

# **ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСОЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

**УДК 624.012.35:620.173**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ТА ФІБРОБЕТОНІВ ПРОБИВАННЮ**

### **INVESTIGATION OF RESISTANCE OF HIGH-DURABLE CONCRETE AND FIBER-REINFORCED CONCRETE PENETRATION**

**Бабич Є.М., д.т.н., проф., Кочкар'єв Д.В., к.т.н., доц., Філіпчук С.В.  
к.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та  
природокористування, м. Рівне)**

**Babich E.M., Dr., Professor, Kochkarev D.V., candidate of technical sciences,  
associate professor, Filipchuk S.V., candidate of technical sciences, associate  
professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)**

**Розглянуто теоретично-експериментальні дослідження бетонів та  
фібробетонів на пробій. Обґрунтовано теоретично-експериментальний  
метод отримання коефіцієнтів піддатливості проникненню бетонів та  
фібробетонів. Наведені експериментальні данні. Запропоновані вирази  
визначення коефіцієнтів піддатливості проникненню бетонів та  
фібробетонів.**

**Theoretical and experimental studies of concrete and fibro concrete on the  
breakdown are considered. The theoretical and experimental method of  
obtaining coefficients of penetration of concrete and fibro concrete is  
substantiated. The commonly used methods of researching concrete,  
reinforced concrete and fibro concrete coatings on the breakdown provide for  
their punching at given speeds. In the vast majority of laboratory studies, this  
is done on samples of small sizes. This makes some inaccuracies and errors in  
the initial output. Examination of samples of standard sizes in laboratory  
conditions is possible and safe only at small speeds of shock drills. As a result  
of the study of the nature of the resistance forces during the breakdown,  
certain patterns were established. In general, the strength of the resistance of  
materials depends on the speed of shock drills. Thus, with single-kinetic  
energy of impact and different speeds of a shock buoy, we will receive  
different data. The resistance of the materials is taken to characterize the  
penetration coefficient. This is determined at speeds of a shock boom more  
than 300 m / s. To obtain the penetration rate, it is necessary to bring the  
experimental data to the appropriate conditions. Bringing the results of**

experiments to the appropriate speeds should take place in accordance with the law of conservation of energy. Thanks to this approach, it was possible to confirm the generally accepted values of the coefficients of penetration for heavy fortification concrete, as well as to obtain new values for high-strength fast-hardening concrete, fiber reinforced concrete and reinforced concrete. As experimental samples plates of 400x200x100 mm were used. The research was carried out on the installation of a coiled type at a different height of the impact drill, which allowed the different energy of impact to be received. As a result of the processing of a large number of experimental data, the formulas for determining the coefficients of infiltration penetration are proposed. They depend on the type and type of concrete, the presence of fittings and are installed depending on the calculated resistance of concrete to compression.

**Ключові слова:**

високоміцний важкий бетон, високоміцний дрібнозернистий бетон, фібробетон, пробивання, опір.  
high-hard concrete, high-strength fine-grained concrete, fiber concrete, penetration, resistance.

**Вступ.** Високоміцні бетони та фібробетони, відкривають великі перспективи у розробці сучасних захисних споруд оборонного призначення. При цьому дослідження високоміцних бетонів та фібробетонів є доволі обмеженими, у тому числі і пробивання, які відіграють значну роль у проектуванні захисних споруд [1-5], що надає особливої актуальності обраним для дослідження питанням.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження на пробивання по визначенню глибини проникнення боєприпасів у різні матеріали, відомі ще, починаючи з 1912 року [6]. Найбільш відома емпірична формула – Березанська, отримана за результатами стрільбищ на острові Березань у Чорному морі біля м. Очаків. Вона має наступний вираз

$$h = k \frac{q}{d^2} V_c \cos \psi_0, \quad (1)$$

де  $h$  – глибина проникнення боєприпасів у товщу матеріалу, м;

$q$  – маса снаряду, кг;

$d$  – калібр снаряду, мм;

$k$  – коефіцієнт, який характеризує властивості захисної товщі;

$V_c$  – швидкість підходу боєприпасів до захисної товщі, м/с;

$\psi_0$  – кут під яким снаряд проникає у захисну товщу. Кут відраховується від нормалі до захисної поверхні.

