



УДК 624.012.35:624.072.221



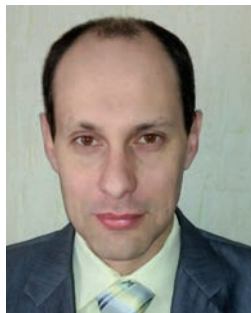
БАБИЧ Є.М.

Д-р технічних наук, проф., зав. каф., Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна,
e-mail: e.m.babich@nuwm.edu.ua,
тел. +38(050) 142-25-04,
ORCID: 0000-0003-1746-9991



ДВОРКІН Л.Й.

Д-р технічних наук, проф., зав. каф., Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна,
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com
тел. +38(068) 353-33-38



КОЧКАРЬОВ Д.В.

Канд. технічних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна,
e-mail: kaf-mbg@nuwm.edu.ua,
тел. +38(066) 257-06-84,
ORCID: 0000-0002-4525-7315



ФІЛІПЧУК С.В.

Канд. технічних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна,
e-mail: s.v.filipchuk@nuwm.edu.ua
тел. +38(068) 226-00-08,
ORCID: 0000-0002-4464-4620

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНІСНИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВАХ

АНОТАЦІЯ

Запропоновано обґрунтовані теоретично та експериментально підтверджені залежності для встановлення міцнісних та деформаційних характеристик високоміцних бетонів при динамічних впливах, що дозволяє визначати характеристики високоміцних бетонів при різних видах напружено-деформованого стану. Доведено можливість встановлення деформаційних характеристик бетонів залежно від міцності на стиск та коефіцієнта динамічного зміцнення, що дозволяє спростити інженерні розрахунки на динамічні навантаження. Отримані залежності підтверджені експериментально.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: міцність, коефіцієнт динамічного зміцнення, граничні деформації бетону, швидкість зміни деформацій, швидкість зміни напружень.

EVALUATION OF STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH CONCRETES UNDER DYNAMIC INFLUENCES

BABYCH Y.M. Dr, Prof., Head of Department, National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: e.m.babich@nuwm.edu.ua, tel. +38(050) 142-25-04, ORCID: 0000-0003-1746-9991

DVORKIN L.Yo. Dr, Prof., Head of Department, National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua, tel. +38 (068) 353-33-38.

KOCHKAREV D.V. PhD, Ass. Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: kaf-mbg@nuwm.edu.ua, tel. +38(066) 257-06-84, ORCID: 0000-0002-4525-7315

FILIPCHUK S.V. PhD, Ass. Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: s.v.filipchuk@nuwm.edu.ua, tel. +38(068) 226-00-08, ORCID: 0000-0002-4464-4620

ABSTRACT

Theoretical and experimentally confirmed dependencies for the establishment of strength and deformation characteristics of high-strength concrete under dynamic influences are proposed. It is accepted to characterize dynamic strength of concrete as the dynamic strengthening coefficient (DEF), which evaluates the ratio of the static strength of concrete to the dynamic deformation of a certain type. The application and substantiation of generally accepted hypotheses and their extension to include their dynamics and influences, in comparison with the empirical expressions obtained for certain conditions, will considerably extend the range of tasks directly related to them. The obtained dependencies allow them to be determined at different types of stress-strain behavior. The main advantage of the proposed method is that there is no need to determine the empirical factors that depend on many parameters and may have different values, even with one type of concrete. To describe the stress-strain behavior under dynamic



loads and influences, not only the strength characteristics but also deformation ones are essential. It is proved to be possible to determine the deformation characteristics of concrete, depending on compressive strength and dynamic strengthening coefficient, which makes it possible to simplify engineering calculations for dynamic loads. The established expression allows to obtain reliable experimental data of the dynamic strengthening coefficient for different types of deformations, obtaining experimental values only for a certain type of deformation. Expressions to determine the dynamic strengthening coefficient and boundary deformations under dynamic influences are theoretically substantiated and obtained. The proposed expressions reveal wide possibilities for conducting generalization and analysis of experimental data under the dynamic influences. Experimental verification of the obtained expressions has been carried out, which showed sufficient accuracy for engineering calculations. The possibility of obtaining reliable data on simple hammer mechanism in the laboratory is substantiated.

KEY WORDS: strength, dynamic strengthening coefficient, concrete boundary deformations, speed of deformation change, speed of stresses change.

