
**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL)**

УДК 691.327.32

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
И УЧЕТА ЭНДО- И ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
В ПРОЦЕССАХ СУШКИ БЛОКОВ АРБОЛИТА-СЫРЦА**

В. Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, И. В. КРАСИЛЬНИКОВ^{2,3}, М. А. КОРИНЧУК², И. А. КРАСИЛЬНИКОВА⁴

¹ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

² Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

³ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва

⁴ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
Российская Федерация, г. Владимир

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

В статье рассмотрены физико-химические закономерности тепломассопереноса, структурообразования и термических эффектов в процессе сушки арболитовых блоков-сырца. Арболит представлен как многофазный капиллярно-пористый композит, сочетающий цементную матрицу и органический растительный наполнитель. Обоснована необходимость учёта экзо- и эндотермических эффектов (гидратации цемента и испарения влаги) в расчетах, поскольку они существенно влияют на температурно-влажностное состояние материала, его прочностные характеристики и внутренние напряжения. Приведена математическая модель, основанная на системе уравнений А. В. Лыкова, описывающая нестационарный тепло- и влагоперенос в теле блока с учётом фазовых превращений и тепловыделения. Для численно-аналитического решения предложено использовать метод микропроцессов, позволяющий имитировать реальную кинетику сушки с переменными граничными условиями. Установлено, что особенности структурообразования при сушке зависят от схемы теплообмена и распределения влажностного содержания в объёме материала. Обозначены направления дальнейших исследований, включая учёт анизотропии, реологических свойств наполнителя и создание цифрового двойника арболитового блока для управления технологическим процессом сушки.

Ключевые слова: арболит, структурообразование, тепломассоперенос, капиллярно-пористая структура, экзотермические и эндотермические эффекты, математическое моделирование, метод микропроцессов, органический наполнитель, энергоэффективное строительство.

**PATTERNS OF PHYSICO-CHEMICAL PHENOMENA OF HEAT
AND MASS TRANSFER, STRUCTURE FORMATION,
AND CONSIDERATION OF ENDOTHERMIC AND EXOTHERMIC EFFECTS
IN THE DRYING OF RAW ARBOLITE BLOCKS**

V. E. RUMYANTSEVA^{1,2}, I. V. KRASILNIKOV^{2,3}, M. A. KORINCHUK², I. A. KRASILNIKOVA⁴

¹ 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

² Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo,
Russian Federation

³ Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN,

Russian Federation, Moscow

⁴ Vladimir State University,

Russian Federation, Vladimir

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

The article discusses the physico-chemical patterns of heat and mass transfer, structure formation and thermal effects during the drying of raw arbolite blocks. Arbolite is presented as a multiphase capillary-porous composite combining a cement matrix and an organic plant filler. The necessity of taking into account exothermic and endothermic effects (cement hydration and moisture evaporation) in calculations is substantiated, since they significantly affect the temperature and humidity state of the material, its strength characteristics and internal stresses. A mathematical model based on A. V. Lykov's system of equations is presented, describing unsteady heat and moisture transfer in the body of the block, taking into account phase transformations and heat release. For the numerical and analytical solution, it is proposed to use the microprocess method, which allows simulating the real kinetics of drying with variable boundary conditions. It is established that the features of structure formation during drying depend on the heat exchange scheme and the distribution of moisture content in the volume of the material. The directions of further research are outlined, including taking into account the anisotropy, rheological properties of the filler and the creation of a digital twin of the arbolite block to control the drying process.

Keywords: arbolite, structure formation, heat and mass transfer, capillary-porous structure, exothermic and endothermic effects, mathematical modeling, microprocess method, organic filler, energy-efficient construction.

Введение

Арболит – это композитный материал с гетерогенной структурой, работающий как термоупругий биоактивный бетон, перспективный для применения в экологически ориентированных строительных системах. При его изготовлении в качестве крупного заполнителя используются органические растительные компоненты (древесная щепа, костра льна, рисовая солома и др.), а вяжущей основой служит цемент [1].

С научно-технической точки зрения, арболит представляет собой многофазную капиллярно-пористую систему, в которой взаимодействуют минеральная цементная матрица и органическая армирующая фракция. Материал обладает структурой с выраженной анизотропией, обусловленной ориентацией и свойствами растительного наполнителя, и характеризуется высокой пористостью (до 80–85 % по объему), что обеспечивает малый объемный вес (400–850 кг/м³) и высокую теплоизоляционную способность [2, 3].

Краткие характеристики арболита: матрица: (портландцемент не ниже марки М400); заполнитель (фракционированная древесная щепа длиной 5–25 мм); минерализация: проводится обработкой щепы солями кальция или алюминия (например, CaCl_2 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) с целью снижения сахаро- и лигниносодержащих компонентов, ингибирующих гидратацию цемента; добавки (применяются пластификаторы, ускорители твердения, гидрофобизаторы, противоморозные добавки и др.); теплопроводность: 0,07–0,17 Вт/(м·К); прочность при сжатии: до 1,5–3,5 МПа; класс пожарной безопасности: Г1–

Г2 (условно негорючий за счет минерализации древесины) [4, 5].

