

Совгира Василиса Васильевна, канд. техн. наук, Одесская государственная академия строительства и архитектуры (г. Одесса, Украина)

Совгира Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Одесская государственная академия строительства и архитектуры (г. Одесса, Украина)

ПОЛНЫЕ ДИАГРАММЫ РАЗВИТИЯ ДЕСТРУКЦИЙ ОДНОРОДНО И НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО БЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ И ВНЕЦЕНТРЕННОМ НАГРУЖЕНИИ БЕТОННЫХ КОРОТКИХ КОЛОНН

© РУП «Институт БелНИИС», 2019
Institute BelNIIS RUE, 2019

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты выполненных исследований механизма интенсивности развития деструкций, псевдопластического деформирования и разрушения однородно и неоднородно сжатого тяжелого бетона призменной прочностью в диапазоне $f_{c15}=22,2...65,6$ МПа при «мягком» и «жестком» режиме нагружения одноосно и внецентренно сжатых бетонных колонн.

Выполнен анализ литературных источников с исследованиями изменения упруго-пластических характеристик ν_c , E_c^{sek} тяжелого бетона с учетом влияния значимых факторов и их изменение с увеличением уровня нагрузки при описании зависимости $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ и $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{cx,e}$. Установлено, что рекомендованные Строительными Нормами ν_{cu} и E_c одноосно сжатого бетона количественно и качественно не отражают характер изменения упруго-пластических свойств неоднородно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки.

Предложены аналитические выражения зависимости изменения коэффициентов упругости (ν_c , $\nu_{c,e}$), секущих модулей упругости (E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$) и коэффициентов интенсивности развития деструкций (K_p , $K_{D,e}$) однородно и неоднородно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки при «мягком» и «жестком»

режиме нагружения исследованных серий тяжелого бетона с использованием ε_{clx} ; $\varepsilon_{clx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$; v_{cu} и $v_{cu,e}$ отражающих процесс изменения упруго-пластических свойств бетона на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования бетона и их существенное отличие при центральном и внецентренном сжатии.

Исследованиями отмечено, что интенсивность развития деформаций в структуре неоднородно нагруженного бетона существенно ниже, чем в одноосно сжатом. Экспериментами установлено характерное изменение по высоте сечения внецентренно сжатых бетонных элементов коэффициента поперечных деформаций $\nu_{c,e}$, свидетельствующее о том, что с увеличением уровня нагрузки коэффициент $\nu_{c,e}$ наиболее сжатой фибры на всех уровнях нагрузки, значительно (в 1,2–1,5 раза) меньше $\nu_{c,e}$ волокон менее нагруженных фибр.

Отмеченное свойство обусловлено изменением внутреннего напряженного состояния с ростом нагрузки и перераспределением напряжений силовыми связями структуры неоднородно сжатого бетона с субмикро- и микроуровней волокон наиболее нагруженной грани по высоте сечения внецентренно сжатых элементов на менее нагруженные волокна. Этот процесс перераспределения напряжений по высоте сечения бетонных колонн как свойство проявляется на изменении поперечной деформации $\varepsilon_{cy,e}$ и, как следствие изменения коэффициента поперечной деформации $\nu_{c,e}$, влияющего на напряженное состояние сжатой зоны подобно внутренним силовым связям, обеспечивающим существенное повышение максимальных напряжений и деформаций в неоднородно сжатом бетоне.

Ключевые слова: коэффициент упругости и развитие деформаций, секущий модуль тяжелого бетона, однородное и неоднородное сжатие, короткие колонны, режим нагружения, полные диаграммы.

Для цитирования: Совгира, В. В. Полные диаграммы развития деформаций однородно и неоднородно сжатого бетона при осевом и внецентренном нагружении бетонных коротких колонн / В. В. Совгира, В. Н. Совгира // Проблемы современного

бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 288–311. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-18>

Vasilisa Sovgira, PhD in Engineering Science, Odessa State Academy of Building and Architecture (Odessa, Ukraine)

Vasiliy Sovgira, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Odessa State Academy of Building and Architecture (Odessa, Ukraine)

DESTRUCTIONS DEVELOPMENT FULL DIAGRAMS FOR UNIFORMLY AND NON-UNIFORMLY COMPRESSED CONCRETE IN TERMS OF UNIAXIAL AND ECCENTRIC LOADING OF SHORT CONCRETE COLUMNS

ABSTRACT

The article presents the results of studies of the intensity of development of destructions, pseudoplastic deformation and destruction of uniformly and non-uniformly compressed heavy concrete with prism strength in the range of $f_{c15} = 22,2 \dots 65,6$ MPa in the “soft” and “hard” loading mode of uniaxially and eccentrically compressed concrete columns.

The analysis of literary sources with studies of changes in the elastic-plastic characteristics of ν_c , E_c^{sek} heavy concrete, taking into account the influence of significant factors and their change with increasing load level when describing the dependence $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ and $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{cx,e}$. It has been established that the ν_{cu} and E_c recommended by the Building Norms of uniaxially compressed concrete do not quantitatively and qualitatively reflect the nature of the change in the elastic-plastic properties of non-uniformly compressed concrete with increasing load levels.

Analytical expressions are proposed for the dependence of the change in elasticity coefficients (ν_c , $\nu_{c,e}$), cross-section elastic modulus (E_c^{sek} , $E_{c,e}^{sek}$) and the intensity factors for the development of destructions (K_p , $K_{D,e}$) of uniformly and non-uniformly compressed concrete and “hard” loading mode of the studied series of heavy concrete using: ε_{dx} ; $\varepsilon_{dx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$; ν_{cu} and $\nu_{cu,e}$, reflecting the process of changing the elastic-plastic properties of concrete in the ascending and descending parts of the

complete concrete deformation diagrams and their significant difference under uniaxial and eccentrically compression.

