

Павлова Инесса Павловна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет» (г. Брест, Беларусь)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ САМОНАПРЯЖЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО БАЗАЛЬНО-ФИБРОБЕТОНА

© РУП «Институт БелНИИС», 2018
Institute BelNIIS RUE, 2018

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены основные экспериментально-теоретические исследования напрягающего базальто-фибробетона с использованием основных положений Дифференциальной Теории Эффективной Среды. В работе приняты определенные допущения о представлении структуры напрягающего фибробетона в виде непрерывной активной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен моноразмерный пассивный заполнитель. При этом моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов. Моделирование процесса расширения базируется на совместном рассмотрении структурообразования с позиций геометрии: моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя приведенного радиуса; химический аспект: транзитная зона в силу специфики структурообразования, resultирующей в повышении пористости, рассматривается как пассивный (нерасширяющийся) компонент, а остальной цементный камень – как активный (расширяющийся) компонент бетона; жесткостный аспект: базальтовая фибра, распадаясь на монофиломенты, создает пространственное (т. н. 3-D) армирование в бетоне и рассматривается в итоге как ограничивающий расширение элемент с определенными жесткостными характеристиками. Совместное применение расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа и базальтовой фибры позволяет

получить химическое преднапряжение структуры и повысить прочностные характеристики бетона (в частности, на растяжение при изгибе). Количество расширяющейся добавки назначается исходя из позиций достижения необходимого уровня самонапряжения. Максимальное содержание базальтовой фибры ограничивается до 5 %, чтобы предотвратить эффект перколяции, но обеспечить формирование условного «пространственного каркаса» из волокон фибры. Предложенная модель позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать основную энергетическую характеристику напрягающего бетона – самонапряжение.

Ключевые слова: напрягающий бетон, базальтовая фибра, теория эффективной среды, структурная модель, химическое преднапряжение, этtringит, самонапряжение.

Для цитирования: Павлова, И. П. Применение теории эффективной среды для прогнозирования самонапряжения напрягающего базальто-фибробетона / И. П. Павлова // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 200–213. <https://doi.org/10.23746/2018-10-13>

Inesa Paulava, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Department of Concrete Technology and Building Materials, Brest State Technical University (Brest, Belarus)

EFFECTIVE MEDIUM THEORY APPLICATION FOR PREDICTION EXPANSIVE BASALT FIBERCONCRETE SELF-STRESSES

ABSTRACT

In present paper experimental-theoretical research for expansive basalt fiberconcrete on the basis of main conditions of Effective Medium Theory are proposed. In study following assumptions are accepted: expansive fiberconcrete is presented as continuous active matrix (cement stone), in the body of which discrete passive aggregate is located.

Modeling system in this case expanded uniformly on the volume without contact discontinuity. Expanding process modeling based on combined consideration of structure formation on the position of geometry: modeling system contained uniformly divided in matrix volume equal-sized spherical aggregate grains with equivalent radius; chemical: transition zone due to specific structure formation, resulted on high porosity, are considered as passive (unexpanded) component, the rest of cement stone – as active (expanded) component; stiffness: basalt fiber due to disintegration on monofilament, create 3-D structure reinforcement in concrete, and, as result, are considered such as restrictive element with specific stiffness characteristics. Combined application of expansive sulfo-aluminate admixture with basalt fiber allow to receive chemical prestressing and strength concrete properties increasing (particularly tensile strength increase). Amount of expansive additive assign proceeding from achievement of necessary self-stress level. Maximum amount of basalt fiber limit to 5% cause to prevent percolation effect, but to provide formation of filament spatial framework. Proposed model allow with adequate degree of accuracy prognoses main characteristic of self-stressed concrete – self-stressing.

Keywords: self-stressed concrete, basalt fiber, Effective Medium Theory, structure model, chemical prestressing, ettringite, self-stress.

