

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-283-296

УДК 691.3

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

### Основы теории технологии получения, расчета физико-механических свойств и показателей химико-биологического сопротивления каркасных строительных композитов

В.Т. Ерофеев 

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Саранск, Российская Федерация

✉ vlalmo@mail.ru

#### История статьи

Поступила в редакцию: 12 мая 2022 г.

Доработана: 24 июля 2022 г.

Принята к публикации: 27 июля 2022 г.

**Аннотация.** Энергосбережение, эксплуатационная надежность зданий и сооружений различного назначения определяется долговечностью применяемых при их возведении строительных материалов и изделий. К настоящему времени на основе полиструктурной теории разработаны каркасные строительные композиты. Каркасная технология изготовления строительных изделий заключается в предварительном изготовлении каркасов из крупнопористых смесей с последующим заполнением пустот в отвердевшем каркасе матрицей – пластифицированным связующим, тонкодисперсной или мелкозернистой композицией, при этом каркасы и матрица могут быть сформированы на различных связующих. Данная технология дает возможность получать строительные материалы и изделия с сочетанием самых различных и даже несовместимых вяжущих с заранее заданным комплексом свойств, то есть открывает путь к направленному материаловедению. Представлены результаты теоретических исследований и расчета технологических и физико-механических свойств каркасных композиционных строительных материалов. Выявлены закономерности структурообразования каркасных композитов на уровне формирования каркасов и матриц, а также при их объединении. Установлено, что процесс пропитки каркаса матрицей подчиняется закономерностям движения свобододисперсных или связнодисперсных систем. Получены формулы для расчета структурных напряжений в твердеющих каркасных композитах. С феноменологических позиций получены аналитические зависимости для расчета коэффициента теплопроводности изделий. Для моделей из упорядоченно расположенных заполнителей получены выражения для расчета модуля упругости и показана кинетика процессов разрушения каркасных композитов при их нагружении. Установлены теоретические зависимости для вычисления коэффициента диффузии в каркасных композитах от основных структурообразующих факторов.

**Ключевые слова:** строительные композиционные материалы, композиты каркасной структуры, каркас, матрица, закономерности структурообразования, наполнители, заполнители, вязкость матриц, структурные напряжения, физико-механические свойства, прочность, теплопроводность, механика разрушения, долговечность

#### Для цитирования

Ерофеев В.Т. Основы теории технологии получения, расчета физико-механических свойств и показателей химико-биологического сопротивления каркасных строительных композитов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 4. С. 283–296. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-283-296>

**Ерофеев Владимир Трофимович**, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, директор Института архитектуры и строительства, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, директор НИИ «Материаловедение», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Российская Федерация, 430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68; ORCID: 0000-0001-8407-8144, Scopus Author ID: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, eLIBRARY SPIN-код: 4425-5045; vlalmo@mail.ru

© Ерофеев В.Т., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

# Fundamentals of technology theory of production, calculation physical and mechanical properties and indicators chemical and biological properties of frame building composites

Vladimir T. Erofeev 

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

✉ vlalmo@mail.ru

## Article history

Received: May 12, 2022

Revised: July 24, 2022

Accepted: July 27, 2022

## For citation

Erofeev V.T. Fundamentals of technology theory of production, calculation physical and mechanical properties and indicators chemical and biological properties of frame building composites. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(4):283–296. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-283-296>

**Abstract.** Energy saving, operational reliability of buildings and structures for various purposes is determined by the durability of building materials and products used in their construction. To date, frame building composites have been developed on the basis of polystructural theory. The frame technology for the manufacture of building products consists in the preliminary manufacture of frames from coarse-pored mixtures, followed by filling voids in the hardened frame with a matrix-plasticized binder, fine-dispersed or fine-grained composition, while the frames and matrix can be formed on various binders. This technology makes it possible to obtain building materials and products with a combination of the most diverse and even incompatible binders with a predetermined set of properties, i.e. opens the way to directional materials science. The paper presents the results of theoretical research and calculation of the technological physical and mechanical properties of frame composite building materials. The regularities of the structure formation of frame composites at the level of the formation of frames and matrices, as well as when they are combined, are revealed. It is established that the process of impregnating the frame with a matrix obeys the laws of motion of freely dispersed or connected dispersed systems. Formulas for calculating structural stresses in hardening frame composites are derived. Analytical dependences for calculating the thermal conductivity coefficient of products are obtained from phenomenological positions. Expressions for the calculation of the modulus of elasticity are obtained for models of ordered aggregates and the kinetics of the processes of destruction of frame composites under their loading is shown. Theoretical dependences for calculating the diffusion coefficient in frame composites on the main structure-forming factors are established.

**Keywords:** building composite materials, frame structure composites, frame, matrix, patterns of structure formation, filler, filling material, matrix viscosity, structural stresses, physical properties, mechanical properties, strength, thermal conductivity, fracture mechanics, durability

## Введение

Создание новых строительных материалов и изделий, обеспечивающих улучшение их эксплуатационных показателей, повышение эффективности, снижение материалоемкости, стоимости и трудоемкости изготовления, является основной задачей в области строительного материаловедения.

Радикальным способом повышения долговечности композиционных материалов и изделий является применение композитов на полимерном вяжущем. Так, к настоящему времени широкое применение в строительной отрасли находят полимербетоны на основе синтетических связующих [1–3], композиционные конструкционные материалы [4–10], добавочные полимерные композиты к цементным и другим бетонам и композитам [11–14].

Перспективным направлением дальнейшего развития строительных композитов представляется получение и внедрение материалов каркасной структуры. Это показано в работах авторов при исследовании каркасных композитов на полимерных связующих, стеклощелочных вяжущих, растворимого стекла [15–18], а также композитов с организованной макроструктурой на основе синтетических смол [19; 20].

Технология их изготовления включает предварительное создание оптимальных смесей наполнителей и склеивание зерен друг с другом с последующим заполнением пустот полученного каркаса матри-

*Vladimir T. Erofeev*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Director of the Institute of Architecture and Construction Engineering, Head of the Chair of Building Materials and Technologies, Director of the Research Institute "Materials Science," National Research Ogarev Mordovia State University, 68 Bolshevistskaya St, Saransk, 430005, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8407-8144, Scopus Author ID: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, eLIBRARY SPIN-code: 4425-5045; vlalmo@mail.ru

цей. Это позволяет получать высоконаполненные каркасные композиты, облегчается их изготовление и укладка, появляется возможность создавать на их основе материалы с заданными свойствами и изделия различного назначения. Установлено повышение физико-технических свойств каркасных композитов по сравнению с композитами обычной структуры: прочность при сжатии и растяжении выше в 1,2 раза; ударная прочность – в 1,5–3,5 раза. При этом усадочные деформации снижаются в 5–7 раз, температурные деформации – в 2,2 раза, а ползучесть – в 1,2 раза. Показано резкое повышение ударной прочности (более чем в 3 раза) каркасных композитов, армированных дисперсной арматурой [20].

В связи с развитием вычислительной техники резко возросла роль математического моделирования как средства изучения явлений и процессов в жидких, газовых, пластичных средах, твердых телах, в том числе в бетонах и других композиционных материалах (КМ). Усилия теоретиков сосредоточены на расчетах механических и некоторых физико-химических свойств композитов.

Теоретические исследования многих поколений ученых и инженеров заложили основы проектирования конструкций и их элементов с учетом обеспечения их прочностных и деформативных характеристик. Принятые методы расчета дают возможность оценить состояние элементов конструкции, при котором произойдет их разрушение или когда деформации превзойдут их допустимую величину. В этой связи важным является процесс получения численных значений прочности и характеристик деформирования разных материалов при различных внешних воздействиях. Возможность теоретического подхода к исследованию процесса деформирования твердых тел связана с необходимостью принятия некоторой модели этих тел.

Цель исследования состояла в разработке теоретических предпосылок создания каркасных композитов с улучшенными показателями структуры и физико-технических свойств.

Задачи исследований:

- обосновать методы теоретического изучения композиционных строительных материалов каркасной структуры;
- изучить процессы структурообразования и структуры каркасных композитов;
- структурные напряжения в каркасных композитах;
- поведение каркасных композитов при действии внешних нагрузок;
- химико-биологическое сопротивление каркасных композитов;
- получить математическую зависимость для оценки термического сопротивления каркасных композитов.

### **Материалы и методы**

Структура каркасного композита представляет собой совокупность соприкасающихся, склеенных друг с другом зерен крупного заполнителя или волокон, пустоты между которыми заполнены дисперсной средой – матрицей. Физико-технические свойства каркасных композитов предопределяются: структурой клея каркаса, заполнителей и матрицы; особенностями взаимодействия на границах «заполнитель – клей каркаса» и «каркас – матрица»; характером геометрической упаковки заполнителей в каркасе.

Базовыми методами для проведения теоретических исследований каркасных композитов служили: полиструктурная теория композиционных материалов; законы и явления гидродинамики и гидростатики; закономерности движения свободнодисперсных и связнодисперсных систем; метод конечных элементов; метод обобщенной проводимости; теория химического сопротивления композитов.

### **Теоретические предпосылки создания каркасных композитов с улучшенными показателями структуры и физико-технических свойств**

#### *Теория структурообразования каркасных композитов*

В научном материаловедении в последние годы утверждается концепция, согласно которой конечные свойства материалов определяются их структурой. Проблемы управления деформированием структуры (от нано- до макроуровня) композиционных материалов в настоящее время являются приоритетными. Структуры, создаваемые на масштабных уровнях от нано до макро, обеспечивают основные свойства материалов. С этой целью в механике материалов для представительного объема композита часто используются сферические модели ячейки (эффективные и структурные).

Установлены закономерности структурообразования каркасных композитов. Основными показателями, определяющими качество структуры каркаса, служат пропускная способность, позволяющая за-

полнить поровое пространство связующим, и адгезия связующего (матрицы) к вяжущему каркаса. Пропускная способность каркаса определяется из соотношения размеров заполнителей каркаса и связующего, а также вязкостью последнего [20].

Предложено оптимальное соотношение размеров наполнителей матрицы и наполнителей каркаса находить из выражения

$$r = 0,14\sqrt{R^2 + 0,9(R + \delta_{к.с})^2}, \quad (1)$$

где  $r$  и  $R$  – радиусы наполнителя и заполнителя;  $\delta_{к.с} = V_k/S$  – толщина пленки связующего на зернах каркаса;  $V_k$  – объем клея каркасной смеси;  $S$  – суммарная поверхность заполнителей.

Размеры зерен и их удельная поверхность рассчитываются по формулам

$$d_{ср} = \sqrt[3]{6m / (\pi\rho_s)} \text{ или } d_{ср} = \sqrt{d_1 d_2} \text{ (частиц одной фракции);}$$

$$d_{\text{с}} = \sum_{i=1}^N x_i d_{\text{с}i} \lim_{x \rightarrow \infty} \text{(смеси наполнителей); } S_{\text{уд}} = (6 / \rho_s) \sum (\varphi_{\text{чи}} x_i / d_i), \quad (2)$$

где  $m$  и  $\rho_s$  – масса и плотность частиц;  $d_1, d_2$  – линейные размеры отверстий сит, между которыми задержались частицы;  $N$  – число фракций;  $d_{\text{с}i}$  – средние диаметры зерен;  $x_i$  – массовые доли отдельных фракций.

Реологические свойства ненаполненных пропиточных композиций и композиций с наполнителями рассчитываются по уравнениям Ньютона, Бингама – Шведова и Кулона:

$$\tau = \eta_0 (dQ/dx), \quad \tau = \eta + \eta_m (dQ/dx) \text{ и } \tau = \sigma \text{tg}(\varphi) + \eta_m (dQ/dx), \quad (3)$$

где  $(dQ/dx)$  – градиент скорости сдвига;  $\sigma$  – нормальное напряжение;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Процесс пропитки каркаса полимерными связующими следует законам движения жидкости в канале круглого сечения. По реологическим параметрам пропиточные матрицы разделяются на бесструктурные (вязкие) и структурированные (вязкопластические).

Уравнение гидравлической проницаемости каркаса вязкими матрицами в результате преобразования известного соотношения Пуазейля получено в виде

$$\eta_b = \frac{\pi \Delta P \Pi [(\sqrt{3}R^2 - 0,5\pi(R + \delta_k)^2 / \pi)]^2}{8Ql[1 + 0,274(1 - \Pi)]}, \quad (4)$$

где  $\eta_b$  – вязкость жидкости;  $\Delta P$  – капиллярное давление;  $\Pi$  – пористость каркаса;  $Q$  – расход жидкости;  $l$  – длина капилляра.

Структурные и технологические параметры процесса пропитки вязкопластическими матрицами находятся из уравнения, полученного при преобразовании соотношения Букингема – Рейнера:

$$\eta_c = \eta_b \left\{ 1 - \frac{8\tau_T l}{3\Delta P \sqrt{[\sqrt{3}R^2 - 0,5\pi(R + \delta_k)^2] / \pi}} + \frac{1}{3} \left[ \frac{2\tau_T l}{\Delta P \sqrt{[\sqrt{3}R^2 - 0,5\pi(R + \delta_k)^2] / \pi}} \right]^4 \right\}, \quad (5)$$

где  $\eta_c$  – структурная вязкость;  $\tau_T$  – предельное напряжение сдвига.