Studies have noted that the intensity of the development of destructions in the structure of non-uniformly loaded concrete is significantly lower than in uniaxially compressed. Experiments established a characteristic change in the height of the cross section of eccentrically compressed concrete elements of the transverse strain coefficient $\vartheta_{c,e}$, indicating that with an increase in the load level, the coefficient $\vartheta_{c,e}$ of the most compressed fiber at all load levels is significant (1,2-1,5 times) less $\vartheta_{c,e}$ fibers, less loaded fibers.

This property is caused by the change in the internal stress state with increasing load and stress redistribution by force bonds of the structure in non-uniformly compressed concrete from submicro- and microlevels of the fibers of the most loaded face along the height of the cross section of eccentrically compressed elements to less loaded fibers. This process of stress redistribution along the height of the cross section of concrete columns as a property manifests itself in a change in transverse deformation $\varepsilon_{cy,e}$ and, as a result, a change in the transverse deformation coefficient $\vartheta_{c,e}$ affecting the stress state of the compressed zone, similar to internal force connections, providing a significant increase in maximum stresses and strains in non-uniformly compressed concrete.

Keywords: coefficient of elasticity and the development of destruction, secant modulus of heavy concrete, uniformly and non-uniformly compression, short columns, loading mode, full diagrams.

For citation: Sovgira Vasilisa, Sovgira Vasiliy Destructions development full diagrams for uniformly and non-uniformly compressed concrete in terms of uniaxial and eccentric loading of short concrete columns. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 288–311. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-18> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых, внецентренно нагруженных бетонных и

железобетонных конструкций, как правило, сопряжено с уточнением параметров диаграмм деформирования одноосно сжатого бетона и совершенствованием методик трансформирования их на неоднородное напряженное состояние. Исследования в этой области продолжаются.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что какой бы полной ни была информация о поведении одноосно сжатого бетона, она адекватно не отражает НДС неоднородно сжатого бетона, характерного для сжатой зоны изгибаемых и внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций. Правомерность переноса диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$ однородно сжатого бетона и его упруго-пластических характеристик на неоднородно сжатый $\sigma_{c,e} - \varepsilon_{c,e}$ (при изгибе и внецентренном нагружении) оспаривается.

Анализ аналитических выражений, рекомендуемых строительными нормами Украины [1] и большинства зарубежных стран, описывающих диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$ одноосно сжатого бетона, показал, что они прямо или косвенно включают начальный модуль деформаций E_0 или секущий модуль деформаций $E_c^{sek} = E_c \cdot v_{cu}$, где в E_c^{sek} используются значения коэффициента упругости на вершине диаграммы, рекомендуемые строительными нормами $v_{cu} = 0,45 \dots 0,5$.

Сопоставление выполненных исследований из литературных источников [3...6; 14 и др.] и обширных экспериментальных результатов авторов [7, 8] выявили некоторые отличительные особенности в оценке начального E_0 и секущего E_c^{sek} модуля деформаций неоднородно сжатого тяжелого бетона внецентренно нагруженных и изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций и их изменение с ростом уровня нагрузки по сравнению с одноосно сжатым бетоном, вызвавшие противоречивые мнения.

Выполненные исследования свидетельствуют о заметном расхождении в оценке начального модуля деформаций E_0 , отражающего изменение упруго-пластических свойств тяжелого бетона, поскольку предлагаемые эмпирические зависимости не полностью отражают влияние на него таких факторов, как прочность бетона, зерновой состав заполнителей, упругие характеристики заполнителей и цементного камня, количественное

содержание цементного камня в составе бетона и условия его твердения, возраст бетона, высота сечений и величина эксцентриситета, режим нагружения и др. По этой причине, видимо, принятые методы нормирования начального модуля упругости бетона в зависимости от прочности с учетом одного или нескольких факторов не отражают действительные закономерности изменения его величины и, следовательно, являются приближенной оценкой.

Кроме того, начальный модуль деформации E_0 одноосно сжатого бетона существенно отличается от начального модуля деформации фибровых волокон неоднородно нагруженного бетона [3...8] по высоте сечений внецентренно сжатых и изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций, что приводит к искажению количественной оценки напряжений и деформаций неоднородно сжатого бетона в сопоставлении с экспериментальными. Для сближения опытных показателей с экспериментальными авторы работы [3] рекомендуют использовать интегральный модуль деформации сжатого бетона всего сечения на данном уровне нагружения бетонных внецентренно сжатых колонн, вычисляя его как усредненное значение дискретных модулей.

Вопрос экспериментальных исследований полных диаграмм деформирования одноосного сжатого (растянутого) бетона или их корректного трансформирования для расчетов внецентренно сжатых (изгибаемых) конструкций с использованием начального модуля деформаций E_0 или секущего модуля деформаций E_c^{sek} , отражающих нарушение упруго-пластических свойств (разуплотнения) бетона с увеличением уровня нагрузки, является актуальным по настоящее время.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОДНООСНО СЖАТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ

В работах [7...11 и др.] изучено влияние значимых факторов на прочность и деформации одноосно и внецентренно сжатого бетона при «мягком», аналогично испытанию с $d\sigma/dt = \text{const}$, и «жестком», подобно испытанию с падающей нагрузкой при

$d\varepsilon/dt = \text{const}$, режимах нагружений на восходящих и нисходящих участках диаграмм по методике, изложенной в [2; 8 и 10]. Исследованы закономерности субмикро-, микро- и макроразрушений в центрально и внецентренно сжатом бетоне и цементном камне с реализацией полных диаграмм деформирования, характеризующих изменение упруго-пластических свойств материала и корректно отображающих физические процессы развития деформаций в структуре бетона с ростом нагрузки.

