DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.230-242
УДК 624.131.64

к.т.н., доцент **Афанасьєва Л.В.**,
afanasieva2709@gmail.com, ORCID:0000-0001-6237-2609**,**
к.т.н., доцент **Лавріненко Л.І.,**
ludmila.lavrinenko@gmail.com, ORCID:0000-0001-5601-0943,
Київський національний університет будівництва і архітектури

КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНИХ СПОРУД В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОГО УДАРУ

Наведені передумови і результати чисельного моделювання роботи залізобетонних елементів під дією високошвидкісного удару. Наданий аналіз взаємодії ударника і плити в умовах динамічного навантаження. За результатами виконаних досліджень встановлений тип армування конструкції, що унеможливлює її руйнування внаслідок механічного пошкодження при дії ударного навантаження. Запропоновано конструктивне рішення елементів захисної споруди, що дозволяє рекомендувати його для застосування в практику проектування і будівництва захисних споруд.

Ключові слова: плита; ударник; взаємодія; проникнення; захисна споруда.

Постановка проблеми. Структурні елементи захисних споруд покликані в якості бар'єрів витримувати динамічні навантаження, до яких відноситься високошвидкісний удар. Стійкість будівлі характеризується глибиною проникнення пробійника в тіло конструкцій, а також їх локальним пошкодженням внаслідок дії ударного навантаження. Накопичений досвід математичного моделювання процесів удару твердих тіл по різних мішенях. Діапазон зміни деформацій залізобетонних елементів («плита»), що відповідає високошвидкісній взаємодії в момент пробивання твердим тілом («ударник») з початковою швидкістю зіткнення до 1000 м/с, а також визначення їх динамічного характеру деформування потребують всебічного обґрунтування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Будівництво захисних споруд в Україні регламентовано вимогами нормативних документів [1].

Аналізу фізичних явищ високошвидкісної взаємодії системи «ударник-плита» присвячені роботи [2,4,5,7,8,9,10,11,12,13,20]. Швидкість зіткнення впливає на зміну структури речовин тіл, порушує симетрію кристалічної решітки матеріалів, що супроводжується плавленням, випаровуванням, ефектом випромінювання. До факторів, що впливають на процес взаємодії, в проведених дослідженнях включені початкова швидкість ударника і кут зустрічі ударника з плитою.

Проведені дослідження [6] свідчать, що для металів і сплавів, а також для бетону високошвидкісний діапазон дії навантаження відповідає умові:

$$M_0 = v_0 / c_0 < 0.75, \quad (1)$$

де v_0 – швидкість удару;

c_0 – швидкість звуку в матеріалі.

Дослідження високошвидкісної взаємодії тіл передбачають визначення:

- швидкості і траєкторії ударника до зіткнення з плитою;
- характеру деформування ударника і плити при їх взаємодії;
- параметрів кратера в плиті;
- залишкової швидкості і маси ударника після пробиття плити;
- граничної швидкості пробиття;
- маси, швидкості великих осколків, що утворюються в процесі зіткнення; іт.

Розрахунок параметрів проникнення ударника в плиту, а також межі наскрізного пробиття наведені в роботах [7,8,13].

При цьому опір середовища, в якому рухається ударник, змінний і дорівнює:

$$f_c = f_{c1} + f_{c2} + f_{c3}, \quad (2)$$

де f_{c1} – динамічний опір, що викликаний інерцією частинок середовища;

f_{c2} – сила в'язкого опору, що виникає за рахунок подолання тертя між частинками середовища;

f_{c3} – статичний опір, що залежить від міцності плити.

Таким чином, сила опору становить:

$$f_c = -m \frac{dv}{dt} S (A \cdot \vartheta_0^2 + B \cdot \vartheta_0 + C), \quad (3)$$

де m, ϑ_0 – відповідно маса і швидкість ударника;

S – площа поперечного перерізу ударника;

A, B, C – коефіцієнти, що залежать від властивостей і форми ударника.

За результатами експериментальних досліджень взаємодії ударника і бетонної плити глибина проникнення ударника в плиту L приймається за формулою Національного оборонного дослідного комітету (NDRC):

$$L = \sqrt{4 \cdot k \cdot N \cdot m \cdot d(\vartheta / 1000 \cdot d)}^{1.8} \quad \text{при } L/d \le 2 \quad (4)$$

$$L = \sqrt{4 \cdot k \cdot N \cdot m(\vartheta / 1000 \cdot d)}^{1.8} \quad \text{при } L/d > 2, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від міцності бетону плити;

N – коефіцієнт, що характеризує вплив форми головної частини ударника на опір проникнення в плиту.