К пропиточным композициям, содержащим наполнители, необходимо предъявлять требования нерасслаиваемости. Наполнители должны находиться в связующем во взвешенном состоянии. Для выполнения этого требования пропиточная композиция должна при введении наполнителя приобретать структуру, обладающую некоторой прочностью. В случае если плотность наполнителя больше плотности

вяжущего, частицы первого будут оседать. Вяжущее препятствует движению, и в нем возникают касательные напряжения:

$$\tau = m / F, \quad (6)$$

где  $m$  – масса частицы в связующем;  $F$  – площадь поверхности частицы.

Сила сопротивления связующего движению частиц наполнителя вниз, приходящаяся на единицу площади, есть статическое напряжение сдвига  $\Theta$ . Принимая частицы наполнителя шарообразной формы диаметром  $d$ , определим массу частицы в связующем:

$$m = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_r - \gamma_c), \quad (7)$$

где  $\gamma_r, \gamma_c$  – плотности наполнителя и связующего соответственно.

Площадь поверхности частицы шарообразной формы равна

$$F = \pi d^2. \quad (8)$$

Тогда формула (6) после подстановки выражений (7) и (8) будет иметь вид

$$\tau = \Theta = \frac{d}{6} (\gamma_r - \gamma_c). \quad (9)$$

В реальных условиях для предупреждения осаждения напряжения на поверхности частицы при ее движении должны превосходить статическое напряжение сдвига, что учитывается коэффициентом  $\kappa$ . Его значение зависит от размера частиц и с ростом их диаметра увеличивается. При диаметре частицы до 2 мм  $\kappa = 2,5-3$ . Учитывая это, из выражения (9) получим предельный размер частицы, не оседающей в связующем:

$$d = 6\kappa\Theta / (\gamma_r - \gamma_c). \quad (10)$$

При заполнении пустот каркаса термопластами необходимо предотвращать застывание расплава во время пропитки. Согласно закону сохранения энергии и результатам экспериментальных исследований механизма течения в литниковых каналах расплав не охлаждается при течении со скоростью не ниже

$$v_0 = 0,06(t_p - t_\phi) / \tau_0, \quad (11)$$

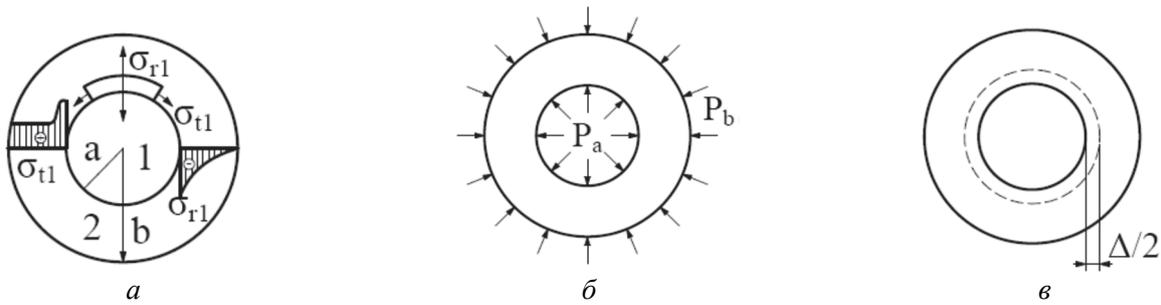
где  $t_p$  и  $t_\phi$  – температуры расплава и поверхности канала соответственно;  $\tau_0$  – напряжение сдвига у стенки канала.

### **Структурные напряжения в каркасных композитах**

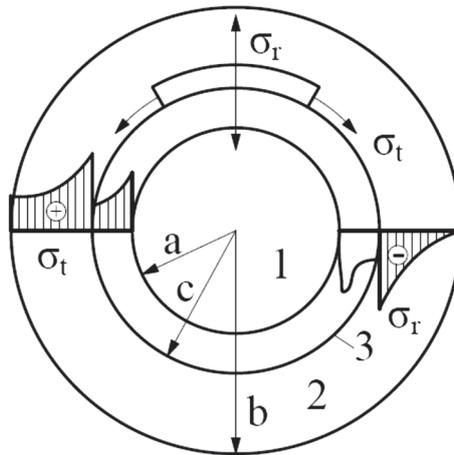
Композитам оптимальной структуры соответствуют бездефектные системы, в которых до минимума сведена величина структурных напряжений.

Известно, что в процессе отверждения бетонов происходит усадка матрицы. Развитию усадочных деформаций препятствует наполнитель. Вследствие этого в матрице возникают напряжения, называемые структурными, так как они появляются в процессе формирования структуры бетонов. Величина структурных напряжений зависит от усадки матрицы, степени ее наполнения, жесткости наполнителей, модуля упругости матрицы, режима отверждения композита.

Для анализа зависимости усадочных напряжений от свойств элементов структуры бетона предложена простая расчетная модель, которую можно применить и при качественной оценке усадочных напряжений в каркасных композитах (рис. 1). Предполагаем, что каркасные композиты, как и обычные, состоят из наполнителей цилиндрической формы и матрицы. Их отличительной особенностью является то, что в этих бетонах матрица с наполнителями взаимодействует через клеевую прослойку каркаса. Поэтому для бетонов данного типа рассматриваем задачу о напряженном состоянии цилиндра из жесткого сердечника с двухслойным покрытием (рис. 2).

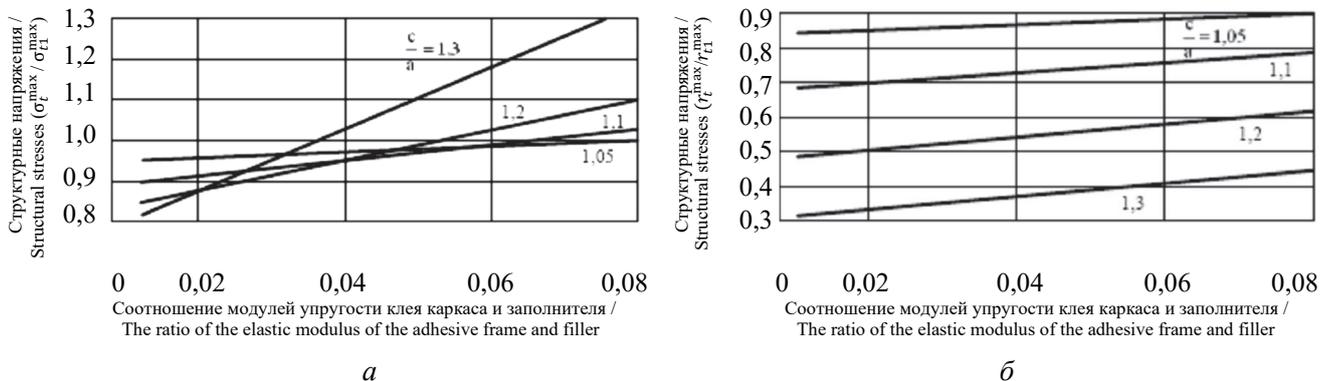


**Рис. 1.** Структурный элемент композита обычной структуры:  
*a* – расчетная модель: 1 – наполнитель, 2 – матрица; *б* – расчетная схема; *в* – перемещения от усадки  
**Figure 1.** Structural element of a regular structure composite:  
*a* – theoretical model: 1 – filler, 2 – matrix; *б* – structural design; *в* – shifts from shrinkage



**Рис. 2.** Структурный элемент композита каркасной структуры:  
 1 – наполнитель; 2 – матрица; 3 – клеевой слой  
**Figure 2.** Structural element of a framed composite:  
 1 – filler; 2 – matrix; 3 – glue layer

Получены аналитические выражения для расчета структурных напряжений в твердеющих каркасных композитах, определяющие особенности формирования структуры композитов и пригодные для управления процессами структурообразования и получения каркасных материалов с оптимальным комплексом свойств. По полученным формулам получены графические зависимости (рис. 3).



**Рис. 3.** Изменение структурных напряжений в матрице каркасного композита от толщины клеевого слоя каркаса ( $c/a$ ) и соотношения модулей упругости клея каркаса  $E_3$  и наполнителя  $E_1$ :  
*a* – окружных; *б* – радиальных

**Figure 3.** The change in structural stresses in the matrix of the frame composite from the thickness of the adhesive layer of the frame ( $c/a$ ) and the ratio of the elastic modulus of the glue of the frame  $E_3$  and the filler  $E_1$ :  
*a* – circumferential; *б* – radial

Из графиков видно, что структурные напряжения значительно снижаются упругим клеем каркаса, при этом оптимальное соотношение модулей упругости клея каркаса и заполнителей при постоянной жесткости матрицы находится в пределах от 0,01 до 0,04.

### Исследование поведения каркасных композитов при действии внешних нагрузок

Теоретически и экспериментально изучено поведение каркасных композитов при действии внешней нагрузки. Поведение композиционных материалов при воздействии внешней нагрузки во многом определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) в его структурных элементах. Так как компоненты композиционных строительных материалов (КСМ) имеют различные упругопрочностные свойства, нагрузка, приложенная к композиту, распределяется по объему неравномерно. В структуре материала при значительной неоднородности возникают области с концентрацией напряжений, и в них зарождаются микротрещины. Изучив влияние структурообразующих факторов на НДС, можно установить, при каких характеристиках компонентов концентрация напряжений в структуре будет минимальной. Используя эти данные при проектировании состава композитов, можно полнее использовать работу всех его компонентов и улучшить эксплуатационные свойства.

С целью выяснения влияния структурных факторов на напряженно-деформированное состояние КСМ при действии внешней нагрузки целесообразно использовать методы конечных элементов. В них рассматриваются плоские и объемные расчетные модели [21]. Бетоны обычно моделируются плоской расчетной моделью с одним включением [22–27]. При проведении расчетов модель разбивается на определенное число элементов конечных размеров, чаще всего треугольной или четырехугольной формы. В пределах этих элементов сначала определяют деформации, а затем по закону Гука и напряжения, которые представляются в виде коэффициентов концентрации напряжений, выражающих отношение максимальных напряжений к интенсивности внешней сжимающей условной нагрузки, определяемой как отношение суммарной внешней узловых силы к длине модели.

Расчетная модель, составленная для изучения НДС каркасных композитов, показана на рис. 4. Она разбивалась на 172 элемента треугольной формы. Ее загрузка производилась сжимающей нагрузкой по верхней грани в узлах. Для каркасных композитов важным является выяснение влияния на НДС соотношения жесткостей заполнителя, клея каркаса и матрицы, формы заполнителя и толщины клея на его зернах.

При оптимизации структурных показателей клея каркаса отношение толщины пленки связующего к диаметру заполнителя варьировалось в пределах от 0,05 до 0,1, а соотношение модулей упругости клея каркаса и заполнителя изменялось от 0 до 0,75.

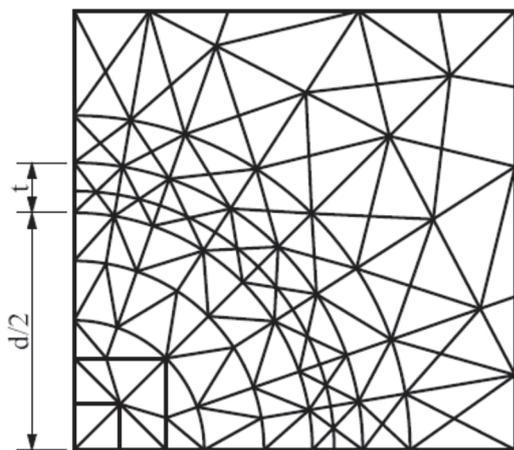


Рис. 4. Разбивка модели каркасного композита на треугольные элементы

Figure 4. Breakdown of the frame composite model into triangular elements

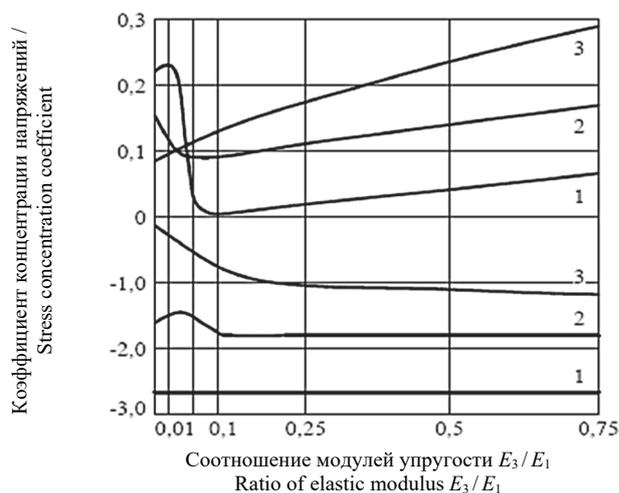


Рис. 5. Распределение максимальных напряжений в каркасном композите в зависимости от соотношения модулей упругости клея и заполнителя при соотношении модулей упругости матрицы и заполнителя  $E_3/E_1 = 0,5$ :

1 – в матрице; 2 – в заполнителе; 3 – в клее

Figure 5. Distribution of maximum stresses in the frame composite depending on the ratio of the elastic modulus of the adhesive and the filler with the ratio of the elastic modulus of the matrix and the filler  $E_3/E_1 = 0,5$ :

1 – in the matrix; 2 – in the filler; 3 – in the glue

Для изучения напряженного состояния композита каркасной структуры возьмем семь уровней отношений модулей упругости клея к наполнителю: 0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75. Нулевому уровню соответствуют напряжения в композите обычной структуры, без клеевой пленки на наполнителе.

Установлено, что изменение концентрации растягивающих напряжений происходит в больших пределах. В матрице, например, коэффициент концентрации растягивающих напряжений изменяется от 0,01 при  $E_3 / E_1 = 0,1$  до 0,25 при  $E_3 / E_1 = 0,01$ . Сжимающие напряжения при этом изменяются незначительно. В наполнителе растягивающие напряжения уменьшаются с увеличением  $E_3 / E_1$  до величины 0,05. При соотношении модулей упругости более 0,05 напряжения в наполнителе возрастают (рис. 5).

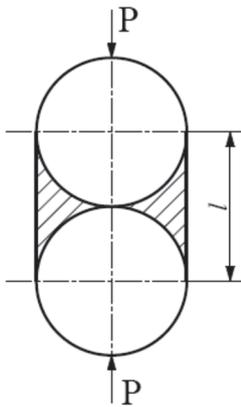
**Влияние формы наполнителя на внутренние напряжения**

**Influence of the filler shape on internal stresses**

Форма наполнителя	Условные напряжения в матрице	
	Растяжение	Сжатие
Диск	1	1
16-угольник	1,16	1,02
8-угольник	1,58	1,26
Ромб	2,17	1,37

Placeholder form	Conditional stresses in the matrix	
	Stretching	Compression
Disk	1	1
16-square	1,16	1,02
8-square	1,58	1,26
Rhomb	2,17	1,37

Форма зерен реального наполнителя может отличаться от сферы, поэтому были исследованы модели с различной формой включений. Отношение их объемов к общему объему модели принималось равным 0,24. Отклонение от круговой формы наполнителя приводит к увеличению концентрации напряжений (таблица). Наиболее значительный ее рост по отношению к круговой форме наблюдается в моделях с включением ромбических структур, ориентированных большой осью в сторону направления действия внешней нагрузки.



**Рис. 6.** Модель для расчета механических характеристик  
**Figure 6.** A model for calculating mechanical characteristics

Анализ напряженного состояния каркасного композита позволил определить его оптимальную структуру, в которой структурные напряжения существенно снижаются клеевым слоем. С данной точки зрения наиболее рационально следующее соотношение модулей упругости наполнителя, матрицы и клея: 1:0,3 – 0,5:0,05 – 0,1; причем желательно иметь клей каркаса с повышенными значениями прочности на растяжение. Это достигается, например, путем дисперсного армирования клея каркаса.

Модель каркасного композита рассматриваем как двухкомпонентную систему из наполнителей и матрицы. Зерна наполнителя в композите находятся в непосредственном контакте, а объем матрицы равен объему пустот наполнителей. Заменяем реальную систему моделью с регулярно расположенными наполнителями (рис. 6).

Расстояния между центрами наполнителей, расположенных вдоль вертикали и горизонтали, в начальном состоянии принимаем одинаковыми. При приложении сжимающих нагрузок расстояние между центрами двух соприкасающихся зерен уменьшится на величину  $\delta$ , что будет определяться процессами деформирования в зоне контакта при сопряжении частиц ( $\delta_1$ ) и вдавливания их в матрицу ( $\delta_2$ ).

Для моделей, состоящих из регулярно расположенных наполнителей, получены формулы для расчета модуля упругости при статическом и динамическом нагружении:

$$E = \frac{Pl}{\pi R^2 \left[ \frac{\delta h (1 + \beta^{3/2})}{2\beta} - \frac{(1 - \mu_2)P}{2E_2 R} \right]}; \quad E_{\text{прив}}^{\text{дин}} = \frac{Pl}{\pi R^2 [x + f(E_1 E_2)]}, \quad (12)$$

где  $P$  – нагрузка;  $l$  – расстояние между центрами контактирующих наполнителей;  $\delta h$  – деформация по Герцу;  $\beta$  – коэффициент сжатия эпюры, зависящий от параметров шероховатости и сжимающей нагрузки;  $E_2$  и  $\mu_2$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона матрицы соответственно;  $x = \delta - \delta_0$  (здесь  $\delta$  – сближение между центрами соприкасающихся зерен при приложении нагрузки;  $\delta_0$  – сближение в точке статического равновесия).

### Термическое сопротивление каркасных композитов

Широко распространенным методом теоретического исследования теплопроводности композиционных материалов является метод обобщенной проводимости, позволяющий применить для расчета основные соотношения электростатики и электродинамики. При описании процесса теплопроводности по методу обобщенной проводимости используют континуальную физическую модель. В континуальных моделях отдельные компоненты материала рассматриваются в виде сплошной среды (континуума) и на основании феноменологического анализа процесса переноса устанавливается зависимость коэффициента переноса от структуры смеси, от коэффициентов переноса отдельных компонентов и от их концентрации.

Структуру каркасного композита отнесем к системам с взаимопроникающими компонентами. Контактующие частицы и матрица между заполнителями образуют непрерывную протяженность заполнителей и матрицы во всех направлениях.

Рассмотрим модель, состоящую из цепочно-связанных в направлении теплового потока заполнителей в матрице (рис. 7).

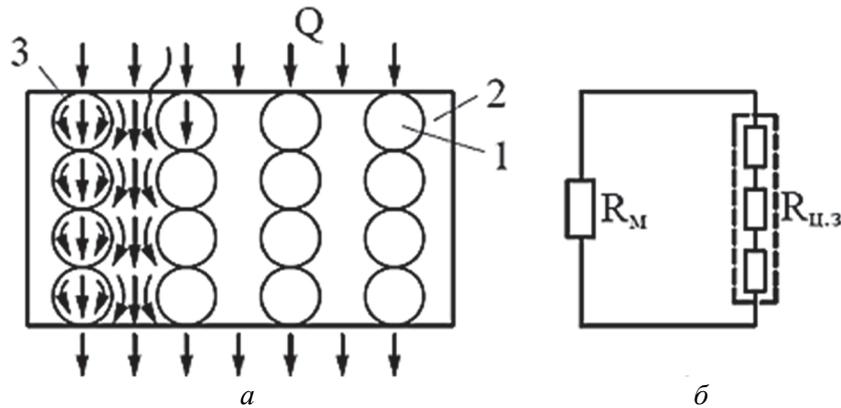


Рис. 7. Модель для расчета теплопроводности каркасных композиционных материалов:

*a* – элементарная ячейка; *б* – схема составляющих термического сопротивления модели;

1 – заполнитель; 2 – матрица; 3 – линии теплового потока через контактирующие заполнители; 4 – линии теплового потока по матрице

Figure 7. A model for calculating thermal conductivity of frame composite materials:

*a* – an elementary cell; *b* – a diagram of the components of the thermal resistance of the model;

1 – filler; 2 – matrix; 3 – lines of heat flow through contacting fillers; 4 – lines of heat flow through the matrix

С феноменологических позиций с использованием континуальной модели получены аналитические зависимости для расчета термического сопротивления изделий из каркасных композитов:

$$R_k = [100\pi d^2 / (6F_{обр}\rho_1)] \{ [\delta_1\rho_1 / 100\lambda_{гр}] + \{ 1 - (1,45/d)[2P_1d(1-\mu_1) / E_1]^{1/3} \} \times \\ \times F_3 / \{ 2,9\lambda_{гр}[2P_1d(1-\mu_1) / E_1]^{1/3} \} + \{ 100\pi d^2 / [6F_{обр}(100-\rho_1)] \} \times \{ \delta_1(1-\rho_1/100) / \lambda_m + \\ + [1 - (1-0,25\pi)^{1/2}] \times F_m / \{ 2d\lambda_m[1-0,25\pi] / 0,25\pi \}^{1/2} \} \}, \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр заполнителя;  $F_{обр}$  и  $\delta_1$  – площадь сечения и толщина образца;  $\rho_1$  – объемная концентрация заполнителя;  $\lambda_{гр}$  и  $\lambda_m$  – коэффициенты теплопроводности гранул заполнителя и матрицы;  $P_1$  – контактное усилие, вызываемое внутренними напряжениями в композите;  $E_1$  и  $\mu_1$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона матрицы соответственно;  $F_m = \pi b_m^2/4$  и  $F_3 = \pi a_m^2/4$  – площади сечения матрицы и заполнителей (здесь  $a_m$  и  $b_m$  – диаметры условного цилиндрического сечения матрицы в узком и широком проходе соответственно (между четырьмя и восемью шарообразными заполнителями)).

Значения теплопроводностей заполнителей и ненаполненных матричных композиций являются справочными данными. Для расчета теплопроводности наполненных матричных композитов следует пользоваться известными соотношениями. Например, теплопроводность полимерных композиций с мелкодисперсными наполнителями в [28] предлагается определять по формулам Эйкена:

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_c - \lambda_n - 2\gamma_n(\lambda_c - \lambda_n)}{2\lambda_c - \lambda_n - 2\gamma_n(\lambda_c - \lambda_n)} \quad \text{при } \lambda_n < \lambda_c; \quad (14)$$

$$\lambda_m = \frac{1+2\gamma_n}{1-\gamma_n} \lambda_c \quad \text{при } \lambda_n > \lambda_c, \quad (15)$$

где  $\lambda_m$ ,  $\lambda_c$ ,  $\lambda_n$  – теплопроводность наполненной композиции (матрицы), связующего и наполнителя соответственно;  $\gamma_n$  – объемное содержание наполнителя.

### *Химико-биологическое сопротивление каркасных композитов*

Сформулированы предложения по построению количественной теории химического и биологического сопротивления каркасных композитов. В каркасных композитах, составленных на плотных (непроницаемых) заполнителях, твердый скелет из заполнителей (каркас) тормозит скорость переноса вещества через матрицу, находящуюся в его пустотах. Замедление диффузии обусловлено удлинением пути диффузионного потока вследствие огибания непроницаемых зерен. Получены теоретические зависимости коэффициента диффузии в каркасных композитах от основных структурообразующих факторов. Эффективный коэффициент диффузии каркасного композита предложено подсчитывать по формуле

$$D = \frac{D_m}{1 + 0,274(1 - \Pi)}, \quad (16)$$

где  $\Pi$  – пористость каркаса;  $D_m = \sqrt{\frac{a}{r}} D_1$  – эффективный коэффициент диффузии пропиточной матрицы;  $a$  – расстояние между наполнителями;  $r$  – радиус частиц наполнителя;  $D_1$  – коэффициент диффузии связующего.

Расстояние между наполнителями определяется по формуле

$$a = \left\{ \left[ \frac{\pi(m_c/\rho_c + m_n/\rho_n)}{6m_n/\rho_n} \right]^{1/3} - 1 \right\} d, \quad (17)$$

где  $m_c$  и  $m_n$  – массы связующего и наполнителя соответственно;  $\rho_c$  и  $\rho_n$  – плотности связующего и наполнителя соответственно;  $d$  – диаметр наполнителя.

Практическое значение имеют теоретические и экспериментальные исследования поведения строительных материалов при воздействии биологических сред в оптимальных для роста микроорганизмов условиях, когда происходит максимальное выделение продуктов метаболизма (ферментов) и более быстрая деградация материалов. Уравнение биосинтеза ферментов на полимерных субстратах, согласно [29], имеет следующий вид

$$\dot{E} = X\mu_E - \{[E]_s + 0,1[E]_a\}J_n, \quad (18)$$

где  $X$  – биомасса микроорганизмов в единице объема;  $\mu_E$  – удельная скорость биосинтеза;  $[E]_s$  – равновесная концентрация ферментов в среде, то есть не связанная с субстратом;  $[E]_a$  – концентрация адсорбированных субстратом ферментов;  $J_n$  – удельная скорость инактивации ферментов.

Рост микроорганизмов подчиняется следующему уравнению [30]:

$$X = \bar{X}(\mu_x - A_x), \quad (19)$$

где  $X$  – предельная критическая биомасса;  $\mu_x$  и  $A_x$  – удельные скорости роста биомассы и отмирания клеток соответственно.

Величина согласно [31] определяется при комбинировании уравнений баланса ферментов и изотермы адсорбции Лангмюра:

$$[E] = [E]_a + [E]_s; \quad (20)$$

$$\frac{[E]_a}{E_1} = \frac{S[E]_s}{K_E + [E]_s}, \quad (21)$$

где  $E$  – общая концентрация фермента;  $E_1$  – величина предельной адсорбции;  $S$  – площадь поверхности субстрата;  $K_E$  – константа адсорбции фермента.

Подстановка  $[E]_a$  из (20) в (21) приводит к квадратному уравнению, решение которого дает

$$[E]_a = 0,5 \{b - (b^2 - 4E_1S[E])\}^{0,5}, \quad (22)$$

где  $b = E_1S + K_E + [E]$ .

Координата фронта диффузии продуктов метаболизма в композит может быть оценена по формуле

$$a = k(\zeta)\sqrt{Dt}. \quad (23)$$

В случае же, если некоторые компоненты материала являются источниками питания, то в уравнение необходимо вводить коэффициенты  $n$  и  $k_1$ , характеризующие концентрацию веществ, усваиваемых микроорганизмами, и константу скорости взаимодействия веществ с ними соответственно:

$$a = k(\zeta)\sqrt{Dt / nk_1}. \quad (24)$$

Деграционные процессы в цементных бетонах при коррозии второго вида могут сопровождаться образованием в поверхностных слоях материала продуктов разрушения в виде труднорастворимых соединений, обладающих малой прочностью [30], которые затрудняют доступ агрессивной среды во внутренние слои материала и тем самым снижают интенсивность коррозионных процессов. При таком механизме на начальном этапе коррозии, когда слой еще не образовался, ее интенсивность определяется скоростью химических реакций – процесс находится в кинетической области, на втором же этапе, по мере роста слоя продуктов коррозии, ее интенсивность определяется диффузией агрессивной жидкости через прородированный слой к еще не поврежденному – процесс переходит в диффузионную область.

Для цементных композитов при таком механизме деграции глубина повреждения определяется по уравнению Таммана:

$$a = \sqrt{D^* C_0 \Xi t}, \quad (25)$$

где  $D^*$  – эффективный коэффициент диффузии агрессивной среды через слой продуктов коррозии;  $C_0$  – концентрация агрессивного вещества;  $\Xi = mM_{CaO} / nM_{кисл}$  – химический эквивалент, представляющий собой соотношение масс оксида кальция и кислоты, вступающих во взаимодействие;  $m$  и  $n$  – стехиометрические коэффициенты;  $t$  – время.

Наряду с диффузионными механизмами деграции при воздействии продуктов метаболизма микроорганизмов возможна реализация чисто гетерогенного механизма разрушения.

Скорость биокоррозии при гетерогенном механизме деграции экспериментально можно оценить по формуле

$$V = \frac{P_1 - P_2}{St}, \quad (26)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – масса образца до и после испытаний соответственно;  $S$  – площадь всей поверхности образца.

Разработаны методы прогнозирования и работоспособности композитов каркасной структуры в агрессивных средах.

Согласно теории химического сопротивления композитов, чтобы установить деграцию композиционных материалов, необходимо определить координату фронта переносимой (диффундирующей или фильтрующей) жидкости и изменение прочностных и упругопластических характеристик композита по сечению.

## Заключение

1. Показана перспективность применения в строительстве каркасных строительных композитов, технология изготовления которых включает предварительное создание оптимальных смесей заполнителей и склеивания зерен друг с другом с последующим заполнением пустот полученного каркаса матрицей.

2. Специфическая структура каркасных композитов и своеобразная технология их изготовления позволяют создавать на их основе материалы с заданными свойствами и изделия различного назначения.

3. Установлены закономерности структурообразования каркасных композитов на уровне формирования каркасов и матриц, а также при их объединении.

4. Предложены формулы для расчета количественного содержания составляющих компонентов каркасных композитов. Показано, что процесс пропитки каркаса матрицей подчиняется закономерностям движения свобододисперсных или связнодисперсных систем.

5. Получены аналитические выражения для расчета структурных напряжений в твердеющих каркасных композитах, пригодные для получения материалов с оптимальным комплексом свойств.

6. Методом конечных элементов исследовано влияние основных структурных и механических показателей композитов на их напряженно-деформированное состояние.

7. С феноменологических позиций с использованием континуальной модели получены аналитические зависимости для расчета коэффициента теплопроводности изделий из композитов сплошного и слоистого поперечного сечения.

8. Для моделей, состоящих из упорядоченно расположенных заполнителей получены формулы для расчета модуля упругости и показана кинетика процессов разрушения каркасных композитов при их нагружении.

9. Сформулированы предложения по построению количественной теории химического сопротивления каркасных композитов. Получены теоретические зависимости коэффициента диффузии в каркасных композитах от основных структурообразующих факторов.

## Список литературы

1. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the mycoflora, selected surface samples poliferation composites in humid maritime climate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. No. 2. Article 022082. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022082>
2. Ma P.-C., Mo S.-Y., Tang B.-Z., Kim J.-K. Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites // Carbon. 2010. Vol. 48. No. 6. Pp. 1824–1834. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.028>
3. Erofeev V., Smirnov V., Myshkin A. The study of polyester-acrylate composite's stability in the humid maritime operating conditions // Materials Today. 2019. Vol. 19. Pp. 2255–2257. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.547>
4. Shen H.-S. Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments // Composite Structures. 2009. Vol. 91. No. 1. Pp. 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.026>
5. Zhu P., Lei Z.X., Liew K.M. Static and free vibration analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory // Composite Structures. 2012. Vol. 94. No. 4. Pp. 1450–1460. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.010>
6. Erofeev V., Shafigullin L., Bobrishev A. investigation of noise – vibration-absorbing polymer composites used in construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. No. 4. Article 042034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042034>
7. Song M., Kitipornchai S., Yang J. Free and forced vibrations of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphenenanoplatelets // Composite Structures. 2017. Vol. 159. Pp. 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.070>
8. Zhang L.W., Lei Z.X., Liew K.M., Yu J.L. Static and dynamic of carbon nanotube reinforced functionally graded cylindrical panels // Composite Structures. 2014. Vol. 111. No. 1. Pp. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.12.035>
9. Yas M.H., Samadi N. Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012. Vol. 98. Pp. 119–128.
10. Erofeev V., Dergunova A., Piksaikina A., Bogatov A., Kablov E., Startsev O., Matvievskiy A. The effectiveness of materials different with regard to increasing the durability // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73. Article 04021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167304021>
11. Erofeev V., Bobryshev A., Shafigullin L., Zubarev P., Lakhno A., Darovskikh I., Tretiakov I. Building heat-insulating materials based on the products of the transesterification of polyethylene terephthalate and dibutyltin dilaurate // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1455–1459. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.879>
12. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 96–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96>

13. Shen H.-S., Xiang Y., Lin F. Nonlinear vibration of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates in thermal environments // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 319. Pp. 175–193. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.02.029>
14. Ni Y., Chen L., Teng K., Shi J., Qian X., Xu Z., Tian X., Hu C., Ma M. Superior mechanical properties of epoxy composites reinforced by 3D interconnected graphene skeleton // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015. Vol. 7. No. 21. Pp. 11583–11591. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02552>
15. Erofeev V. Frame construction composites for buildings and structures in aggressive environments // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. Pp. 1444–1447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.877>
16. Montazeri A., Montazeri N. Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content // *Materials and Design*. 2011. Vol. 32. No. 4. Pp. 2301–2307. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.003>
17. Malekzadeh P., Zarei A.R. Free vibration of quadrilateral laminated plates with carbon nanotube reinforced composite layers // *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 82. Pp. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.04.016>
18. Ke L.-L., Yang J., Kitipornchai S. Dynamic stability of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2013. Vol. 20. No. 1. Pp. 28–37. <https://doi.org/10.1080/15376494.2011.581412>
19. Rahmanian S., Suraya A.R., Shazed M.A., Zahari R., Zainudin E.S. Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: carbon nanotubes and short carbon fibers // *Materials and Design*. 2014. Vol. 60. Pp. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.039>
20. Ерофеев В.Т. Каркасные строительные композиты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 52 с.
21. Зенкевич Д.Г. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
22. Гусев Б.В., Зазимко В.Г., Нетеса Н.И. Исследование напряженно-деформированного состояния компози- тов с использованием метода конечных элементов // *Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура*. 1981. № 8. С. 13–16.
23. Дементьев А.Г., Тараканов О.Г. Структура и свойства пенопластов. М.: Химия, 1983. 176 с.
24. Зазимко В.Г. Оптимизация свойств строительных материалов. М.: Транспорт, 1981. 103 с.
25. Ломакин Е.В., Гаспарян Г.О. О средах, чувствительных к виду напряженного состояния // *Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела*. М., 1984. С. 59–76.
26. Сергеев С.М., Беккер В.А., Безаелев В.В. Моделирование напряженного состояния растворной части во- круг гранул крупного заполнителя бетона при действии на него внешней сжимающей нагрузки // *Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура*. 1982. № 5. С. 21–25.
27. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.
28. Попов В.М. Теплообмен через соединения на клеях. М.: Энергия, 1974. 303 с.
29. Мануковский Н.С., Абросов Н.С., Косолапова Л.П. Кинетика биоконверсии лигноцеллюлоз. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. 112 с.
30. Первушин Ю.В., Бобров О.Г. Моделирование кинетики обрастания микроорганизмами полимерных мате- риалов // *Пластические массы*. 1990. № 8. С. 69–71.
31. Гусаков А.В., Синуцин А.П., Клесов А.А. Математическая модель ферментативного гидролиза целлюлозы препаратом гриба *Trichoderma longibrachiatum* в реакторе периодического действия // *Прикладная биохимия и мик- робиология*. 1986. Т. 22. Вып. 1. С. 59–69.

## References

1. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the mycoflora, selected surface samples poliferation composites in humid maritime climate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698(2):022082. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022082>
2. Ma P.-C., Mo S.-Y., Tang B.-Z., Kim J.-K. Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functiona- lized carbon nanotubes in epoxy composites. *Carbon*. 2010;48(6):1824–1834. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.028>
3. Erofeev V., Smirnov V., Myshkin A. The study of polyester-acrylate composite's stability in the humid maritime operating conditions. *Materials Today*. 2019;19:2255–2257. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.547>
4. Shen H.-S. Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal en- vironments. *Composite Structures*. 2009;91(1):9–19. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.026>
5. Zhu P., Lei Z.X., Liew K.M. Static and free vibration analyses of carbon nanotube-reinforced composite plates using finite element method with first order shear deformation plate theory. *Composite Structures*. 2012;94(4):1450–1460. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.010>
6. Erofeev V., Shafigullin L., Bobrishev A. Investigation of noise – vibration-absorbing polymer composites used in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;463(4):042034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/4/042034>
7. Song M., Kitipornchai S., Yang J. Free and forced vibrations of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphenenanoplatelets. *Composite Structures*. 2017;159:579–588. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.070>

8. Zhang L.W., Lei Z.X., Liew K.M., Yu J.L. Static and dynamic of carbon nanotube reinforced functionally graded cylindrical panels. *Composite Structures*. 2014;111(1):205–212. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.12.035>
9. Yas M.H., Samadi N. Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:119–128.
10. Erofeev V., Dergunova A., Piksaikina A., Bogatov A., Kablov E., Startsev O., Matvievskiy A. The effectiveness of materials different with regard to increasing the durability. *MATEC Web of Conferences*. 2016;73:04021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167304021>
11. Erofeev V., Bobryshev A., Shafigullin L., Zubarev P., Lakhno A., Darovskikh I., Tretiakov I. Building heat-insulating materials based on the products of the transesterification of polyethylene terephthalate and dibutyltin dilaurate. *Procedia Engineering*. 2016;165:1455–1459. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.879>
12. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept. *Solid State Phenomena*. 2016;871:96–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96>
13. Shen H.-S., Xiang Y., Lin F. Nonlinear vibration of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates in thermal environments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017;319:175–193. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.02.029>
14. Ni Y., Chen L., Teng K., Shi J., Qian X., Xu Z., Tian X., Hu C., Ma M. Superior mechanical properties of epoxy composites reinforced by 3D interconnected graphene skeleton. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015;7(21):11583–11591. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02552>
15. Erofeev V. Frame construction composites for buildings and structures in aggressive environments. *Procedia Engineering*. 2016;165:1444–1447. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.877>
16. Montazeri A., Montazeri N. Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content. *Materials and Design*. 2011;32(4):2301–2307. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.003>
17. Malekzadeh P., Zarei A.R. Free vibration of quadrilateral laminated plates with carbon nanotube reinforced composite layers. *Thin-Walled Structures*. 2014;82:221–232. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.04.016>
18. Ke L.-L., Yang J., Kitipornchai S. Dynamic stability of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2013;20(1):28–37. <https://doi.org/10.1080/15376494.2011.581412>
19. Rahmanian S., Suraya A.R., Shazed M.A., Zahari R., Zainudin E.S. Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: carbon nanotubes and short carbon fibers. *Materials and Design*. 2014;60:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.039>
20. Erofeev V.T. *Frame building composites* (abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences). Moscow: 1993. (In Russ.)
21. Zenkevich D.G. *Finite element method in engineering*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.)
22. Gusev B.V., Zazimko V.G., Netesa N.I. Investigation of the stress-strain state of composites using the finite element method. *News of Higher Educational Institutions. Series: Construction and Architecture*. 1981;(8):13–16. (In Russ.)
23. Dementiev A.G., Tarakanov O.G. *Structure and properties of foams*. Moscow: Khimiya Publ.; 1983. (In Russ.)
24. Zazimko V.G. *Optimization of the properties of building materials*. Moscow: Transport Publ.; 1981. (In Russ.)
25. Lomakin E.V., Gasparyan G.O. On media sensitive to the type of stress state. *Nelinejnye Modeli i Zadachi Mekhaniki Deformiruemogo Tverdogo Tela*. Moscow; 1984. p. 59–76. (In Russ.)
26. Sergeev S.M., Becker V.A., Bezaev V.V. Modeling of the stress state of the mortar part in the circle of granules of a large aggregate of concrete under the action of an external compressive load on it. *Izvestiya Vuzov. Seriya: Stroitel'stvo i Arkhitektura*. 1982;(5):21–25. (In Russ.)
27. Fujii T., Dzako M. *Mechanics of destruction of composite materials*. Moscow: Mir Publ.; 1982. (In Russ.)
28. Popov V.M. *Heat transfer through joints on adhesives*. Moscow: Energiya Publ.; 1974. (In Russ.)
29. Manukovsky N.S., Abrosov N.S., Kosolapova L.P. *Kinetics of bioconversion of lignocelluloses*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.)
30. Pervushin Yu.V., Bobrov O.G. Modeling of the kinetics of microbial fouling of polymer materials. *Plasticheskie Massy*. 1990;(8):69–71. (In Russ.)
31. Gusakov A.V., Sinitin A.P., Klesov A.A. Mathematical model of enzymatic hydrolysis of cellulose with preparation of the fungus *Trichoderma longibrachiatum* in a batch reactor. *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*. 1986;22(1):59–69. (In Russ.)