

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50

Панченко Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: panchenko.bstu@mail.ru

РАСЧЕТ ФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Аннотация. Наличие сведений о физико-механических свойствах фибробетона позволяет вести расчет конструкций на его основе с надлежащим приближением к реальности. Накопленные экспериментальные данные, касающиеся модулей упругости первого и второго рода, коэффициента Пуассона, пределов прочности на растяжение и сжатие при характерных длинах волокон и процентах армирования по массе, являются условием создания алгоритма расчета таких конструкций. Этому способствует переход от линейно упругой постановки задачи к учету физической нелинейности. В рамках программных комплексов, основанных на конечно-элементной модели деформируемого тела, приемлем итерационный процесс, обусловленный сходимостью решения. Предложенный метод дополнительных нагрузок в конечно-элементной интерпретации оставляет в силе накопленный опыт автоматизированного проектирования. Итерационная процедура расчета содержит циклы с постепенным приближением физических модулей к их истинному значению в результате сходимости решения задачи. Критерий сходимости имеет энергетическую природу. Вычисление модулей упругости ведется на основе зависимостей механики деформируемого твердого тела, что придает постановке задачи фундаментальный характер. Эффект предложенной методики демонстрируется на примере расчета заглубленного цилиндрического резервуара из стеклофибробетона для жидкости. Добавление стекловолокон в бетон приводит к улучшению сопротивляемости трещинообразованию и уменьшению величины раскрытия трещин.

Ключевые слова: фибробетонные конструкции, стеклянные и углеродные волокна, физическая нелинейность, матрица жесткости, диаграмма сдвига, конечно-элементная интерпретация метода дополнительных нагрузок.

Введение. Успехи в области повышения активности минеральных вяжущих веществ, в первую очередь цемента, позволили значительно повысить предел прочности бетонов на сжатие. В то же время прочность на растяжение оставалась во много раз ниже прочности на сжатие. Это несоответствие в некоторой мере сглаживается использованием волокон в качестве арматуры. Наряду с применением металлических элементов большое распространение получили стеклянные и углеродные волокна [1–11].

Фибробетон, содержащий те или иные волокна, как и бетон, деформируется по нелинейному физическому закону. Механические характеристики (модуль продольной деформации, коэффициент поперечной деформации, модуль сдвига) являются переменными величинами и зависят от деформации. Их значения определяются на основе стандартных испытаний. Автором проведены такого рода исследования для цилиндрических элементов из стеклофибробетона. Серии отличались длиной волокна (20 мм, 35 мм, 50 мм) и процентом армирования (1,5 %, 3 %, 4,5 %) в различных сочетаниях. Результаты испытаний представлены в табличной форме [12].

Для определения прочностных характеристик стеклофибробетона (предела прочности на

растяжение, сжатие) также использовалась стандартная методика с применением образцов в виде кубиков и призм.

Накопленный материал о физико-механических свойствах фибробетона [13, 14] позволяет вести расчет конструкций на его основе с надлежащим приближением к реальности. Этому способствует переход от линейно упругой постановки задачи к учету физической нелинейности. В рамках программных комплексов, основанных на конечно-элементной модели деформируемого тела, приемлем итерационный процесс, обусловленный сходимостью решения.

Материалы и методы. Известно, что при линейном физическом законе прямая задача содержит в качестве неизвестных 15 компонентов напряжений, деформаций и перемещений. Для их определения используются 15 уравнений по трем законам деформирования твердого тела. При наличии нелинейных деформаций в прямой задаче появляются дополнительные неизвестные – интенсивности касательных напряжений τ_i и деформаций сдвига γ_i , а дополнительными уравнениями являются выражение: γ_i и зависимость между τ_i и γ_i [15].

Возможности современной вычислительной техники привели к разработке общих численных алгоритмов решения нелинейных задач. Одним из наиболее эффективных способов построения

таких алгоритмов является линеаризация. Рассматриваемые ниже их варианты предложены российскими учеными А.А. Ильюшиным и И.А. Биргером.

