



ЗАСТОСУВАННЯ СПІВВІДНОШЕНЬ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ ОПИСУ ДЕФОРМАЦІЙ БЕТОНУ ПРИ СКЛАДНИХ РЕЖИМАХ БАГАТОВІСНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

В. І. Корсун¹, А. В. Недорезов²

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

E-mail: ¹ korsun_vi@mail.ru, ² nedorezov_a_v@mail.ru

Отримана 9 вересня 2013; прийнята 27 вересня 2013.

Анотація. Представлено результати порівняльних розрахунків деформацій бетону за найбільш розробленими деформаційними теоріями для випадків простих і складних режимів одно-, дво- і тривісного навантаження. Наведено основні співвідношення модифікованого варіанта деформаційної теорії пластичності бетону [4], що розробляється в ДонНАБА. Бетон представлено моделлю ортотропного тіла, ортотропні властивості якого обумовлені напрямленим розвитком мікроруйнувань в структурі, що проявляються у вигляді ефектів стисливості і дилатації. У роботі розглянуто дані експериментальних досліджень в умовах пропорційного і непропорційного дво- і тривісного стиснення. Виконана оцінка відповідності розрахункових величин до дослідних. Показано, що співвідношення деформаційної теорії пластичності бетону і її модифікованого варіанта у загальному випадку можна застосувати для опису деформацій бетону при різних програмах складного (непропорційного) дво- і тривісного зростаючого навантаження без розвантаження. Визначений як найбільш перспективний для подальшого розвитку варіант модифікованої деформаційної теорії пластичності бетону на основі зсуво-відривної моделі руйнування структури бетону. Подальший розвиток ортотропної моделі вимагає проведення спеціальних експериментів для кількісної оцінки складових деформацій, обумовлених процесами мікроруйнування в структурі бетону.

Ключові слова: бетон, об'ємний напружений стан, стисливість, дилатація, деформаційні теорії, режими навантаження, напруження, деформації, міцність.

ПРИМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ МНОГООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. И. Корсун¹, А. В. Недорезов²

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

E-mail: ¹ korsun_vi@mail.ru, ² nedorezov_a_v@mail.ru

Получена 9 сентября 2013; принята 27 сентября 2013.

Аннотация. Представлены результаты сопоставительных расчетов деформаций бетона по наиболее разработанным деформационным теориям для случаев простых и сложных режимов одно-, двух- и трехосного нагружения. Приведены основные соотношения модифицированного варианта деформационной теории пластичности бетона [4], разрабатываемого в ДонНАСА. Бетон представлен моделью ортотропного тела, ортотропные свойства которого обусловлены направленным развитием микроразрушений в структуре, проявляющихся в виде эффектов сжимаемости и дилатации. В работе рассмотрены данные экспериментальных исследований в условиях пропорционального и непропорционального двух- и трехосного сжатия. Выполнена оценка соответствия расчетных величин с опытными. Показано, что соотношения деформационной теории пластичности бетона и ее модифицированного варианта

в общем случае применимы для описания деформаций бетона при различных программах сложного (непропорционального) двух- и трехосного возрастающего нагружения без разгрузки. Определен как наиболее перспективный для последующего развития вариант модифицированной деформационной теории пластичности бетона на основе сдвига-отрывной модели разрушения его структуры. Дальнейшее развитие ортотропной модели требует проведения специальных экспериментов для количественной оценки составляющих деформаций, обусловленных процессами микроразрушений в структуре бетона.

Ключевые слова: бетон, объемное напряженное состояние, сжимаемость, дилатация, деформационные теории, режимы нагружения, напряжения, деформации, прочность.

APPLICATION OF THE DEFORMATION THEORY RELATIONS FOR THE DESCRIPTION OF CONCRETE DEFORMATIONS UNDER COMPLEX MULTIAXIAL LOADING MODES

Volodymyr Korsun¹, Andrii Niedoriezov²

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

E-mail: ¹ korsun_vi@mail.ru, ² nedoriezov_a_v@mail.ru

Received 9 September 2013; accepted 27 September 2013.

Abstract. The results of comparative calculations of concrete strains by the most developed deformation theory for the cases of simple and complex modes of one-, two- and triaxial loading are presented. The basic ratios for the modified version plasticity deformation theory for concrete [4] developed in DonNACA are given. Concrete is presented by the model of an orthotropic solid, orthotropic properties of which are caused by directed development of structure micro fractures, which appear as the effects of compressibility and dilatation. The paper discusses the results of experimental studies in conditions of proportional and non-proportional two- and triaxial compression. Conformity of agreement between the calculated values and the experimental one has been performed. It is shown that the ratio of the concrete plasticity strains theory and its modified version, in general, can be used for the description of concrete deformation under various programs of a complex (non-proportional) two- and triaxial increasing loading without unloading. The modified version of concrete plasticity deformation theory based on the shear rupture fracture model of concrete structure was founded the most promising for further development. The orthotropic model further development require special experiments for the quantitative assessment of deformation components which are caused by the micro fracture processes in the concrete structure.

Keywords: concrete, the volumetric stress state, compressibility, dilation, deformation theory, loading modes, stress, strains, strength.

Железобетонные конструкции ряда производственных зданий и ответственных инженерных сооружений – дымовых труб, градирен, защитных оболочек АЭС и др. – работают в условиях совместных силовых и температурно-влажностных воздействий и испытывают неодноосные (объемные) напряженно-деформированные состояния (НДС). Для них характерны, как правило, сложные (непропорциональные) режимы нагружения. Достоверность оценки НДС таких конструкций в определяющей степени зависит от достоверности принятой расчетной модели деформирования бетона. К настоящему време-

ни нет разработанной в достаточной мере для практических расчетов модели деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния. Это объясняется, главным образом, сложностью описания процессов, связанных с разрушением структуры бетона в процессе нагружения [4, 6, 7, 9–15].

Наиболее удобной для практической реализации из моделей бетона является деформационная теория пластичности бетона Г. А. Гениева [2], соотношения которой устанавливают связи между инвариантами напряженного и деформированного состояния бетона при кратковременном

простом (пропорциональном) нагружении. Модель [2] получила дальнейшее развитие в работах [3, 4, 5]. Е. С. Лейтесом [5] предложено аналитическое выражение для модуля дилатации. В исследованиях [3, 4] модель Г. А. Гениева [2] получила развитие в части учета влияния вида напряженного состояния на основные параметры диаграмм деформирования бетона, а также в части учета направленного развития микроразрушений в структуре бетона – эффектов сжимаемости и дилатации.

Модифицированный вариант деформационной теории пластичности бетона [4] использует нелинейные соотношения между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций в форме, аналогичной соотношениям [2]:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{K(\eta)} + \theta_d, \quad (1)$$

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G(\eta)}, \quad (2)$$

где $K(\eta)$, $G(\eta)$ – соответственно модуль объемного сжатия и модуль деформаций сдвига.

θ_d – составляющая относительного изменения объема бетона, обусловленная эффектом дилатации, с помощью которой учитывается кажущееся увеличение объема бетона при сжатии вследствие микротрещинообразования в его структуре [2]:

$$\theta_d = q(\gamma_i) \cdot \gamma_i^2, \quad (3)$$

$q(\gamma_i)$ – модуль дилатации [2], аналитическое выражение для которого принимается в виде [5]:

$$q(\gamma_i) = \frac{|\sigma_0|}{\tau_i} \cdot \frac{1}{\gamma_i} \cdot \frac{1 - \exp(-\eta^3)}{\eta + \exp(-\eta^3)}, \quad (4)$$

$$\text{где } \eta = \frac{\gamma_i}{\gamma_i}.$$

В формулах (2)...(4) τ_i и γ_i – соответственно интенсивность касательных напряжений и интенсивность деформаций сдвига [1]:

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (5)$$

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (6)$$

где $\bar{\gamma}_i$ – предельное значение γ_i , определяемое в зависимости от предельных значений интенсивности касательных напряжений $\bar{\tau}_i$ и модуля сдвига G :

$$\bar{\gamma}_i = \frac{\bar{\tau}_i}{G(\eta)}. \quad (7)$$

Значение $\bar{\tau}_i$ определяется из принятого условия прочности.

Модули линейных $E(\eta)$, сдвиговых $G(\eta)$ и объемных $K(\eta)$ деформаций бетона определяются выражениями, соответствующими по форме записи соотношениям [2]:

$$E(\eta) = E_b \cdot F(\eta_j);$$

$$G(\eta) = \frac{E_b}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot F(\eta_j);$$

$$K(\eta) = \frac{E_b}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \cdot F(\eta_j). \quad (8)$$

В модели [3] функция $F(\eta_j)$ принята зависящей от вида напряженного состояния:

$$F(\eta_j) = \frac{1 - \eta_i / k}{1 + (k - 2) \cdot \eta_i}; \quad (9)$$

где

$$k = k_1 \cdot f(\sigma_o, \tau_i) \geq 1;$$

$$k_1 = E_b \cdot \bar{\varepsilon}_u / R_b; \quad (10)$$

$f(\sigma_o, \tau_i)$ – функция учета вида напряженного состояния, с помощью которой диаграммы деформирования бетона трансформируются в широком диапазоне значений от прямой линии, в случае равномерного двухосного растяжения, до пологой кривой в случаях двух- и трехосного сжатия:

$$f(\sigma_o, \tau_i) = \frac{5}{6} - \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \frac{\sigma_o}{\tau_i}. \quad (11)$$

В формулах (1)...(11): E_b , μ_0 , $\bar{\varepsilon}_u$ – соответственно начальный модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций и предельная сжимаемость бетона; σ_o – среднее напряжение [1].

Функция (9), определяющая закон изменения модулей деформаций бетона, принята в соответствии с рекомендациями европейских норм [8] для одноосного нагружения бетона.

Направленность процесса микротрещинообразования в структуре бетона учитывается на основе разработанной сдвига-отрывной модели разрушения структуры бетона по типу пространственно ориентированных зигзаг-трещин [3].

Компоненты полных деформаций вдоль направлений осей ортотропии при кратковременном нагружении ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) в модели [3] определяются соотношениями:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} - \frac{\mu_0}{E} \cdot (\sigma_j + \sigma_k) + a_i \cdot \Theta_d; \quad (12)$$

(i, j, k = 1, 2, 3),

где a_i (i = 1, 2, 3) – коэффициенты разложения объемной деформации дилатации Θ_d на составляющие вдоль главных осей, значения

которых определяются из предложенной в [3] сдвиго-отрывной модели разрушения структуры бетона по типу «зигзаг-трещин»:

$$a_1 = \frac{(r_{12} + r_{13})^2}{r_{23}^2 + (r_{12} + r_{13})^2};$$

$$a_2 = \frac{r_{23}^2}{r_{23}^2 + (r_{12} + r_{13})^2}; \quad a_3 = 0;$$

$$r_{ik} = \frac{\sigma_i - \sigma_k}{\sigma_1 - \sigma_3}; \quad (ik = 12, 13, 23). \quad (13)$$

При этом выполняется условие:

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1. \quad (14)$$

Тестирование модели выполнено сопоставлением опытных и теоретических кривых деформирования бетона на основе данных экспериментальных исследований В. И. Корсуна [4] в условиях пропорционального и непропорционального двухосного сжатия и данных А. В. Яшина и А. К. Кулманова [6, 7] в условиях пропорционального и непропорционального трехосного сжатия.

В исследованиях [4] при двухосном сжатии реализованы два режима нагружения (рис. 1а):

- пропорциональное (простое) при постоянном соотношении главных сжимающих напряжений $\sigma_3 : \sigma_2 = -3 : -1$ ($\sigma_1 = 0$);
- непропорциональное (сложное), выполняемое в три этапа соответственно траекториям нагружения внутренних слоев сжатой зоны дымовой трубы:

ОА – одноосное сжатие $\sigma_3 : \sigma_2 = -1 : 0$ соответственно собственному весу сооружения до уровня напряжений $|\sigma_3| \approx 0,2R_b$;

АВ – догружение равномерным двухосным сжатием $\Delta\sigma_3 : \Delta\sigma_2 = -1 : -1$, соответствующее догружению температурными напряжениями при неравномерном нагреве сооружения до напряжений $|\sigma_2| = 0,4R_b, |\sigma_3| = 0,6R_b$;

ВС – догружение напряжением сжатия σ_3 до разрушения при $|\sigma_2| = 0,4 \cdot R_b = const$, что отвечает догружению сжатой зоны горизонтального сечения дымовой трубы от действия ветровой нагрузки.

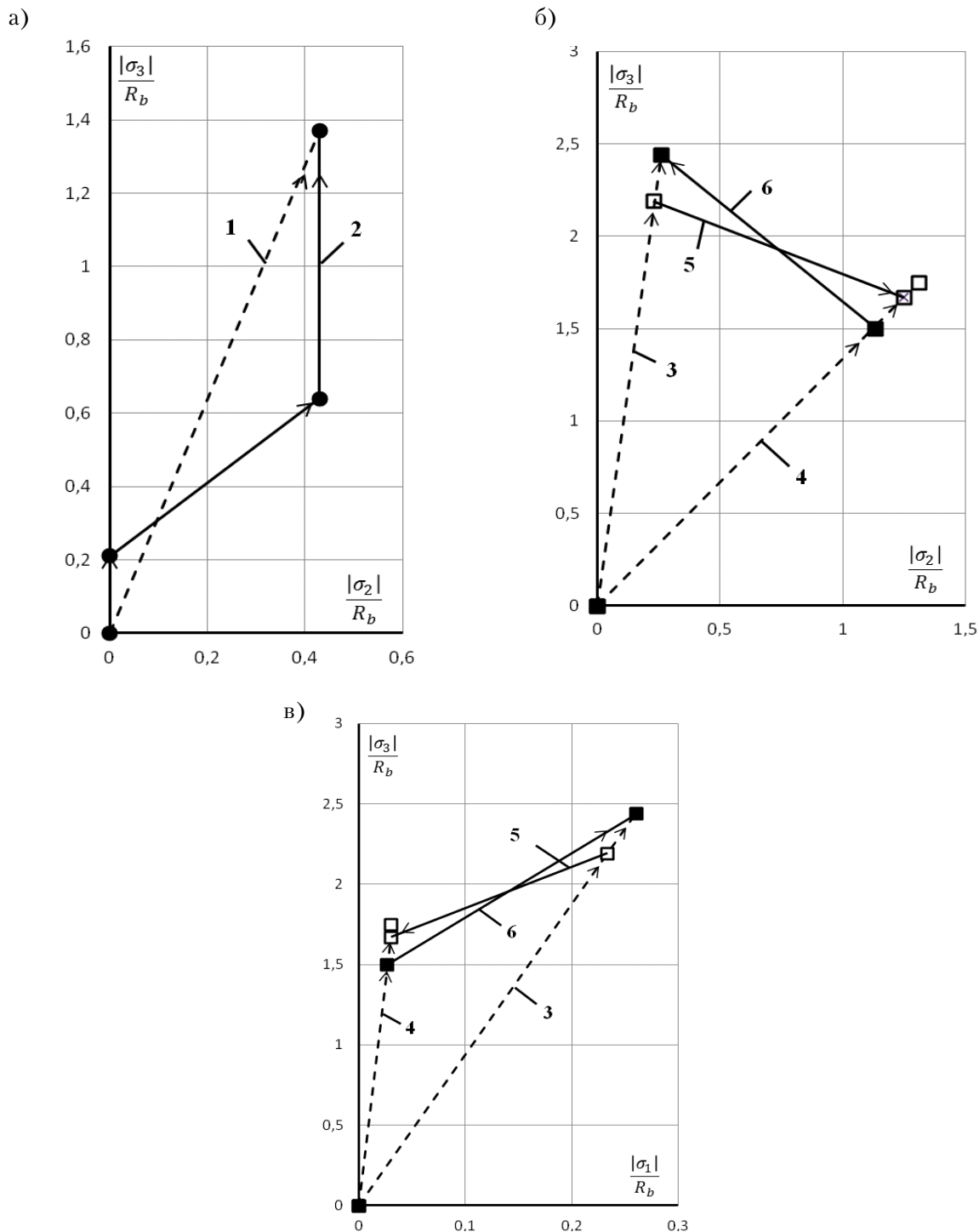
Траектории нагружения образцов в опытах [6, 7] при трехосном сжатии (рис. 3, 4) представлены на рис. 1б, 1в. Образцы первоначально нагружали при постоянных соотношениях $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ по траекториям 2 и 3 до высокого уровня напряжений порядка 0,9 от предельного значения. За-

тем нагружение продолжалось по траекториям 5 и 6 до разрушения образцов. Параметр Лодена при этом изменялся от $-1,0$ до $0,5$ и наоборот, от $0,5$ до $-1,0$. Величина среднего напряжения не была постоянной и изменялась таким образом, чтобы был обеспечен выход вектора нагружения на расчетную предельную поверхность прочности. Нагружение по указанным программам предназначалась для определения влияния траектории нагружения на предельные величины напряжений и деформаций.

Отмечается достаточно близкое соответствие расчетных величин компонент линейных деформаций и относительного изменения объема опытным величинам при простом (пропорциональном) двухосном и трехосном нагружении (рис. 2а; 3а). Учет направленного развития составляющих деформаций дилатации в модели [3] позволяет получать более близкие к опытным расчетные значения деформаций в сравнении с результатами расчета по модели [2]. Для программ сложного (непропорционального) нагружения характерно более существенное превышение (рис. 1) опытных значений деформаций над расчетными (рис. 2б; 4). При этом наибольшие расхождения характерны для высоких уровней нагружения при неравномерном боковом обжатии. Это объясняется проявлением дополнительных необратимых деформаций в бетоне вследствие явлений сжимаемости и дилатации в процессе разрушения его структуры, обусловленных действием компонент тензора девиатора напряжений.

Выводы

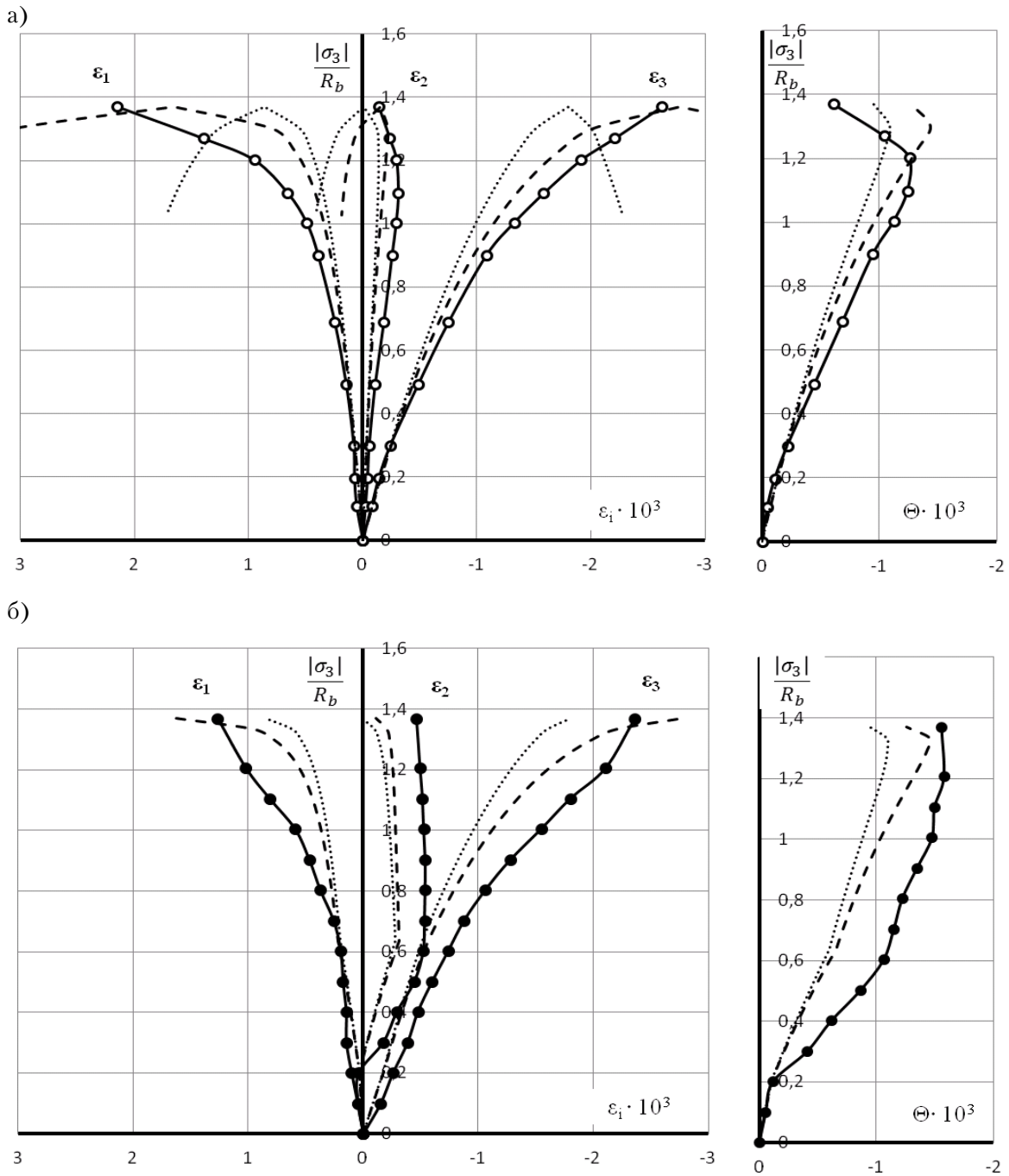
1. Основные закономерности ортотропного деформирования бетона при многоосных нагружениях в определяющей степени зависят от вида напряженного состояния, уровня и последовательности приложения напряжений вдоль осей нагружения.
2. Соотношения деформационной теории пластичности бетона [2] и ее модифицированного варианта [3, 4] позволяют с удовлетворительной точностью описывать деформации бетона при различных программах сложного (непропорционального) двухосного сжатия. В условиях трехосного непропорционального нагружения при существенном изменении