ВСТУП. Дослідження особливостей роботи бетонних і залізобетонних елементів та конструкцій при динамічних впливах набувають особливої актуальності. Робота бетону в таких умовах має цілу низку особливостей. Зокрема, під дією значних динамічних навантажень змінюються як міцнісні, так і деформаційні характеристики бетонів. З появою високоміцних видів бетонів постала необхідність у додаткових дослідженнях впливу динамічних факторів на їх характеристики, а також набув актуальності пошук загальних підходів по встановленню розрахункових характеристик бетонів різних видів за дії динамічних навантажень та впливів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ. Дослідженням роботи бетону за динамічних навантажень присвятили свої роботи чимало вчених. Динамічну міцність бетону прийнято характеризувати коефіцієнтом динамічного зміцнення (DEF), який оцінює відношення динамічної міцності бетону до статичної за певного виду деформування. Ю.М. Баженов та його учні [1] відмічають, що коефіцієнт динамічного зміцнення залежить від часу дії навантаження (t). Вони пропонують залежність для визначення коефіцієнта динамічності при стиску, яка справедлива у діапазоні часу дії навантаження $t=1 \div 2000$ м.с

$$DEF_c = 1,58 - 0,35 \lg \tau + 0,07 (\lg \tau)^2, \quad (1)$$

де τ - час навантаження, м.с.

Коефіцієнт динамічності при розтягуванні має аналогічний вираз, але його значення дещо менші

$$DEF = 1,42 - 0,15 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2. \quad (2)$$

Коефіцієнт динамічності при зрізі [1] залежно від часу навантаження встановлюється за формулою

$$DEF_r = 1,42 - 0,14 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2. \quad (3)$$

Більш сучасні дослідження встановлюють коефіцієнт динамічного зміцнення у залежності від швидкості зміни напружень σ або деформацій ε . Так, авторами [2] за результатами статистичної обробки значної кількості експериментальних даних рекомендовані наступні залежності:

- для ударного стиску

$$\begin{cases} DEF_c = 1,212 + 0,0424 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } 1 \times 10^{-5} \leq \dot{\varepsilon} \leq 1 \text{ c}^{-1}; \\ DEF_c = 1,212 + 0,0441 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } 1 \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^2 \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (4)$$

- для ударного розтягу

$$\begin{cases} DEF = 1,9 + 0,181 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } 1 \times 10^{-5} \leq \dot{\varepsilon} \leq 1 \text{ c}^{-1}; \\ DEF = 1,9 + 2,582 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } 1 \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^2 \text{ c}^{-1}. \end{cases} \quad (5)$$

Аналогічні вирази запропоновані у [4, 5]

$$\begin{cases} DEF_c = 1,38 + 0,081 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ DEF_c = 1,14 + 0,031 \lg \dot{\varepsilon} & \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{cases} \quad (6)$$

Норми ЕКБ ФІБ [3] залежності коефіцієнтів динамічності при стисненні та розтяганні в діапазоні швидкостей $30 \times 10^{-6} - 300 \text{ c}^{-1}$ описують наступною системою рівнянь

$$DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ c}^{-1}; \quad (7)$$

$$DEF_c = \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{1/3} \quad \text{при } 30 \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 \text{ c}^{-1},$$

де

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}, \quad (8)$$

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}. \quad (9)$$

У виразах (7), (8): $\dot{\varepsilon}$ - швидкість зростання деформацій, c^{-1} ; f_c - міцність бетону на стиск при статичній дії навантаження, МПа; $f_{c0} = 10$ МПа; $\dot{\varepsilon}_{sc} = 30 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$.

Аналогічні вирази при розтягу мають наступний вигляд

$$\begin{cases} DEF = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{st}} \right)^{1,016\delta_s} & \text{при } 3 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ c}^{-1}; \\ DEF = \beta_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{st}} \right)^{1/3} & \text{при } 30 \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (10)$$



де

$$\delta_s = \frac{1}{10 + 6f_{ct} / f_{c0}}, \quad (11)$$

$$\beta_s = 10^{(7,112\delta_s - 2,33)}. \quad (12)$$

У виразах (10), (11): f_{ct} - міцність бетону на розтяг при статичній дії навантаження, МПа; $\dot{\varepsilon}_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1}$.