При решении в перемещениях в дифференциальных уравнениях и граничных условиях слагаемые, возникающие из-за отклонения от закона Гука, переносятся в правые части уравнений и считаются известными. Таким образом, получаем систему уравнений линейной теории деформирования относительно компонентов перемещений, но с дополнительными объемными и поверхностными силами. В первом приближении полагаем эти дополнительные нагрузки равными нулю и решаем физически линейную задачу. Найдя перемещения, вычисляем интенсивность γ_i , позволяющую определить нелинейные члены в уравнениях Ламе и граничных условиях и решить вторичную физически линейную задачу с дополнительными нагрузками, отличными от нуля и т.д. Такого рода алгоритм получил название метода дополнительных нагрузок.

При решении в напряжениях используется метод дополнительных деформаций. Дифференциальные уравнения равновесия и граничные условия остаются без изменения. Уравнения сплошности вследствие наличия нелинейных членов в выражении физического закона будут содержать дополнительные слагаемые, которые

$$D = \frac{2G}{1-2\nu} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, ν – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для физической нелинейности характерны переменные величины этих характеристик. Диапазон изменения коэффициента поперечной деформации мал, в связи с чем, его часто принимают неизменным. Фактический модуль сдвига имеет выражение:

$$G(\gamma_i) = G \left(1 - \frac{\gamma_i}{2\gamma_{is}} \right), \quad (2)$$

$$I_{\varepsilon 2}^* = \frac{1}{6} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \frac{1}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2), \quad (4)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – элементы тензора деформаций.

При трещинообразовании в фибробетоне имеет место увеличение объема тела – дилатация $g_0 \gamma_i^2$, где g_0 – модуль дилатации, зависящий от свойств бетона, типа и содержания армирующих

можно интерпретировать как дополнительные деформации и определять их последовательными приближениями.

Имеет место также метод переменных параметров упругости. Систему уравнений представляют в форме уравнений линейной теории с переменными «параметрами упругости» $E(\lambda)$ и $\nu(\lambda)$ (λ – отражает процесс деформирования), которые в процессе последовательных приближений вычисляются по деформациям.

Природа физической нелинейности фибробетона исходит из механических свойств бетона, проявляющихся в диаграмме «напряжение-деформация», явлении дилатации. Условием создания алгоритма расчета конструкций является наличие экспериментальных данных, касающихся модулей упругости первого и второго рода, коэффициента Пуассона, пределов прочности на растяжение и сжатие при характерных длинах волокон и процентах армирования по массе.

Построение расчета проведено на основе метода конечных элементов (МКЭ), используемого в инженерной практике для решения задач различного типа. Матрица жесткости конечного элемента содержит матрицу упругости D как характеристику связи между напряжениями и деформациями [15]:

где γ_i и γ_{is} – интенсивность деформаций сдвига для фактического состояния и ее предельная величина для рассматриваемого вида напряженного состояния, то есть

$$\gamma_i = 2 \sqrt{I_{\varepsilon 2}^*}, \quad (3)$$

где $I_{\varepsilon 2}^*$ – второй инвариант девиатора деформаций, равный

волокон. При чистом сдвиге предельная объемная деформация ϑ_c зависит от предельной интенсивности деформации сдвига γ_{is} [16]:

$$\vartheta_c = g_0 \gamma_{ic}^2, \quad (5)$$

откуда вытекает значение модуля:

$$g_0 = \frac{\vartheta_c}{\gamma_{ic}^2}. \quad (6)$$

Линейные деформации дополняются величиной $g_0\gamma_i^2/3$. Сохраняется предположение о пропорциональности и соосности девиаторов напряжений и деформаций.

Величина γ_{is} зависит от инвариантов тензора $I_{\varepsilon 1}$ и девиаторов $I_{\varepsilon 2}^*$, $I_{\varepsilon 3}^*$ деформаций, в которых находят отражение прочность фибробетона на сжатие R_{fbc} и растяжение R_{fbc} . Эти характеристики, как и модуль g_0 , зависят от свойств бетона, типа и содержания армирующих волокон. В качестве математической модели γ_{is} можно использовать аналогичную модель для бетона с заменой характеристик R_{bc} и R_{bt} на R_{fbc} и R_{fbc} [12].