Наведене аналітичне рішення математичної системи рівнянь, що описує рух ударника, а також стан ударника і плити при їх взаємодії може бути застосовано в обмеженому діапазоні. Тому оцінка локального впливу удару може здійснюватися за результатами експериментальних досліджень з використанням емпіричних формул, а також чисельних методів моделювання [21] роботи тіл з врахуванням їх пружно-пластичних характеристик.

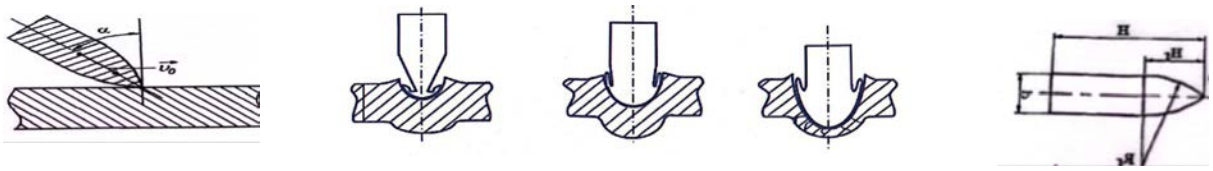
Метою публікації є висвітлення результатів розрахунку і моделювання взаємодії ударника і плити, а також аналізу їх поведінки і умов руйнування при динамічному навантаженні, що спричинено дією високошвидкісного удару.

Виклад основного матеріалу дослідження. В проведених дослідженнях застосований програмний комплекс ANSYS, який реалізує систему математичних рівнянь, що описують рух і стан «ударника-плити» при їх взаємодії [15].

Головні параметри, що визначаються за результатами розрахунку:

- напружено-деформований стан ударника і плити при їх взаємодії;
- зміна шляху (глибина проникнення ударника в плиту), швидкість і прискорення ударника в залежності від часу;
- залишкова швидкість після пробиття плити.

Геометрична модель задачі наведена на рис. 1.



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Геометрична модель задачі взаємодії ударника і плити (а), стадії проникнення ударника в плиту (б), параметри моделі (в)

Розрахункова геометрична модель задачі високошвидкісної взаємодії ударника і плити розглядається у вигляді циліндра, головна частина якого прийнята конусною. Характеристики форми ударника включають: діаметр корпусу *d;* довжина ударника *H;* довжина головної частини H_r; радіус головної частини R_r. Плита є прямокутна пластина з відповідними габаритами, що обмежена ступенями свободи по бічних поверхнях.

Передбачається, що в початковий момент часу ударник зустрічається з плитою зі швидкістю ϑ_0 під кутом α до її нормалі в середній точці (див. рис. 1,а). При цьому до зустрічі з плитою ударник здійснює тільки прямолінійний рух. Кут зустрічі ударника з плитою становить 0°.

Математичне модулювання задачі взаємодії ударника і плити полягає в наступному.

При дії на середовище зовнішніх сил його матеріальні точки отримують прискорення α, що призводить до їх руху і появі поля швидкостей ϑ і переміщень u. Виникнення переміщень викликає зміну відстаней між матеріальними точками середовища, що є причиною утворення поля тензора деформацій $T\varepsilon$ і напружень T_σ,

В загальному випадку зміна деформованого стану тіла спричиняє зміну його об'єму, а відповідно і зміну форми матеріальних часток. Останні оточують матеріальні точки середовища, що мають нескінченно малий об'єм.

Таким чином, тензори деформацій і напружень складаються з суми двох тензорів – шарового тензора і девіатора відповідно деформацій і напружень. Фізична поведінка деформованих середовищ характеризується здатністю чинити опір зміні об'єму часток, що відповідає величині взаємозв'язку девіаторів напружень і деформацій, і визначається рівнянням фізичної поведінки. Механічна поведінка середовища характеризується інтенсивністю деформацій, швидкістю їх змін, тиску, температури, фазових перетворень тобто визначальним рівнянням.

Слід зазначити, що при динамічному навантаженні зміна швидкості деформацій стиску або розтягу призводить к суттєвим змінам фізико-механічних характеристик матеріалів. Дослідні випробування показали, що при зростанні швидкості деформацій відбувається збільшення міцності матеріалу.

Головним критерієм, який характеризує міцність матеріалу плити при динамічному навантаженні є коефіцієнт динамічного зміцнення, що визначається як відношення міцності бетону дослідних плит при динамічному і статичному навантаженні. В проведених дослідженнях чисельне моделювання взаємодії ударника і плити виконане з застосуванням пружно-пластичної моделі, що реалізована засобами ПК ANSYS з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Модель реалізує можливість визначення поверхонь міцності - залишкової, руйнування, а також межі пластичності. При навантаженні поточна поверхня міцності мігрує між трьома зазначеними поверхнями. Моделювання дії високошвидкісного удару досягається сумісним деформуванням матеріалів ударника і плити з матеріалом середовища.

У початковий момент часу область середовища має об'єм Ω_0, обмежений граничною поверхнею Γ_0; момент часу t дослідна область Ω обмежена поверхнею Γ. Матеріальна точка A в початковий момент знаходиться в області Ω_0 і має координати X_i , швидкість ϑ_0 , прискорення α_0, переміщення u_0. В момент часу t відповідно X_i , ϑ, α, u. Зазначені параметри в Лагранжевій системі координат можуть бути виражені функціями X_i і t (див. рис. 2).

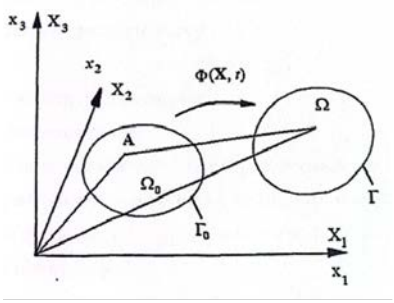


Рис. 2. Дослідна область середовища

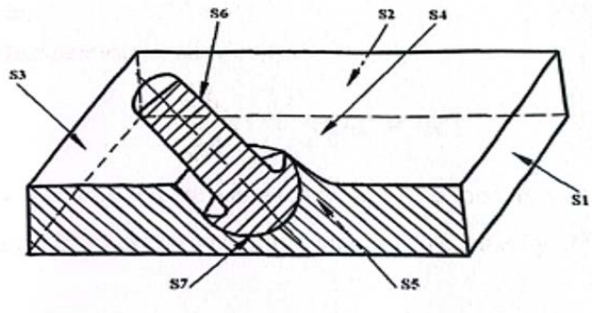


Рис. 3. До визначення граничних умов задачі

При постановці задачі взаємодії ударника і плити задають граничні умови на ділянках поверхонь $S_1 – S_7$, що наведені на рис. 3. На контактній поверхні S_7 ударника з плитою задають обмеження швидкості руху, напруженого стану точок тіл з урахуванням умови непроникності. Така тривимірна задача вирішується засобами просторової і часової дискретизації з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності конструкції.

В даній задачі використані восьмивузлові гексаедричні елементи (призма, тетраедр, октаедр).

Застосування сітки Лагранжа передбачає відповідність її вузлів точкам матеріального середовища, тобто кожний вузол сітки зв’язується з відповідною матеріальною точкою середовища. Це дозволяє при моделюванні дії високошвидкісного удару враховувати сумісне деформування матеріалів ударника і плити, визначати межі контактів тіл, а також фазові перетворення речовини; що кожний елемент - ударник і плита містить один матеріал.

Схема інтегрування за часом системи рівнянь при Лагранжевій сітці включає операції, що наведені на рис. 4**.**