For citation: Paulava I. Effective medium theory application for prediction expansive basalt fiberconcrete self-stresses. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 200–213. <https://doi.org/10.23746/2018-10-13> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Применение фибробетонов в строительстве позволяет решить ряд технологических и конструктивных задач: повысить трещиностойкость и снизить износ, увеличить ударную вязкость, повысить прочностные характеристики и т. д. Сегодня фибробетон успешно используется при возведении и для ремонта емкостных сооружений, в полах промышленных зданий с высокими эксплуатационными нагрузками, в качестве дорожных одежд

и т. п. Однако долгое время применение в качестве дисперсного армирования стекловолокна и базальтового волокна сдерживалось недостаточной щелочестойкостью в цементных системах. Применение в качестве вяжущего напрягающего цемента на основе сульфоалюминатных композиций позволяет не только компенсировать усадочные деформации и получить деформации расширения в бетоне, но также создать более благоприятные условия для базальтовой фибры. Применение напрягающего базальтофибробетона позволит осуществить эффект химического преднапряжения за счет одновременного действия эффекта связанного расширения сульфоалюминатного комплекса и трехмерного армирования базальтовой фиброй, которая, распушаясь в бетоне на монофиламенты диаметром 16 мкм, создает пространственную сетку. Одной из основных проектных характеристик напрягающего бетона является величина самонапряжения как показатель энергетического потенциала материала [1–5]. Для прогнозирования величины самонапряжения бетона в данной работе предложена трехкомпонентная пространственная иерархическая модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы, условно разделенной на неактивную транзитную зону вокруг заполнителя и активный расширяющийся цементный камень, а также базальтовой фибры, создающей пространственное ограничение.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

При построении модели в данной работе приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит представлен в виде непрерывной активной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель, представляющий собой зерна заполнителя с оболочкой неактивной транзитной зоны вокруг;
- моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов;
- при прогнозировании процесса расширения для упрощения расчетов в модели был использован ряд допущений, не искажающих физический смысл рассматриваемого явления;

- моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя приведенного радиуса;
- в процессе расчета в качестве пассивной компоненты рассмотрен заполнитель с транзитной зоной вокруг него, для которого согласно основным положениям теории эффективной среды рассчитывают некоторые усредненные деформативные характеристики;
- базальтовая фибра, распадаясь на монофиломенты, создает пространственное (т. н. 3-D) армирование в бетоне и рассматривается в итоге как ограничивающий элемент с определенными жесткостными характеристиками.

Жесткостные характеристики элементов модели и их изменение во времени. В силу специфики структурообразования расширяющегося композита (эффект стены и эффект одностороннего роста) транзитная зона из-за повышенной пористости рассматривается как неактивный компонент, вынужденными деформациями которого с целью упрощения расчетов можно пренебречь. В расчетной модели в качестве заполнителя рассматривается некоторый идеализированный сферический заполнитель с размером зерна, равным размеру зерна заполнителя с транзитной зоной вокруг него, и с усредненными эффективными, упругими характеристиками (рис. 1). Для определения эффективных деформативных характеристик идеализированного моноразмерного заполнителя использованы положения Дифференциальной Теории Эффективной Среды (англ. Differential Effective Medium Theory, в дальнейшем D-EMT) [6, 7].

В соответствии с правилами, сформулированными в D-EMT, частица заполнителя с размером $\bar{r}$ и деформативными характеристиками G_{agg} , K_{agg} , помещенная в транзитную зону размером $\bar{r} + \delta_{itz}$ с деформативными характеристиками G_{itz} , K_{itz} , заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \bar{r} + \delta_{itz}$ и соответствующими деформативными характеристиками (модулем сдвига и объемным модулем) G_{it} , K_{it} .

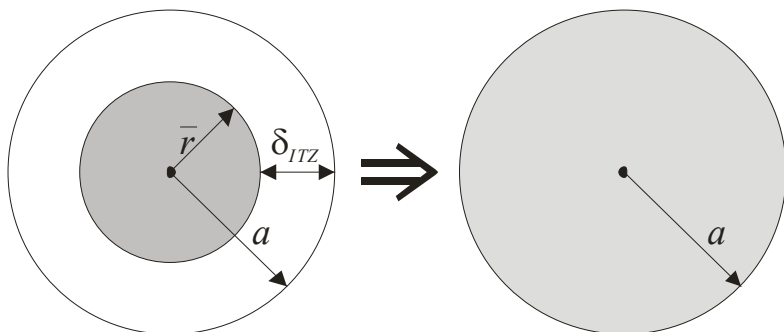


Рисунок 1. Трансформация композитного включения, состоящего из заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг него, в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D-EMT

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_d композитного включения с учетом транзитной зоны находят из решения соответствующего квадратного уравнения:

$$A\left(\frac{G_d}{G_{itz}}\right)^2 + 2B\left(\frac{G_d}{G_{itz}}\right) + C = 0, \quad (1)$$

где A , B , C – коэффициенты, предложенные в работе [7].

Эффективный объемный модуль K_d для данного «приведенного» заполнителя с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$K_d = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1 - p) \left[\frac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + \frac{4}{3}G_{itz}} \right]}. \quad (2)$$

Пользуясь зависимостями (1) и (2), рассчитывают характеристики бетона к некоторому фиксированному моменту времени τ (как правило, к возрасту 28 сут). Однако процессы структурообразования в расширяющемся композите развиваются во времени, в течение которого в бетоне возникают как силовые, так и не силовые воздействия, приводящие к изменению деформаций системы.

При прогнозировании рассматривается процесс расширения во времени, поэтому следующим допущением является вид функции $E(\tau)$. В настоящих исследованиях использована

функция, применяемая для описания упрочняющегося во времени материала:

$$E(\tau) = \beta(\tau)[1 - \delta(\tau)]\bar{E}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала, установленный без учета эффектов старения при $\beta = 1$ и $\delta = 0$; $\beta(\tau)$ – степень упрочнения материала;

$\delta(\tau)$ – степень старения материала. Параметры β и δ варьируются в пределах от 0 до 1 и монотонно возрастают с течением времени.

В работах Laube для описания процессов упрочнения бетонного композита предложена функция $\beta(\alpha)$, описывающая процесс упрочнения материала в зависимости от степени гидратации $\alpha(\tau)$ цементного вяжущего:

$$\beta(\alpha) = \left[\frac{\alpha(\tau) - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{\frac{2}{3}} \geq 0. \quad (4)$$

Напряжения и деформации расширяющейся композитной системы. Для начала рассмотрим наиболее простой с точки зрения реализации решения случай одиночного включения, располагаемого в активной матрице цементного камня. В работе [7] указывается граничная концентрация заполнителя $\text{sagg} = 0,05$, при которой не наблюдается эффекта влияния соседних частиц. Для случая изолированного сферического включения, окруженного оболочкой произвольной толщины, погруженного в однородную матрицу (все три фазы имеют некоторые условные модули и деформации расширения), получены аналитические решения, позволяющие рассчитать напряженно-деформированное состояние расширяющейся системы. В реальной структуре бетона близкое расположение частиц заполнителя будет играть важную роль, однако на начальном этапе расчета и для случая изолированного заполнителя будут сохраняться все закономерности формирования напряжений и перемещений, свойственных композиту. В данном случае в моделируемой системе рассматриваются только перемещения и напряжения, вызываемые расширением активной матрицы.

Для единичного сферического включения, помещенного в бесконечную активную матрицу, при определении

напряженно-деформированного состояния композита использованы стандартные решения осесимметричной задачи с привлечением функции напряжений Airy. В сферических координатах радиальная компонента перемещения, обозначенная u , будет являться функцией от радиуса r . Тогда три диагональные составляющие тензора деформаций (деформации сдвига равны 0) будут соответственно равны: $\varepsilon_r = \partial u / \partial r$, $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = u/r$, где θ и ϕ – углы в сферических координатах.

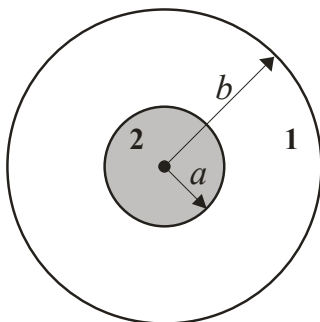


Рисунок 2. Схематическое представление анализируемой системы «пассивный наполнитель в активной матрице»: (1) – активная матрица, $a < r < b$, (2) – наполнитель, $0 < r < a$, где r – радиальная координата

Для решения дифференциальных уравнений использовано решение Лямэ: для i -й фазы общее решение для радиальной компоненты вектора перемещений $u(r)$ будет иметь вид $u(r) = \alpha_i r + \frac{\beta_i}{r^2}$, где α_i и β_i – некоторые неизвестные коэффициенты, различные для каждой фазы, определяемые из соответствующих граничных условий.

$$\sigma_r = 3K_i \alpha_i - 4G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = 3K_i \alpha_i + 2G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0. \quad (6)$$

Относительные деформации расширения, развивающиеся в композитной системе, в общем случае будут равны: $\varepsilon_{0,CE} = \frac{u(r=b)}{b}$ или

$$\varepsilon_{0,CE} = \alpha_m + \frac{\beta_m}{b^3}, \quad (7)$$

где α_m, β_m – коэффициенты, определяемые решением соответствующей системы уравнений.

Получив решение для одиночного включения в соответствии с основными положениями D–ЕМТ, выполняют замену существующей системы, состоящей из одиночного включения и активной матрицы (система «первого уровня»), некоторой идеализированной однородной средой, имеющей в процессе расширения относительные деформации $\varepsilon_{0,CE}$ и жесткостные характеристики:

$$K_0 = K_m + K_m k(K_d, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (8)$$

$$G_0 = G_m + G_m g(G_d, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (9)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_d и G_m/G_d .

В соответствии с положениями D–ЕМТ для данной однородной системы часть объема ($c = 0,05$) заменяем заполнителем и в свою очередь находим K_j и G_j , воспользовавшись соответствующими уравнениями. Затем, подставив в систему уравнений соответствующие значения K_m, G_m и $\varepsilon_m^0 = \varepsilon_{0,м}$, найдем относительную деформацию расширения ε_j ($j = 1, 2, \dots, n$, причем $\sum_{j=1}^n c = c_{agg}$) («второй уровень»). Так, путем последовательной замены, переходя от уровня к уровню, для реальной концентрации заполнителя c_{agg} определяют текущие значения жесткостных характеристик K, G и относительную деформацию расширения ε композитной системы в момент времени τ . Полученная деформация ε соответствует деформации «свободного» расширения композита ε_{CE} .

Поскольку рассматривается бетонный композит, ограничение деформаций расширения которого обусловлено наличием в структуре разветвленной 3-D-сетки, состоящей из базальтового волокна (рис. 3), для расчета прогнозируемой величины самонапряжения в условиях ограничения идеализированный однородный массив с установленными жесткостными характеристиками и деформацией расширения ε_{CE} помещается в оболочку с жесткостью, эквивалентной жесткости упругого ограничения

базальтовой фиброй, косвенно определенной как условный «процент армирования» ρ_l .

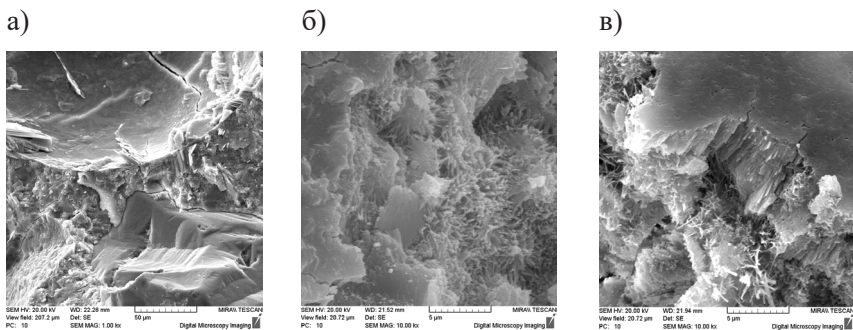


Рисунок 3. Микрофотография образца цементного камня

а) портландцемент; б) напрягающий цемент; в) напрягающий цемент, модифицированный базальтовой фиброй

Как видно из микрофотографий, если цементный камень на основе алитового цемента в большей мере представлен крупными кристаллами портландита в однородной массе кристаллического C-S-H (а), то для напрягающего цемента уже характерно наличие мелкодисперсного иглоподобного этtringита (б), а при введении базальтовой фибры (в) четко наблюдаются связывающие «мостики» в поровом пространстве.

Для модели «расширяющееся ядро в упругой оболочке», воспользовавшись уравнениями (5) и (6), была определена относительная деформация расширения бетона ε_c в условиях внешнего упругого ограничения.

Для случая объемного армирования относительные связанные деформации можно определить по следующей зависимости:

$$\varepsilon_n(\tau) = \frac{1}{1 + \rho_l \frac{K_f}{K_c}} \cdot \varepsilon_{\alpha o}(\tau), \quad (10)$$

где K_c – объемный модуль бетона;

K_f – объемный модуль фибры;

ε_{TOT} – деформация «свободного» расширения бетона.

Тогда величина самонапряжения для рассматриваемой модели определяется по традиционной формуле:

$$\sigma_{\epsilon} = \epsilon_c \rho_l E_f. \quad (11)$$

Для сравнения положений модели были использованы опытные данные [8].

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (11) для случая объемного армирования фиброй, представлено на рисунке 4.

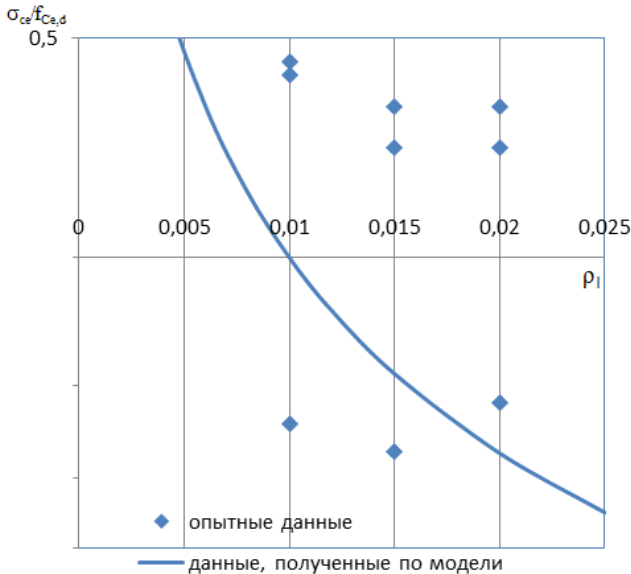


Рисунок 4. Сравнение опытных данных с рассчитанными по модели

Как видно из представленной графической интерпретации зависимостей, невзирая на достаточно обширный разброс экспериментальных данных, модель достаточно адекватно описывает влияние изменения косвенного процента армирования фиброй на величину самонапряжения в условиях объемного ограничения деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К числу несомненных преимуществ представленной модели расширяющегося бетонного композита следует отнести ее универсальность. Данная модель дает возможность прогнозировать итоговые деформации и напряжения для различных условий ограничения (модель позволяет получать адекватные характеристики расширения как в условиях одноосного ограничения [6], так для плоского и объемного ограничений, в том числе стальное армирование и дисперсное армирование фиброй). Также предложенная структурная модель позволяет учитывать изменение входных параметров (изменение сырьевых ресурсов: изменение крупности и концентрации заполнителя, применение напрягающих цементов разной энергоактивности, варьирование водовяжущего отношения, применение дисперсного армирования с разными жесткостными характеристиками и т. п.) и, поэтапно моделируя во времени структурообразование, иметь возможность оценивать свободные и связанные деформации расширения на любом временном этапе до момента стабилизации процесса расширения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красильников, К. Г. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов / К. Г. Красильников, Л. В. Никитина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона: Сб. тр. / Под ред. А. Е. Десова. – Москва: Стройиздат, 1972. – С. 4–20.
2. Литвер, С. Л. Самонапряженный железобетон и его применение в строительстве / С. Л. Литвер // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве: Материалы научн.-техн. совещ. / Центр. Росс. Дом знаний. – М., 1992. – С. 12–17.
3. Михайлов, В. В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер – М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.
4. Панченко, А. И. Критерии оценки расширяющихся вяжущих и бетонов на их основе / А. И. Панченко, Г. В. Несветаев // Проблемы технологии производства

- строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: Сб. тр. / Под ред. Н. П. Блещика и В. В. Тура. – Брест: БПИ, 1998. – С. 179–190.
5. Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 243 с.
 6. Павлова, И. П. Приложение теории эффективной среды к моделированию жесткостных характеристик бетонного композита / И. П. Павлова, В. В. Тур // Строительная наука и техника. – 2005. – № 3. – С. 3–8.
 7. Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E. J. Garboczi, J. Berryman // Mechanics of Materials, 2001. – P. 455–470.
 8. Бондаренко, В. М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Владимир Михайлович Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.

Статья поступила: 23.11.2018

REFERENCES

1. Krasilnikov K., Nikitina L. *Priroda obiomnykh deformatsiy pry tverdeniyi razshiriaiushchikhsya tsementov* [Nature of volume strains on expansive cement hardening] // *Phisico-chimitcheskiye issledovaniya tsementnogo kamnya i betona: Sb. Tr./ Pod red. A. Desova*. Moscow: Stroyizdat, 1972. P. 4–20. (rus)
2. Litver S. *Samonapryiazshonny zshelezobeton i ego primeneniye v stroitelstve* [Self-stressed ferroconcrete and its application in building] // *Opyt i perspektivy primeneniya betonov na napriagaiuschem tsemente v stroitelstve: Materialy nauch.-techn. sovesch.* / Centr. Ross. Dom znaniy. Moscow, 1992. Pp. 12–17. (rus)

3. Michailov V., Litver S. *Razshiriaiushiesiya i napriagaiushchiye tsementy i samonapriazshonnyie konstruktsyi* [Expansive and stressed cements and self-stressed structures]. Moscow: Sroyzdat, 1974. 389 p. (rus)
4. Panchenko A., Nesvetaev G. *Kriteryi otsenki razshiriaiushchikhsya viazshusichih I betonov na ich osnove* [Evaluation indicator for expansive bindings and concrets on its basis] // Problemy tehnologii proizvodstva stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruktsyi, stroitelstva zdaniy i sooruzheniy: ed. by N. Bleschik & V. Tur. Brest: BPI, 1998. Pp. 179–190. (rus)
5. Tur V. *Experimentalno-teoreticheskiye osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstruktsyi pri primeneni napriagaiushchego betona* [Experimental-theoretical basis of prestressing structures on the self-stressed concrete usage]. Brest: BPI, 1998. 243 p. (rus)
6. Pavlova I., Tur V. *Priylozheniye teoryi effektivnoy sredy k modelirovaniyu zshekostnykh charakteristik betonnoogo kompozita* [Effective Medium theory application on modeling concrete composite stiffness characteristics] // *Stroyitelnaya nauka i tekhnika*. 2005. № 3. Pp. 3–8. (rus)
7. Garboczi E. J., Berryman J. G. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations // *Mechanics of Materials*. 2001. Pp. 455–470.
8. Bondarenko V. *Soprotivleniye osevomu szshatiyu staletrubobetonnykh elementov kruglogo secheniya s yadrom iz napriagaiushchego betona* [Steel pipe of circle section with self-stressed concrete kernel axial compression resistance]: dis. ... kand. techn. nauk : 05.23.01. Brest, 2010. 148 p. (rus)

Received: 23.11.2018