

а) «обычный» бетон, б) напрягающий бетон

**Рисунок 4** – Микроструктура транзитной зоны

Как видно из представленных рисунков, транзитная зона обычного бетона представлена достаточно «рыхлой» структурой, сформированной гексагональными кластерами  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , в то время как в структуре напрягающего бетона хорошо видно «ветвистые кристаллы» этtringита, которые играют роль своего рода «стяжек» или «мостиков» в поровом пространстве.

Применяя расширяющиеся добавки, в состав которых входит метакаолин, можно наблюдать следующие эффекты: эффект наполнения благодаря колоссальной удельной поверхности (более 200 000  $\text{см}^2/\text{г}$ ), пуццолановый эффект благодаря высокому содержанию  $\text{SiO}_2$  (около 60%), и эффект 3-D армирования благодаря высокому содержанию алюминатов (около 40%). Данные эффекты протекают параллельно, накладываясь и усиливая друг друга, в результате чего возникает синергетический эффект.

Улучшение микроструктуры и компенсация усадочных явлений позволяет применять модифицированные вяжущие как для получения высококачественных самоуплотняющихся бетонов, так и для получения бетонов повышенной непроницаемости для эксплуатации в различных агрессивных средах.

#### Заключение

- Технология получения бетонов высокой эксплуатационной надежности должна базироваться на современных подходах к прогнозированию свойств композитов, включая моделирование и концепцию «управляемого структурообразования».
- Рассмотрение бетона как сложной иерархической структуры позволяет, улучшая либо изменяя свойства на каждом из уровней, в итоге получать композит с заданными характеристиками.
- Применение расширяющихся вяжущих (в данном случае метакаолиновых комплексов) позволит улучшить свойства транзитной зоны путем достижения эффекта наполнения, пуццоланового эффекта и эффекта 3-D.
- Применение бетонов с «улучшенной» транзитной зоной позволит решить ряд сложных технологических задач, в т. ч. в сфере ремонтов и гидроизоляции.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Monteiro P.J.M., Mehta P.K. Interaction between Carbonate Rock and Cement Paste / P.J.M. Monteiro, P.K. Mehta // *Cem. and Concr. Res.* – 1986. – № 2. – P. 127–134.
2. Prasad, M. Acoustic Microscopy of Portland Cement Mortar / M. Prasad, Y. Wang R.A. Livingstone // *Aggregate Interfaces.* – 1999. – P. 1–21.
3. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
4. Hogan, F.J. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag / F.J. Hogan, J.W. Meusel // *Cements, Concrete and Aggregates.* – 1981. – V 3. – № 1. – P. 40–52.
5. Barnes, B.D. The Contact Zone between Portland Cement Paste and Glass “Aggregate” Surfaces / B.D. Barnes, Diamond Sindy, W.L. Dolch // *Cem. and Concr. Res.* – 1978. – № 2. – P. 233–243.
6. Bradley, G. Water Soluble Polymers: the Relationship Between Structure, Dispersing Action, and Rate of Cement Hydration / G. Bradley, I.M. Howarth // *Cement, Concrete and Aggregates.* – 1986. – Vol. 8. – P. 68–75.
7. Структура, прочность и деформации бетонов / Под ред. А.Е. Десова. – Госстройиздат, 1966.
8. Rocha, J. Solid-state NMR studies of the structure and reactivity of metakaoline / J. Rocha, J. Klinowski // *Angewandte Chemie*, 1990. – Vol. 29. – № 5. – P. 553–554.

Материал поступил в редакцию 02.02.2018

#### **BELOMESOVA K. Yu., PAVLOVA I.P. Concrete Interfacial Transition Zone Structure Optimization Approach**

In article main approach for concrete interfacial transition zone structure adjustment are presented. In the capacity of one of the optimal choice to improvement expansive binders on the basis of sulpho-aluminate complex are proposed. Due to this a whole number of effects may be realized, such as filling and pozzolanic effects, and, of course, 3-D reinforcement effect. Consideration of concrete such as complex hierarchical structure and changing properties on each level allow to obtain in the end composite with specified characteristics.

УДК 624.012.45

**Павлова И.П.**

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА**

**Введение.** При проектировании составов напрягающего бетона наряду с прочностными показателями проектной характеристикой также является величина самонапряжения как показатель энергетического потенциала материала [1–5]. Далее для определения величины самонапряжения бетона использована трехкомпонентная пространственная модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы, и расположенной между ними транзитной зоны.

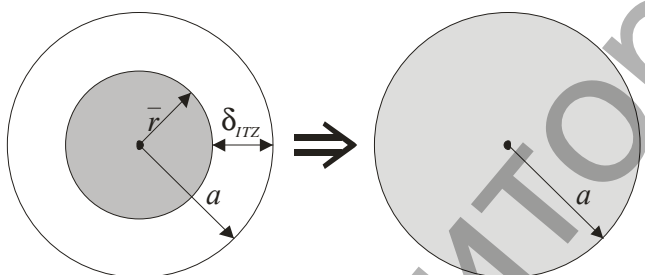
**Основные положения модели.** При построении модели приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит представлен в виде непрерывной активной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель;
  - 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, транзитная зона рассматривается как неактивная компонента, вынужденными деформациями которой 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, так называемыми эффективными, упругими характеристиками (см. 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)  $G_{id}$ ,  $K_{id}$ .