Для опису напружено-деформованого стану при динамічних навантаженнях та впливах, суттєве значення мають не тільки міцнісні, а й деформаційні характеристики.

Деформаційні характеристики приводять у залежності від швидкості зростання деформацій та класу бетону. Дослідження, проведені [4, 5], вказують на можливість описання граничних деформацій неармованого бетону при максимальних значеннях напружень за виразами

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{c1,d} = \left(1,3 - 0,0611 \lg \dot{\varepsilon} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} c^{-1}, \\ \varepsilon_{c1,d} = \left(0,5 - 0,23 \lg \dot{\varepsilon} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} c^{-1}. \end{array} \right. \quad (13)$$

Для визначення граничних деформацій неармованого бетону запропоновані такі формули

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 6 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} \lg \dot{\varepsilon} \right) 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} c^{-1}, \\ \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 1,25 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} \lg \dot{\varepsilon} \right) 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} c^{-1}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Розглянуті вирази встановлення динамічних параметрів бетонів мають доволі великий діапазон значень, який виникає внаслідок багатьох факторів. У першу чергу, це різні методи випробувань та різна точність вимірювального лабораторного обладнання, різні розміри зразків та температурно-вологісні умови, різні заповнювачі та в'язучі, з яких виготовлявся бетон тощо.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. Метою досліджень є визначення кореляційних зв'язків між міцністю при стисканні, розтяганні та розколі при дії динамічних впливів, визначення залежності граничних деформацій бетонів різних видів від динамічних впливів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Детальний розгляд запропонованих питань необхідний в першу чергу для того, щоб показати більш сучасні підходи по

встановленню основних залежностей. Застосування та обґрунтування загально прийнятих гіпотез та поширення їх на динамічні явища та впливи, у порівнянні з емпіричними виразами, отриманими для певних умов, значно розширить діапазон задач безпосередньо пов'язаних із ними.

При статичних навантаженнях загальновідомі формули Коші [6], які дозволяють із достатньою точністю встановлювати значення міцності бетону при різного роду деформуванні, у залежності від міцності на стиск:

- міцність на розтяг при згині $0,08(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при розколюванні $0,055(10f_c)^{2/3}$;
- міцність на осьовий розтяг $0,049(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при зрізі $0,093(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при сколюванні $0,0162(10f_c)^{2/3}$.

Узагальнюючи вищенаведені вирази, запропонуємо вираз для визначення міцності бетону на розтяг у вигляді

$$f_t = k(10f_c)^{2/3}, \quad (15)$$

де k - коефіцієнт, який залежить від виду бетону, вмісту фібри, крупності заповнювача і т.д.

Сформулюємо гіпотезу про справедливість формули Коші, записаної у вигляді (15) при динамічних навантаженнях. Тоді можна записати

$$f_{t,d} = f(f_{c,d}) = k(10f_{c,d})^{2/3}, \quad (16)$$

де $f_{t,d}$ - міцність бетону на розтяг при дії динамічних навантажень, $f_{c,d}$ - міцність бетону на стиск при дії динамічних навантажень.

Динамічна міцність бетону при стиску виражається залежністю

$$f_{c,d} = f_c \times DEF_c, \quad (17)$$

де f_c - міцність бетону на стиск при статичному навантаженні, DEF_c - коефіцієнт динамічного зміцнення при стисканні.

Підставимо формулу (17) у вираз (16), та виконаємо нескладні перетворення

$$f_{t,d} = k(10f_c \times DEF_c)^{2/3} = k(10f_c)^{2/3} DEF_c^{2/3}. \quad (18)$$

З урахуванням виразу (15) отримаємо

$$f_{t,d} = f_t \times DEF_c^{2/3}. \quad (19)$$

Виразимо динамічну міцність бетону при розтягу

$$f_{t,d} = f_t \times DEF, \quad (20)$$

де f_t - міцність бетону на розтяг при статичному навантаженні, DEF - коефіцієнт динамічного зміцнення при розтягу.

Остаточо прирівнявши вирази, отримаємо значення коефіцієнта динамічності при розтягу в залежності від його значення при стиску



$$DEF = DEF_c^{2/3}. \quad (21)$$

Аналогічний вираз можна отримати для опору на зріз та розколювання. Для цих видів деформацій він буде однаковим. Це дає можливість отримувати динамічні характеристики лише за певного виду деформування, з використанням простих лабораторних установок.

Для підтвердження справедливості виразу (21) було виконане порівняння із загально відомими виразами Ю.М. Баженова та В.С. Удальцова [1] для розтягу та розколювання (рис. 1). Середнє значення відхилень усереднених експериментальних даних від значень, обрахованих за виразом (21) складає - 0,979%, стандартне відхилення - 2,15%, коефіцієнт варіації - 0,46%. Це вказує на прийнятність запропонованого підходу, а також

можливості проведення випробувань на розколювання з подальшим визначенням необхідних характеристик.

Основна перевага запропонованого методу полягає в тому, що відповідає необхідність у визначенні емпіричних коефіцієнтів, які залежать від багатьох параметрів і можуть мати різні значення, навіть, при одному виді бетону.

Встановлений вираз дозволяє отримувати достовірні експериментальні дані коефіцієнта динамічного зміцнення при різних видах деформацій, отримуючи експериментальні значення лише за певного виду деформацій. Насамперед, це необхідно при виборі експериментальної установки. Так, випробування стандартних зразків на стиск пов'язано з необхідністю створення значної енергії удару. Це створити у лабораторних умовах доволі складно, та неможливо без застосування спеціального устаткування. Установки по випробуванню на зріз потребують набагато меншу енергію удару, та дозволяють отримувати достовірні експериментальні дані в лабораторних умовах на простих копрових установках, а запропоновані вище вирази дають змогу визначати коефіцієнти динамічного зміцнення бетонів при деформаціях різного виду. Проведені експериментальні дослідження повністю підтвердили наведені вище твердження.

Для додаткового підтвердження викладених вище тверджень визначимо відносну похибку виразів визначення коефіцієнтів динамічності при розтягу (2) та розколюванні (3).

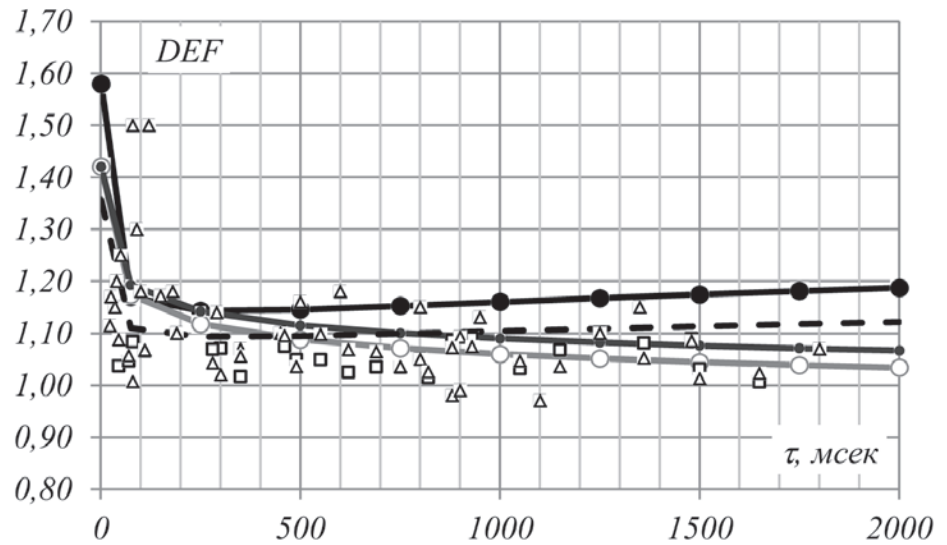


Рис. 1. Коефіцієнти динамічності для важкого бетону:

- коефіцієнт динамічності при стиску за Баженовим Ю.М. (1);
- коефіцієнт динамічності при розтягуванні за Баженовим Ю.М. (2);
- коефіцієнт динамічності при розколюванні за Баженовим Ю.М. (3);
- - - коефіцієнт динамічності при розтягу та розколюванні за виразом (21)
- експериментальні дані по визначенню коефіцієнта динамічності при розтягу;
- △ експериментальні дані по визначенню коефіцієнта динамічності при розколюванні

$$\Delta = \frac{DEF_r - DEF}{DEF} \times 100 =$$

$$= \frac{0,011 \lg \tau}{1,42 - 0,15 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2} \times 100\%. \quad (22)$$

Підставимо у вираз (22) нижню та верхню межу часу дії навантаження та визначимо похибку. При $\tau = 2000$ м.с похибка $\Delta = 3,19\%$, при $\tau = 1$ м.с $\Delta = 0\%$.

Як вказувалось раніше, деформаційні характеристики при дії динамічних впливів мають суттєве значення в сучасному розрахунковому апараті. Для більшості інженерних задач їх використання ускладнене тим, що вони залежать від швидкості зміни деформацій або напружень (вирази 13, 14). Тому вирази визначення граничних деформацій бетону при динамічних впливах приведемо до більш зручних виразів, які у загальному повинні мати наступний вигляд:

$$\varepsilon_{c1,d} = f(DEF_c, f_c), \quad (23)$$

$$\varepsilon_{cu,d} = f(DEF_c, f_c). \quad (24)$$

Шляхом нескладних перетворень виразів (6) і (13) отримаємо формули, аналогічні (23, 24) для знаходження граничних деформацій бетону $\varepsilon_{c1,d}$



$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{c1,d} = \left(2,352 - 0,763 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{c1,d} = \left(9,24 - 7,666 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \end{array} \right. \quad (25)$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{c1,d} = (2,352 - 0,763 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{c1,d} = (9,24 - 7,666 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{array} \right. \quad (26)$$

Встановимо аналогічні формули для $\varepsilon_{cu,d}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 75 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,38) \right) 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 41,67 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,14) \right) 10^{-3} \\ \text{при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{array} \right. \quad (27)$$

Отримані вирази вказують на залежність деформаційних характеристик при динамічних впливах від динамічної міцності.

Максимально можливі деформації бетону $\varepsilon_{cu,d}$ пропонується також визначати за екстремальним критерієм, з урахуванням стійкого руйнування, яке в багатьох випадках задовольняється при напруженнях у бетоні не нижче $0,8f_c$.

ВИСНОВКИ

Теоретично обґрунтовано та отримано вирази для визначення коефіцієнта динамічного зміцнення та граничних деформацій при динамічних впливах. Запропоновані вирази розкривають широкі можливості проведення узагальнення та аналізу експериментальних даних при дії динамічних впливів. Проведено експериментальну перевірку отриманих виразів (рис. 1), яка показала достатню точність для інженерних розрахунків. Обґрунтовано можливість отримання достовірних даних на простому копровому обладнанні в лабораторних умовах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Баженов Ю.М. - М.: Стройиздат, - 1970, 274 с.

2. Кумпьяк О.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпьяк, Д.Г. Копаница. - Томск: STT, 2002. - 336 с.
3. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993. - 461 p.
4. Kufuor K.G. & Perry S.H. Hard impact of shallow reinforced concrete domes. Int. Conf. Structural Impact and Crashworthiness: Int. Conf. - V.2. - London, 1984. - P. 675-686.
5. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные загрузки / [Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпьяк О.Г., Югов Н.Т.]. - Томск: STT, 2004. - 466 с.
6. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін - Київ: Основа, 2007. - 616 с.
7. Заломин Д.О. Коэффициент динамического упрочнения сталефибробетона при растяжении / Заломин Д.О. // Современные наукоемкие технологии. - М.: АСВ, 2004. № 2. - С. 150-151.

REFERENCES

1. Bazhenov Y.M. Concrete under dynamic loading. - М.: Strojizdat, 1970. - 274 p.
2. Kumplyak O.G. & Kopanyca D.G. Prochnosty deformatyvnost zhelezobetonnykh sooruzhenyj pry kratkovremennom dynamycheskom nagruzhenyy. - Tomsk: STT, 2002. - 336 p.
3. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993. - 461 p.
4. Kufuor K.G. & Perry S.H. Hard impact of shallow reinforced concrete domes. Int. Conf. Structural Impact and Crashworthiness: Int. Conf. - V.2. - London, 1984. - P. 675-686.
5. Belov N.N., Kopanica D.G., Kumplak O.G. & Ugov N.T. Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads. - Tomsk: STT, 2004. - 466 p.
6. Dvorkin L.J. & Dvorkin O.L. Fundamentals of Concrete Studies. - Kyiv: Osnova, 2007. - 616 p.
7. Zalomin D.O. The coefficient of dynamic hardening of steelfibre concrete at tension. Modern high technology technologies № 2. - М.: Publishing ASV, 2004. - P. 150-151.

Стаття надійшла до редакції 11.08.2017.