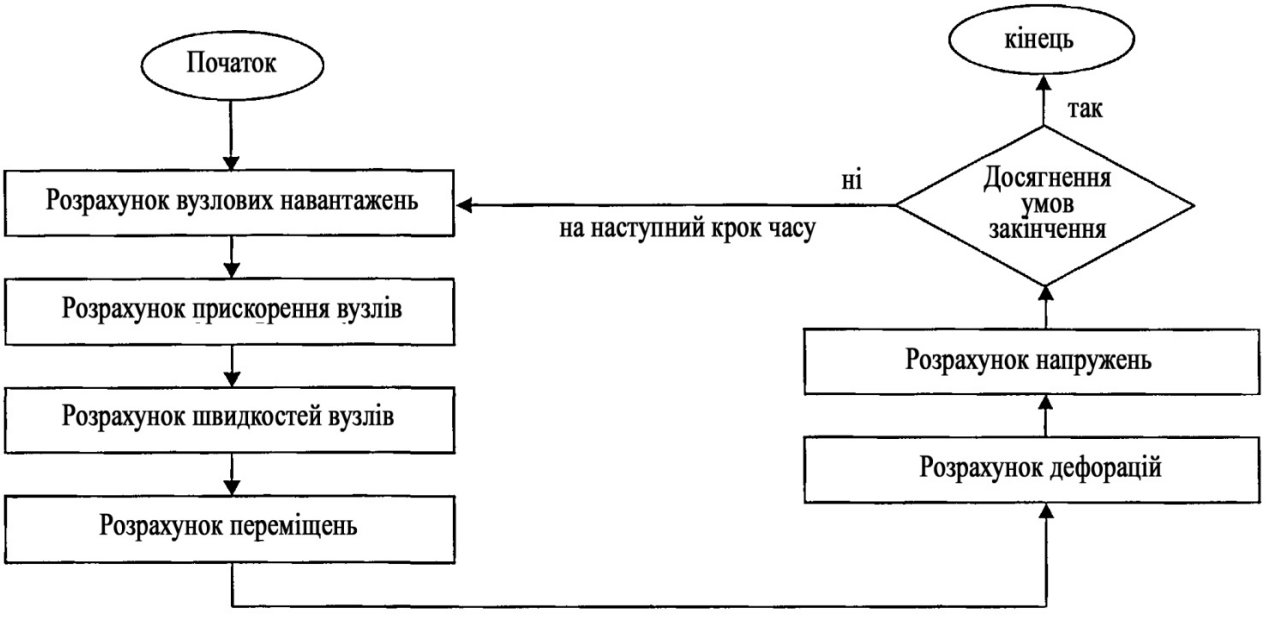


Рис. 4. Схема інтегрування за часом системи рівнянь при Лагранжевій сітці

Використання моделей твердих тіл, яким властивий пружно-пластичний характер роботи при взаємодії, дозволяє враховувати вплив швидкості деформацій на межу текучості матеріалу.

Наведені передумови чисельного моделювання використані в процесі досліджень роботи залізобетонних плит під дією високошвидкісного удару [15, 16]. За результатами виконаних досліджень розроблені розрахункові моделі дослідних плит, встановлені особливості проникнення ударника в плити з різними типами армування.

Чисельному моделюванню піддавались плити, конструктивне рішення яких передбачає армування: подвійними сітками, подвійними сітками з поперечною арматурою, суцільним металевим листом, арматурними сітками і фібрами. Особливості проникнення ударника в плити, що армовані одинарними і подвійними сітками, унеможливлюють їх використання в захисних спорудах внаслідок наскрізного пробиття плити ударником. Використання суцільного металевого листа потребує додаткових технолгічних рішень внаслідок розшарування плити вздовж листа.

Проведені чисельні дослідження [2,3] свідчать, що дослідні плити з використанням комбінованого армування - сітчастого і дисперсною фіброю - не пробиваються ударником, частина зразка залишається неушкодженою. Це досягається рядом переваг дисперсного зміцнення конструкції – збільшує міцність на розтяг; знижує крихкість бетону; підвищує його в'язкість, що сприяє збільшенню тріщиностійкості елемента в цілому. Таким чином, поєднання дискретного традиційного армування конструкцій з дисперсним сприяє підвищенню їх експлуатаційних якостей під дією зовнішніх впливів.

Характеристики дослідних зразків з комбінованим армуванням.

Ударник: циліндрична форма діаметром - 23мм; довжина - 65мм; початкова швидкість ударника 800 м/с; гексаедр розміром 4мм; кількість елементів – 425; кут зустрічі – 0^{o}; густина матеріалу- 7750кг/м3; межа текучості -1539 МПа; температура плавлення 1489,9 ^{o}C; модуль зсуву - 81,8 ГПа;

Плита: товщина – 400 мм; матеріал – бетон класу С35; гексаедр розміром 4мм; кількість елементів – 1834326.

Залишок неушкодженої частини становить 44,0 мм.

Результати чисельного експерименту свідчать, що дисперсне армування фібрами, рівномірно розподіленими в цементній матриці, зумовлює гальмування розвитку тріщиноутворення при дії ударних навантажень; це унеможливило виникнення наскрізного руйнування елемента.

Проведені чисельні дослідження [2,3] свідчать, що дослідні плити з використанням комбінованого армування - сітчастого і дисперсною фіброю - не пробиваються ударником, частина зразка залишається неушкодженою.

Встановлений характер руйнування дослідних елементів на підставі отриманих значень остаточної швидкості ударника, при цьому величина останньої до 35,0% менше в комбіновано армованих плитах.