**Рисунок 1** – Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером  $a$  в соответствии с правилами D–EMT

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига  $G_{id}$  композитного включения с учетом транзитной зоны находят из решения соответствующего квадратного уравнения:

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

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

Эффективный объемный модуль  $K_{id}$  для данного «приведенного» заполнителя с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по следующей зависимости:

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

Пользуясь зависимостями (1) и (2), рассчитывают характеристики бетона к некоторому фиксированному моменту времени  $\tau$  (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  $\bar{E}$  – 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  $\beta$  и  $\delta$  варьируются в пределах от 0 до 1 и монотонно возрастают с течением времени.

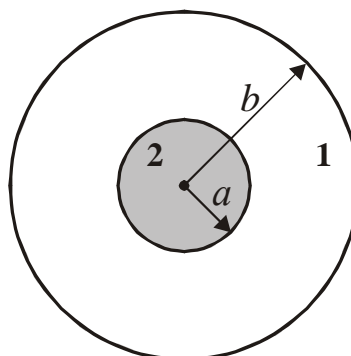
В работах Laube для описания процессов упрочнения бетонного композита предложена функция  $\beta(\alpha)$ , описывающая процесс упрочнения материала в зависимости от степени гидратации  $\alpha(\tau)$  цементного вяжущего:

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

**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  $C_{agg} = 0,05$ , 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 произвольные, 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 будет 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:

$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}$ ,  $\epsilon_{\theta\theta} = \epsilon_{\phi\phi} = \frac{u}{r}$ , где  $\theta$  и  $\phi$  – углы в сферических координатах.



**Рисунок 2** – Схематическое представление анализируемой системы: (1) – активная матрица,  $a < r < b$ , (2) – заполнитель,  $0 < r < a$ , где  $r$  – радиальная координата

В  $i$ -й фазе две независимые составляющие (при  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi}$ ) тензора деформаций могут быть соответственно записаны:

$$\sigma_{rr} = \left( K_i + \frac{4}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \left( K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left( K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \left( 2K_i + \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i^0$  – свободные деформации расширения  $i$ -й фазы.

Для решения дифференциальных уравнений (5), (6) воспользуемся решением 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  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – некоторые неизвестные коэффициенты, различные для каждой фазы, определяемые из соответствующих граничных условий. Тогда с учетом принятой функции перемещений, и учитывая, что для заполнителя  $\beta = 0$ , уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\sigma_{rr} = 3K_i \alpha_i - 4G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 3K_i \alpha_i + 2G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0. \quad (8)$$

Для нахождения оставшихся неизвестных коэффициентов в уравнениях (7), (8) могут быть использованы:

- условия неразрывности перемещений и напряжений на границе раздела «заполнитель – матрица» при  $r = a$ ;
- условие равенства нулю напряжений в радиальном направлении при  $r = b$ .

С учетом принятых граничных условий может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_m + \frac{\beta_m}{a^3} - \alpha_{id} = 0 \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{a^3} - K_{id} \alpha_{id} - K_m \varepsilon_m^0 = 0, \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{b^3} - K_m \varepsilon_m^0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Относительные деформации расширения, развивающиеся в композитной системе, в общем случае будут равны:

$$\varepsilon_{0,CE} = \frac{u(r=b)}{b} \quad \text{или}$$

$$\varepsilon_{0,CE} = \alpha_m + \frac{\beta_m}{b^3}, \quad (10)$$

где  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$  – коэффициенты, определяемые из решения системы (9).

Получив решение для одиночного включения в соответствии с основными положениями Д–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:

$$K_0 = K_m + K_m k(K_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (11)$$

$$G_0 = G_m + G_m g(G_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (12)$$

где  $k$  и  $g$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения  $K_m/K_{id}$  и  $G_m/G_{id}$ .

В соответствии с положениями Д–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 (9) соответ-

ствующие значения  $K_m, G_m$  и  $\varepsilon_m^0 = \varepsilon_{0,CE}$ , найдем относительную деформацию расширения  $\varepsilon_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ , 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  $\varepsilon$  композитной системы в момент времени  $\tau$ . Полученная деформация  $\varepsilon$  соответствует деформации «свободного» расширения композита  $\varepsilon_{CE}$ .

Поскольку рассматривается композит, ограничение деформаций расширения которого обусловлено наличием в структуре разветвленной 3-D сетки, состоящей из базальтового волокна (см. рис. 3), то для расчета прогнозируемой величины самонапряжения в условиях ограничения идеализированный однородный массив с установленными жесткостными характеристиками и деформацией расширения  $\varepsilon_{CE}$  помещается в оболочку с жесткостью, эквивалентной жесткости упругого ограничения базальтовой фиброй, косвенно определенной как условный «процент армирования»  $\rho_l$ .