Вираз (1) справедливий для невеликого діапазону швидкостей та дає доволі низьку точність. Дана формула трансформована АНІІ [6] використовується для розрахунку проникнення звичайних боєприпасів у

грунти, гірські породи, бетонні та залізобетонні конструкції при їх кінцевій швидкості до 400 м/с. Зауважимо, що формула АНІІ [6] дає задовільні результати проникнення артилерійських снарядів, корпуси яких не деформуються при проникненні у захисну товщу. Вона має наступний вигляд

$$h = \lambda k_{np} \frac{q}{d^2} V_c \frac{\cos(n\psi_0)}{\sqrt{\cos\psi_0}}, \quad (2)$$

де  $\lambda = \lambda_1 \lambda_2$  – коефіцієнт, який враховує форму головної частини снаряду та його калібр;

$k_{np}$  – коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу: для ґрунтів –  $110 \dots 130 \times 10^{-7}$ ; для цегляної кладки  $20 \dots 25 \times 10^{-7}$ ; для бетонів середньої міцності  $20 \dots 25 \times 10^{-7}$ ;

$d$  – калібр снаряду, м;

$\psi_0 \leq \frac{90^\circ}{2n-1}$  – кут (від нормалі) під яким снаряд проникає у захисну споруду;

$n$  – коефіцієнт, який враховує можливе викривлення траєкторії руху снаряду в захисній товщі: для снарядів дальнобійної форми  $n=1,82$ , для снарядів не дальнобійної форми  $n=1,0$ .

Коефіцієнт форми головної частини снаряду  $\lambda_1$  визначається за виразом

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,43 \sqrt{\left(\frac{H_z}{d}\right)^2}, \quad (3)$$

де  $H_z$  – висота головної частини снаряду, м.

Коефіцієнт калібру снаряду  $\lambda_2$  встановлюється за виразом

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d}. \quad (4)$$

Широке використання у фортифікаційних розрахунках набула формула Забудского [6], яка має вигляд

$$h = \frac{q \times \sin \theta_c}{2A \times B \times \Phi \times S} \ln \left( \frac{1 + BV_c^2}{1 + BV^2} \right), \quad (5)$$

де  $\theta_c$  – кут під яким снаряд проникає у захисну споруду, який вираховується від поверхні;

$A, B$  – коефіцієнти, які залежать від властивостей матеріалу;

$\Phi = (1,15 \dots 0,20) \frac{H_z}{d}$  – коефіцієнт форми головної частини боеприпасу;

$S$  – міделевий переріз боеприпасу, м<sup>2</sup>;

$V$  – швидкість боеприпасу у середині захисної товщі, м/с.

Формула (5) задовільно описує реальний процес проникання боеприпасів без загострення, із швидкостями на момент пробивання  $V_c < 400$  м/с.

Для надзвукових швидкостей при пробиванні, коли швидкість снаряду  $V_c$  перевищує швидкість звуку матеріалу захисної споруди  $a_0$ , Балаганский І.А. та Мержневский Л.А. [6] пропонують використовувати наступний вираз

$$h = \lambda \frac{q}{d^2} K \left( \frac{V_c}{a_0} \right) 10^4, \quad (6)$$

де  $\lambda = (0,45 \dots 1,0) \frac{H_z}{d}$ ;  $K \left( \frac{V_c}{a_0} \right) = 24 \frac{V_c}{a_0} e^{6,65 \left( \frac{V_c}{a_0} \right)}$ .

Національним комітетом дослідження оборони у 1946 році [7], було запропоновано товщину захисних бетонних і залізобетонних споруд із умов пробивання визначати за допомогою виразів

$$\begin{cases} \frac{h}{d} = \frac{1}{19,8} \sqrt{K_{NDRC} N_{NDRC} \frac{q}{d^{2,8}} \left( \frac{V_c}{1000} \right)^{1,8}} & \text{для } \frac{h}{d} \leq 2; \\ \frac{h}{d} = \frac{1}{1,56 \times 10^3} K_{NDRC} N_{NDRC} \frac{q}{d^{2,8}} \left( \frac{V_c}{1000} \right)^{1,8} + 1 & \text{для } \frac{h}{d} > 2. \end{cases} \quad (7)$$

У формулах (7):  $K_{NDRC}$ ,  $N_{NDRC}$  – коефіцієнти, що залежать від міцності матеріалу захисної споруди та форми головної частини снаряду. Вони визначаються за виразами

$$K_{NDRC} = \frac{14,9 \times 10^3}{\sqrt{f_c}}, \quad (8)$$

$$N_{NDRC} = 0,72 + 0,25 \sqrt{CRH - 0,25}, \quad (9)$$

де  $CRH$  – радіус калібру головної частини снаряду.

Коефіцієнт форми головної частини снаряду  $N_{NDRC}$  для різних типів приведено у табл. 1.

Вдосконалення вираз (7) набув у 1976 році Армійським корпусом інженерів

$$\frac{h}{d} = \frac{11,1}{\sqrt{f_c}} \frac{q}{d^{2,785}} \left( \frac{V_c}{1000} \right)^{1,5} + 0,5. \quad (10)$$

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів форми головної частини снаряду [7]

№ п/п	Геометричний вигляд головної частини снаряду	$N_{NDRC}$
1	Плоский	0,72
2	Полусферичний	0,84
3	Тупий	1,00
4	Дуже гострий	1,14

Вираз для визначення товщини пробивання залізобетонних захисних покриттів із залізобетону та бетону міцністю на стиск не більше ніж 124 МПа запропоновано Young (Сандійська національна лабораторія) [7] у 1997 році

$$h = 18 \times 10^{-6} S_Y N_Y \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^{0,7} (V_c - 30,5) \text{ для } V_c \geq 61 \text{ м/с}, \quad (11)$$