Условные обозначения:

- — простое нагружение по лучу 1 ($\sigma_1 = 0$) в опытах (а) [4] и по лучам 3, 4 в опытах (б, в) [6; 7];
- — сложное нагружение по траектории 2 в опытах (а) [4];
- — сложное нагружение по траектории 3+5 в опытах (б, в) [6; 7];
- — то же, по траектории 4+6 в опытах (б, в) [6; 7].

Рисунок 1. Траектории простого и сложного нагружения бетона в опытах В. И. Корсуна (а) [4] и А. В. Яшина, А. К. Кулманова (б, в) [6; 7].



Опытные данные В. И. Корсуна [4]:

—○— — простое нагружение (а);

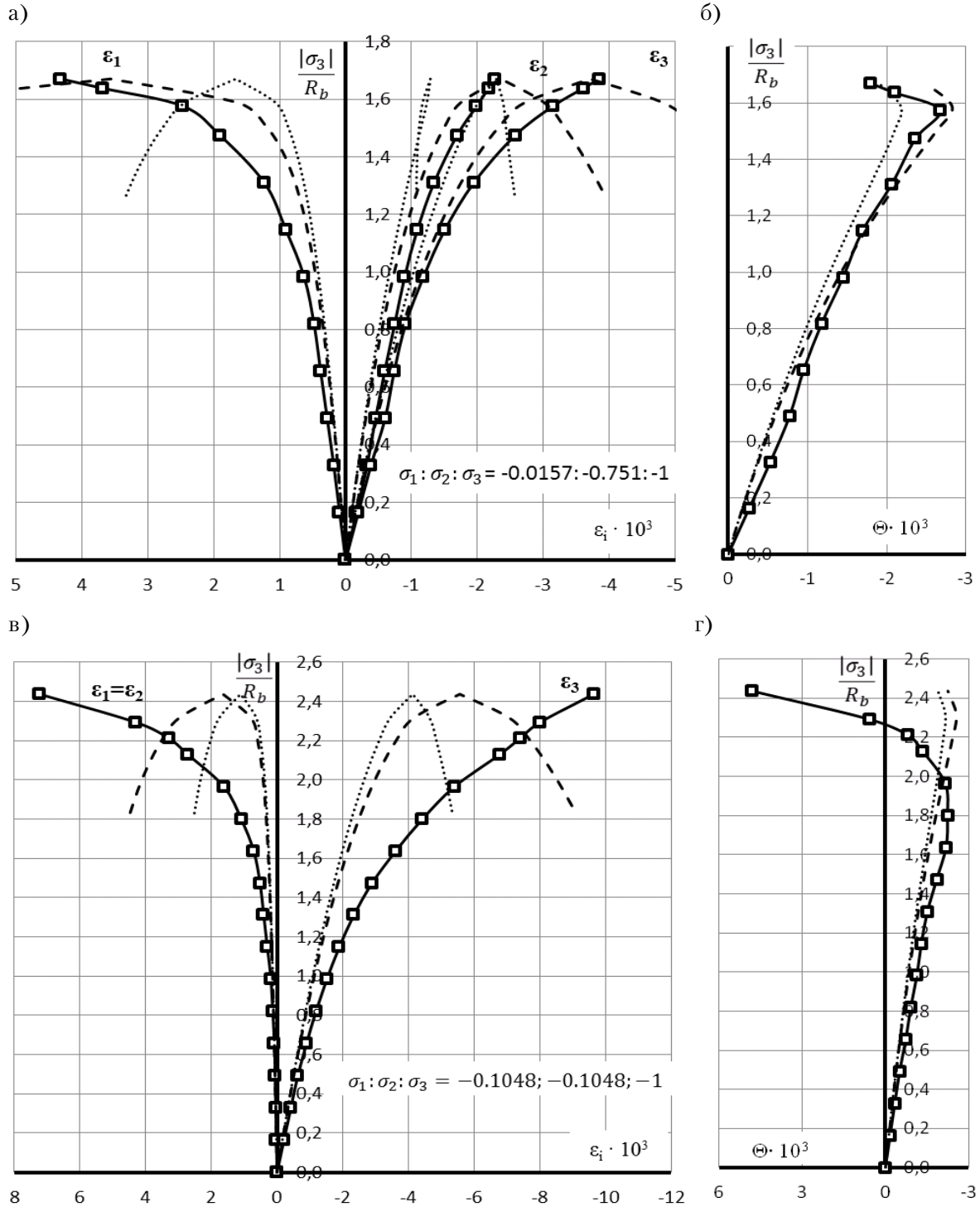
—●— — сложное нагружение (б) по траектории 2 (рис. 1а);

Теоретические значения:

..... — расчет по модели Г. А. Гениева [2];

----- — то же, по модифицированному варианту [3].

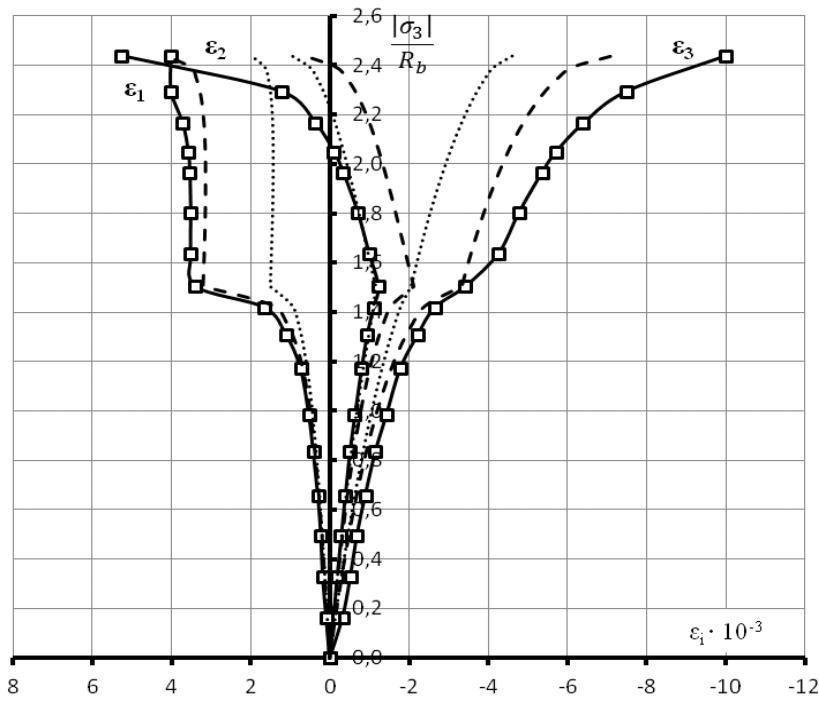
Рисунок 2. Опытные и расчетные данные диаграммы деформирования бетона при простом (а) и сложном (б) напряжениях в условиях двухосного сжатия.



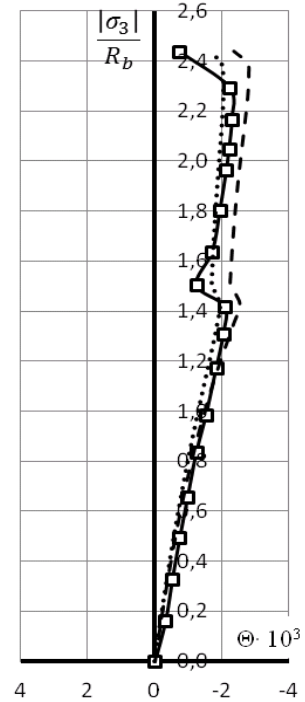
Опытные данные А. В. Яшина и А. К. Кулманова [6, 7]:
 —□— — при трехосном сжатии $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = -0,0157 : -0,751 : -1$ (а, б) и $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = -0,1048 : -0,1048 : -1$ (в, г);
 Теоретические значения:
 — расчет по модели Г. А. Гениева [2];
 - - - - - — то же, по модифицированному варианту [3].

Рисунок 3. Опытные и расчетные диаграммы деформирования бетона в условиях простого нагружения трехосным сжатием.

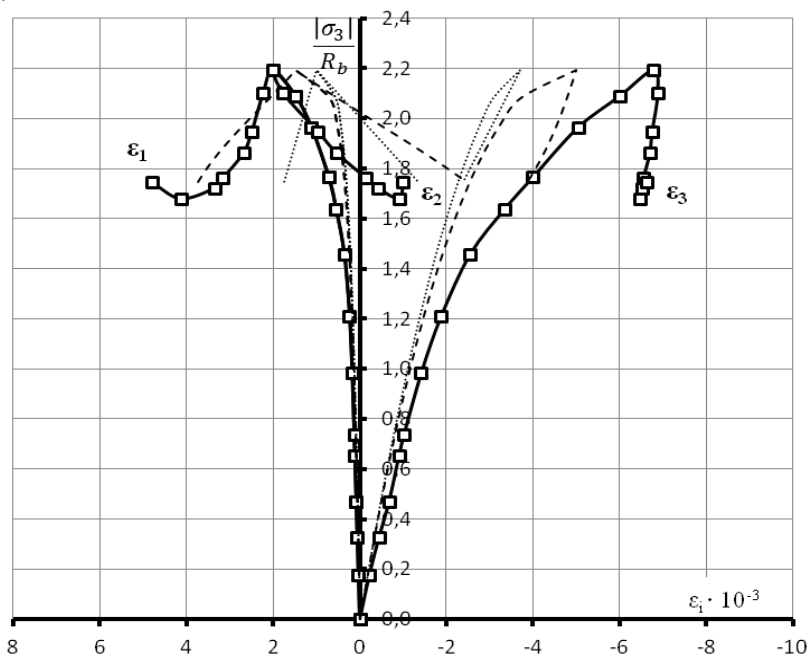
а)



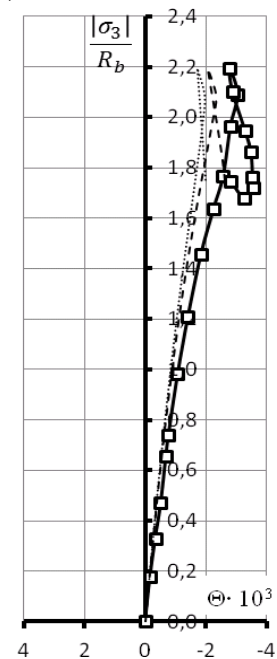
б)



в)



г)



- — опытные данные А. В. Яшина и А. К. Кулманова [6; 7];
 — расчет по модели Г. А. Гениева [2];
 - - - - - — то же, по модифицированному варианту [3].

Рисунок 4. Опытные и расчетные диаграммы деформирования бетона в условиях сложного нагружения трехосным сжатием: а, б – по траекториям 3 + 5 (рис. 2б, 2в); в, г – по траекториям 4 + 6 (рис. 2б, 2в)

- пропорций между напряжениями бокового обжатия различия между расчетными и опытными компонентами деформаций могут составлять более 50 %.
3. Для всех рассмотренных траекторий сложного (непропорционального) нагружения характерно, в сравнении с пропорциональным нагружением, превышение опытных значений линейных компонент деформаций укорочения и удлинения над расчетными. Это может быть объяснено проявлением дополнительных пластических деформаций, обусловленных микроразрушениями в структуре бетона и недостаточно учитываемых в деформационных моделях.
 4. При простых и сложных траекториях нагружения наиболее близкие к опытным результатам дает вариант модифицированной де-

формационной теории пластичности бетона, разрабатываемый в ДонНАСА [3, 4]. Этот вариант является наиболее перспективным для последующего развития, как отражающий основные закономерности связей между напряжениями и деформациями в бетоне и учитывающий направленный характер развития микроразрушений в его структуре.

5. Дальнейшее развитие модели деформирования бетона в части более точного учета пропорций ортотропного деформирования требует проведения серии специальных экспериментов по программам сложного нагружения с целью более точной количественной оценки составляющих деформаций уплотнения и разуплотнения объема бетона, обусловленных процессами микроразрушений в его структуре.

Литература

1. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н. И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.
2. Гениев, Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона [Текст] / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М. : Стройиздат, 1974. – 316 с.
3. Корсун, В. И. К учету направленного развития микроразрушений в ортотропной модели бетона [Текст] / В. И. Корсун // Будівельні конструкції. – К. : НДІБК, 1999. – № 50. – С. 119–124.
4. Корсун, В. И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий [Текст] / В. И. Корсун. – Макеевка : ДонГАСА, 2004. – 153 с.
5. Лейтес, Е. С. К построению теории деформирования бетона, учитывающей нисходящую ветвь диаграммы деформаций материала [Текст] / Е. С. Лейтес // Новые исследования элементов железобетонных конструкций при различных предельных состояниях / Научно-исследовательский институт бетона и железобетона. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1982. – С. 24–32.
6. Яшин, А. В. Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неаодноосных напряженных состояниях [Текст] / А. В. Яшин. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 72 с.
7. Яшин, А. В. Влияние сложного (непропорционального) нагружения на деформации и прочность бетона при трехосном сжатии [Текст] / А. В. Яшин, А. К. Кулманов // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействиях различной длительности /

References

1. Bezuhov, N. I. Foundations of the theory of elasticity, plastic properties and afterflow. Moscow: High School, 1968. 512 p.
2. Geniev, G. A.; Kissiuk, V. N.; Tiupin, G. A. Workability of concrete and reinforced concrete. Moscow: Stroizdat, 1974. 316 p.
3. Korsun, V. I. To the accounting of directed evolution of microlysis in orthotropic concrete model. In: *Building constructions*, 1999, № 50, p. 119–124.
4. Korsun, V. I. Strain-stress state of reinforced concrete structures under the conditions of temperature action. Makiivka: DonSASEA, 2004. 153 p.
5. Leites, E. S. To the theory development of concrete straining, taking into account descending branch of strain diagram of material. In: *Advanced researches of units of reinforced concrete structures under different limit state / Research Institute of Concrete and Reinforced concrete*. Moscow: NIIZhB Gosstroia USSR, 1982, p. 24–32.
6. Yashin, A. V. Recommended guideline for determination of strength and deformation parameters of concrete under nonaxial stress state. Moscow: NIIZhB Gosstroia USSR, 1985. 72 p.
7. Yashin, A. V.; Kulmanov, A. K. The influence of difficult (disproportional) loading on deformation and concrete strength under triaxial compression. In: *Behavior of concrete and units of reinforced concrete structures under forcing of different duration*. Moscow: NIIZhB Gosstroia USSR, 1980, p. 4–17.
8. EN 1992-1:2001 (Final Draft, April, 2002) Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part 1:

- Научно-исследовательский институт бетона и железобетона. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1980. – С. 4–17.
8. EN 1992-1:2001 (Final Draft, April, 2002) Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules for Building [Текст]. – Brussels : CEN, 2002. – 230 p.
 9. Kotsovos, M. D. A fundamental explanation of the behavior of reinforced concrete beams in flexure based on the properties of concrete under multiaxial stress [Текст] / M. D. Kotsovos // *Material of construction*. – 1982. – № 90. – P. 529–538.
 10. Kupfer, H. Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung [Текст] / H. Kupfer // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität*. – Dresden, 1968. – № H.6. – P. 1515–1518.
 11. Lahlou, K. Behaviour of High-strength Concrete Under Confined Stresses [Текст] / K. Lahlou, E.-C. Ai'tcin, O. Chaallal // *Cement & Concrete Composites*. – 1992. – № 14. – P. 185–193.
 12. Shuaib, H. Complete triaxial stress-strain curves for concrete [Текст] / H. Shuaib, P. Surendra // *Proc. ASCEJ Struct.* – 1982. – № 108. – P. 728–742.
 13. Vu*, X. H. Strain measurements on porous concrete samples for triaxial compression and extension tests under very high confinement [Текст] / X. H. Vu*, Y. Malecot, L. Daudeville // *J. Strain Analysis*. – 2009. – Vol. 44. – P. 633–657.
 14. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio [Текст] / X. H. Vu*, Y. Malecot, L. Daudeville, E. Buzaud // *International Journal of Solids and Structures*. – 2009. – Vol. 46. – P. 1105–1120.
 15. Zhen-jun, He. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures [Текст] / Zhen-jun He, Yu-pu Song // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – № 40. – P. 171–178.
- General Rules for Building. Brussels: CEN, 2002. 230 p.
9. Kotsovos, M. D. A fundamental explanation of the behavior of reinforced concrete beams in flexure based on the properties of concrete under multiaxial stress. In: *Material of construction*, 1982, № 90, p. 529–538.
 10. Kupfer, H. Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität*, Dresden, 1968, № H.6, p. 1515–1518.
 11. Lahlou, K.; Ai'tcin, E.-C.; Chaallal, O. Behaviour of High-strength Concrete Under Confined Stresses. In: *Cement & Concrete Composites*, 1992, № 14, p. 185–193.
 12. Shuaib, H.; Surendra, P. Complete triaxial stress-strain curves for concrete. In: *Proc. ASCEJ Struct.*, 1982, № 108, p. 728–742.
 13. Vu*, X. H.; Malecot, Y.; Daudeville, L. Strain measurements on porous concrete samples for triaxial compression and extension tests under very high confinement. In: *J. Strain Analysis*, 2009, Vol. 44, p. 633–657.
 14. Vu*, X. H.; Malecot, Y.; Daudeville, L.; Buzaud, E. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio. In: *International Journal of Solids and Structures*, 2009, Vol. 46, p. 1105–1120.
 15. Zhen-jun, He; Yu-pu, Song. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures. In: *Cement and Concrete Research*, 2010, № 40, p. 171–178.

Корсун Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка методів розрахунку залізобетонних конструкцій для загального випадку об'ємного напруженого стану з урахуванням силових і температурно-вологісних впливів різної тривалості.

Недорезов Андрій Володимирович – асистент кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експериментальні дослідження процесів деформування і руйнування бетону при складних напружених станах.

Корсун Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка методов расчета железобетонных конструкций для общего случая объемного напряженного состояния с учетом силовых и температурно-влажностных воздействий различной длительности.

Недорезов Андрей Владимирович – ассистент кафедры железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: Экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения бетона при сложных напряженных состояниях.

Volodymyr Korsun – Dr.Sc., Professor, Head of the Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: development of analysis for general case of three dimensional stress reinforced concrete structures taking into account the temperature and moisture effects of different duration.

Andrii Niedoriezov – assistant, Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: experimental studies of concrete deformation and fracture under complex stress states.