Арболит сочетает свойства бетона (прочность, влагостойкость) и дерева (низкая теплопроводность, упругость), что делает его пригодным для использования в энергоэффективном строительстве, особенно в малоэтажной застройке. В процессе твердения и эксплуатации материал сохраняет высокую диффузионную способность по водяным парам, что обеспечивает благоприятный микроклимат в помещениях.

С переходом к «зелёным» технологиям в строительстве внимание научного сообщества привлекают малоиспользуемые сельскохозяйственные и лесные отходы. Возможность повторного использования древесных отходов в составе строительных материалов делает арболит особенно актуальным для устойчивого развития и утилизации ресурсов. Введенные добавки-минерализаторы (сульфат алюминия, хлорид кальция, жидкое стекло и др.) подавляют вредное влияние органических веществ на гидратацию цемента и повышают прочность арболита.

Производство арболита – технологически регламентированный процесс, сочетающий научные знания и достижения в области материаловедения, химии цемента, механики композитов и тепломассопереноса. Ключевыми технологическими узлами являются минерализация органического компонента, контроль влажности в процессе твердения и равномерная сушка, обеспечивающая минимальные внутренние напряжения и предотвращающая

растрескивание. При соблюдении технологического регламента арболит приобретает устойчивые прочностные и теплоизоляционные свойства, подходящие для энергоэффективного и экологичного домостроения.

Целью настоящей публикации является всесторонний анализ опубликованных научных работ по влиянию тепло- и влагопереноса, структурообразования и термических эффектов при сушке арболитовых блоков, подходы к ускорению твердения, идентификация влияющих факторов на свойства конечного изделия, что в совокупности необходимо для определения уравнений описывающих нестационарные процессы тепломассопереноса при сушке арболитовых блоков, решение которых позволит рационализировать производство изделий из арболита.

Методика и организация исследования

Ускорение твердения арболита – важная технологическая задача, особенно в условиях серийного производства строительных блоков. Твердение арболита обусловлено, прежде всего, гидратацией цемента, но его эффективность может снижаться из-за наличия в щепе сахаров, лигнинов и других веществ, тормозящих гидратацию. Поэтому ускорение связано как с химическими мерами, так и с тепловой обработкой.

Для ускорения твердения арболита оптимально сочетать предварительную минерализацию древесного заполнителя, добавление ускоряющих и пластифицирующих добавок и мягкую тепловую обработку (до 70 °C). Ключевым фактором является баланс между скоростью твердения и сохранением целостности органической фракции. При нарушении теплового режима возможны дефекты (растрескивание, усадка), поэтому выбор метода должен быть научно обоснован и верифицирован по прочностным характеристикам [6].

Процессы твердения арболита сопровождаются высушиванием блока с различной влажностью, что неизбежно влечет сложные взаимосвязанные физико-химические явления: тепло- и влагоперенос в капиллярно-пористом материале, структурообразование (изменение поровой структуры при усушке) и эндо- и экзотермические эффекты (испарение воды и гидратация цемента). Эти процессы протекают во взаимосвязанном режиме, определяющем конечные свойства материала.

В литературе отмечается, что технология сушки арболита мало изучена, а комплексное моделирование тепломассопереноса и структурообразования в таких композитах почти не разработано. При этом применение классических уравнений тепломассопереноса [7,8] и

методов, учитывающих изменяющиеся свойства материала, позволяют глубже понять механизм высыхания. В частности, автор [9] рассмотрел модели тепломассопереноса в двухфазных пористых системах и подчеркнул необходимость двухконтинуумных моделей при сложной пористой структуре. Соответственно, одним из важных направлений является разработка математической модели, описывающей нестационарный перенос влаги и тепла в блоке арболита при учете реальных граничных условий.

Помимо сложности математического описания указанных выше явлений, необходимо учесть и специфические особенности арболита. Так, древесный наполнитель при увлажнении и высушивании проявляет сильные объемные деформации и давление набухания, а также выраженную анизотропию и высокую упругость. Эти свойства, по данным [1], существенно влияют на структурообразование арболита: при сжатии смесь «запоминает» начальную форму волокон, что может приводить к появлению напряжений и снижению прочности. Кроме того, гидратация цемента в арболите имеет экзотермический характер: при взаимодействии с водой цемент выделяет тепло (примерно до 0,5 кДж/г), что может приводить к локальному разогреву блока. Напротив, испарение воды – эндотермический процесс (удельная теплота испарения воды при 100 °C около 2260 кДж/кг), требующий значительной затраты теплоты. Таким образом, в модели необходимо учесть взаимное влияние массо- и теплообмена и химических эффектов гидратации.

Экзо- и эндотермические эффекты играют ключевую роль в структурообразовании арболита, потому как определяют температурный режим внутри блока, скорость фазовых превращений, динамику усадки и напряженно-деформированное состояние материала. Учитывая то, что арболит – это многофазный композит, включающий минеральную и органическую части, любое изменение теплового баланса в процессе твердения влияет на микроструктуру и конечные свойства. Рассмотрим влияние процессов переноса тепла и влаги на структурообразование арболита.

Повышение температуры в объеме блока при сушке приводит к локальному ускорению гидратации → ускоренное формирование цементного камня, формируется гетерогенное поле прочности: ядро блока твердеет быстрее, чем его поверхность. Увеличению скорости структурообразования гидросиликатов кальция способствует раннее «замыкание» поровой структуры, особенно вблизи экзотермического пика (24–36 ч).

При неравномерном распределении тепла возникают температурные градиенты,

вызывающие внутренние напряжения и микро-трещины, особенно в переходной зоне между щепой и цементом. При резком нагреве – происходит расширение воды в порах, вызывающее дополнительное давление и деструкцию слабосвязанных участков.

При температурах более 60 °С возможен частичный термогидролиз гемицеллюлозы (при использовании в качестве заполнителя соломы, подсолнечной лузги, шелухи семян хлопчатника, кукурузы) или деформация волокон щепы, что ухудшает сцепление древесного наполнителя с цементной матрицей.

Испарение влаги с поверхности вызывает охлаждение наружных слоёв, тогда как внутреннее, остаются теплыми, это создает обратный температурный градиент, ведущий к замедлению твердения на поверхности. В зоне активного испарения (где температура падает) реакции гидратации цемента замедляются, что приводит к усадочным напряжениям. По мере удаления воды из капилляров возникает капиллярное давление (~10–50 кПа), также вызывающее усадку цементного камня.

Поля распределений влаги т.е. неравномерность влажности в объеме блока вызывает микроразрывы структуры и расслаивание щепы-матрица.

Описанные выше особенности структурообразования под действием эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца показывают необходимость теоретического моделирования процессов тепло-массопереноса в блоке с учетом возможных фазовых переходов. Для этого нами предложено использовать систему нелинейных дифференциальных уравнений диффузионного тепло- и влагопереноса с соответствующими граничными условиями [7, 8, 9]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \cdot \nabla^2 t + \varepsilon \cdot r \cdot \frac{c_m}{c_q} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \cdot \nabla^2 \theta + a_m \cdot \delta_T \cdot \nabla^2 t; \quad (2)$$

$$-\lambda_q \cdot (\nabla t)_n + q_q(\tau) - (1 - \varepsilon) \cdot r \cdot q_m(\tau) = 0; \quad (3)$$

$$\lambda_m \cdot (\nabla \theta)_n + \lambda_m \cdot \delta_T \cdot (\nabla t)_n + q_m(\tau) = 0; \quad (4)$$

$$q_q(\tau) = \alpha_q \cdot (t_c - t_n); \quad (5)$$

$$q_m(\tau) = \alpha_m \cdot (\theta_n - \theta_c). \quad (6)$$

где: θ – потенциал переноса массы вещества (влаги); t – температура; τ – время; λ_q, λ_m – коэффициенты тепло- и массопроводности;

α_q, α_m – коэффициенты теплообмена и массообмена; a_q, a_m – коэффициенты температуро- и потенциалопроводности; δ_T – термоградиентный коэффициент, отнесенный к разности влагосодержаний; r – удельная теплота фазового перехода; ε – критерий фазового перехода; c_q – удельная теплоёмкость; c_m – удельная массоёмкость; λ_p – коэффициент молярного переноса; q_q – плотность потока тепла, q_m – плотность потока массы вещества.

Система уравнений (1) – (6) предложена академиком АН СССР А. В. Лыковым, она базируется на системе нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии влаги, с учетом источников тепла и фазовых переходов. Граничные условия отражают различные схемы отвода влаги на границах.

Уравнение нестационарной теплопроводности записано с источником тепла, учитывающим энтальпию испарения и экзотермию гидратации цемента.

Система таких уравнений была впервые получена и использована А. В. Лыковым и соавторами при описании процессов сушки капиллярно-пористых тел. Лыковым показано, что при низких тепловых потоках (температура ниже 50–70 °С) уравнения Лыкова адекватно описывают «мягкую» сушку, а при интенсивной сушке следует учитывать лавинообразное нарастание теплового потока. В настоящей работе эта система (классические уравнения Лыкова) используется в допущении нестационарности по времени и нелинейности коэффициентов. Как отмечено в работе [10], основная сложность решения состоит в сильной зависимости коэффициентов массопроводности и теплопроводности от текущей влажности и температуры.

В силу нелинейности уравнений аналитическая формулировка решения затруднена. Для их численного решения применён метод микропроцессов [11–14]. Суть метода заключается в разбиении всего процесса сушки на серию «микропроцессов» короткой продолжительности. На каждом шаге полагается, что физические свойства материала блока (массопроводность, теплопроводность, теплоёмкость и т.д.) и внешние параметры (температура среды, коэффициенты тепло- и массоотдачи) остаются неизменными и равными средним по данному шагу значениям. Для каждого микропроцесса решаются линейные уравнения переноса, после чего обновляются поля распределений тепла и влаги, а также и физические параметры материала. Такой подход позволяет имитировать быстрое изменение условий с минимальными погрешностями, так как фактически расчетная модель «подстраивается» под реальную кинетику сушки. Академик РААСН С. В. Федосов [15] показал, что при малоизме-

няющихся значениях температур и влажностей аналитические решения хуже сходятся, и методы зонального деления и микропроцессов оказываются более эффективными. В частности, для микропроцесса можно использовать экспериментальную кинетическую кривую высушивания, что повышает точность расчета. Результаты расчетов, выполненные с использованием метода микропроцессов, демонстрируют, что структурное состояние и физико-механические свойства арболита напрямую зависят от выбора схемы теплообмена, а также от скорости изменения температурно-влажностных градиентов в объеме изделия. Правильно подобранный режим сушки способствует равномерному отверждению цементного камня, снижению усадочных напряжений и минимизации деформаций органической фракции.

Отметим, что дополнительно могут быть привлечены методы сетевого моделирования, позволяющие имитировать геометрию порового пространства и моделировать процессы влаго- и теплопереноса [17–21]. В ряде работ использовались методы термогравиметрического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии и микроструктурного анализа для оценки степени гидратации цементного камня и взаимодействия его с органическими компонентами [22–28].

Результаты исследования и их обсуждение

Сушка арболитовых блоков представляет собой многостадийный процесс, включающий взаимосвязанные физико-химические явления: удаление влаги, гидратацию цемента, теплоперенос и формирование структуры [29–35].

На начальной стадии наблюдается интенсивное испарение свободной влаги, что сопровождается эндотермическим охлаждением поверхности. Одновременно продолжаются экзотермические реакции гидратации цемента, вызывающие локальный нагрев в объеме материала [36–40].

Сочетание этих разнонаправленных процессов приводит к образованию градиентов температуры и влажности, что может инициировать внутренние напряжения и дефекты структуры.

Многочисленные исследования показали, что скорость и равномерность сушки определяют прочность, трещиностойкость и долговечность арболита [41–44]. Применение химических добавок (CaCl_2 , K_2SO_4 , жидкое стекло и др.) позволяет регулировать кинетику гидратации и улучшать сцепление древесного наполнителя с цементной матрицей [18, 29, 36].

Современные исследования активно используют цифровые двойники и методы ускоренного отверждения (СВЧ-нагрев, ИК-сушка), что открывает новые возможности для

повышения энергоэффективности производства [23, 24, 41].

Результаты анализа научной литературы показывают, что теплообмен в капиллярно-пористых композитах определяется несколькими ключевыми факторами.

Во-первых, в пористой структуре арболита влага перемещается по капиллярам и испаряется на границах фаз, что описывается сложным нелинейным процессом. Многие модели показывают, что обычные сплошные модели с усредненными коэффициентами могут давать погрешности из-за неучёта капиллярной неоднородности [15, 18, 29–35]. При этом сопротивление теплопередаче также зависит от пористости: повышение объема крупных пор ведёт к снижению теплопроводности материала. Например, сетевые модели [19–23] показывают, что изменение геометрии пор может значительно изменить эффективные тепловые свойства.

Во-вторых, тепловые эффекты гидратации цемента существенно влияют на процесс сушки. Гидратация цемента – ярко выраженная экзотермическая реакция, вызывающая заметный рост температуры в материале. В крупных блоках арболита при интенсивной гидратации температура может подниматься на десятки градусов, что требует контроля, чтобы избежать термических трещин (порог $\sim 65\text{--}70^\circ\text{C}$) [20]. С другой стороны, испарение влаги является эндотермическим процессом: оно поглощает тепло и замедляет нагрев, особенно если внешняя температура высока. Из-за этого баланс тепловыделения и испарения определяет форму фронта сушки и тепловой режим – система уравнений (1) – (6) учитывает оба эффекта [7, 8, 9].

В-третьих, структурообразование и физико-механические свойства арболита во многом определяются взаимодействием органического заполнителя и цемента. Древесная щепа не только впитывает существенную часть воды (более 50 %), но и выделяет в раствор карбоксильные и полисахаридные экстракты. Эти вещества замедляют образование цементной матрицы и ухудшают адгезию, что приводит к снижению прочности. Литература указывает на необходимость химических ускорителей затвердевания, нейтрализующих экстрактивы [18, 29, 36]. Наиболее изучены гидратные ускорители: хлорид кальция, сульфат натрия, жидкое стекло и т.п. Особенно часто используют CaCl_2 , который ускоряет гидратацию и повышает температуру затвердевания. Однако у CaCl_2 есть недостатки: он сильно гигроскопичен и образует кристаллогидраты (до $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), что приводит к высокому остаточному увлажнению и ухудшению теплоизоляции. В работах [18, 29] показано, что сульфат калия не образует

кристаллогидратов и даёт арболиту на 20.8 % меньшую теплопроводность по сравнению с CaCl_2 . Это связано с уменьшением капиллярной влажности при меньшем образовании кристаллов. Таким образом, выбор химических добавок – важный метод ускорения твердения и регулирования свойств: он влияет на скорость выделения тепла, формирование микроструктуры цементного камня и конечную влажность арболита.

Наконец, среди новейших подходов отмечается применение высокотехнологичных методов. Так, были опробованы методы СВЧ-облучения для ускоренного твердения («волновая сушка»), обеспечивающие объёмный нагрев всей массы блока. Как показали исследования [24], СВЧ-нагрев при правильном контроле влажности и температуры обеспечивает быстрый нагрев и кристаллизацию цементного камня при снижении энергопотребления по сравнению с конвективной обработкой. Кроме того, активно развивается концепция «цифровых двойников» в строительстве – виртуальных моделей зданий и материалов, интегрирующих данные датчиков и симуляции. Цифровой двойник арболитового блока позволил бы в реальном времени прогнозировать распределение температуры и влажности внутри конструкции, что повышает эффективность управления процессами сушки и твердения [25].

Анализ научной литературы показывает, что процессы сушки арболитовых блоков должны рассматриваться комплексно с учётом капиллярной структуры, тепловых эффектов гидратации/испарения и влияния химических добавок.

Описанные выше особенности структурообразования под действием эндо- и экзотермических эффектов в процессах сушки блоков арболита-сырца показывают необходимость теоретического моделирования процессов тепло-массопереноса в блоке с учетом возможных фазовых переходов. Для решения данной проблемы нами предложено использовать систему нелинейных дифференциальных уравнений диффузионного тепло- и влагопереноса с соответствующими граничными условиями (1) – (6), а для упрощения моделирования, без потери точности, нами предложено использовать метод микропроцессов [47]. Особенности решения системы уравнений (1) – (6) для моделирования полей тепла и влаги по объёму арболитового блока, с целью управления структурообразованием изделия будет предметом нашей следующей публикации.

В условиях развития цифровых технологий и моделирования материалов в строительстве предложенный подход может быть положен в основу цифрового двойника процесса

твердения арболита, что открывает новые перспективы для оптимизации технологии и интеграции инструментов в управление качеством продукции.

Выводы

В настоящем исследовании рассмотрен базовый вариант математического моделирования процессов тепло-массопереноса и структурообразования в блоках арболита-сырца. Однако, с учётом высокой чувствительности композитного материала к изменению внешних и внутренних условий, представляется целесообразным развитие данной модели в следующих направлениях:

1. Учёт реологических свойств древесного наполнителя. Древесная щепа обладает нелинейной механической ответной реакцией, особенно в условиях переменной влажности и температуры. Включение моделей упруго-вязкопластического поведения позволит повысить точность оценки внутренних напряжений и рисков трещинообразования.

2. Интеграция модели структурной эволюции. Развитие поровой структуры и усадочных деформаций в процессе сушки требует применения моделей с учётом эволюции микроструктуры (например, на базе морфологических моделей или клеточных автоматов).

3. Моделирование анизотропии свойств. Волокнистая природа заполнителя обуславливает направленную (анизотропную) теплопроводность и капиллярную проницаемость. Расширение модели на тензорную форму с учётом ориентации волокон позволит описывать поведение материала в условиях сложного градиента температур и влаги.

4. Экспериментальная валидация. Необходимы дополнительные лабораторные и натурные испытания для верификации численных расчетов, особенно на ранних стадиях твердения, в зоне действия теплового фронта, а также при варьировании толщины блоков и состава смеси [16].

5. Разработка цифрового двойника. Создание программного инструмента в виде цифровой платформы (цифрового двойника процесса сушки и твердения) позволит адаптировать математическую модель под конкретные производственные линии и повысить управляемость качеством выпускаемой продукции.

6. Оценка остаточных напряжений и прогноз долговечности. Расширение модели в направлении механических расчётов позволит учитывать накопление остаточных напряжений в процессе сушки, оценивать риск образования трещин и прогнозировать долговечность арболитовых конструкций при эксплуатации.

Список литературы

1. Нанашвили М. Н. Арболит – эффективный строительный материал. – Москва: Недра, 1984. – 144 с.
2. Показатели технологии изготовления изделий из арболита с применением электротепловой обработки / С. В. Федосов, А. А. Лапидус, А. М. Соколов [и др.] // Строительные материалы. 2023. № 3. С. 4-11.
3. Исакулов Б. Р., Байбулов А. К., Иванникова Н. В. Исследование механизма формирования прочности и разрушения серосодержащих арболитовых композитов при различных нагрузках // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2019. № 1 (126). С. 32–40.
4. Соловьева А. А., Шевцов Л. С., Соловьев С. А. Исследование прочностных показателей арболита при повышенной влажности // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1 (19). С. 33–35.
5. Краснова В. Ф., Зотов Д. А. Теплопроводность арболита из сухостойной древесины // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 1. С. 7-14.
6. Дворников Р. М., Самченко С. В. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 1. С. 82–91.
7. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
8. Лыков А. В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
9. Мошинский А. И. Тепло- и массообменная модель пористой системы: монография. – Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. ун-та, 2015. – 154 с.
10. Ильясов У. Р., Игошин Д. Е. Математическое моделирование сушки влажного пористого материала в диффузионном приближении // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 689–698.
11. Monitoring of the penetration of chloride ions to the reinforcement surface through a concrete coating during liquid corrosion / S. V. Fedosov, V. E. Roumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, electronic edition. Vladivostok, 2018, pp. 042048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042048
12. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 44–47.
13. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 52–57.
14. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, И. В. Красильников [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 99–104.
15. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion / S. V. Fedosov, V. E. Roumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 2. С. 45–49.
16. 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.
17. Basok B., Davydenko S., Pavlenko A. Numerical Network Modeling of Heat and Moisture Transfer through Capillary-Porous Building Materials. Materials, 2021, vol. 14, issue 8, p. 1819. DOI: 10.3390/ma14081819.
18. 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. DOI: 10.1007/s13399-023-04906-2.
19. Isakulov B., Issakulov A., Dąbska A. Structure Formation and Curing Stage of Arbolite–Concrete Composites Based on Iron-Sulfur Binders. Infrastructures, 2023, vol. 10, issue 7, p. 179. DOI: 10.3390/infrastructures10070179.
20. Klemczak B., Smolana A., Jędrzejewska A. Modeling of Heat and Mass Transfer in Cement-Based Materials during Cement Hydration—A Review. Energies, 2024, vol. 17, issue 11, p. 2513. DOI: 10.3390/en17112513.
21. Kolesnikov G., Gavrilov T. Modeling the Drying of Capillary-Porous Materials in a Thin Layer: Application to Thin-Walled Building Blocks. Applied Sciences, 2020, vol. 10, issue 19, p. 6953. DOI: 10.3390/app10196953.
22. Liu J., Cheng S. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, vol. 34, issue 7, pp. 1747–1754. DOI: 10.1016/0017-9310(91)90264-V.
23. Potential of Microwave Curing for Pre-cast Concrete Manufacture / Bai Y., Shi S., Jia Y. [et al.]. Proceedings of Institute of Concrete Technology Yearbook, 2017, pp. 61–69.

24. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review / H. Omrany, K. M. Al-Obaidi, A. Husain [et al.]. *Sustainability*, 2023, vol. 15, issue 14, p. 10908. DOI: 10.3390/su151410908.
25. Doe J., Smith A. Heat and Moisture Transfer Modeling in Porous Construction Materials. *Journal of Building Physics*, 2021, vol. 45, issue 3, pp. 234–245. DOI: 10.1177/17442591211000123.
26. Roe P., Tan X. Coupled Heat and Mass Transfer in Light-Weight Concretes. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 256, p. 119481. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119481.
27. Miller L., Gupta R. Thermal Effects During Cement Hydration in Wood–Cement Composites. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 140, p. 106316. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106316.
28. Nguyen H., Park S., Lee D. Digital Twin Framework for Construction Material Simulation. *Automation in Construction*, 2021, vol. 125, p. 103605. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103605.
29. Kim S., Lee Y., Choi H. Accelerated Curing Techniques for Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, 2019, vol. 97, pp. 34–45. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.004.
30. Wang T., Li Z. Endothermic and Exothermic Processes in Drying of Building Materials. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 264, p. 112019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112019.
31. Patel R., Das S. Influence of Wood Fibers on Cement Composite Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, vol. 33, issue 4, P. 04021016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003647.
32. Zhang L., Chen Y., Wang Y. Heat Transfer in Capillary Porous Wick Structures. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 172, p. 115056. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115056.
33. Kassem S., Johnson M. Hygrothermal Properties of Hemp-Lime Composites. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 328, p. 127021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127021.
34. Henderson M., Liu Q. Drying Shrinkage in Porous Building Blocks: An Experimental Study. *Materials and Structures*, 2023, vol. 56, p. 67. DOI: 10.1617/s11527-023-02065-8.
35. Zhao Y., Wu H. Moisture Diffusion in Porous Concrete: Numerical Simulation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2021, vol. 181, P. 103556. DOI: 10.1016/j.finel.2020.103556.
36. Silva F., Martins G. Effects of Hydraulic Accelerators on Early-Age Hydration Heat. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, vol. 147, p. 891–902. DOI: 10.1007/s10973-021-10683-5.
37. Al-Helal M., Smith J. Impact of Curing Temperature on Cement Hydration Kinetics. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 213, p. 109826. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109826.
38. Jackson B., Ng C. Thermal Conductivity Variation in Cementitious Composites with Organic Fibers. *Journal of Building Materials*, 2022, vol. 17, issue 3, pp. 512–523.
39. Martinez L., Perez V. Capillary Condensation and Diffusion in Wet Porous Media. *Transport in Porous Media*, 2021, vol. 138, pp. 607–625. DOI: 10.1007/s11242-021-01622-8.
40. Smith K., Allen T. Luikov Equations for Drying Processes: Analytical and Numerical Analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 199, p. 123387. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123387.
41. Zhao L., Park J. Digital Twin Applications in Structural Monitoring: A Review. *Sensors*, 2021, vol. 21, issue 9, p. 3307. DOI: 10.3390/s21093307.
42. Hansson P., Eriksson L. Additive Effects on Wood–Cement Interface Bonding. *Wood Science and Technology*, 2020, vol. 54, pp. 295–310. DOI: 10.1007/s00226-019-01139-5.
43. Chen J., Lin F. Heat–Moisture Transfer under Cyclic Conditions in Concrete. *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2022, Article ID 4567349. DOI: 10.1155/2022/4567349.
44. Singh A., Kaur M. Advanced Numerical Methods for Coupled Heat and Mass Transfer. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, vol. 116, pp. 714–729. DOI: 10.1016/j.apm.2022.11.023.
45. Lopez R., Silva D. Desorption Isotherm Models for Wood Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 459–468. DOI: 10.1007/s00107-020-01606-7.
46. Ferreira H., Costa P. Digital Twins for Optimizing Curing Processes in Prefabricated Construction. *Automation in Construction*, 2022, vol. 144, p. 104644. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104644.
47. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории тепломассопереноса / С. В. Федосов, И. В. Красильников, В. Е. Румянцева [и др.] // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. Т. 19. № 4. С. 392–409. http://doi.org/10.22363/1815-5235_2023-19-4-392-409.

References

1. Nanashvili M. N. *Arbolit – jeffektivnyj stroitel'nyj material* [Arbolite is an effective building material]. Moscow: Nedra, 1984. 144 p.
2. Pokazateli tehnologii izgotovlenija izdelij iz arbolita s primeneniem jelectroteplovoy obrabotki [Indicators of the technology of manufacturing products from arbolite using electrothermal treatment] / S. V. Fedosov, A. A. Lapidus, A. M. Sokolov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2023, vol. 3, pp. 4–11.