де  $N_Y$  – коефіцієнти форми головної частини снаряду, визначається за виразом

$$N_Y = 0,18(CRH - 0,25)^{0,5} + 0,56. \quad (12)$$

Коефіцієнт  $S_Y$  у виразі (11) враховує вплив об'ємного армування бетону та його міцність на глибину пробивання. Встановлюється за виразом

$$S_Y = 0,085 K_e (0,11 - R_{steel}) (t_c T_c)^{-0,06} \left( 35 \times 10^6 / f_c \right)^{0,3}, \quad (13)$$

де  $R_{steel}$  – коефіцієнт об'ємного армування,  $t_c$  – коефіцієнт, який залежить від віку бетону, приймається рівним одиниці при віці бетону старше одного року;

$T_c$  – параметр, який залежить від відношення товщини захисної споруди до діаметра снаряду, приймається рівним 6 при відношенні товщині захисної споруди до діаметру снаряду більше 6;

$K_e$  – параметр, який приймається:

- для армованих захисних покриттів

$$\begin{cases} K_e = (20d / W_c)^{0,3} & \text{при } W_c / d < 20; \\ K_e = 1 & \text{при } W_c / d \geq 20; \end{cases} \quad (14)$$

- для не армованих захисних покриттів

$$\begin{cases} K_e = (30d / W_c)^{0,3} & \text{при } W_c / d < 30; \\ K_e = 1 & \text{при } W_c / d \geq 30; \end{cases} \quad (15)$$

У виразах (14), (15),  $W_c$  – ширина захисної споруди, м.

Для снарядів масою менше 182 кг визначену за виразом (11) товщину  $h$  необхідно зменшувати множенням на коефіцієнт  $K_h$

$$K_h = 0,46 q^{0,3} \text{ при } q < 182 \text{ кг}. \quad (16)$$

Також є пропозиції Li та Chen [7] у 2003 році по визначенню товщини захисних споруд

$$\begin{cases} \frac{h}{d} = \sqrt{\frac{4kI / \pi}{(1 + I / N)}} & \text{для } \frac{h}{d} \leq k; \\ \frac{h}{d} = \frac{2}{\pi} N \sqrt{\frac{1 + I / N}{1 + k\pi / (4N)}} + k & \text{для } \frac{h}{d} > k. \end{cases} \quad (17)$$

Коефіцієнт форми снаряду  $k$  для виразів (17) визначається за формулою

$$k = 0,707 + \frac{H_e}{d}. \quad (18)$$

Функція впливу  $I$  визначається за виразом

$$I = \frac{I^*}{S}, \quad (19)$$

де  $I^* = \frac{qV_c^2}{d^3 f_c}$ ;  $S$  – емпіричний коефіцієнт, який характеризує міцність бетону

захисної споруди, може бути визначений за одним із виразів

$$S = 82,6 \bar{f}_c^{-0,544}, \quad (20)$$

$$S = 130,3 \bar{f}_c^{-0,733}. \quad (21)$$

У виразах (20), (21),  $\bar{f}_c$  – міцність бетону за осьового стиску.

Функція впливу геометрії  $N$  для виразів (17) визначається за виразом

$$N = \frac{q}{\rho_c d^3 N^*}, \quad (22)$$

де  $N^* = \frac{l}{3\psi} - \frac{l}{24\psi^2}$ ,  $0 < N^* \leq \frac{l}{2}$ ;  $\rho_c$  – густина бетону;  $\psi$  – відношення

калібру снаряда до радіуса його головної частини.

**Постановка мети та задач досліджень.** Виконати комплексні теоретично-експериментальні дослідження високоміцних бетонів та фібробетонів на пробивання. Встановити коефіцієнти піддатливості проникненню високоміцних бетонів та фібробетонів.

**Методика досліджень.** Встановимо математичні моделі опору наведених вище емпіричних виразів. Скористаємося другим законом Ньютона для визначення сили опору матеріалу

$$qa = -F, \quad (23)$$

де  $a$  – прискорення,  $m/c^2$ .

Запишемо загальновідомі диференціальні залежності руху

$$a = \frac{d^2 S}{dt^2}, \quad \frac{dS}{dt} = v, \quad (24)$$

де  $S$  – шлях,  $m^2$ ;  $t$  – час,  $c$ .

Силу опору середовища в загальному представляють, як суму трьох сил

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = Av^2 + Bv + C, \quad (25)$$

де  $F_1 = Av^2$  – сила динамічного опору, що викликана інерцією часток середовища, приймається пропорційною квадрату швидкості проникнення;

$F_2 = Bv$  – сила в'язкості середовища, яка виникає за рахунок сил тертя між частками середовища, пропорційна швидкості проникнення;

$F_3 = C$  – сила статичного опору, залежить лише від міцності перешкоди.

У виразі (25)  $A$ ,  $B$ ,  $C$  коефіцієнти, які залежать від багатьох параметрів: властивостей матеріалу, форми ударника і т.д.

Запишемо другий закон Ньютона із врахуванням виразів (24), (25) він набуде вигляду

$$q \frac{dv}{dt} = Av^2 + Bv + C. \quad (26)$$

При необхідності із виразу (26) можна отримати більшість розглянутих вище формул, прийнявши відповідний закон залежності сили опору.

Остаточно можна зауважити, що практично всі емпіричні формули по оцінці глибини проникнення снарядів у захисну споруду, відповідають різним фізичним уявленням процесу взаємодії між снарядом та захисною спорудою. А тому при використанні того чи іншого виразу необхідно детально аналізувати вхідні параметри, зокрема – швидкість снаряду, матеріал споруди, форму снаряду і т.д.

Останні дослідження показують, що в загальному сила опору середовища відповідає більш загальному закону у вигляді

$$F = \sum_{i=1}^n a_i v^{k_i}, \quad (27)$$

де  $a_i, k_i$  – емпіричні коефіцієнти.

Вираз (27) дозволяє змоделювати більшість із розглянутих формул. Застосування тієї чи іншої формули залежить, в основному від швидкості снаряду. А тому їх використання повинно відбуватися у відповідності з умовами, для яких справедливий закон опору середовища. Розглянуті моделі опору вказують на можливість приведення багатьох експериментальних даних до практично кожної з наведених формул. Це дає можливість розглядати високошвидкісні удари при значно менших швидкостях, та моделювати ударні дії в лабораторіях на звичайних копрах падаючої дії. Приведення результатів експериментів до відповідних швидкостей та умов використання наведених вище виразів, повинно відбуватися згідно закону збереження енергії за виразом

$$m_n v_n^2 = m_e v_e^2, \quad (28)$$

де  $m_e$  – маса експериментального ударника, кг;  $v_e$  – швидкість експериментального ударника, м/с;  $m_n$  – маса снаряду, із значенням, яке відповідає умовам застосування відповідних виразів, кг;  $v_n$  – швидкість снаряду, яка відповідає умовам застосування відповідних виразів, м/с.

**Результати досліджень.** Розглянувши установки для створення динамічних випробувань, можна стверджувати, що отримати достовірні експериментальні данні є доволі складною задачею. Насамперед, це пов'язано з тим, що при динамічних процесах відбувається перетворення одного виду енергії в інший. Для врахування процесу перетворення необхідно враховувати цілу низку факторів. Використання методу Кольського із стержнями Хопкінса, має доволі складну та дорогу конструкцію, до того ж отримані дані потребують великої кількості корегувальних та уточнюючих

коефіцієнтів [8, 9, 10], а розміри зразків мають доволі малі розміри, що вносить необхідність у застосуванні ще й масштабних коефіцієнтів.

Отримані вище залежності, вказують на можливість опису високошвидкісних ударів при низьких швидкостях. Це дає можливість виконувати дослідження на звичайних копрах, з ударником падаючої дії.

Для встановлення необхідних динамічних параметрів високоміцних швидкотвердіючих бетонів та фібробетонів було заплановано провести цілий ряд експериментальних досліджень, а саме:

- дослідження на пробій плит розміром  $100 \times 200 \times 400$  з важкого бетону класу  $C25$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій плит розміром  $100 \times 200 \times 400$  з дрібнозернистого бетону класу  $C80$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій залізобетонних плит розміром  $100 \times 200 \times 400$  з важкого бетону класу  $C25$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій залізобетонних плит розміром  $100 \times 200 \times 400$  з важкого бетону класу  $C80$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій фібробетонних плит класу  $C80$  розміром  $100 \times 200 \times 400$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій залізобетонних плит з фібробетону класу  $C80$  розміром  $100 \times 200 \times 400$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій плит з дрібнозернистого сталеві фібробетону класу  $C80$  розміром  $100 \times 200 \times 400$  у віці 28 діб;
- дослідження на пробій залізобетонних плит з дрібнозернистого сталеві фібробетону класу  $C80$  розміром  $100 \times 200 \times 400$  у віці 28 діб.

Експериментальні зразки плит, призначених для проведення досліджень на пробій, передбачається випробувувати, як вільно лежачу балку на двох опорах, з розрахунковим прольотом  $l=300$  мм. Ударне навантаження прикладається по середині прольоту. Армування експериментальних зразків плит показано на рис. 1. Загальний вигляд копрової лабораторної установки та експериментальних зразків приведено на рис. 2. Для армування зразків прийнята арматура серповидного профілю  $A500$ . Для визначення коефіцієнтів піддатливості проникненню будемо використовувати формулу (2). Приведену швидкість, за якою будемо проводити розрахунки визначимо із рівняння (31), попередньо прийнявши масу відповідних боєприпасів. У нашому випадку  $m_n=4,8$  г (патрон ДШК). Випробування плит на пробій виконувалось при різній висоті ударного бойка, це давало змогу отримувати різну енергію удару. Ударна частина бойка була виконана у вигляді патрона ДШК калібру 12,5. Таким чином для приведених умов, є можливість використати вираз (2), та побудувати графіки залежності глибини проникнення від приведеної швидкості боєприпасів, за якими отримати коефіцієнти піддатливості проникненню. Такі залежності апроксимуються прямими лініями з високим коефіцієнтом кореляції (див. рис. 3).



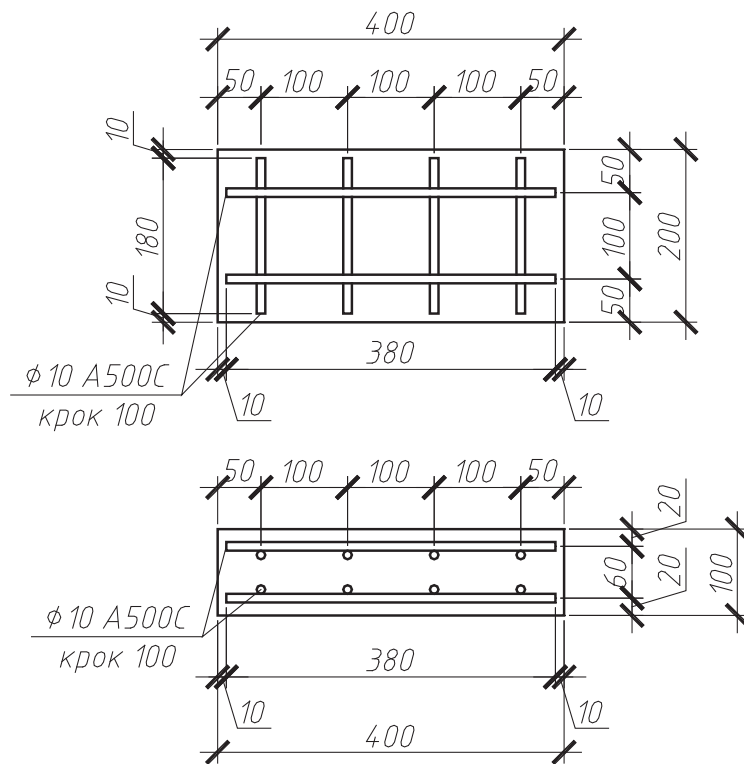


Рис. 1. Схема армування експериментальних плит при дослідженні на пробивання

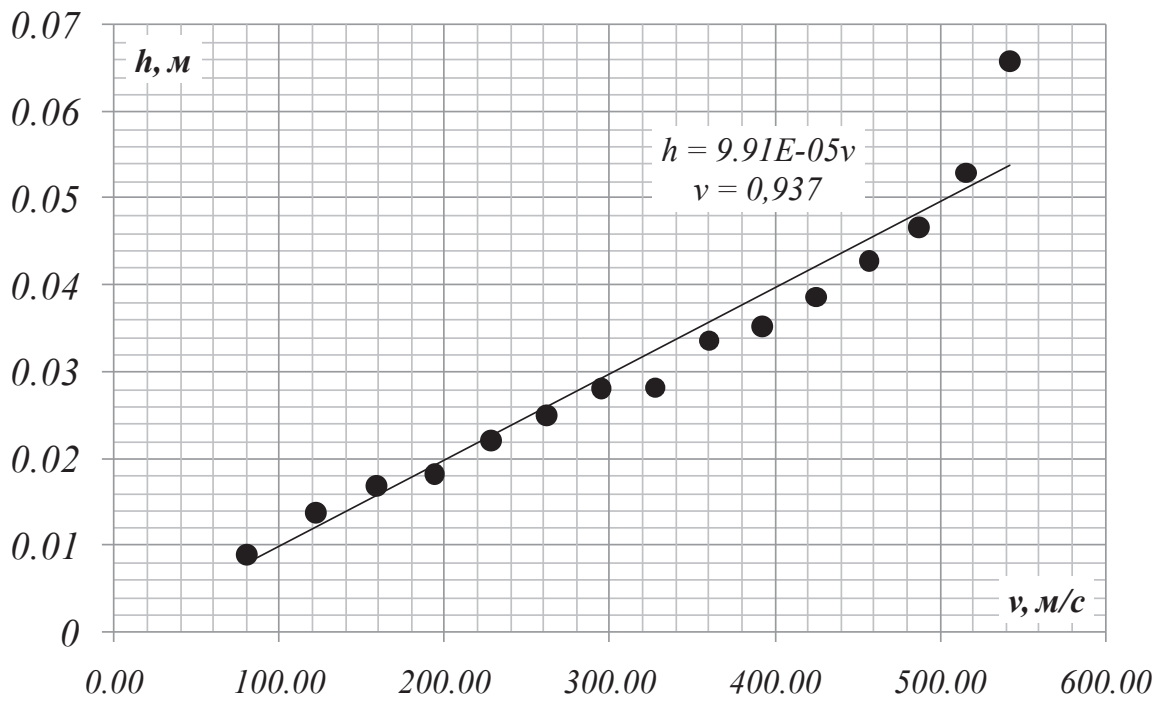
а)



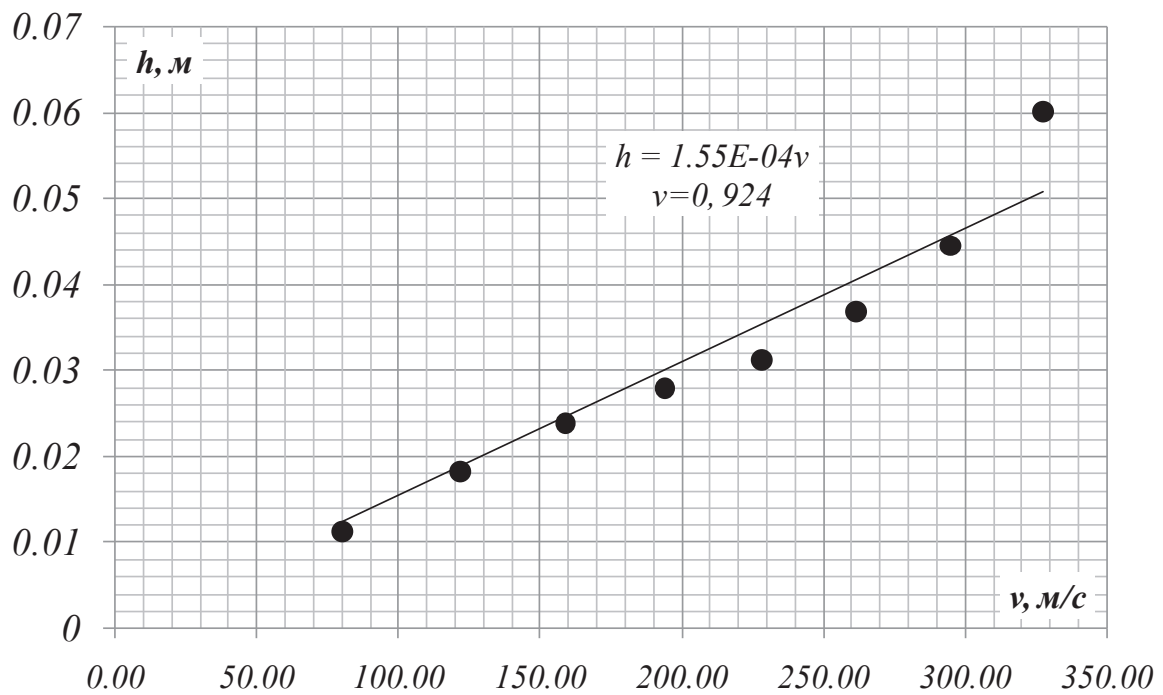
в)



Рис. 2 – Експериментальні дослідження на пробивання: а) загальний вигляд установки при дослідженнях на пробивання; б) загальний вигляд експериментальних зразків безпосередньо перед випробуванням; в) ударний бойок у вигляді патрону ДШК



a)



б)

Рис. 3. Залежність глибини проникнення від приведеної швидкості на момент пробивання: а) залізобетонна плита із дрібнозернистого сталефібробетону С80; б) залізобетонна плита із важкого бетону С25

Найменший коефіцієнт піддатливості проникненню показали залізобетонні плити із дрібнозернистого сталефібробетону класу С80 (табл. 4). Його середнє значення склало  $6,68 \times 10^{-7}$ , це в 1,5 рази менше ніж для залізобетонної плити, із звичайного важкого бетону класу С25, що використовується в сучасних фортифікаційних спорудах. Сталефібробетонні

плити класу С80 показують дещо менші коефіцієнти піддатливості проникненню, у порівнянні із залізобетонними плитами з важкого бетону С25. Це також відкриває певні перспективи у проектуванні захисних споруд з нього.

При проведенні експериментальних досліджень на пробивання, у не армованих плитах спостерігався злом. Всі плити були пробиті наскрізь, окрім залізобетонних плит з дрібнозернистого сталевібробетону класу С80. При дослідженнях на пробій, також, визначали відкол.

У плитах із низькою міцністю ширина відколу була дещо меншою, ніж в плитах із високоміцного бетону. В усіх плитах пробій супроводжувався утворенням та ростом тріщин. Тріщини починались у нижній зоні та поширювались по всьому зразку. При глибоких пробоях тріщина утворювалась у верхній частині плити. При попаданні бойка у розтягнуту зону з тріщинами, зразу проходило наскрізне пробиття. Дане питання потребує додаткового дослідження, так як в окремих випадках спостерігався значний опір матеріалу розтягнутої зони. Загальний вигляд зразків після випробування на пробій показано на рис. 4.