Для модели «расширяющееся ядро в упругой оболочке», воспользовавшись уравнениями (7) и (8), была определена относительная деформация расширения бетона  $\varepsilon_c$  в условиях внешнего упругого ограничения.

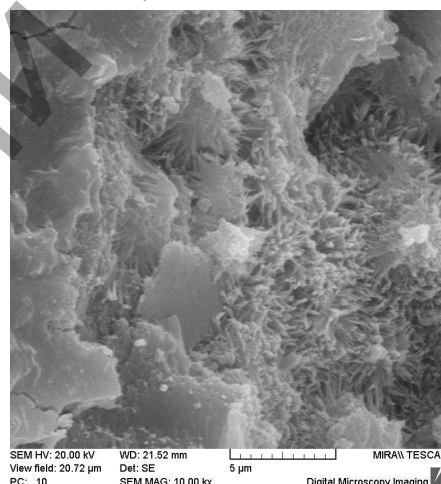


Рисунок 3 – Микрофотография образца цементного камня, модифицированного расширяющей добавкой и базальтовой фиброй

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

$$\varepsilon_c(\tau) = \frac{1}{1 + \rho_l \frac{K_s}{K_c(\tau)}} \cdot \varepsilon_{TOT}(\tau) \quad (13)$$

где  $K_c$  – объемный модуль бетона;

$K_f$  – объемный модуль фибры;

$\varepsilon_{TOT}$  – деформация свободного расширения бетона.

Тогда величина самонапряжения для рассматриваемой модели определяется по традиционной формуле:

$$\sigma_{CE} = \varepsilon_c \rho_l E_f l. \quad (14)$$

Отношение прогнозируемой величины самонапряжения к марке по самонапряжению в стандартных условиях ограничения будет равно:

$$\frac{\sigma_{CE}}{f_{CE,d}} = \frac{1 + \left( \frac{K_f}{K_c} \right)}{1 + \rho_l \cdot \left( \frac{K_f}{K_c} \right)} \cdot \rho_l \cdot 10^2. \quad (15)$$

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

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (15) для случая объемного армирования фиброй представлено на рис. 4.

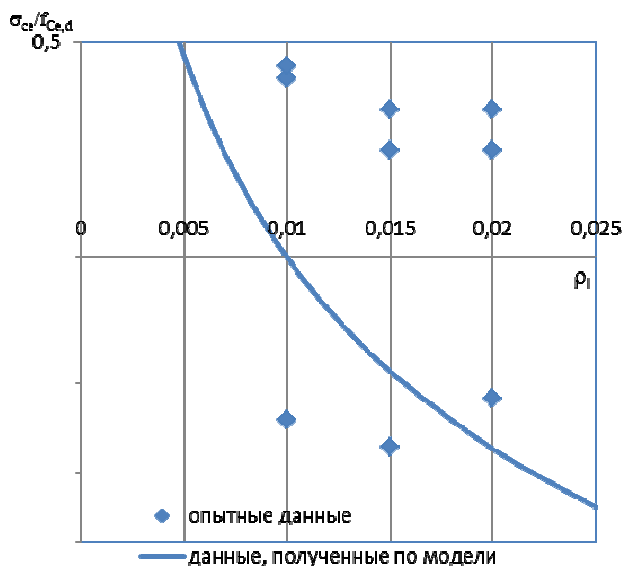


Рисунок 4 – Сравнение опытных данных с прогнозируемыми по модели

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 модели расширяющегося бетонного композита следует отнести ее универсальность. Данная модель дает возможность рассчитать 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). Кроме того, модель РБК более гибко реагирует на изменение входных параметров и позволяет оценить влияние структуры композита на итоговые связанные деформации.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ 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 // 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. – 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. – Минск, 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.G. Berryman // Mechanics of Materials, 2001. – P. 455–470.
8. Бондаренко, В.М. Сопротивление осевому сжатию сталебрун бетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.2018

#### PAULAVA I.P. Prediction self-stress magnitude in expansive fiberconcrete

In present paper expansive concrete composite model for prediction self-stress magnitude in triaxial restriction conditions are presented. Main model conditions on the basis of Effective Medium Theory and Solidification Theory are founded. In work are considered probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for chemical prestressing and strength concrete properties increasing.

Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to concrete composite strength increase course of 3-D structure reinforcement effect and changing fracture toughness. 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.

УДК 624.04

Найчук А.Я.

### О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ И МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

**Введение.** Общеизвестно, что древесина и материалы на ее основе относятся к материалам, прочность которых зависит не только от направления действия нагрузки по отношению к направлению волокон, но и от продолжительности ее действия. Принятая в нормах [1–3] методика определения расчетных значений прочности

базируется на фундаментальных исследованиях [4–9] изменения длительной прочности древесины и материалов на ее основе. Несмотря на огромный комплекс проведенных исследований и полученных при этом результатов, они не в полной мере охватывают все случаи, имеющие место в реальных конструкциях. Так, например,

Найчук Анатолий Яковлевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура