

УДК 691.58:536.24:519.6

DOI 10.48612/ntp/4emk-et3e-nnp

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В АРБОЛИТОВЫХ БЛОКАХ ПРИ СУШКЕ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ МАССООБМЕНА

**С. В. ФЕДОСОВ^{1,4}, В. Е. РУМЯНЦЕВА^{2,3}, И. В. КРАСИЛЬНИКОВ^{2,3},
М. А. КОРИНЧУК³, И. А. КРАСИЛЬНИКОВА⁵**

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, г. Москва

² Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

³ Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

⁴ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва

⁵ Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Российская Федерация, г. Владимир

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru; varrym@gmail.com, korasb@mail.ru,
m1na47-74@mail.ru, irinanebukina@rambler.ru

В статье рассматривается проблема оптимизации процессов сушки арболита – экологически ориентированного композитного материала на основе древесного заполнителя и цементного вяжущего. Недостаточная изученность физико-химических процессов твердения и нестационарного массопереноса приводит к образованию усадочных дефектов и снижению прочностных характеристик изделий. Целью работы является разработка математической модели, описывающей распределение влажностного содержания в блоке-сырце при различных граничных условиях. В основу исследования положено нелинейное дифференциальное уравнение А. В. Лыкова для капиллярно-пористых тел. Получено аналитическое решение задачи с использованием безразмерных критериев подобия (Фурье, Кирпичева) для трех технологических схем размещения блоков: на проницаемом, непроницаемом и частично проницаемом основании. Проведен численный эксперимент, демонстрирующий пространственно-временную эволюцию влажностного поля. Результаты показывают, что схема с непроницаемым основанием вызывает асимметрию профиля влажности и риск трещинообразования, тогда как частично проницаемый настил обеспечивает оптимальный баланс между скоростью сушки и качеством структуры. Разработанная модель позволяет прогнозировать дефекты и может служить основой для создания цифрового двойника технологического процесса.

Ключевые слова: арболит, сушка, математическое моделирование, массоперенос, влажностное содержание, граничные условия, технологические схемы, критерии подобия.

MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY MOISTURE TRANSFER IN ARBOLITE BLOCKS DURING DRYING, TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR ORGANIZING MASS EXCHANGE

**S. V. FEDOSOV^{1,4}, V. E. RUMYANTSEVA^{2,3}, I. V. KRASILNIKOV^{2,3},
M. A. KORINCHUK³, I. A. KRASILNIKOVA⁵**

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
Russian Federation, Moscow

² Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

³ Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

⁴Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN
Russian Federation, Moscow

⁵ Vladimir State University
Russian Federation, Vladimir

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru; varrym@gmail.com, korasb@mail.ru,
m1na47-74@mail.ru, irinanebukina@rambler.ru

The article discusses the problem of optimizing the drying processes of arbolite, an environmentally friendly composite material based on wood filler and cement binder. Insufficient knowledge of the physical and chemical processes of hardening and non-stationary mass transfer leads to the formation of shrinkage defects and a decrease in the strength characteristics of the products. The aim of the work is to develop a mathematical model that describes the distribution of moisture content in a raw block under various boundary conditions. The study is based on the nonlinear differential equation of A.V. Lykov for capillary-porous bodies. An analytical solution of the problem is obtained using dimensionless similarity criteria (Fourier, Kirpichev) for three technological schemes of block placement: on a permeable, impermeable, and partially permeable base. A numerical experiment is conducted to demonstrate the spatial and temporal evolution of the moisture field. The results show that the scheme with an impermeable base causes asymmetry in the moisture profile and increases the risk of cracking, while the partially permeable base provides an optimal balance between the drying rate and the quality of the structure. The developed model allows for the prediction of defects and can serve as a basis for creating a digital twin of the technological process.

Keywords: arbolite, drying, mathematical modeling, mass transfer, moisture content, boundary conditions, technological schemes, and similarity criteria.

Введение

В условиях перехода к устойчивому развитию и «зелёным» технологиям арболит приобретает значимость как экологически ориентированный материал. Ключевое преимущество лёгких бетонов на органических заполнителях – эффективное использование вторичных ресурсов (отходов деревообработки, сельского хозяйства), составляющих до 80–90 % объёма композита. Это снижает антропогенную нагрузку и соответствует принципам циркулярной экономики.

Арболит представляет собой композиционный материал на основе цементного вяжущего и древесной дробленки. Его низкая теплопроводность (0,07...0,17 Вт/м·К) и достаточная прочность (1,5...3,5 МПа) делают его перспективным для энергоэффективного строительства. Для нейтрализации ингибирующего воздействия экстрактивных веществ древесины на гидратацию цемента применяются химические минерализаторы (сульфат алюминия, хлорид кальция, жидкое стекло) и функциональные добавки.

Однако внедрению материала препятствует недостаточная изученность физико-химических процессов твердения и сушки. Арболит – сложная многофазная капиллярно-пористая система с выраженной анизотропией свойств. В процессе сушки одновременно протекают гидратация цемента, испарение влаги, капиллярный перенос и усадочные деформации. Неравномерное распределение темпера-

туры и влажности вызывает внутренние напряжения и микротрещины, снижая прочностные характеристики.

Для ускорения твердения применяются методы тепловой обработки: электропрогрев, СВЧ-нагрев или традиционная тепловлажностная обработка (ТВО). Несмотря на наличие разработок, отсутствует комплексная теоретическая модель, описывающая нестационарные процессы тепломассопереноса с учётом фазовых превращений и химических реакций. Теоретическое и экспериментальное исследование этих закономерностей позволит назначать рациональные режимы сушки, минимизировать образование дефектов и повысить энергоэффективность производства.

Цель публикации: Разработка теоретической базы и аналитического аппарата для рационального проектирования режимов сушки арболитовых изделий, минимизации производственных дефектов (трещин, коробления) и повышения энергоэффективности производства на основе прогнозирования полей влагосодержания.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положена концепция арболита как многофазной капиллярно-пористой среды (твёрдая фаза – цемент и заполнитель, жидкая – влага, газовая – воздух в порах). Структурные особенности определяют диффузионные свойства и анизотропию: тепло-

и влагопроводность вдоль волокон превышают поперечные значения в 1,5...2,5 раза.

Технологические схемы сушки блоков-сырца классифицированы по типу опорной поверхности и организации массообмена:

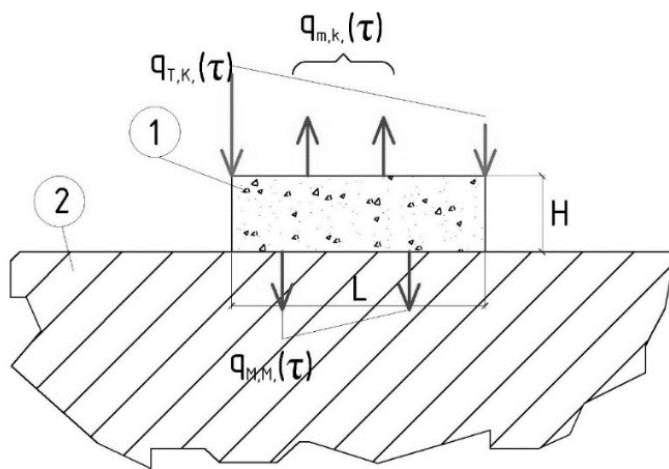
1. **Проницаемое основание.** Характеризуется двусторонним отводом влаги (испарение с верхней поверхности и диффузия в подстилающий слой). Применяется преимущественно для естественной сушки в жарком климате (рис. 1).

2. **Непроницаемое основание.** Предполагает односторонний массообмен через верхнюю и боковые грани. Условие нулевого потока влаги снизу приводит к асимметричному профилю влагосодержания и риску усадочных дефектов в придонной зоне (рис. 2).

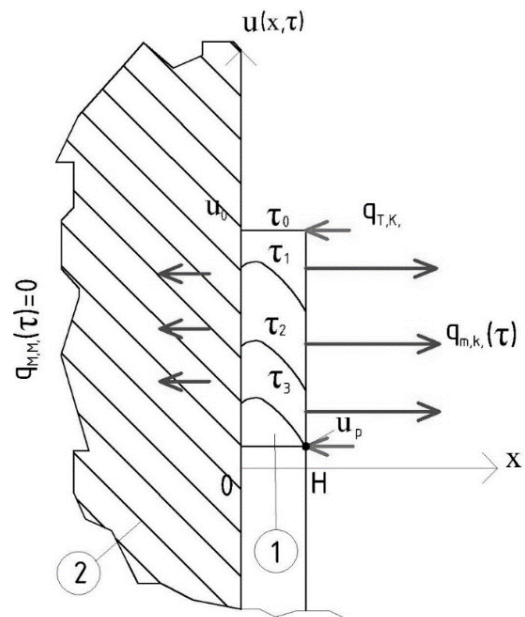
3. **Частично проницаемое основание.** Промежуточный вариант (контакт с перфорированными формами), где массообмен снизу описывается граничным условием третьего рода с пониженным коэффициентом отдачи (рис. 3).



а)



б)



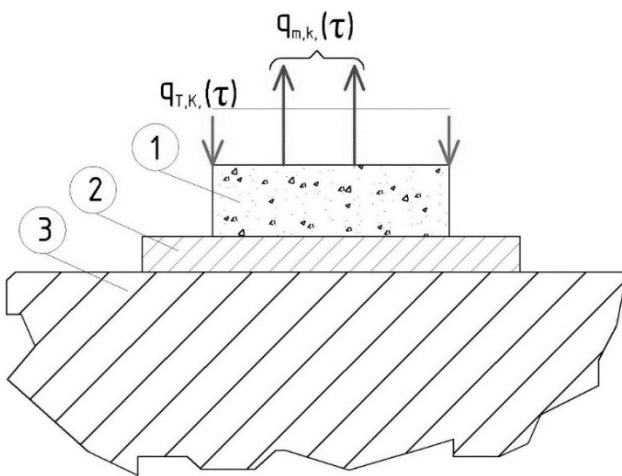
в)

Рис. 1. Вариант размещения с контактом вида «блок – сплошной проницаемый настил»
а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена; в) расчетная схема влагопереноса.

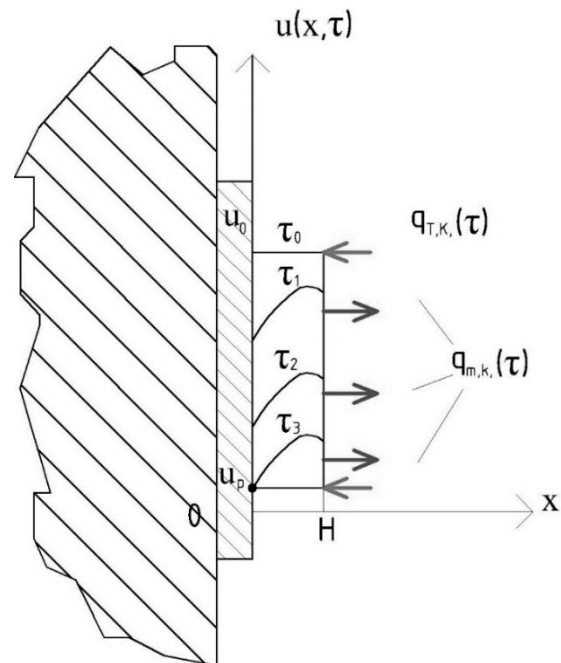
1 – блок-сырец; 2 – настил; u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья



а)



б)



в)

Рис. 2. Вариант размещения с контактом вида «сырец – сплошной непроницаемый настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена; в) расчетная схема влагопереноса.
 1 – блок-сырец; 2 – настил; 3 – основание
 u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Во всех схемах структурообразование сопровождается тепловой обработкой двумя способами:

- **Естественная сушка.** Теплоподвод осуществляется комбинированным механизмом: конвекция с воздухом и поглощение солнечной радиации. Интенсивность зависит от метеорологических параметров.

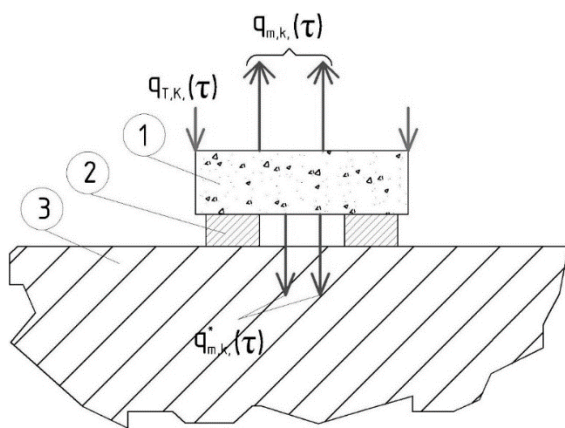
- **Искусственная сушка.** Блоки размещаются в сушильных камерах, где теплоноситель нагревается до 40–60 °С и подаётся принудительно. Это позволяет стабилизировать

параметры среды и исключить влияние климатических факторов.

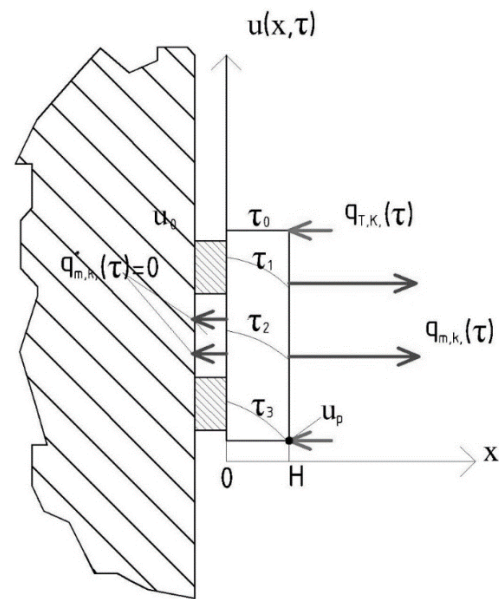
Физическая картина распределения потоков теплоты и влаги варьируется в зависимости от схемы. Для проницаемого основания характерен двунаправленный градиент влагосодержания, для непроницаемого – ориентированный исключительно вверх. Выбор схемы влияет на кинетику сушки и формирование микроструктуры цементного камня: схема с проницаемым основанием технологически проще, но её эффективность ограничена климатическими условиями и требуемыми площадями.



а)



б)



в)

Рис. 3. Вариант размещения с контактом вида «сырец – несплошной настил»
 а) пример сушки рассматриваемым методом; б) варианты размещения блоков в зоне теплообмена;
 в) расчетная схема влагопереноса. 1 – блок-сырец; 2 – настил; 3 – основание
 u_0 – начальная влажность сырья; u_p – равновесная влажность сырья

Математическое моделирование процессов сушки базируется на нелинейном дифференциальном уравнении А. В. Лыкова для нестационарного массопереноса в капиллярно-пористых телах [17]:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[k(x, \tau) \text{grad } u(x, \tau)], \quad (1)$$

где $u(x, \tau)$ – изменение влажности по толщине блока и во времени, кг влаги/кг сухого; $k(x, \tau)$ – коэффициент массопроводности (коэффициент диффузии влаги в твёрдом теле), $\text{м}^2/\text{с}$.

В процессе сушки арболита коэффициент массопроводности представляет собой ключевой параметр, определяющий интенсивность

внутреннего влагопереноса под действием градиента влагосодержания. Физически он характеризует способность капиллярно-пористой структуры материала пропускать влагу и зависит от множества факторов: текущей влажности (снижается по мере высыхания из-за уменьшения количества свободной воды в капиллярах), температуры (возрастает с повышением температуры за счёт увеличения подвижности молекул воды), степени гидратации цементного камня (формирование гелевых фаз сужает поровое пространство) и анизотропии древесного наполнителя (диффузия вдоль волокон превышает поперечную в 1,5–2,5 раза) [10, 13]. Экспериментальные исследования показывают, что для арболита с плотностью 500 ... 700 $\text{кг}/\text{м}^3$

коэффициент массопроводности варьируется в диапазоне $1,5 \cdot 10^{-10} \dots 8,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с при изменении влажности от начальной (60–70 %) до равновесной (12–16 %) [13]. В рамках предлагаемой математической модели для обеспечения вычислительной устойчивости, с учетом применения метода микропроцессов, коэффициент массопроводности принимается постоянным (равным его среднему значению за рассматриваемый временной интервал) [18]. Такой подход позволяет сохранить физическую адекватность модели при одновременном снижении вычислительной сложности, поскольку локальная погрешность аппроксимации не превышает 3 %, а глобальная погрешность интегрального распределения влаги по толщине блока за весь цикл сушки укладывается в допустимые пределы ± 5 %.

При описанных выше допущениях, дифференциальное уравнение нестационарной массопроводности (диффузии влаги) по толщине блока-сырца принимает линейный вид:

$$\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq H. \quad (2)$$

Начальное распределение влажности по толщине блока-сырца на i -м микропроцессе принимаем неравномерным, полученное из результатов расчета $(i-1)$ -го микропроцесса, описываемое какой-либо математической функцией:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0(x). \quad (3)$$

В частном случае равномерного начального условия, оно запишется:

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0. \quad (4)$$

Правильные граничные условия обеспечивают физическую достоверность и математическую корректность решения дифференциального уравнения, определяя единственность решения и адекватно отражая взаимодействие

моделируемой системы с внешней средой на границах расчётной области.

На внешней поверхности блока граничное условие характеризует плотность потока влаги, поступающей из внутренних слоев блока к границе раздела фаз:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=H} = q_{m,k}(\tau). \quad (5)$$

На нижней поверхности блока поток влаги, подходящей из внутренних слоев блока к нижней поверхности, должен быть равен потоку влаги, идущему в основание по механизму фильтрационного переноса:

$$-k \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{m,\phi}(\tau). \quad (6)$$

Предложенный подход позволяет не только прогнозировать температурно-влажностные поля в объеме блока на любом этапе сушки, но и оценивать риски образования дефектов (трещин, коробления) за счёт расчёта градиентов усадочных деформаций и внутренних напряжений, что создаёт предпосылки для разработки цифрового двойника технологического процесса производства арболитовых изделий.

Результаты и обсуждение

Анализ научной литературы показал, что профессорами С. П. Рудобаштой и Э. М. Карташовым [19] получено аналитическое решение дифференциального уравнения нестационарной массопроводности для неограниченной пластины при неравномерном начальном распределении концентраций переносимого компонента и граничных условиях второго рода на обеих поверхностях, которые представлены в виде функции, зависящей от времени. Данное решение может быть адаптировано к задаче моделирования влагопереноса в среде с переменными потенциалами в арболитовом блоке-сырце на i -м микропроцессе (уравнения (2)–(6)):

$$\begin{aligned} u(x, \tau) = & \frac{1}{H} \int_0^H u_0(x) dx - \frac{1}{H} \int_0^T [q_{mk}(\tau^*) - q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^* + \\ & + \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^H u_0\left(\frac{x^*}{H}\right) \cos\left(\pi m \frac{x^*}{H}\right) d\frac{x^*}{H} - \\ & - \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m \frac{x}{H}\right) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^T [q_{mk}(\tau^*) - (-1)^m q_{m\phi}(\tau^*)] d\tau^*. \end{aligned} \quad (7)$$

Как отмечено в исследованиях [17-20], применение безразмерных переменных и критерияльного анализа при математическом моделировании процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах обеспечивает универсальность решений и позволяет выявить

физическую сущность явлений независимо от конкретных геометрических размеров и свойств материала. Введём следующие безразмерные переменные и критерии подобия Фурье и Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u(x, \tau) - u_p}{u_p}, \quad \bar{x} = \frac{x}{H}, \quad U_0(\bar{x}, Fo_m) = \frac{u_0(x, \tau) - u_p}{u_p}, \quad (8)$$

$$Fo_m = \frac{k\tau}{H^2}, \quad Ki_{mk}(Fo_m^*) = \frac{q_{mk}(\tau^*) H}{k u_p}, \quad Ki_{m\phi}(Fo_m^*) = \frac{q_{m\phi}(\tau^*) H}{k u_p}. \quad (9)$$

После подстановки (8) и (9) в решение (7), получено следующее аналитическое решение для расчета полей влагосодержаний в

блоке арболита-сырца, учитывающее изменение во времени плотности потоков массы:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = \int_0^1 U_0(\bar{x}) d\bar{x} - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*). \quad (10)$$

Полученное аналитическое решение представляет собой распределение влагосодержания $u(x, \tau)$ по толщине арболитового блока при его сушке, с учетом изменения во времени потоков массы. Оно является решением линейного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности (2) при неравномерном начальном распределении влаги (3) и граничных условиях второго рода (4)–(5), соответствующих конкретной технологической схеме сушки (проницаемый или частично проницаемый настил). При моделировании сушки на непроницаемом настиле $Ki_{m\phi} = 0$. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объеме арболитового блока-сырца с учётом градиента влагосодержания на

поверхностях, обусловленного испарением свободной воды. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные частные случаи, необходимые для моделирования технологического процесса сушки.

I. Равномерное начальное распределение концентраций, в виде:

$$U_0(\bar{x}) = \frac{u_0(x, 0) - u_p}{u_p} \Big|_{\tau=0} = U_0 = \frac{u_0 - u_p}{u_p}. \quad (11)$$

В таком случае динамика влажности по толщине блока будет изменяться по следующему закону:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*) - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^{Fo_m} [Ki_{mk}(Fo_m^*) - (-1)^m Ki_{m\phi}(Fo_m^*)] d(Fo_m^*). \quad (12)$$

II. Линейная зависимость критериев Кирпичева во времени процесса в виде:

$$Ki_{mk}(Fo_m) = A_{mk} Fo_m + B_{mk}; \quad Ki_{m\phi}(Fo_m) = A_{m\phi} Fo_m + B_{m\phi}. \quad (13)$$

Подставив предлагаемые зависимости массообменного критерия Кирпичева на поверхностях блока (13) от числа Фурье в

решение при равномерном начальном распределении влагосодержаний (12), после математических преобразований получаем:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - \left\{ \frac{A_{mk} - A_{mf}}{2} Fo_m^2 + (B_{mk} - B_{mf}) Fo_m \right\} - \\ - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \left\{ \frac{1}{2} [A_{mk} - (-1)^m A_{mf}] Fo_m^2 + [B_{mk} - (-1)^m B_{mf}] Fo_m \right\}. \quad (14)$$

III. Равномерное начальное распределение концентраций и постоянные значения критериев Кирпичева:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = U_0 - (K_{imk} - K_{imf}) Fo_m - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) [K_{imk} - (-1)^m K_{imf}] Fo_m. \quad (15)$$

Полученное аналитическое решение представляет собой распределение влагосодержания $u(x, t)$ по толщине арболитового блока, которое можно использовать при соответствующих конкретных технологических схемах сушки на проницаемом, непроницаемом или частично проницаемом настиле. Данное решение позволяет прогнозировать пространственно-временную эволюцию влажностного поля в объёме арболитового блока-сырца с учётом градиента влагосодержания на поверхности.

В качестве иллюстрации возможностей разработанной расчётной методики приведены результаты численного эксперимента по моделированию нестационарного влагопереноса в арболитовом блоке при различных схемах организации массообмена на границах. В расчетах принята начальная влажность арболита 60%, а равновесным будем считать значение влажности 20%, следовательно, $U_0 = 2$.

На рис. 4 представлено распределение безразмерного влагосодержания U по толщине блока при двустороннем массообмене с окружающей средой ($K_{imk}=1, K_{imf}=1$), что соответствует технологической схеме сушки на проницаемом настиле либо в условиях принудительной конвективной сушки с обдувом обеих поверхностей. В этом случае наблюдается симметричное снижение влажности от центра к границам с формированием характерного «параболического» профиля. Хотя в действительности реальных технологических процессов сушки арболита равенство потоков массы достигаться будет редко, полученные графические зависимости показывают воспроизводимость полученного решения и демонстрируют постепенное приближение распределения влагосодержания к равновесному. Такая схема обеспечивает

наиболее интенсивное влагоудаление, однако требует значительных энергозатрат на поддержание интенсивного массообмена на обеих поверхностях.

Сушка арболита на непроницаемом основании (рис. 5), характерная для технологий с размещением блоков на металлических поддонах без перфорации ($K_{imk}=1, K_{imf}=0$), демонстрирует принципиально иную картину распределения влаги. Отсутствие массоотдачи с нижней поверхности приводит к формированию асимметричного профиля с максимумом влажности в придонной зоне. За тот же безразмерный временной интервал влагосодержание снизилось лишь на 28 % от начального избытка. Повышенные градиенты влажности в поверхностных слоях создают предпосылки для возникновения усадочных напряжений и микротрещин [23-31], особенно в зоне контакта «цементный камень – древесное волокно». При этом в придонной зоне сохраняется избыточная влага, что замедляет достижение распалубочной прочности.

На рис. 6 показан промежуточный вариант – сушка при асимметричных условиях массообмена ($K_{imk}=1, K_{imf}=0,5$), реализуемый при использовании частично проницаемых перфорированных форм или решётчатых настилов. Асимметрия профиля влажности менее выражена, чем в случае непроницаемого основания, что снижает риски образования дефектов структуры.

Полученные результаты подтверждают физическую адекватность предложенной математической модели и демонстрируют её прикладную ценность для рационального проектирования режимов сушки арболитовых изделий. Выбор технологической схемы должен осуществляться с учётом баланса между произво-

дительностью (временем достижения расплывчатой прочности) и качеством продукции (равномерностью структуры, отсутствием дефектов). Для условий массового производства в умеренном климате предпочтительной представляется схема с частично проницаемым основанием, обеспечивающая снижение времени сушки на 25–30 % по сравнению с непроницаемым вариантом при сохранении приемлемой равномерности влажностного поля.

Следует отметить, что в реальных условиях потоки массы на поверхности не остаются

постоянными, а изменяются во времени вследствие снижения градиента влажности на границе и изменения скорости воздушного потока. Применение метода микропроцессов, заложенного в основу расчёта, позволяет адекватно учитывать эту нестационарность за счёт адаптивного обновления численного значения граничных условий на каждом временном шаге, что обеспечивает погрешность аппроксимации не более 3–5 % по сравнению с экспериментальными кинетическими кривыми сушки.

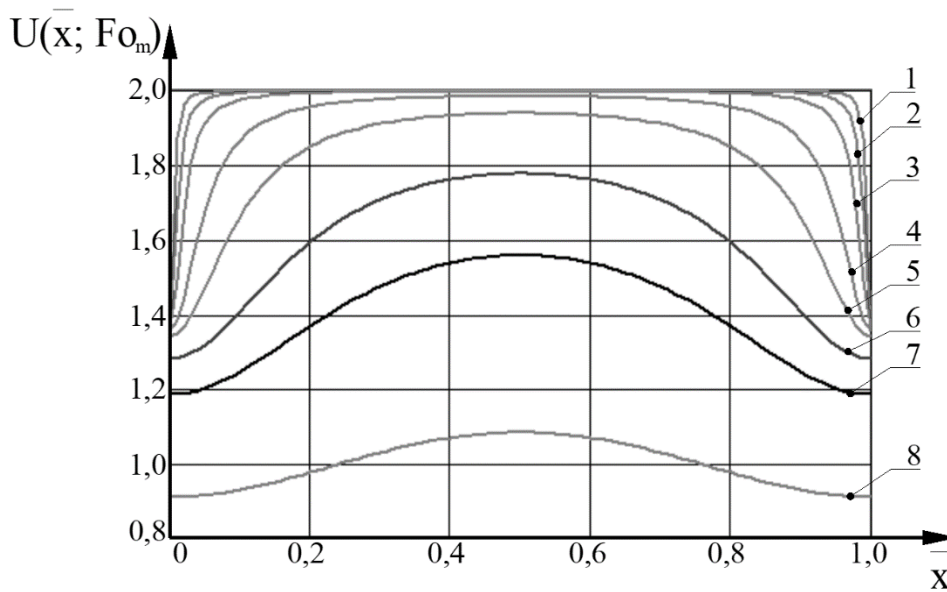


Рис. 4. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2, K_{imk}=1, K_{imf}=1$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

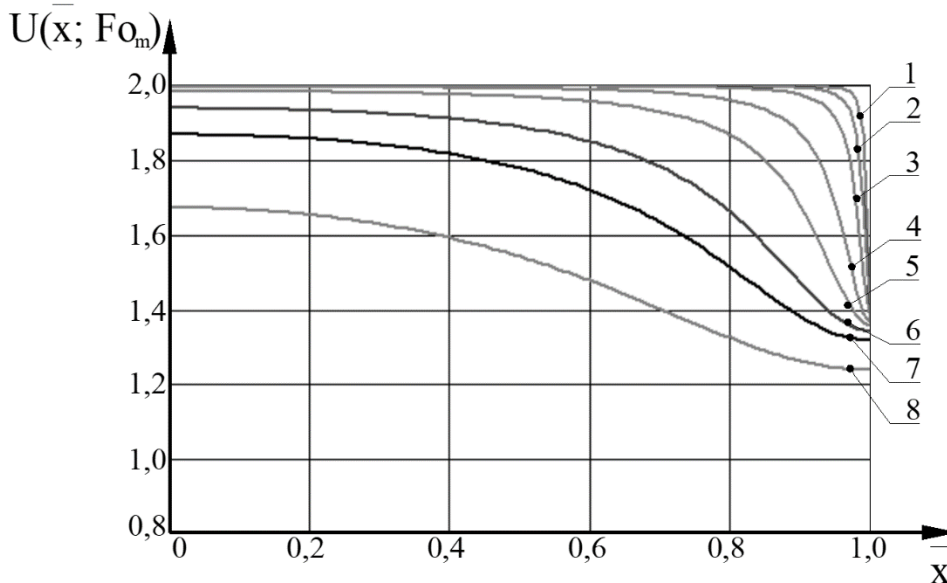


Рис. 5. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2, K_{imk}=1, K_{imf}=0$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

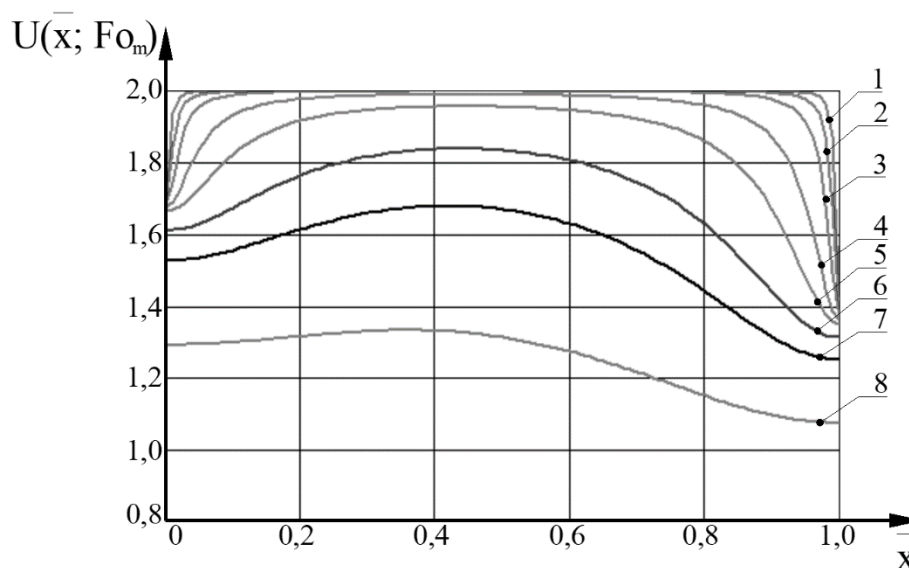


Рис. 6. Динамика влагосодержаний по толщине блока при сушке арболита ($U_0 = 2$, $K_{\text{имк}}=1$, $K_{\text{имф}}=0,5$, значения Fo_m : 1-0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,05; 5 – 0,1; 6-0,2; 7-0,3; 8-0,5)

Выводы

1. Разработана математическая модель нестационарного влагопереноса в арболите на основе уравнения диффузии А. В. Лыкова, учитывающая анизотропию материала и химические процессы гидратации через усредненный коэффициент массопроводности.

2. Получено аналитическое решение для распределения влагосодержания по толщине блока при переменных во времени граничных условиях второго рода, адаптированное для метода микропроцессов.

3. Установлено, что сушка на непроницаемом основании приводит к значительной асимметрии влажностного поля и накоплению влаги в придонной зоне, что повышает риск усадочных деформаций.

4. Схема с частично проницаемым основанием признана оптимальной для массового производства, обеспечивая снижение времени сушки на 25–30 % по сравнению с непроницаемым вариантом при сохранении равномерности структуры.

Список литературы

1. Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Ленинград: Стройиздат, 1990. 415 с.

2. Maximizing Strength and Durability in Wood Concrete (Arbolite) via Innovative Additive Control and Consumption / A. Yagubkin, D. Shabanov, A. Niyakovskii [et al.]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, vol. 15, issue 9, pp. 13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>

3. Ilmaliyev Zh., Zhatkanbayev Ye. Ye., Kurtibay K. A. Research and development of wood-cement composites as sustainable building materials based on secondary resources // Комплексное использование минерального сырья. 2025. № 4 (335). С. 34–41. EDN: SKNBHS. <http://doi.org/10.31643/2025/6445.37>

4. Федосов С. В., Кеневей Э., Лапидус А. А. В поиске инновационных материалов для массового строительства малоэтажных зданий в республике Чад // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 72–80. EDN: JQQWLD.

<http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78>

5. Долматов С. Н. Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 29–46. EDN: UYZBPR. <http://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>

6. Исакулов Б. Р., Акулова М. В., Нургалеев Р. М. Формирование структуры шлакощелочного арболита в процессе дальнейшего твердения // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 24–29. EDN: WAALAY. http://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_24

7. Создание и изготовление композитов на основе отходов древесины / Ж. Ильмалиев, Қ. Куртибай, Ә. Қаппасұлы [и др.] // Вестник КазУТБ. 2025. Т. 2. № 27. EDN: HWMVCO. <http://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-704>

8. Кульшаров Б. Б. Влияние влажности на прочностные характеристики блоков из легкого бетона на основе кукурузных отходов для строительства текстильных предприятий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 122–126. EDN: OHBYZQ. http://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_3_122
9. Показатели технологии изготовления изделий из арболита с применением электро-тепловой обработки / С. В. Федосов, А. А. Лапидус, А. М. Соколов [и др.] // Строительные материалы. 2023. № 3. С. 4–11. EDN: IMEBXQ. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10>
10. Процессы структурообразования шлакощелочного арболита в условиях тепловлажностной и тепловой обработки / К. Е. Иманалиев, Ж. Н. Назыбек, Ж. П. Атамбаева [и др.] // Точная наука. 2021. № 102. С. 21–25. EDN: TONVEQ
11. Яковенко С. М., Данько В. П. Арболит, пенобетон и газобетон: технические характеристики в сравнительном анализе // Components of Scientific and Technological Progress. 2024. № 12 (102). С. 15–19. EDN: PKBHST
12. Влияние дисперсности древесины в строительных материалах на ее скорость термодеструкции / М. Д. Болотов, Е. А. Коваленко, Д. О. Плеханов [и др.] // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 3 (19). С. 30–35. EDN: ZDGBZD. <http://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.60.33.005>
13. Закономерности физико-химических явлений теплопереноса, структурообразования и учета эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, М. А. Коринчук [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 3 (56). С. 70–80. EDN: KGSHPH
14. Increase of physical and mechanical parameters of arbolite-concrete composites by deep impregnation with liquid sulfur / B. R. Isakulov, F. T. Balmaganbetova, A. R. Sundetova [et al.]. Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2025. № 2 (151). С. 59–76. EDN: WTOBQE. <http://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-59-76>
15. Сафина А. В., Хаертдинова А. А. Исследование эксплуатационных свойств древесно-цементных композитов на основе древесных отходов экстракционного производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5 (155). EDN: JSOIRE. <http://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.54>
16. Оптимизация состава светопроницаемого арболита на древесном наполнителе / С. Е. Ткаченко, О. Е. Смирнова, В. Ф. Хританков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2025. № 3 (795). С. 32–40. EDN: OHSBGQ. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-795-3-32-40>
17. Лыков А. В. Теплообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
18. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории теплопереноса / С. В. Федосов, И. В. Красильников, В. Е. Румянцева [и др.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 4. С. 392–409. EDN: WNUWLC. <http://doi.org/10.22363/1815-52352023-19-4-392-409>
19. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Химическая технология: диффузионные процессы. Часть 2. М: Юрайт. 2018. 296 с.
20. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон - жидкая среда», лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 134–140. EDN: SIGNGF. <http://doi.org/10.31659/0585-430x-2022-799-1-2-134-140>
21. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Roumyantseva, I. Krasilnikov [et al.]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, vol. 403 LNNS, pp. 1362–1370. EDN: TPZZSD. http://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_152
22. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. Chem-ChemTech, 2022, vol. 65. issue 7, pp. 61–70. EDN: WBKUAS. <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6606>
23. Прогнозирование долговечности железобетонной башенной градирни, с учетом циклически изменяющихся параметров среды эксплуатации / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 89–98. EDN: LYUCXY
24. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 1 (42). С. 24–31. EDN: UKZZCT
25. Определение влияния вязкости насыщающей жидкости на физико-механические характеристики цементного камня различной пористости / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, И. А. Красильникова [и др.] //

Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (43). С. 143-152. EDN: XYRZIF

26. Трансформация прочности бетона при эксплуатации конструкции в агрессивной воздушной среде с изменяющимися параметрами / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, У. А. Новикова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 158–168. EDN: UPRSBB

27. Моделирование массопереноса агрессивных растворов солей в торкрет-бетонном покрытии / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, У. А. Новикова [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 116–128. EDN: ARLVBF

28. Самовосстановление бетонов модифицированием специальными бактериями / В. Е. Румянцева, И. В. Красильников, М. В. Таничев [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 160–167. EDN: YJJDBE

29. Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко [и др.] // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 65–70. EDN: QZJSCJ

30. Гетерогенные физико-химические процессы массопереноса агрессивных веществ в структуре бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовой среде с изменяющимися параметрами / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 142–152. EDN: VEQJNB

31. Румянцева В. Е., Красильников И. В., Красильникова И. А. Оценка эффективности некоторых составов бетонных смесей, применяемых при торкретировании, по критериям долговечности // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 4 (53). С. 97–108. EDN: CGJWBL

References

1. Nanazashvili I. Kh. *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoy kompozitsii* [Building materials from wood-cement composition]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 415 p. (in Russ.).

2. Maximizing Strength and Durability in Wood Concrete (Arbolite) via Innovative Additive Control and Consumption / A. Yagubkin, D. Shabanov, A. Niyakovskii [et al.]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 15, issue 9, pp. 13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>

3. Ilmaliyev Zh., Zhatkanbayev Ye. Ye., Kurtibay K. A. Research and development of wood

- cement composites as sustainable building materials based on secondary resources // Комплексное использование минерального сырья. 2025. № 4 (335). С. 34–41. EDN: SKNBHS. <http://doi.org/10.31643/2025/6445.37>

4. Fedosov S. V., Kenevei E., Lapidus A. A. V poiske innovatsionnykh materialov dlya massovogo stroitel'stva maloetazhnykh zdaniy v respublike Chad [In search of innovative materials for mass construction of low-rise buildings in the Republic of Chad]. *Stroitel'nye materialy*, 2023, issue 5, pp. 72–80. EDN: JQQWLD. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-72-78> (in Russ.).

5. Dolmatov S. N. Analiz potentsial'noy emkosti rynka i ob'emov potrebleniya stenovykh stroitel'nykh materialov, orientirovannykh na individual'nykh zastroishchikov, primenitel'no k tekhnologii drevesno-mineral'nykh kompozitov [Analysis of potential market capacity and consumption volumes of wall building materials aimed at individual developers, in relation to wood-mineral composites technology]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii*, 2025, vol. 1 (33), pp. 29–46. <http://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29> (in Russ.).

6. Isakulov B. R., Akulova M. V., Nurgaliev R. M. Formirovanie struktury shlakoshchelochnogo arbolita v protsesse dal'neyshego tverdeniya [Formation of the structure of slag-alkali arbolite in the process of further hardening]. *Ekspert: teoriya i praktika*, 2024, vol. 1 (24), pp. 24–29. EDN: WAALAY. http://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_24 (in Russ.).

7. Sozdanie i izgotovlenie kompozitov na osnove otkhodov drevesiny [Creation and production of composites based on wood waste] / Zh. Il'maliev, K. Kurtibay, A. Kappasuly [et al.]. *Vestnik KazUTB*, 2025, vol. 2, issue 27. EDN: HWMVCO. <http://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.27-704> (in Russ.).

8. Kul'sharov B. B. Vliyanie vlazhnosti na prochnostnye kharakteristiki blokov iz legkogo betona na osnove kukuruznykh otkhodov dlya stroitel'stva tekstil'nykh predpriyatii [Influence of humidity on strength characteristics of lightweight concrete blocks based on corn waste for construction of textile enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2024, vol. 3 (411), pp. 122–126. EDN: OHBYZQ. http://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_3_122 (in Russ.).

9. Pokazateli tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz arbolita s primeneniem elektroteplovoy obrabotki [Indicators of the technology for manufacturing arbolite products using electrothermal treatment] / S. V. Fedosov, A. A. Lapidus, A. M. Sokolov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2023,

issue 3, pp. 4–11. EDN: IMEBXQ. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10> (in Russ.).

10. Protsessy strukturoobrazovaniya shlakoshchelochnogo arbolita v usloviyakh teplov-lazhnostnoy i teplovoy obrabotki [Processes of structure formation of slag-alkali arbolite under conditions of heat-moisture and thermal treatment] / K. E. Imanaliev, Zh. N. Nazybek, Zh. P. Atambaeva [et al.]. *Tochnaya nauka*, 2021, issue 102, pp. 21–25. EDN: TOHVEQ (in Russ.).

11. Yakovenko S. M., Danko V. P. Arbolit, penobeton i gazobeton: tekhnicheskie kharakteristiki v sravnitel'nom analize [Arbolite, foam concrete and aerated concrete: technical characteristics in comparative analysis]. *Components of Scientific and Technological Progress*, 2024, vol. 12 (102), pp. 15–19. EDN: PKBHTS (in Russ.).

12. Vliyanie dispersnosti drevesiny v stroitel'nykh materialakh na ee skorost' termodestruksii [Influence of wood dispersion in building materials on its thermal destruction rate] / M. D. Bolotov, E. A. Kovalenko, D. O. Plekhanov [et al.]. *Aktual'nye problemy bezopasnosti v tekhnosfere*, 2025, vol. 3 (19), pp. 30–35. EDN: ZDGBZD. <http://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.60.33.005> (in Russ.).

13. Zakonomernosti fiziko-khimicheskikh yavleniy teplomassoperenosa, strukturoobrazovaniya i ucheta endo- i ekzotermicheskikh effektov v protsessakh sushki blokov arbolita-syrtsa [Regularities of physico-chemical phenomena of heat and mass transfer, structure formation and accounting for endo- and exothermic effects in the drying processes of arbolite green blocks] / V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov, M. A. Korinchuk [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2025, vol. 3 (56), pp. 70–80. EDN: KGSHPH (in Russ.).

14. Increase of physical and mechanical parameters of arbolite-concrete composites by deep impregnation with liquid sulfur / B. R. Isakulov, F. T. Balmaganbetova, A. R. Sundetova [et al.]. *Vestnik Evraziyskogo natsional'nogo universiteta imeni L. N. Gumileva. Seriya: Tekhnicheskie nauki i tekhnologii*, 2025, vol. 2 (151), pp. 59–76. EDN: WTOBQE. <http://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-59-76> (in Russ.).

15. Safina A. V., Khaertdinova A. A. Issledovanie ekspluatatsionnykh svoystv drevesno-tsementnykh kompozitov na osnove drevesnykh otkhodov ekstraktsionnogo proizvodstva [Study of operational properties of wood-cement composites based on wood waste from extraction production]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2025, issue 5 (155). EDN: JSOIRE. <http://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.54> (in Russ.).

16. Optimizatsiya sostava svetopronitsaemogo arbolita na drevesnom zapolnitele [Optimization of the composition of light-permeable arbolite

on wood aggregate] / S. E. Tkachenko, O. E. Smirnova, V. F. Khritankov [et al.]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2025, vol. 3 (795), pp. 32–40. EDN: OHSBGQ. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-795-3-32-40> (in Russ.).

17. Lykov A. V. *Tplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. (in Russ.).

18. Fizicheskie osobennosti problem zhidkostnoy korrozii zhelezobetona s pozitsiy teorii teplomassoperenosa [Physical features of liquid corrosion problems of reinforced concrete from the standpoint of heat and mass transfer theory] / S. V. Fedosov, I. V. Krasil'nikov, V. E. Rummyantseva [et al.]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*, 2023, vol. 19, issue 4, pp. 392–409. EDN: WNUWLC. <http://doi.org/10.22363/1815-52352023-19-4-392-409> (in Russ.).

19. Rudobashta S. P., Kartashov E. M. *Khimicheskaya tekhnologiya: diffuzionnye protsessy. Chast' 2* [Chemical technology: diffusion processes. Part 2]. Moscow: Yurayt, 2018. 296 p. (in Russ.).

20. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnogo massoperenosa v sisteme «tsementnyy beton - zhidkaya sreda», limitiruemogo vnutrenney diffuziey i vneshney massootdachey [Mathematical modeling of unsteady mass transfer in the system «cement concrete - liquid medium», limited by internal diffusion and external mass transfer] / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2022, issue 1-2, pp. 134–140. EDN: SIGNGF. <http://doi.org/10.31659/0585-430x-2022-799-1-2-134-140> (in Russ.).

21. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Rummyantseva, I. Krasilnikov [et al.]. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 403 LNNS, pp. 1362–1370. EDN: TPZZSD. http://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_152

22. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete - liquid aggressive environment» / S. V. Fedosov, V. E. Rummyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *Chem-ChemTech*, 2022, vol. 65. issue 7, pp. 61–70. EDN: WBKUAS. <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6606>

23. Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnay bashennoy gradirni, s uchedom tsiklicheski izmenyayushchikhsya parametrov sredy ekspluatatsii [Prediction of durability of reinforced concrete tower cooling tower, taking into account cyclically changing parameters of the operating environment] / V. E. Rummyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, vol. 3 (44), pp. 89–98. EDN: LYUCXY (in Russ.).

24. Issledovanie vliyaniya temperatury na intensivnost' massoperenosa pri korrozii pervogo vida tsementnykh betonov [Study of the influence of temperature on the intensity of mass transfer during corrosion of the first kind of cement concretes] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2022, vol. 1 (42), pp. 24–31. EDN: UKZZCT (in Russ.).

25. Opreделение vliyaniya vyzkosty nasyshchayushchey zhidkosti na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki tsementnogo kamnya razlichnoy poristosti [Determination of the influence of the viscosity of the saturating liquid on the physico-mechanical characteristics of cement stone of various porosity] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, I. A. Krasil'nikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2022, vol. 2 (43), pp. 143–152. EDN: XYRZIF (in Russ.).

26. Transformatsiya prochnosti betona pri ekspluatatsii konstruksii v agressivnoy vozduшной среде s izmenyayushchimisya parametrami [Transformation of concrete strength during operation of the structure in an aggressive air environment with changing parameters] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, U. A. Novikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2023, vol. 3 (48), pp. 158–168. EDN: UPRSB (in Russ.).

27. Modelirovanie massoperenosa agressivnykh rastvorov soley v torkret-betonnom pokrytii [Modeling of mass transfer of aggressive salt solutions in shotcrete coating] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, U. A. Novikova [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 116–128. EDN: ARLVBF (in Russ.).

28. Samovosstanovlenie betonov modifitsirovaniem spetsial'nymi bakteriyami [Self-

healing of concretes by modification with special bacteria] / V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov, M. V. Tanchev [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2023, vol. 2 (47), pp. 160–167. EDN: YJDBE (in Russ.).

29. Modelirovanie massoperenosa v protsessakh korrozii pervogo vida tsementnykh betonov v sisteme «zhidkost'-rezervuar» pri nalichii vnutrennego istochnika massy v tverdoj faze [Modeling of mass transfer in corrosion processes of the first kind of cement concretes in the «liquid-reservoir» system in the presence of an internal mass source in the solid phase] / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, N. S. Kas'yanenko [et al.]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2013, vol. 2 (37), pp. 65–70. EDN: QZJSCJ (in Russ.).

30. Geterogennye fiziko-khimicheskie protsessy massoperenosa agressivnykh veshchestv v strukture betona zhelezobetonnykh konstruksiy, ekspluatiruemykh v gazovoy srede s izmenyayushchimisya parametrami [Heterogeneous physico-chemical processes of mass transfer of aggressive substances in the concrete structure of reinforced concrete structures operated in a gaseous environment with changing parameters] / S. V. Fedosov, V. E. Rumyantseva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2022, vol. 4 (45), pp. 142–152. EDN: VEQJHB (in Russ.).

31. Rumyantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Krasil'nikova I. A. Otsenka effektivnosti nekotorykh sostavov betonnykh smesey, primenyaemykh pri torkretirovanii, po kriteriyam dolgovechnosti [Assessment of the effectiveness of certain concrete mix compositions used in shotcreting, according to durability criteria]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, vol. 4 (53), pp. 97–108. EDN: CGJWBL (in Russ.).

Федосов Сергей Викторович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, г. Москва

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва

Академик РААСН, доктор технических наук, профессор

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Fedosov Sergey Viktorovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Russian Federation, Moscow

Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN,
Russian Federation, Moscow

Academician of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Румянцева Варвара Евгеньевна

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор
E-mail: varrym@gmail.com

Rumyantseva Varvara Evgenievna

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
Corresponding Member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: varrym@gmail.com

Красильников Игорь Викторович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор
E-mail: korasb@mail.ru

Krasilnikov Igor Viktorovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
Advisor to the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: korasb@mail.ru

Коринчук Михаил Александрович

Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
аспирант
E-mail: m1na47-74@mail.ru

Korinchuk Michael Aleksandrovich

Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
graduate student
E-mail: m1na47-74@mail.ru

Красильникова Ирина Александровна

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
Российская Федерация, г. Владимир
кандидат технических наук, доцент
E-mail: irinanebukina@rambler.ru

Krasilnikova Irina Aleksandrovna

Vladimir State University,
Russian Federation, Vladimir
Candidate of Technical Sciences, docent
E-mail: irinanebukina@rambler.ru