Аналізуючи отримані експериментальні дані спостерігається чітка кореляційна залежність міцності при стиску і коефіцієнта піддатливості проникненню. Це дає можливість записати наступний вираз

$$k_{np} = f(f_c). \quad (29)$$

Даний вираз справедливий лише для певного виду та типу матеріалу, в тому числі бетону. Так для важкого, дрібнозернистого та фібробетону різних видів буде окрема залежність.

Прийняття залежності у такому вигляді дозволяє для бетонів рекомендувати загально відому формулу для визначення приведеної міцності з урахуванням армування

$$f_{c,red} = f_c + \varphi \mu_{xy} f_{s,xy}, \quad (30)$$

де  $f_{s,xy}$  – розрахунковий опір арматури,  $\varphi$  – коефіцієнт ефективності армування, визначається за виразом

$$\varphi = \frac{1}{0,23 + \psi}, \quad (31)$$

$$\psi = \frac{\mu_{xy} f_{s,xy}}{f_c + 10}, \quad f_c, f_{s,xy} - \text{в МПа}, \quad (32)$$

$$\mu_{xy} = \frac{n_x A_{sx} l_x + n_y A_{sy} l_y}{A_{ef} s}. \quad (33)$$

Для дрібнозернистого бетону коефіцієнт  $\varphi$  приймається не більше одиниці.

Таблиця 4

Експериментальні значення коефіцієнтів піддатливості проникненню

№ п/п	Вид конструкції	Глибина проникнення бойка $h$ , м	Енергія удару бойка $E$ , Дж	Коефіцієнт піддатливості проникненню $k_{np} \times 10^7$	Середнє значення $k_{np} \times 10^7$
1	Плити із дрібнозернистого бетон С80	0.0117	154.6	10.98	9.79
2		0.0156	357.3	8.82	
3		0.0245	684.2	9.56	
4	Плити із дрібнозернистого стелефібробетону С80	0.0084	154.6	8.62	7.64
5		0.0122	357.3	7.44	
6		0.0174	608.1	7.28	
7		0.0176	907.1	6.01	
8		0.024	1254.2	6.91	
9		0.0328	1649.5	8.24	
10		0.0202	684.2	7.88	
11		0.0287	1368.4	7.92	
12		0.0376	2052.5	8.47	
13	Залізобетоні плити із дрібнозернистого стелефібробетону С80	0.0089	154.6	9.00	6.68
14		0.0138	357.3	8.11	
15		0.0168	608.1	7.11	
16		0.0182	907.1	6.17	
17		0.0221	1254.3	6.37	
18		0.025	1649.5	6.28	
19		0.0281	2093	6.27	
20		0.0282	2585	5.66	
21		0.0336	3124.3	6.13	
22		0.0352	3712.2	5.89	
23		0.0386	4348.2	5.97	
24		0.0428	5032.4	6.16	
25		0.0466	5716.6	6.29	
26		0.0529	6400.7	6.75	
27		0.0658	7084.9	7.98	

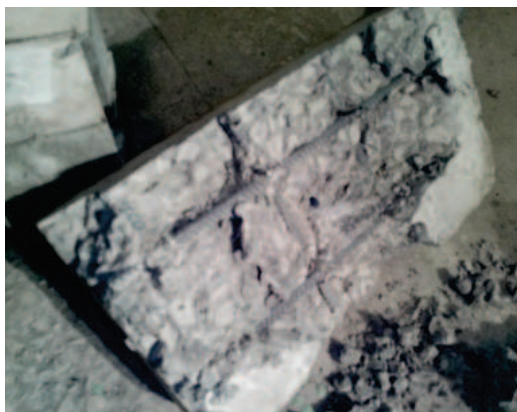
## Експериментальні значення коефіцієнтів піддатливості проникненню

№ п/п	Вид конструкції	Глибина проникнення бойка $h$ , м	Енергія удару бойка $E$ , Дж	Коефіцієнт піддатливості проникненню $k_{np} \times 10^7$	Середнє значення $k_{np} \times 10^7$
28	Плити із важкого бетону С25	0.0117	154.55	10.98	12.01
29		0.0182	202.70	13.04	
30	Залізобетоні плити із важкого бетону С25	0.0112	154.55	10.64	9.99
31		0.0182	357.25	9.82	
32		0.0238	608.10	9.85	
33		0.0278	907.1	9.42	
34		0.0312	1254.2	8.99	
35		0.0368	1649.5	9.24	
36		0.0444	2093	9.90	
37		0.06	2584.6	12.04	



а)

б)



в)