За даними досліджень [13] встановлено, що дисперсне зміцнення надміцного бетону стальною фіброю сприяло зменшенню остаточної швидкості ударника до 52,0%, при цьому глибина його проникнення зменшилась до 38,0%.

Графік зміни швидкості ударника наведений на рис. 5.

Зазначені результати досліджень корелюються з даними, що отримані при випробуванні наномодифікованих фібробетонів в умовах високошвидкісного удару [19]. На рис. 6 представлені зразки дослідних кубів, армованих дисперсною фіброю.

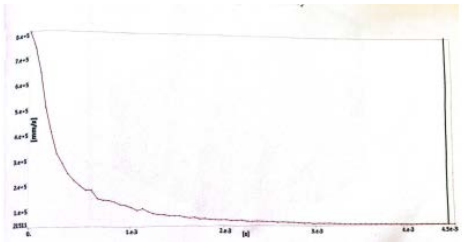


Рис. 5. Графік зміни швидкості ударника при проникненні в плиту з комбінованим армуванням

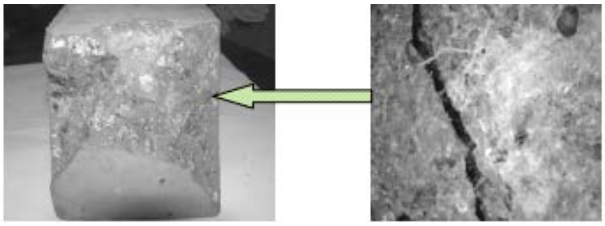


Рис. 6. Загальний вигляд зразків-кубів наномодифікованого фібробетону в умовах високошвидкісного удару

Встановлено, що відколювання окремих частинок матриці пройшло внаслідок точкового ударного навантаження в напрямку дії зовнішнього зусилля (див. рис. 6). Основна маса залишилась суцільною і практично неушкодженою. Нанотехнологічний підхід створення технологічних бетонів ґрунтується на сучасних принципах формування їх структури, що характеризується наявністю нанооб'єктів; останні сприяють дисперсному зміцненню і релаксації внутрішніх зусиль бетону.

Наприклад, підсилення залізобетонних плит вуглепластиком сприяло зменшенню остаточної швидкості ударника до 18,0 % [13].

Характер проникнення ударника в комбіновано армовану плиту наведений на рис. 7.

Таким чином, армування дисперсною фіброю, рівномірно розподіленою в цементній матриці, зумовлює гальмування розвитку тріщиноутворення при дії ударних навантажень, запобігає миттєвому крихкому руйнуванню конструкції внаслідок наскрізного пробиття ударником.

Враховуючи, що використовувані бетони охоплюють вузький спектр міцності на стиск, доцільно провести подальші дослідження роботи залізобетонних конструкцій з використанням нанотехнологічних підходів.

Окремої уваги потребує питання рухливості бетонної суміші з урахуванням наявності армувальних елементів, що спричиняє зниження її рухливості.

Рис. 7. Особливості проникнення ударника в плиту з комбінованим армуванням: а) – характер руйнування; б) армування плити до взаємодії з ударником

На підставі викладених результати чисельних досліджень роботи елементів з комбінованим армуванням їх обґрунтовано можна рекомендувати до застосування в практику будівництва захисних споруд, що відповідають умовам експлуатації при дії високошвидкісного удару.

Загальний вигляд рекомендованої захисної споруди, а також схема її армування наведені на рис. 8.

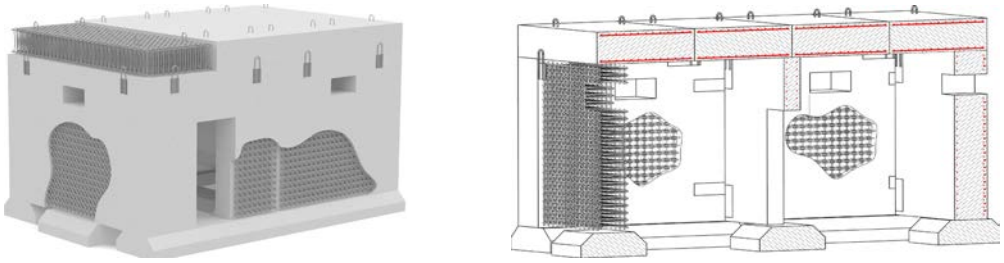


Рис. 8. Захисна споруда з використанням дослідних елементів: а) загальний вигляд; б) схема армування елементів споруди

Висновки. За результатами проведених досліджень засобами чисельного моделювання встановлений характер взаємодії ударника і залізобетонної плити, що характеризується глибиною проникнення і локальним руйнуванням в умовах високошвидкісного удару. При цьому здатність конструкції-бар'єра чинити опір удару залежать від глибини проникнення ударника і обсягу пошкоджень внутрішньої сторони конструкції, які відповідають остаточній швидкості ударника.

Запропоновано конструктивне рішення залізобетонної плити, що містить дискретне армування сітками, а також зміцнена дисперсною стальною фіброю. Дослідні зразки з таким комбінованим армуванням відрізнялись зменшеною до

35,0% остаточною швидкістю ударника, що виключило наскрізне руйнування плити. Глибина проникнення зменшилась до 20,0%.

Потребують подальшого розвитку дослідження технологічних бетонів для можливого їх використання в конструкціях-бар'єрах захисних споруд, що здатні витримувати динамічні впливи в умовах високошвидкісного удару.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». – К.: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 112 с. – *чинний з 01.11.2013*.
2. Афанасьєва Л.В. Залізобетонні конструкції в умовах високошвидкісного удару//Містобудування і теріторіальне планування, 2016. Вип.61. - С.108-113. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2016/201661.pdf.
3. Афанасьєва Л.В. Про можливість використання залізобетонних конструкцій в умовах дії високошвидкісного удару// *Збірник праць XIII Міжнародної наукової конференція «Наука і освіта, Угорщина, Хайдусобосло, 2019. - С. 3-7.* http://lib.khnu.km.ua/konfer_HNU/2019/SE-2019.pdf.
4. Зукас Дж., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. - *М.:Мир,1985. – 296 с.*
5. Согомонян А.Я. Динамика пробивания преград // *М. МГУ, 1988. - 221с.*
6. Ковтун А.В., Табуненко В.О., Нестеренко С.І. Моделі взаємодії високошвидкісного ударника з захисними перешкодами // *Опір матеріалів і теорія споруд/ Strength of Materials and Theory of Structures 2019, № 102. - С. 207-219.* http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/173127/172890.
7. Эйгельберг П., Каймаке Е. Физические особенности разрушения препятствий конечной толщины при высокоскоростном пробитии их разными ударниками// *Вестник ТГУ. 2013, 13(4). - 269 с.*
8. M. Esaker, G. Thermou, L. Neves. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review // *International Journal of Impact Engineering, 2023. - 180(11). pp. 2-22.* https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722 .
9. T. Almusallam, Y. Al-Salloum, S. Alsayed, Rizwan Iqbal, H. Abbas. Effect of CFRP strengthening on the response of RC slabs to hard projectile impact // *Journal Nuclear Engineering and Design. 2015. - 286(5), pp. 211-226.* https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.02.017.
10. A. Dancygier, A. Katz, D. Benamou, D. Yankelevsky. Resistance of double-layer reinforced HPC barriers to projectile impact// *International Journal of Impact Engineering,2014.-67(5). pp. 39-51.* https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.01.001.
11. Noël, K.Soudki. Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement//*Journal Engineering Structures, 2014. - 59(2). pp.392-398.* https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.005.
12. T.Teng,Y.Chu**.** F**.** Chang, B.Shen, D.Cheng. Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact// *Journal Computational Materials Science, 2008. - 42(3). pp.90-99.* https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.013.
13. W. Sun, W. Zhang, J. Yuan, X. Gao, Y. Wua, W. Ni, J. Feng. Multi-scale study on penetration performance of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete// *Journal Construction and Building materials, 2024. - 422(4).* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135846.
14. H. Hansson, S.Peter. Simulation of Concrete Penetration in 2D and 3D with the RHT Material // *Swedish Defence Research Agency. 2002. - 50 pp.* https://www.foi.se › rapports.
15. Петрученко О.С. Динамічні та кінематичні характеристики етапу проникнення кулі в броню //*Петриченко О.С., Флюд О.В., Величко Л.Д.// Військово-техн.збірник.-2017, № 16. - С. 8-11.* https://doi.org/10.33577/2312-4458.16.2017.8-11.

16. Клованич С.Ф. Метод скінчених елементів в нелінійних задачах інженерної механіки // *Запоріжжя. Світ геотехніки, 2009. - 400 с.*
https://www.liraland.ua/books/book-metod-konechn-kh-lementov-v-nelyneyn-kh-zadachakh-ynzhenernoy-mekhanyky.

17. Барабаш М.С. Комп'ютерне моделювання процесів життєвого цикла об'єктів будівництва// *Сталь,2014. - 301 с.*
https://www.liraland.ua/books/book-kompyuternoe-modelyrovanye-protsessov-zhyznennogo-tsykla-ob-ektov-stroytelstva.

18. Максименко В., Барабаш М., Костира, Н., Бармін,І Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР // *Наука та будівництво. 2023. 38(4).*
https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3.

19. Марущак У.Д., Саницький М.А., Королько С. Наномодифіковані швидкотвердіючі бетони, армовані дисперсними волокнами // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. – 2017. – № 877. - С. 136–144.*
https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/may/12245/23235.

20. Лавріненко Л.І., Некора В.С. Дослідження нагрівання сталевої балки з гофрованою стінкою в умовах пожежі // *Будівельні конструкції. Теорія і практика. Вип.6 (2020). - С. 12-21*. https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21.

21. Бензель О.М, Лавріненко Л.І. Інформаційне моделювання сталевої будівлі з підвищеними вимогами жорсткості // *Будівельні конструкції. Теорія і практика. Вип. 9 (2021).- С. 30-44.* https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44.

Ph.D, Associate Professor **Afanasieva Liudmyla**,
Ph.D, Associate Professor **Lavrinenko Liudmyla,**
Kyiv National University of Construction and Architecture

CONSTRUCTIONS OF THE PROTECTIVE STRUCTURES UNDER THE CONDITIONS OF HIGH-SPEED IMPACT

The stability of the building is characterized by the depth of penetration of the punch into the body of the structures, as well as their local damage due to the impact load. There was accumulated experience of mathematical modeling of the impact processes of solid bodies on various targets. The range of deformations changes of the reinforced concrete elements ("slab"), which corresponds to the high-speed interaction at the moment of punching by a solid body ("impactor") with an initial impact speed of up to 1000 m/s, as well as the determination of their dynamic nature of deformation require comprehensive justification.

The analytical solution of the mathematical system of equations describing the movement of the impactor, as well as the state of the impactor and the slab during their interaction can be applied in a limited range. Therefore, the assessment of the local effect of the impact can be carried out on the basis of the results of experimental studies using empirical formulas, as well as numerical methods of modeling the work of bodies taking into account their elastic-plastic characteristics.

The ANSYS software package was used in the conducted research, which implements a system of mathematical equations that describe the movement and state of the "impactor-slab" during their interaction. Based on the results of the performed numerical modeling, it was established that the tested slabs with the use of combined reinforcement - mesh and dispersed metal fiber - are not penetrated by the impactor, part of the sample remains intact. At the same time, the final speed of the impactor in these slabs is up to 35.0% less than in the slabs with the mesh reinforcement. The penetration depth decreased up to 20.0%.

The experience of dispersion strengthening of the concrete indicates the inhibition of cracking in the fiber concrete elements, which makes it expedient for usage in the combined reinforced constructions of the protective structures, capable of withstanding the dynamic impacts under conditions of high-speed impact. Further development of the of technological concretes studies is needed for their possible use in barrier structures of protective structures,

Keywords: slab; impactor; interaction; penetration; protective structure.

REFERENCES

1. DBN V.2.2-5:2023 «Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu». – K.: Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy, 2023. – 112 p. – valid from 01.11.2013. {in Ukranian}

2. Afanasieva L.V. Zalizobetonni konstruktsii v umovakh vysokoshvydkisnoho udaru//Mistobuduvannia i teritorialne planuvannia, 2016, Vyp.61. - S. 108-113.
https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2016/201661.pdf. {in Ukranian}

3. Afanasieva L.V. Pro mozhlyvist vykorystannia zalizobetonnykh konstruktsii v umovakh dii vysokoshvydkisnoho udaru// *Zbirnyk prats XIII Mizhnarodnoi naukovoi konferentsiia «Nauka i osvita, Uhorshchyna, Khaidusoboslo, 2019. – pp. 3-7.* http://lib.khnu.km.ua/konfer_HNU/2019/SE-2019.pdf. {in Ukranian}

4. Zukas Dzh., Nykolas T., Svyft Kh.F. y dr. Dynamyka udara.-M.: Myr,1985. – 296 s. {in Russian}

5. *Sohomonian A.Ia. Dynamyka probyvanyia prehrad // M.: MHU, 1988, - 221 s.* {in Russian}

6. Kovtun A.V., Tabunenko V.O., Nesterenko S.I. Modeli vzaiemodii vysokoshvydkisnoho udarnyka z zakhysnymy pereshkodamy // Opir materialiv i teoriia sporud */ Strength of Materials and Theory of Structures 2019, № 10.* – pp. *207-219.* http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/173127/172890. {in Ukranian}

7. Эihelberh P., Kaimake E. Fyzycheskye osobennosty razrushenyia prepiatstvyi konechnoi tolshchynы pry vysokoskorostnom probytyy ykh raznыmy udarnykamy// Vestnyk THU. 2013, 13(4), -269 s. {in Russian}

8. M. Esaker, G. Thermou, L. Neves. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review // *International Journal of Impact Engineering, 2023.-180(11). – pp. 2-22.* https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722. {in English}

9. T. Almusallam, Y. Al-Salloum, S. Alsayed, Rizwan Iqbal, H. Abbas. Effect of CFRP strengthening on the response of RC slabs to hard projectile impact // *Journal Nuclear Engineering and Design.2015.-286(5). – pp. 211-226.* https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.02.017. {in English}

10. A. Dancygier, A. Katz, D. Benamou, D. Yankelevsky. Resistance of double-layer reinforced HPC barriers to projectile impact// *International Journal of Impact Engineering,2014.-67(5). – pp. 39-51.* https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.01.001. {in English}

11. Noël, K. Soudki. Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement//*Journal Engineering Structures,2014.-59(2). – pp. 392-398.* https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.005. {in English}

12. T. Teng, Y. Chu, F. Chang, B. Shen, D. Cheng. Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact// *Journal Computational Materials Science, 2008.-42(3). – pp. 90-99.* https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.013. {in English}

13. W. Sun, W. Zhang, J. Yuan, X. Gao, Y. Wua, W. Ni, J. Feng. Multi-scale study on penetration performance of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete// *Journal Construction and Building materials,2024. - 422(4).* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135846. {in English}

14. H. Hansson, S. Peter. Simulation of Concrete Penetration in 2D and 3D with the RHT Material // *Swedish Defence Research Agency. 2002. - 50* p. https://www.foi.se › rapports. {in English}

15. Petruchenko O.S. Dynamichni ta kinematychni kharakterystyky etapu pronyknenniakuli v broniu //Petrychenko O.S., Fliud O.V., Velychko L.D.// *Viiskovo-tekhn.zbirnyk.-2017, № 16, – pp. 8-11.* https://doi.org/10.33577/2312-4458.16.2017.8-11. {in Ukranian}

16. Klovanych S.F. Metod skinchenykh elementiv v neliniinykh zadachakh inzhenernoi mekhaniky // *Zaporizhzhia. Svit heotekhniky, 2009, - 400 p.* https://www.liraland.ua/books/book-metod-konechn-kh-lementov-v-nelyneyn-kh-zadachakh-ynzhenernoy-mekhanyky. {in Ukranian}

17. Barabash M.S. Kompiuterne modeliuvannia protsesiv zhyttievoho tsykla obiektiv budivnytstva// *Stal,2014. - 301 p.*

https://www.liraland.ua/books/book-kompyuternoe-modelyrovanye-protsessov-zhyznennogo-tsykla-ob-ektov-stroytelstva. {in Ukranian}

18. Maksymenko V., Barabash M., Kostyra, N., Barmin,I Modeliuvannia dynamichnykh navantazhen vybukhovoho typu v zadachakh doslidzhennia mitsnosti budivelnykh konstruktsii z vykorystanniam PK LIRA-SAPR // *Nauka ta budivnytstvo. 2023, 38(4).* https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3. {in Ukranian}

19. Marushchak U.D., Sanytskyi M.A., Korolko S. Nanomodyfikovani shvydkotverdiiuchi betony, armovani dyspersnymy vcoloknamy // *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriia: Teoriia i praktyka budivnytstva. – 2017. – № 877. – pp. 136–144.* https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/may/12245/23235. {in Ukranian}

20. Lavrinenko L.I., Nekora V.S. Doslidzhennia nahrivannia stalevoi balky z hofrovanoiu stinkoiu v umovakh pozhezhi // *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka. Vyp.6 (2020). – pp. 12-21.* https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.12-21. {in Ukranian}

21. Benzel O.M, Lavrinenko L.I. Informatsiine modeliuvannia stalevoi budivli z pidvyshchenymy vymohamy zhorstkosti // *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka. Vyp. 9 (2021). – p. 30-44*. https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44. {in Ukranian}