long-term compression of concrete on their crack resistance and strength during subsequent stretching. Collection "Creep and shrinkage of concrete" prepared by NIISK Gosstroy of the USSR (Materials of the meeting of the RILEM Union Commission), Kyiv, Budivelnik.
15. Fenko, G. A. (1972) Effect of intrinsic stresses on concrete properties: PhD thesis. Poltava: Poltava ISI [in Russian].
16. Ovsyanko V.M. (2003). Computer analysis of electronic models, objects of rheology. Famous universities Construction, No. 4, p. 26-34.

**Кузнецова Ольга Вадимівна** – старший викладач кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, e-mail: Kuznec-68@ukr.net , ORCID 0009-0006-2189-730644;

**Іванова Лариса Віталіївна** – старший викладач кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, e-mail: [larisa29@i.ua](mailto:larisa29@i.ua) , ORCID 0009-0001-4239-3100.

**O. Kuznetsova**  
**L. Ivanova**

## **CRACK RESISTANCE AND STRENGTH OF CONCRETE UNDER TENSION AFTER PRELIMINARY COMPRESSION BASED ON ITS STRUCTURAL THEORY**

Cherkasy State Technological University

*The results of theoretical researches on the basis of the structural theory of crack resistance and tensile strength of concrete after preliminary long compression of various intensity are stated. For the structural scheme in the form of a checkerboard arrangement of the aggregate in the cement matrix, the stress-strain state of concrete during unloading or subsequent stretching to stresses when the cement stone has exhausted its bearing capacity (cracks are formed) and destruction of concrete as a whole is considered.*

*Analytical dependences of definition of the specified parameters for various levels of precompression are resulted.*

**Key words:** Concrete, secant module, mortar, cement stone, aggregate, structural diagram of stress, deformation.

**Olga Kuznetsova** – Senior Lecturer of the Department Geodesy, Land Management, Building Structures And Life Safety, Cherkasy State Technological University, e-mail: Kuznec-68@ukr.net, ORCID 0009-0006-2189-7306;

**Larysa Ivanova** – Senior Lecturer of the Department Geodesy, Land Management, Building Structures And Life Safety, Cherkasy State Technological University, e-mail: [larisa29@i.ua](mailto:larisa29@i.ua), ORCID 0009-0001-4239-3100.