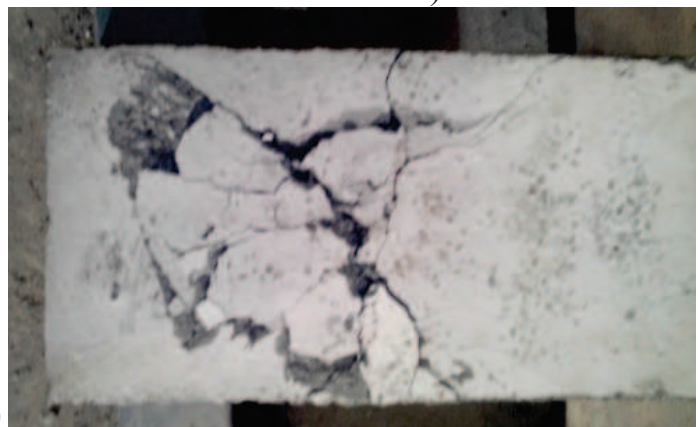


Рис. 4. Експериментальні зразки після випробування на пробій: а) дрібнозернистий фібробетон; б) важкий бетон з армуванням; в) дрібнозернистий фібробетон з армуванням

У виразах (32), (33):

$n_x, A_{sx}, l_x$  – відповідно число стержнів, площа поперечного перерізу і довжина стержня в одному напрямку;  $n_y, A_{sy}, l_y$  – те саме, в іншому напрямку;  $A_{ef}$  – площа перерізу бетону, що знаходиться в середині контуру сіток, (див. рис. 6);  $s$  – відстань між стержнями в напрямку дії динамічного навантаження (див. рис. 5).

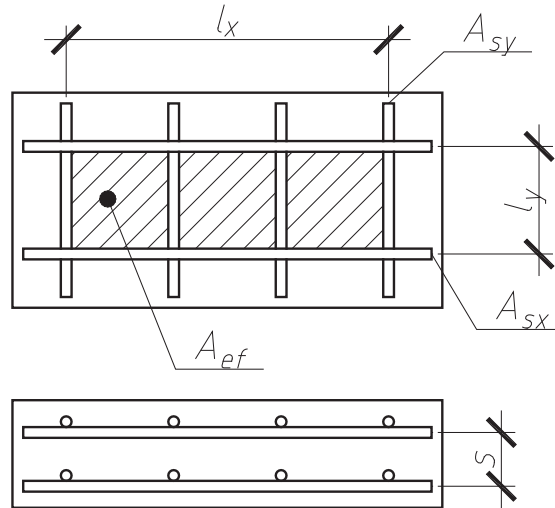


Рис. 5. До визначення приведеної міцності бетону

Армування впливає на міцність бетону за таких умов:

- 1) площі перерізу стержнів на одиницю довжини в одному та в іншому напрямках не повинні відрізнятися більш ніж у 1,5 рази;
- 2) відстань між стержнями одного напрямку повинна бути не більше 150 мм, і не більше 1/3 меншої сторони перерізу елемента.

На основі обробки експериментальних даних можемо рекомендувати наступні залежності для коефіцієнта піддатливості проникненню

- для важкого бетону (від С15 до С100)

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_c) \times 10^{-7}; \quad (34)$$

- для дрібнозернистого бетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (13,75 - 0,05 f_c) \times 10^{-7}; \quad (35)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_c) \times 10^{-7}. \quad (36)$$

При необхідності врахування армування у вирази (34)-(36) необхідно підставляти приведені значення міцності бетону визначене за формулою (30).

**Висновки.** 1. Виконані комплексні дослідження високоміцних бетонів та фібробетонів на пробивання.

2. Показана можливість отримання достовірних даних при високошвидкісних ударах за значно менших швидкостях, та моделювання ударних дій в лабораторіях на звичайних копрах падаючої дії.

3. Отримані експериментально коефіцієнти піддатливості проникненню для бетонів та фібробетонів.

4. Встановлені формули визначення коефіцієнтів піддатливості проникненню для бетонів та фібробетонів.

5. Експериментально та теоретично обґрунтовані коефіцієнти піддатливості проникненню армованих елементів з бетону та фібробетону.

1. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, – 1970, 274 с. 2. Баландин В.В. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 75 (3). Нижний Новгород, 2013. – С. 232-237.

3. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпляк О.Г., Югов Н.Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. – Томск: STT, 2004. – 466 с. – ISBN 5-93629-183-9.

4. Заломин Д.О. Коэффициент динамического упрочнения сталефибробетона при растяжении // Современные наукоемкие технологии №2. – М.:Издательство АСВ, 2004. – С 150-151.

5. Казаков, Ю.Н. Инженерные решения для строительства «антитеррористических» зданий. Ю. Н. Казаков, Н. Флавицкий, Т. М. Николаева. Монография. – СПб.: СПГАСУ, 2009. – 472 с.

6. Кумпляк О.Г., Копаница Д.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении. – Томск: STT, 2002. – 336 с.

7. Балаганский И.А., Мержневский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004. – 408 с. – ISBN 5-7782-0467-1.

8. Nakan Hansson. Warhead penetration in concrete protective structures. Licentiate Thesis. – Stockholm, 2011. – 188 с.

9. Ламзин Д.А. Высокоскоростное деформирование и разрушение мелкозернистых бетонов. Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Нижний-Новгород, 2014. – 161 с.

10. Аветисян Л. А. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий. Дис... канд. техн. наук: 05.23.01. – Москва, 2015. – 215 с.