Основная часть. Как следует из изложенных выше положений о физической нелинейности, синтезирующее уравнение метода конечных элементов содержит вместо постоянной матрицы жесткости K ее переменный аналог \bar{K} так, что

$$\bar{K} = K + \Delta K, \quad (7)$$

где ΔK – корректирующая матрица, равная

$$\Delta K = \sum_e \Delta k_e, \quad (8)$$

где Δk_e – корректирующая матрица отдельного конечного элемента, число которых e .

Эта предпосылка заставляет заменить решение упомянутого уравнения МКЭ итерационным решением рекуррентного уравнения:

$$Kq^{(s)} = F - \Delta K(q^{(s-1)})q^{(s-1)}, \quad (9)$$

или

$$Kq^{(s)} = F - \Delta F^{(s-1)}, \quad (10)$$

где $q^{(s)}$ – s -е приближение q ; ΔF – фиктивная дополнительная нагрузка, равная

$$\Delta F^{(s-1)} = \Delta K(q^{(s-1)})q^{(s-1)}. \quad (11)$$

Сходимость итерационного процесса подтверждена решениями типовых задач. Критерий сходимости имеет энергетическую природу:

$$\frac{|W_e - W_m|}{W_m} \leq \varepsilon_0, \quad (12)$$

где W_e – потенциальная энергия деформации конечного элемента; W_m – средняя величина для e величин W_e ; ε_0 – некоторое малое положительное число.

Алгоритм решения физически нелинейной задачи включает: начальный модуль (модуль упругости) и модуль дилатации; формирование

матрицы жесткости для отдельных элементов; формирование матрицы жесткости для тела и вектора узловых сил; решение уравнений МКЭ; определение модулей по формуле (2); формирование новых матриц жесткости конечных элементов; определение Δk_e ; формирование ΔK ; решение уравнения (10); проверка удовлетворения критерию (12) и другим неучтенным ограничениям (по прочности, деформативности и т. д.). При необходимости следующий цикл начинается с определения модулей упругости по формуле (2).

Изложенная теория, касающаяся определения напряженно-деформированного состояния тела при наличии физической нелинейности, использована при расчете цилиндрических резервуаров для нефтепродуктов. При расчетах бетонных резервуаров без учета влияния растяжения бетона допускалось раскрытие трещин до величины 0,2 мм, а при учете влияния растяжения бетона – до 0,1 мм [17, 18]. Включение стекловолокон в бетон увеличивает сопротивляемость трещинообразованию, и допускаемую величину раскрытия трещин можно уменьшить до 0,05 мм.

В качестве примера рассмотрен резервуар, моделью которого является шарнирно опертая оболочка в грунте радиусом 4 м, длиной 6 м, толщиной стенок 0,05 м. Модуль упругости стеклофибробетона $2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,17. Толщина прилегающего деформируемого слоя основания 5 м, модуль деформации грунта 60 МПа, коэффициент Пуассона 0,3. Давление на боковую поверхность оболочки составляет 500 кН/м.

Исходные данные взяты из решения задачи в линейно-упругой постановке [17]. Учет физической нелинейности потребовал трех приближений расчета. Перемещения срединной поверхности оболочки увеличились на 10–12 %, а изгибающие моменты на 14–16 %. В результате армирование стекловолокнами увеличено на 1,1 %.

Рассмотрим частный случай кручения цилиндрического бруса круглого поперечного сечения радиуса R из материала с билинейной диаграммой сдвига (рис. 1).