Учитывая феноменологические требования к диаграмме $\sigma_c - \varepsilon_c$ (при $\sigma_c \rightarrow 0$, $d\sigma_c/d\varepsilon_c = E_c$ и при $\sigma_c = f_c$, $d\sigma_c/d\varepsilon_c = 0$), предложены аналитические выражения описания полных диаграмм $\sigma_c \sim \varepsilon_c$ одноосно [11, с. 441; (1–3)] и $N_{c,e}/N_{cu,e} \sim \varepsilon_{cx,e}$ внецентренно [11, с. 449; (8–10)] сжатых коротких бетонных элементов. В показателе степени выражений (1–3) использована безразмерная характеристика (n), физический смысл которой раскрывается как $n = f_c/E_c \cdot \varepsilon_{clx} = v_{cu}$, где v_{cu} – максимальный коэффициент упругости (при $\sigma_c = f_c$) тяжелого бетона при осевом сжатии. Выражениями f_c , v_{cu} , v_c , E_c в составе формул (1–3) учитывается влияние значимых факторов, включая прочность бетона, изменение размеров поперечных сечений, режимов нагружений и др. [7...11].

В процессе исследований при ступенчатом нагружении бетонных образцов и контроле изменения скорости прохождения ультразвукового сигнала при сквозном диагональном расположении датчиков и приемников прибора УКБ-1М в уровнях $0,5f_c \leq f_c$ при «мягком» режиме и $0,6f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ при «жестком» режиме нагружения на осциллографе отмечены резкие смещения (всплески) синусоиды. С увеличением уровня нагрузки частота всплесков увеличивалась. Во время выдержки нагрузки на ступени в уровнях $0,5...0,85f_c$ при «мягком» режиме нагружения, в зависимости от прочности тяжелого бетона, всплески прекращались. В уровнях $0,85f_c \leq f_c$ мерцание синусоиды не прекращалось до лавинообразного разрушения образцов, за исключением уменьшения частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени.

При «жестком» режиме нагружения резкие всплески и затухание во время выдержек синусоиды на осциллографе наблюдались

в уровнях $0,6f_c \leq 0,95f_c$. В уровнях $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ мерцание синусоиды не прекращалось до лавинообразного разрушения образцов на отдельные фрагменты. В уровнях $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$, в зависимости от прочности бетона, отмечалось снижение частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени.

Появление всплесков синусоиды по причине некачественного крепления датчиков и приемников к поверхности образцов несостоятельно, так как пьезоэлементы оставались на фрагментах образцов после их разрушения и демонтировались со слоем раствора. При более тщательном изучении причин появления всплесков синусоиды на осциллографе установлено, что мерцание синусоиды является реакцией прибора на динамику разрывов силовых связей в структуре субмикро- и микрообъемов цементного камня и бетона в процессе увеличения нагрузки до следующего, более высокого, уровня. При применении более современных (цифровых) дефектоскопов динамика нарушения структуры в процессе нагружения образцов на высоких уровнях нагрузки не отражалась.

Наблюдаемые процессы нарушения структуры цементного камня и бетона в целом объясняются положениями теории А. А. Гвоздева [12] – установившееся поле начальных напряжений, вызванное структурной капиллярно-пористой неоднородностью изготовленного бетона, взаимодействуя с внутренним полем напряжений, вызванным нагрузкой в теле образца, создает местные концентрации напряжений, приводящие к нарушению сплошности бетона образца. В результате этого при незначительных внешних нагрузках происходят силовые микроразрывы элементов структуры цементного камня и бетона локального характера с развитием субмикро-, микротрещин в отдельных точках микро-, макрообъема образца. Таким образом, одноосно сжатый бетон в результате начальных микроразрушений при малых напряжениях деформируется по длине образца весьма неравномерно. В процессе увеличения нагрузки очередного уровня $0,5f_c \leq f_c$ при «мягком» и $0,6f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ при «жестком» режимах нагружения интенсивно изменяющееся вторичное внутреннее поле напряжений в теле образца, вызванное процессом увеличения усилия очередного уровня, взаимодействуя с установившимся полем напряжений

предыдущего уровня, расширяет объем локальных концентраций напряжений, увеличивая во времени интенсивность динамики силовых микроразрывов элементов структуры цементного камня и бетона локального характера, что отражается характерными всплесками разной интенсивности синусоиды осциллографа с увеличением уровня нагрузки и стабилизации всплесков во время выдержки. В уровнях $0,85f_c \leq f_c$ при «мягком» и $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ при «жестком» режимах нагружения с увеличением уровня нагрузки интенсивность динамики силовых субмикро- и микроразрывов элементов структуры цементного камня и бетона не прекращается, а в уровнях выдержки нагрузки – несколько снижается, что также подтверждается характерными всплесками синусоиды осциллографа разной интенсивности с ростом микротрещин и объединением их в макротрещины, а также во фрагменты магистральных трещин и лавинообразного разрушения.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что механизм деформирования и процесса развития деструкций (разуплотнения) структуры цементного камня и бетона с ростом уровня нагрузки отражается на нелинейном характере изменения коэффициента упругости ν_c и, следовательно, секущем модуле упругости $E_c^{sek} = E_c \cdot \nu_c$, которые используются при определении жесткости внецентренно сжатых и изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций на трещиностойкость и при решении других практических и теоретических задач.

Предложенные [11, с. 441)] аналитические выражения (1...3) позволяют выразить характер изменения коэффициента упругости ν_c , отражающего процесс развития деструкций (разуплотнения) структуры одноосно сжатого цементного камня и бетона с ростом уровня нагрузки на восходящем и нисходящем участке полной диаграммы деформирования бетона, а также определить максимальные (при $\sigma_c = f_c$) значения ν_{cu} для исследованного диапазона прочности $f_{c15} = 22,2...65,6$ МПа.