Установим зависимость между крутящим моментом T и кривизной кручения. При $\frac{\gamma_1}{R} < k_k \leq \frac{\gamma_2}{R}$ брус имеет внутреннюю зону деформирования, связанную с участком диаграммы 0–1, и наружную зону, связанную с участком 1–2. Граница между этими зонами определяется радиусом

$$r_1 = \frac{\tau_1}{Gk_k}. \quad (13)$$

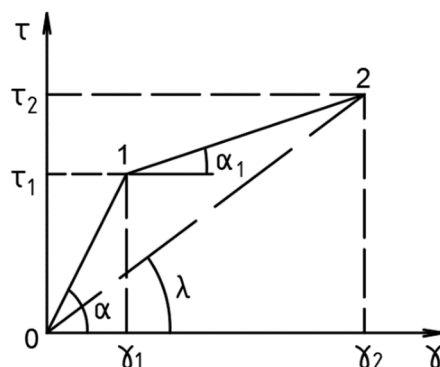


Рис. 1. Диаграмма сдвига: γ – деформация сдвига; τ – касательные напряжения; $\alpha = \arctg G$ (G – модуль сдвига), $\alpha_1 = \arctg G_1$ (G_1 – модуль упрочнения)

Выражение крутящего момента имеет вид или

$$T = 2\pi k_k \left[\int_0^{r_1} G r^3 dr + \int_{r_1}^R G(\lambda) r^3 dr \right]. \quad (14) \quad G(\lambda) = \frac{r_1}{r} G + \left(1 - \frac{r_1}{r}\right) G_1. \quad (16)$$

В данном случае

В итоге получаем

$$G(\lambda) = \frac{1}{\gamma} [\gamma_1 G + (\gamma - \gamma_1) G_1], \quad (15)$$

$$T = \pi k_k \left[\frac{1}{2} G r_1^4 + \frac{2}{3} r_1 (R^3 - r_1^3) (G - G_1) + \frac{1}{2} (R^4 - r_1^4) G_1 \right]. \quad (17)$$

Предположим, что пределу несущей способности бруса соответствует появление на контуре сечения напряжений τ_2 .

При этом

$$r_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} R. \quad (18)$$

При замене переменной r на γ/k_k формула (17) принимает вид

$$T = \frac{1}{k_k^3} \left\{ G \int_0^{\gamma_1} \gamma^2 d\gamma + \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} [\gamma_1 (G - G_1) + \gamma G_1] \gamma d\gamma \right\}. \quad (19)$$

Формула (19) выгодно отличается от формулы (17) своей непосредственной связью с диаграммой сдвига.

Кроме рассмотренной физической нелинейности существуют также и другие виды нелинейности. Геометрическая нелинейность имеет место, во-первых, когда перемещения конструкции вызывают значительные изменения в ее геометрии, так, что уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров конструкции (по деформированной схеме), во-вторых, когда зависимость между перемещениями и деформациями нелинейная.

Конструктивная нелинейность возникает вследствие конструктивных особенностей системы, вызывающих изменение расчетной схемы в процессе деформирования (например, изменяются условия закрепления). Она имеет место в конструкциях с односторонними связями, встречается также в контактных задачах.

При наличии физической и одного из указанных видов нелинейности в комплексе уравнений для решения такого рода задач появляются дополнительные, специфические уравнения, например, новые зависимости между деформациями и

перемещениями, уравнения для условий контакта и другие. При этом остаются в силе предложенные в статье методы решения физически нелинейной задачи.

Выводы. Учет физической нелинейности при расчете конструкций из фибробетона позволяет в определенной мере приблизить физическую модель к реальным обстоятельствам. Предложенный метод дополнительных нагрузок в конечно-элементной интерпретации оставляет в силе накопленный опыт автоматизированного проектирования [19]. Итерационная процедура расчета содержит циклы с постепенным приближением физических модулей к их истинным значениям в результате сходимости решения задачи. Вычисление модулей ведется на основе зависимостей механики деформируемого твердого тела, что придает постановке задачи фундаментальный характер. Эффект предложенной методики демонстрируется на примере расчета заглубленного цилиндрического резервуара из стеклофибробетона для жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 12–13.
2. Волков И.В., Газин Э.М., Бабекин В.В. Инженерные методы проектирования фибробетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2007. № 4. С. 20–22.
3. Олюнин П.С. Дисперсное армирование цементных композитов полимерными волокнами // Бетон и железобетон. 2009. № 1. С. 21–24.
4. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. (ВСН 56-97). М.: НТУ НИЦ «Строительство», 1997. 91 с.
5. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
6. Сталефибробетонные конструкции (СП 52-104-2006). М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. 61 с.
7. Grace N.F., Singh S.B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams // ACI Structural Journal. 2003, May-June. P. 365–376.
8. Lorenzis L. de., Miller B., Nanni A. Bond of FRP laminates to concrete // ACI Material Journal. V. 98. 2001. №3. P. 256–264.
9. Reda Taha M.M., Shrive N.G. Enhancing fracture toughness of high-performance carbon fiber cement composites // ACI Materials Journal. 2001. №2. P. 168–178.
10. Panchenko L.A. Design of transformable beam systems. Innovations and technologies in construction. BUILDINTECH BIT 2021. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_47.
11. Panchenko L.A. Concrete and fiber-reinforced concrete in a fiber-reinforced polymer framework. BUILDINTECH BIT 2020. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 95. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_20.
12. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013, 183 с.
13. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология / Пер. с англ. С.Л. Баженова. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
14. Юрьев А.Г., Панченко Л.А. Исследования деформирования элементов стеклофибробетонных конструкций. Наука и инновации в строительстве SIB-2008. Матер. Междунар. Конгресса. Воронеж. 2008. Том. 2. С. 254–257.
15. Юрьев А.Г. Вариационные принципы строительной механики. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 90 с.
16. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
17. Панченко Л.А. Железобетонные цилиндрические резервуары с дополнительным армированием стекловолокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 2. С. 68–71.
18. Панченко Л.А., Шевченко А.В. Железобетонный цилиндрический резервуар с дополнительным дисперсным армированием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 38–42.
19. Матус Е.П. Применение компьютерного моделирования при расчете прочности при растяжении фибробетона // Известия вузов. Строительство. 2005. № 6. С. 103–105.

Информация об авторах

Панченко Лариса Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.06.2021 г.

© Панченко Л.А., 2022

Panchenko L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: panchenko.bstu@mail.ru

CALCULATION OF FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY

Abstract. *The availability of information about the physical and mechanical properties of fiber-reinforced concrete allows to calculate structures based on it with a proper approximation to reality. The experimental data on the elastic modulus of the first and second kind, the Poisson's ratio, the tensile and compressive strength limits for characteristic fiber lengths and the percentage of reinforcement by weight are a condition*

for creating an algorithm for calculating such structures. This is facilitated by the transition from a linear elastic formulation of the problem to the consideration of physical nonlinearity. In the framework of software systems based on a finite element model of a deformable body, an iterative process is acceptable, due to the convergence of the solution. The proposed method of additional loads in the finite element interpretation leaves the accumulated experience of computer-aided design. The iterative calculation procedure contains cycles with a gradual approximation of the physical modules to their true value as a result of the convergence of the solution of the problem. The convergence criterion has an energy nature. The calculation of the modules is based on the dependencies of the mechanics of a deformable solid. This gives a fundamental character to the formulation of the problem. The effect of the proposed method is demonstrated by the example of calculating a buried cylindrical tank made of glass-fiber concrete for liquid. The addition of glass fibers to concrete leads to an improvement in the resistance to cracking and a decrease in the amount of crack opening.

Keywords: fiber-reinforced structures, glass and carbon fibers, physical nonlinearity, stiffness matrix, shear diagram, finite element interpretation of the method of additional loads.

REFERENCES

1. Volkov I.V. Problems of using fiber-reinforced concrete in domestic construction. [Problemy primeneniya fibrobetona v otechestvennom stroitelstve]. Building materials. 2004. No. 6. Pp. 12–13 (rus)
2. Volkov I.V., Gazin E.M., Babekin V.V. Engineering methods for the design of fiber-reinforced concrete structures. [Inzhenernye metody proektirovaniya fibrobetonnykh konstrukcij]. Concrete and reinforced concrete. 2007. No. 4. Pp. 20–22 (rus)
3. Olyunin P.S. Dispersed reinforcement of cement composites with polymer fibers. [Dispersnoe armirovanie cementnykh kompozitov polimernymi voloknami]. Concrete and reinforced concrete. 2009. No.1. Pp. 21–24 (rus)
4. Design and basic provisions of technologies for the production of fiber-reinforced concrete structures. [Proektirovanie i osnovnye polozheniya tekhnologij proizvodstva fibrobetonnykh konstrukcij]. (VSN 56-97). M.: NTU NITs "Construction", 1997. 91 p. (rus)
5. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction. [Kompozity na osnovе dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii]. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 560 p. (rus)
6. Steel-fiber concrete structures [Stalefibrobetonnye konstrukcii (SP 52-104-2006)]. (SP 52-104-2006). M.: FGUP NITs "Construction", 2007. 61 p. (rus)
7. Grace N.F., Singh S.B. Design approach for carbon fiber-reinforced polymer prestressed concrete bridge beams. ACI Structural Journal. 2003, May-June. Pp. 365–376.
8. Lorenzis L. de., Miller B., Nanni A. Bond of FRP laminates to concrete. ACI Material Journal. V. 98. 2001. No. 3. Pp. 256–264.
9. Reda Taha M.M., Shrive N.G. Enhancing fracture toughness of high-performance carbon fiber cement composites. ACI Materials Journal. 2001. No. 2. Pp. 168–178.
10. Panchenko L.A. Design of transformable beam systems. Innovations and technologies in construction. BUILDINTECH BIT 2021. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_47.
11. Panchenko L.A. Concrete and fiber-reinforced concrete in a fiber-reinforced polymer framework. BUILDINTECH BIT 2020. Civil Engineering Lecture Notes. 2021. Vol. 95. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_20.
12. Panchenko L.A. Building structures with fiber composites. [Stroitel'nye konstrukcii s voloknistymi kompozitami]. Belgorod: Publishing house of BSTU im. V.G. Shukhova, 2013, 183 p. (rus)
13. Matthews F., Rawlings R. Composite materials. Mechanics and technology. [Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya]. Per. from English S.L. Bazhenov. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 408 p. (rus)
14. Yuriev A. G., Panchenko L. A. Studies of deformation of elements of glass-fiber concrete structures. [Issledovaniya deformirovaniya ehlementov steklofibrobetonnykh konstrukcij]. Science and Innovation in Construction SIB-2008. Mater. International. Of the Congress. Voronezh. 2008. Vol. 2. Pp. 254–257 (rus)
15. Yuriev A.G. Variational principles of structural mechanics. [Variacionnye principy stroitel'noj mekhaniki]. Belgorod: BelGTASM Publishing House, 2002. 90 p. (rus)
16. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete. [Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p. (rus)
17. Panchenko L.A. Reinforced concrete cylindrical tanks with additional fiberglass reinforcement. [Zhelezobetonnnye cilindricheskie rezervuary s dopolnitel'nyim armirovaniem steklovoloknom]. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. 2009. No. 2. Pp. 68–71 (rus)
18. Panchenko L.A., Shevchenko A.V. Reinforced concrete cylindrical tank with additional dispersed reinforcement. [Zhelezobetonnnyj

cilindricheskij rezervuar s dopolnitel'nym dispersnym armirovaniem]. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 38–42 (rus)

19. Matus E.P. Application of computer modeling in calculating the tensile strength of fiber-rein-

forced concrete. [Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya pri raschete prochnosti pri rastyazhenii fibrobetona]. Izvestiya vuzov. Building. 2005. No. 6. Pp. 103–105 (rus)

Information about the authors

Panchenko, Larisa A. PhD. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 10.06.2021

Для цитирования:

Панченко Л.А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50

For citation:

Panchenko L.A. Calculation of fiber-reinforced concrete structures taking into account physical nonlinearity. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50