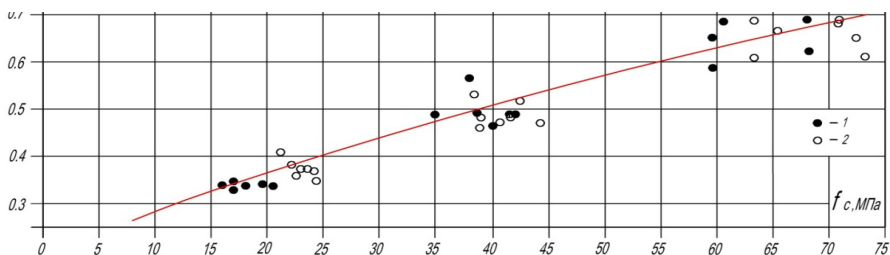


Рисунок 1. Зависимость v_{cu} от прочности тяжелого бетона f_c ;
 --- теоретическая кривая по (1); 1, 2 – опыты [8...10]

На рис. 1 приведена зависимость между опытными значениями максимальных v_{cu} и f_c исследованных серий тяжелого бетона при «мягком» или «жестком» режиме нагружения по методике, изложенной в [2, 8 и 10], она аппроксимирована выражением вида:

$$v_{cu} = (19 + f_{cm15}) / (102 + 0,4 \cdot f_{cm15}), \quad (1)$$

в котором f_{cm15} – призмная прочность бетона базовой призмы с размерами сторон 150x150x600 мм при осевом сжатии, в МПа.

Для исследованных серий тяжелого бетона величина v_{cu} возрастает с увеличением призмной прочности f_c . Эти данные согласуются с исследованиями других авторов. В работе [12] отмечается, что v_{cu} при увеличении прочности тяжелого бетона изменяется в диапазоне от 0,3 до 0,9.

Преобразование выражения $v_c = \varepsilon_c^e / \varepsilon_c$ с учетом [11, с. 441, (1)] позволяет предложить зависимость изменения коэффициента упругости v_{cu} с ростом уровня нагрузки:

$$v_c = \frac{v_{cu} \cdot \sigma_c}{f_c} : \left[1 \mp [1 - \sigma_c / f_c]^{v_{cu}} \right]. \quad (2)$$

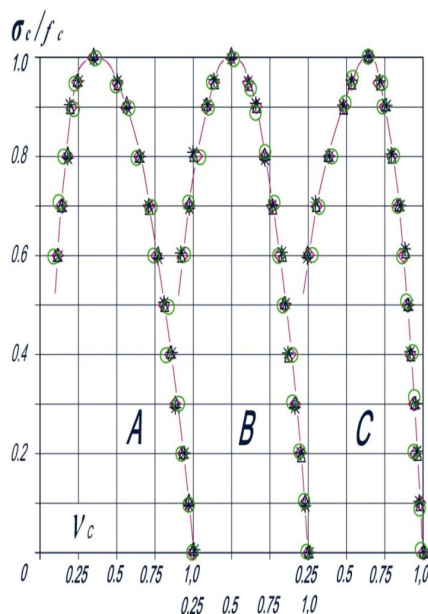


Рисунок 2. Графики зависимости σ_c/f_c - v_c одноосно сжатого тяжелого бетона исследованных серий А, В, С образцов прочностью $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа, отражающие процесс изменения коэффициента упругости с ростом нагрузки

Приведенные на рис. 2 графики изменения коэффициента упругости v_c с ростом уровня нагрузки качественно и количественно отражают нелинейный процесс развития деструкций в структуре цементного камня и бетона, обуславливающий изменение его упруго-пластических свойств и, следовательно, развития псевдопластических деформаций, описываемых приведенными [11, с. 441] аналитическими выражениями (1...3) полных диаграмм зависимости $\sigma_c - \epsilon_c$ одноосно сжатого бетона.

Кривые нелинейной зависимости σ_c/f_c (v_c) по характеру изменения v_c исследованных серий тяжелого бетона показывают, что на восходящих участках диаграмм интенсивность развития деструкций в уровнях f_{crc} ; f_{crc} и $\sigma_c = f_c$, а также на нисходящих участках диаграмм в уровнях $f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$ существенно отличается с увеличением прочности тяжелого бетона.

Разуплотнение технологически образовавшихся вакансий, дислокаций микропор внутри кристаллов, а также микропор и трещин

цементного камня, включая микро- и макродефекты структуры бетона до уровня f_{cr} на восходящем участке полной диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$ и диссипативные процессы интенсивного развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне со слиянием их в фрагменты формирующихся магистральных трещин и расслоение образца на фрагменты с уровня $f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$ нисходящей ветви полной диаграммы деформирования бетона, целесообразно отражать коэффициентом интенсивности развития разрушений K_D .

Аналитическое выражение коэффициента разрушений K_D бетона определено в результате преобразования формулы полных деформаций $\varepsilon_c / \varepsilon_c = \varepsilon_c^e / \varepsilon_c + \varepsilon_c^{pl} / \varepsilon_c$. В которой $\varepsilon_c^{pl} / \varepsilon_c = K_D$ – параметр, характеризующий интенсивность развития разрушений в структуре цементного камня и бетона.

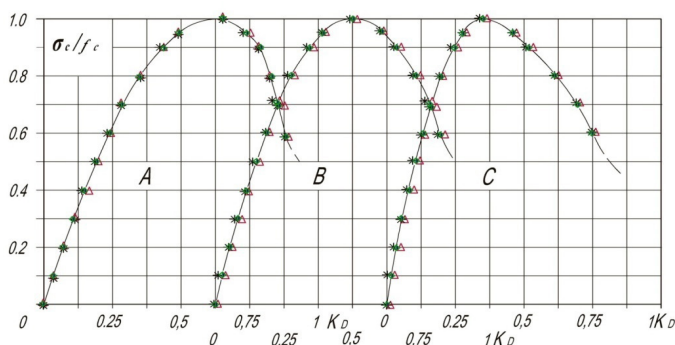


Рисунок 3. Графики зависимости $\sigma_c / f_c - K_D$ интенсивности развития разрушений K_D исследованных серий одноосно сжатого тяжелого бетона прочностью $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа, отображающего процесс развития псевдопластических деформаций и разуплотнения бетона с ростом уровня нагрузки

Преобразование формулы полных деформаций позволяет выделить коэффициент развития разрушения в одноосно сжатом бетоне K_D – критерий, отражающий процесс развития разрушений структуры цементного камня и бетона с увеличением уровня нагрузки, аналитическое выражение которого возможно представить в виде:

$$K_D = (1 - v_c) = 1 - \frac{v_{cu} \cdot \sigma_c}{f_c} : \left[1 \mp \left[1 - \sigma_c / f_c \right]^{v_{cu}} \right]. \quad (3)$$

Графики (рис. 3) зависимости $\sigma_c/f_c - K_D$ отражают количественную и качественную оценку процесса развития деструкций структуры одноосно сжатого цементного камня и бетона на всех уровнях его нагружения. Деструкции бетона в уровнях $0,75f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ сопровождаются интенсивным ростом псевдопластических деформаций (рис. 3) с раскрытием, ростом и слиянием в участки формирующихся магистральных трещин и в уровнях $f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$, в зависимости от прочности бетона, последующим упруго-вязким (серия бетона А) или хрупким (серия бетона В и С) разрушением.

Преобразование аналитических выражений [11, с. 441 (1; 3)] и (2) позволило установить выражение, характеризующее изменение секущего модуля E_c^{sek} на восходящей кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ до достижения $\sigma_c = f_c$ и $\varepsilon_c = \varepsilon_{clx}$ и нисходящей кривой в уровнях $f_c > \sigma_c = 0,8f_c$ и $\varepsilon_{clx} \leq \varepsilon_{cul}$ в виде:

$$E_c^{sek} = \sigma_c / \varepsilon_{cix} \left[1 \mp \left[1 - \sigma_c / f_c \right]^{v_{cu}} \right]. \quad (4)$$

которое отражает изменение упруго-пластических характеристик одноосно сжатого тяжелого бетона с ростом уровня нагрузки.

Из зависимости (4) следует, что наибольшее приближение секущего модуля упругости (E_c^{sek}) к касательному (E_c^k) или начальному (E_{cm}) возможно при малых величинах напряжений $\sigma_c = 0,05 \dots 0,3 f_c$, при которых по восходящей кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$, согласно рекомендациям [2], определяются их значения. Допуская, что бетон на этом участке кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ подчиняется линейному закону, и зависимость между напряжениями и деформациями выражена в виде $\sigma_c = \varepsilon_c^e \cdot E_c$, используя аналитические выражения [11, с. 441 (1; 3)], получили условие $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c^{sek} = \varepsilon_c^e \cdot E_c$, которое позволило определить выражение (4), характеризующее изменение секущего модуля E_c^{sek} на восходящих и нисходящих участках кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ одноосно сжатого бетона при кратковременном нагружении согласно [2].

На (рис. 4) приведены графики изменения секущего модуля E_c^{sek} с ростом уровня нагрузки для исследованных серий при осевом сжатии тяжелого бетона кратковременной статической нагрузкой.

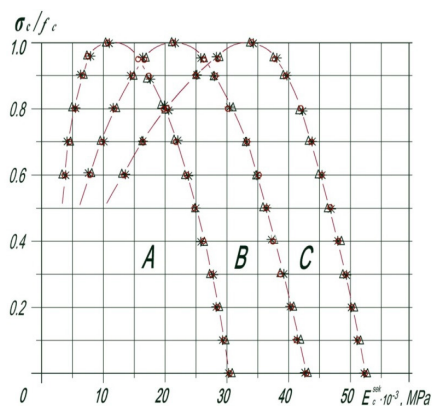


Рисунок 4. Диаграммы изменения секущего E_c^{sek} модуля деформаций с ростом уровня нагрузки исследованных серий А, В и С тяжелого бетона прочностью $f_{cm,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа

Так как наибольшее приближение секущего модуля E_c^{sek} к начальному модулю упругости E_c возможно при малых значениях напряжений, которые отвечают малым значениям деформаций, то погрешность оценки этих деформаций и, соответственно, модуля упругости E_c может достигать существенной величины.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НЕОДНОРОДНО СЖАТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ

Принятие предпосылки об одноосности работы волокон сжатой зоны внецентренно нагруженных ($\sigma_e = 0 \dots 1/6h$) бетонных колонн и перенос, согласно рекомендаций Строительных Норм, физико-механических характеристик одноосно сжатого тяжелого бетона на неоднородно сжатый при сопоставлении внутренних сил (объем эпюры напряжений) с внешним усилием показывает, что в уровнях нагрузки ($0,75 \leq 1 \leq 0,8$) $N_{u,e}$ объемы теоретических эпюр напряжений при «мягких» и «жестких» режимах нагружения на 15–30 % менее внешних (показаний пресса). Использование гипотезы об одноосности работы неоднородно сжатого бетона, как правило, не позволяет уравновесить внутренние (объем эпюры) и внешние силы [4–11]. На работу

неоднородно сжатого бетона внецентренно нагруженных бетонных коротких колонн в предельном состоянии существенное влияние оказывают такие факторы, как прочность тяжелого бетона и режимы нагружения, размеры поперечного сечения и эксцентриситеты нагрузки. Эти обстоятельства отрицают преемственность гипотезы одноосности работы волокон неоднородно сжатого бетона и одновременно свидетельствуют о том, что внецентренно нагруженный бетон работает в иных условиях при сопоставлении с однородно сжатым. В то же время анализ результатов выполненных исследований и учет единства природы деформирования тяжелого бетона позволили описать диаграммы $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{c,e}$ аналитическими выражениями [11, с. 448 (8; 10)], аналогичными связи между $\sigma_c - \varepsilon_c$ осевого сжатия.

Нелинейные опытные и теоретические диаграммы зависимости $N_e / N_{ue} - \varepsilon_{c,e}$ на восходящих и нисходящих участках отражают процессы развития деструкций и деформирования неоднородно сжатого бетона в зависимости от влияния h , e_o , f_c и режима нагружения.

Внецентренное сжатие бетонных коротких колонн привносит отличительные изменения в характер деформирования бетона по высоте сечения. Исследования О. Я. Берга [13] свидетельствуют, что развитие микротрещин в бетоне при наличии градиента напряжений осуществляется в иных условиях, чем при однородном напряженном состоянии. Наши исследования бетонных коротких колонн при внецентренном сжатии показывают, что с увеличением уровня нагрузки их деформирование сопровождается прогрессирующим развитием деструкций как в сжатом, так и в растянутом бетоне.

Микроразрывы силовых связей структуры бетона наиболее сжатой зоны образцов в процессе нагружения фиксируются на разных уровнях нагрузки в широком диапазоне – $(0,2N_{ue} \leq N_{ue} \leq 0,85N_{ue})$ в зависимости от: вида и f_c бетона; режима нагружения; e_o нагрузки; размеров сечения (h) образцов.

Возникающие микроразрывы силовых связей структуры бетона и, как следствие, субмикро- и микротрещины в бетоне крайних наиболее напряженных волокон внецентренно сжатых бетонных элементов стремятся развиваться вглубь бетона, встречая

на своем пути менее нагруженные слои бетона с создавшимся вторичным внутренним полем напряженного состояния, которое препятствует дальнейшему развитию трещин. Кроме того, образовавшиеся субмикро- и микротрещины на своем пути встречают поры, капилляры, дислокации, зерна заполнителей с обходящими трещинами, а также с полем собственного напряженного состояния, которое активно участвует в перераспределении напряжений с устья движущейся микротрещины, препятствуя тем самым ее дальнейшему развитию. С приложением усилия очередной ступени устья трещин прорастают или обходят тормозящие преграды (круглые поры, капилляры, зерна), продолжают развиваться вглубь, встречая новые преграды с вновь создавшимся полем напряженного состояния с перераспределением возрастающих напряжений на соседние по высоте сечения менее нагруженные волокна, что в конечном итоге приводит к увеличению прочности и деформаций бетона наиболее сжатой зоны образца по отношению к центрально загруженным.

Описанный процесс трещинообразования в тяжелом бетоне при центральном сжатии и наиболее нагруженного волокна при внецентренном сжатии оценивался косвенными методами на основании характера изменения: поперечных $\varepsilon_{cy}(\varepsilon_{cx})$ и объемных $\nu_c(\varepsilon_{cx})$ деформаций; коэффициента развития в бетоне деструкций $K_D(N_e/N_{ue})$; коэффициента поперечных деформаций $\nu_c(\varepsilon_{cx})$ и скорости прохождения ультразвука $\Delta t(\varepsilon_{cx})$ с ростом уровня нагрузки по методике, изложенной в [7–10].

Анализ построенных по результатам исследований графиков зависимостей (ε_{cy} ; ν_c ; Δt) от ε_{cx} и K_D от N_e/N_{ue} показал, что поперечные деформации ε_{cy} одноосно сжатого бетона значительно 1,5...1,75 превышают $\varepsilon_{cy,e}$ при равной продольной ε_{cx} наиболее сжатого волокна во внецентренно сжатых бетонных элементах, а продольные деформации $\varepsilon_{cx,e}$ крайней сжатой фибры при внецентренном сжатии в 1,2...1,85 раза превышают ε_{cx} одноосно сжатых образцов-близнецов при равной поперечной ε_{cy} .

На уровень расположения максимальных точек объемных деформаций θ_c одноосно и внецентренно сжатого бетона при «мягком» и «жестком» режимах кратковременного нагружения оказывает влияние вид напряженного состояния, величина

эксцентриситета нагрузки и прочность тяжелого бетона. Во внецентренно нагруженных образцах точки максимальных θ_c крайних сжатых волокон расположены значительно выше, чем в центрально сжатом бетоне. Наблюдаемое превышение подтверждает гипотезу о существенном влиянии менее нагруженных слоев бетона на развитие поперечных деформаций, вызывающих микроразрушения отрыва в связях структуры бетона крайних сжатых волокон.

Развитие деструкций в структуре цементного камня и бетона с увеличением уровня нагрузки обуславливается особенностями изменения коэффициента упругости, который совместно с начальным модулем упругости ($v_c \cdot E_c = E_c^{sek}$) образует секущий модуль упругости, характеризующий упругопластические свойства бетона на рассматриваемых уровнях нагрузки призматических внецентренно сжатых бетонных коротких колонн.

При описании зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ одноосно сжатого бетона с помощью обобщенной формулы Гука Н. И. Карпенко [14, с. 97 (3.1 и 3.2)] применил секущий модуль упругости. В составе секущего модуля упругости использован коэффициент изменения секущего модуля (v_c), отражающий изменение упруго-пластических свойств одноосно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки.

Внецентренное сжатие бетонных образцов привносит отличие в процесс развития деструкций неоднородно сжатого бетона, которое отражается как на мгновенно упругих, так и на псевдопластических деформациях и, соответственно, на их характеристиках $v_{c,e}$ и $K_{D,e}$.

Преобразование формул (2) изменения коэффициента упругости (v_c) и (3) коэффициента деструкции (K_D) с увеличением уровня нагрузки при одноосном сжатии бетона позволяет описывать диаграммы изменения коэффициента упругости $v_{c,e}$ неоднородно сжатого бетона с ростом нагрузки выражением

$$v_{c,e} = \frac{v_{cu,e} \cdot N_{c,e}}{N_{cu,e}} : \left[1 \mp \left[1 - \frac{N_{c,e}}{N_{cu,e}} \right]^{v_{cu,e}} \right], \quad (5)$$

где $v_{cu,e}$ – уточненный (с учетом $\varepsilon_{clx,e}$) максимальный коэффициент упругости наиболее нагруженного волокна неоднородно сжатого бетона по формуле

$$\nu_{cu,e} = \sigma_{cu,e} / \varepsilon_{clx,e} \cdot E_c, \quad (6)$$

$N_{c,e} / N_{cu,e}$ – уровень нагрузки. Преобразовав выражения (6) и (8; 10) [11, с. 448] и используя гипотезу плоских сечений, получим аналитическое выражение секущего модуля упругости любого волокна внецентренно сжатого бетона при $e_0 = (0 \dots h/6)$

$$E_{c,e}^{sek} = \sigma_{c,e} / \varepsilon_{cix,e} \cdot \left[1 \mp \left[1 - \frac{N_{c,e}}{N_{cu,e}} \right]^{\nu_{cu,e}} \right]. \quad (7)$$

Так как трещинообразованию в одноосно и внецентренно сжатом бетоне предшествует разрыв связей структуры цементного камня и бетона, т. е. нарушение сплошности материала и, как следствие, увеличение псевдопластических продольных и поперечных деформаций, то целесообразно описывать нелинейный характер процесса разрушения элементов структуры неоднородно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки коэффициентом интенсивности развития деструкций $K_{D,e}$ неоднородно сжатого бетона по формуле

$$K_{D,e} = 1 - \nu_{c,e} = 1 - \frac{\nu_{cu,e} \cdot N_{c,e}}{N_{cu,e}} : \left[1 \mp \left[1 - \frac{N_{c,e}}{N_{cu,e}} \right]^{\nu_{cu,e}} \right], \quad (8)$$

где $\nu_{c,e}$ – коэффициент упругости неоднородно сжатого бетона по (5).

В исследованиях отмечается изменение по высоте сечения коэффициентов поперечных деформаций $\nu_{c,e}$ фибровых волокон внецентренно сжатых бетонных элементов с ростом уровня нагрузки $0,15 \dots 0,2 N_{c,e} / N_{cu,e}$, свидетельствующее о том, что коэффициент $\nu_{c,e}$ наиболее сжатой фибры на всех уровнях нагрузки выше $0,2 N_{c,e} / N_{cu,e}$, существенно (в 1,2...1,5 раза) меньше $\nu_{c,e}$ фибр менее нагруженной грани (графики 4 на рис. 5). Отмеченное свойство также наблюдается по характеру изменения коэффициента деструкции $K_{D,e}$ структуры бетона по высоте сечения внецентренно сжатого бетонного элемента (графики 6 на рис. 5), а также скорость прохождения ультразвука $\Delta t(\varepsilon_{cx})$ в неоднородно сжатом бетоне (графики 3 на рис. 5) с ростом уровня нагрузки.

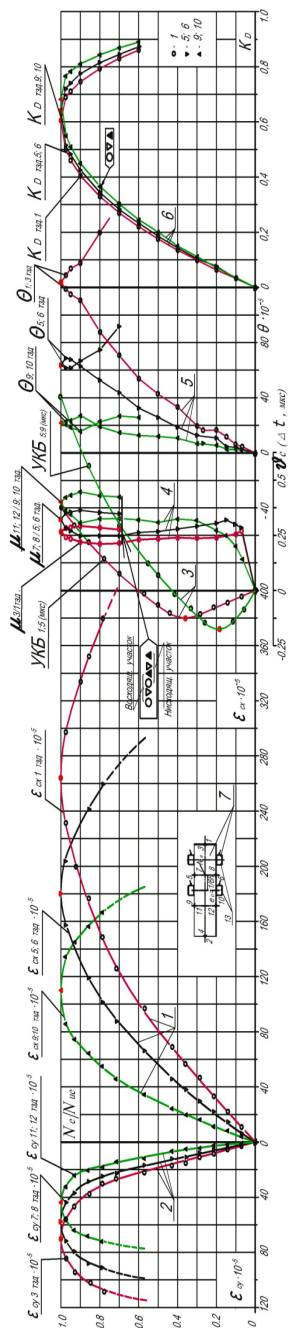


Рисунок 5. Графики, характеризующие развитие деструкций в структуре внецентренно сжатого бетона образцов шестой группы типоразмеров из тяжелого бетона серии В с е₀ = h/6 при «жестком» режиме нагружения по данным изменения продольных $\varepsilon_{сх}$ и поперечных $\varepsilon_{ср}$ деформаций; объемных деформаций ν ; скорости (времени) Δt распространения сквозь бетон импульсов ультразвука; изменения коэффициента Пуассона $\nu_{ср}$ и коэффициента интенсивности развития деструкций $K_{D,e}$ в структуре бетона с ростом уровня нагрузки; **1**; **2** – полные диаграммы $N_{ср}/N_{сх}$ и $N_{сх}/N_{ср}$ при внецентренном сжатии бетонных элементов; **3** – время распространения импульсов ультразвука сквозь неоднородно сжатый бетон; наиболее сжатого волокна фибры **1–5** и между фибрами **5–9**; **4** – изменение $\nu_{ср}$ по высоте сечения внецентренно сжатого элемента с ростом $N_{ср}/N_{сх}$; **5** – изменение $\nu_{сх}$ волокон фибр тзд. **1–3**, **5–6**, **9–10** по высоте сечения колонны с ростом $N_{ср}/N_{сх}$; **6** – изменение коэффициента развития деструкций $K_{D,e}$ в волокнах фибр тзд. **1**, **5–6**, **9–10** по высоте сечения колонн с ростом уровня нагрузки $N_{ср}/N_{сх}$; **7** – схема расположения тензодатчиков (**1–12**) и пьезоэлементов (щупов-13)УКБ

Наблюдаемое свойство обусловлено перераспределением напряжений с наиболее нагруженного фибрового волокна на менее нагруженные силовыми связями структуры неоднородно сжатого бетона на субмикро- и микроуровнях.

Следовательно, исследования напряженно-деформированного состояния бетона внецентренно нагруженных элементов в условиях градиентных эпюр деформаций подтверждают гипотезу [13] о том, что неоднородное линейное сжатие бетонных элементов вызывает в их волокнах сложное напряженное состояние, влияющее на изменение интенсивности развития деструкций в структуре неоднородно сжатого бетона по высоте сечений бетонных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований определено количественное влияние недостаточно изученных факторов (прочности бетона, его упруго-вязких свойств, размеров сечений (h) образцов, эксцентриситета нагрузки, режима нагружения и др.) на интенсивность развития деструкций в структуре цементного камня и бетона, его деформирования с особенностями изменения коэффициента упругости, который совместно с начальным модулем упругости ($v_{c,e} \cdot E_c = E_{c,e}^{sek}$) образует секущий модуль упругости, характеризующий изменение упруго-пластических свойства бетона на рассматриваемых уровнях нагрузки при кратковременном центральном и внецентренном сжатии бетонных коротких колонн с «мягким» и «жестким» режимом нагружения.

Предложенные выражения (1...8) зависимости изменения коэффициента упругости, секущего модуля упругости и коэффициента интенсивности развития деструкции одноосно и внецентренно сжатого бетона с ростом нагрузки при «мягком» и «жестком» режиме нагружения исследованных серий тяжелого бетона с использованием $\varepsilon_{clx,e}$; E_c ; $N_{c,e}/N_{cu,e}$ и $v_{cu,e}$ отражает процесс развития деструкций на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования бетона и его существенное отличие при центральном и внецентренном сжатии.

Практическая оценка коэффициентов упругости ν_c , интенсивности развития деструкций K_D и секущих модулей упругости E_c^{sek} однородно и неоднородно сжатого бетона необходима при решении практических и теоретических задач бетона и железобетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування : ДБН В.2.6.-98:2009. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 96 с.
2. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона : ДСТУ Б В.2.7-217:2009. – Київ. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 16 с.
3. Ганага, П. Н. Закономерность изменения секущего модуля деформации в однородных твердых телах / П. Н. Ганага // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 11. – С. 1–5.
4. Бойко, В. И. Методы аналитического моделирования процессов разрушения на основе использования полных кривых напряжения – деформация ($\sigma_c - \varepsilon_c$) / В. И. Бойко, С. К. Мещанинов, Р. В. Волошин // Сб. научн. трудов ДГТУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 3. – С. 73–84.
5. Бабич, В. И. Исследование модуля деформаций бетона при внецентренном сжатии / В. И. Бабич, Ю. Н. Панчук, С. Р. Жук // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 5. – С. 11–14.
6. Макаренко, Л. П. Практический способ определения модуля упругости и упруго-пластических характеристик бетона при сжатии / Л. П. Макаренко, Г. А. Фенко // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1970. – № 10. – С. 141–147.
7. Кобринец, В. М. Развитие деструкций внецентренно сжатого бетона на основе полных диаграмм / В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Актуальні проблеми інженерної механіки. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної

- конференції 16-19 травня 2017 року. – Одеса : Видавництво «Екологія», 2017. – С. 132–136.
8. Мишутин, А. В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона / А. В. Мишутин, В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Вип. 55. – Одеса : ОДАБА, 2014. – С. 185–197.
 9. Совгира, В. Н. Об упруго-пластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии / В. Н. Совгира, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – Вип. 31. – Одеса : ОДАБА, 2008. – С. 269–274.
 10. Совгира, В. В. Реологическая модель деформирования и разрушения одноосно сжатого бетона на основе полных равновесных диаграмм его упруго- пластических характеристик / В. В. Совгира // Вісник ОДАБА: збірник наукових праць. – Одеса, 2016. – Вип. 62. – С. 233–239.
 11. Совгира, В. В. Полные диаграммы деформирования неоднородно сжатого бетона при внецентренном нагружении коротких бетонных колонн / В. В. Совгира, В. Н. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып.9. – С .436–454.
 12. Гвоздев, А. А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А. А. Гвоздев. – М. : Стройиздат, 1978. – 299 с.
 13. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Стройиздат, 1962. – 96 с.
 14. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 411 с.

Статья поступила: 26.11.2019

REFERENCES

1. *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktsiyi. Osnovnyye polozheniya proektirovaniya* [Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions of the design]: DBN

- V.2.6.-98:2009. Kiev: Ministry of regional development of the Ukraine. 2009. 96 p. (ukr)
2. Betony. *Metody opredeleniya prizmennoy prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona* [Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio]: DSTU B V.2.7-217:2009. Kiev: Ministry of regional development of the Ukraine. 2010. 16 p. (ukr)
 3. Ganaga P. N. *News of universities. Construction and architecture*. 1988. No. 11. pp.1-5. (rus)
 4. Boyko V.I., Meshchaninov S.K., Voloshin R.V. Collection of scientific papers of DGTU. Technical science. 2012. No. 3. pp. 73-84. (rus)
 5. Babich V. I., Panchuk Yu. N., Zhuk S. R. *News of universities. Construction and architecture*. 1986. No. 5. pp. 11-14. (rus)
 6. Makarenko L. P., Fenko G. A. *News of universities. Construction and architecture*. 1970. No. 10. pp. 141-147. (rus)
 7. Kobrinets V. M., Sovgira V. V. *Razvitiye destruktsiy vnetsentrenno szhatogo betona na osnove polnykh diagramm* [Development of destructions of eccentrically compressed concrete on the basis of complete diagrams]. Actual problems of engineering mechanics. Report of the IV International Scientific and Practical Conference. May 16-19, 2017. Odessa: Publishing house «Ecology». 2017. pp. 132-136. (rus)
 8. Mishutin A. V., Kobrinets V. M., Sovgira V. V. *Bulletin of Odessa State Academy of Construction and Architecture*. 2014. No. 55. pp. 185-197. (rus)
 9. Sovgira V. N., Sovgira V. V. *Bulletin of Odessa State Academy of Construction and Architecture*. 2008. No. 31. pp. 269-274. (rus)
 10. Sovgira V. V. *Visnyk ODABA: zbirnyk naukovykh prats*. Odessa. 2016. No. 62. pp. 233- 239. (rus)
 11. Sovgira V. V., Sovgira V. N. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 9. pp. 436-454. (rus)
 12. Gvozdev A. A. *Prochnost, strukturhye izmeneniya i deformat-siyi betona* [Strength, structural changes and deformations of

- concrete]. Moscow: Construction publishing, 1978. 299 p. (rus)
13. Berg O. Y. *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [The physical foundations of the theory of concrete and reinforced concrete strength]. Moscow: Construction publishing, 1962. 96 p. (rus)
 14. Karpenko N. I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General Mechanics model of reinforced concrete]. Moscow: Construction publishing, 1996. 411 p. (rus)

Received: 26.11.2019