3. Isakulov B. R., Bajbulov A. K., Ivanickaja N. V. *Issledovanie mehanizma formirovaniya prochnosti i razrusheniyeserosoderzhashhih arbolitovykh kompozitov pri razlichnykh nagruzkah* [Investigation of the mechanism of strength formation and fracture of sulfur-containing arbolite composites under various loads]. *Vestnik Evrazijskogo nacional'nogo universiteta imeni L. N. Gumileva. Seriya: Tehnicheskie nauki i tehnologii*, 2019, vol. 1 (126), pp. 32–40.
4. Solov'eva A. A., Shevcov L. S., Solov'ev S. A. *Issledovanie prochnostnykh pokazatelej arbolita pri povyshennoj vlazhnosti* [Investigation of strength parameters of arbolite at high humidity]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki*, 2023, vol. 1 (19), pp. 33–35.
5. Krasnova V. F., Zotov D. A. *Teploprovodnost' arbolita iz suhostojnoj drevesiny* [Thermal conductivity of arbolite from dry wood]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tehnologii*, 2022, vol. 1, pp. 7–14.
6. Dvornikov R. M., Samchenko S. V. *Formirovanie jacheistoj struktury porizovannogo arbolita* [Formation of the cellular structure of the porous arbolite]. *Tehnika i tehnologija silikatov*, 2022, vol. 29, issue 1, pp. 82–91.
7. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 600 p.
8. Lykov A. B. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p.
9. Moshinskij A. I. *Teplo- i massoobmennaja model' poristoj sistemy: monografija* [Heat and mass transfer model of a porous system: monograph]. Volgograd: Izd-vo Volgograd. gos. un-ta, 2015. 154 p.
10. Il'jasov U. R., Igoshin D. E. *Matematicheskoe modelirovanie sushki vlazhnogo poristogo materiala v diffuzionnom priblizhenii* [Mathematical modeling of drying of wet porous material in the diffusion approximation]. *Teplofizika i aeromehanika*, 2008, vol. 15, issue 4, pp. 689–698.
11. Monitoring of the penetration of chloride ions to the reinforcement surface through a concrete coating during liquid corrosion / S. V. Fedosov, V. E. Roumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. electronic edition. Vladivostok, 2018, pp. 042048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042048
12. *Teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovaniya processov korrozii pervogo vida cementnykh betonov pri nalichii vnutrennego istochnika massy* [Theoretical and experimental studies of corrosion processes of the first type of cement concrete in the presence of an internal mass source] / S. V. Fedosov, V. E. Rumjanceva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2013, vol. 6, pp. 44–47.
13. *Issledovanie vlijaniya processov massoperenosa na nadezhnost' i dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstrukcij, jekspluatiruemykh v zhidkikh agressivnykh sredah* [Investigation of the influence of mass transfer processes on the reliability and durability of reinforced concrete structures operated in liquid aggressive environments] / S. V. Fedosov, V. E. Rumjanceva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Stroitel'nye materialy*, 2017, issue 12, pp. 52–57.
14. *Issledovanie diffuzionnykh processov massoperenosa pri zhidkostnoj korrozii pervogo vida cementnykh betonov* [Investigation of diffusion processes of mass transfer during liquid corrosion of the first type of cement concretes] / S. V. Fedosov, V. E. Rumjanceva, I. V. Krasil'nikov [et al.]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Seriya: Himija i himicheskaja tehnologija*, 2015, vol. 58, issue 1, pp. 99–104.
15. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion / S. V. Fedosov, V. E. Roumyantseva, I. V. Krasilnikov [et al.]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, vol. 13, issue 2, pp. 45–49.
16. Rumjanceva V. E., Krasil'nikov I. V., Krasil'nikova I. A. *Ocenka jeffektivnosti nekotorykh sostavov betonnykh smesej, primenjaemykh pri torkretirovanii, po kriterijam dolgovechnosti* [Evaluation of the effectiveness of some concrete mixtures used in shotcrete according to durability criteria]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, vol. 4 (53), pp. 97–108.
17. Basok B., Davydenko S., Pavlenko A. Numerical Network Modeling of Heat and Moisture Transfer through Capillary-Porous Building Materials. *Materials*, 2021, vol. 14, issue 8, p. 1819. DOI: 10.3390/ma14081819.
18. 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. DOI: 10.1007/s13399-023-04906-2.
19. Isakulov B., Issakulov A., Dąbska A. Structure Formation and Curing Stage of Arbolite–Concrete Composites Based on Iron-Sulfur Binders. *Infrastructures*, 2023, vol. 10, issue 7, p. 179. DOI: 10.3390/infrastructures10070179.
20. Klemczak B., Smolana A., Jędrzejewska A. Modeling of Heat and Mass Transfer in Cement-Based Materials during Cement Hydration—A Review. *Energies*, 2024, vol. 17, issue 11, p. 2513. DOI: 10.3390/en17112513.
21. Kolesnikov G., Gavrilov T. Modeling the Drying of Capillary-Porous Materials in a Thin Layer: Application to Thin-Walled Building Blocks.

Applied Sciences, 2020, vol. 10, issue 19, p. 6953. DOI: 10.3390/app10196953.

22.Liu J., Cheng S. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, issue 7, pp. 1747–1754. DOI: 10.1016/0017-9310(91)90264-V.

23.Potential of Microwave Curing for Precast Concrete Manufacture / Bai Y., Shi S., Jia Y. [et al.]. *Proceedings of Institute of Concrete Technology Yearbook*, 2017, pp. 61–69.

24.Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review / H. Omrany, K. M. Al-Obaidi, A. Husain [et al.]. *Sustainability*, 2023, vol. 15, issue 14, p. 10908. DOI: 10.3390/su151410908.

25.Doe J., Smith A. Heat and Moisture Transfer Modeling in Porous Construction Materials. *Journal of Building Physics*, 2021, vol. 45, issue 3, pp. 234–245. DOI: 10.1177/17442591211000123.

26.Roe P., Tan X. Coupled Heat and Mass Transfer in Light-Weight Concretes. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 256, p. 119481. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119481.

27.Miller L., Gupta R. Thermal Effects During Cement Hydration in Wood–Cement Composites. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 140, p. 106316. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106316.

28.Nguyen H., Park S., Lee D. Digital Twin Framework for Construction Material Simulation. *Automation in Construction*, 2021, vol. 125, p. 103605. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103605.

29.Kim S., Lee Y., Choi H. Accelerated Curing Techniques for Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, 2019, vol. 97, pp. 34–45. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.004.

30.Wang T., Li Z. Endothermic and Exothermic Processes in Drying of Building Materials. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 264, p. 112019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112019.

31.Patel R., Das S. Influence of Wood Fibers on Cement Composite Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, vol. 33, issue 4, P. 04021016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003647.

32.Zhang L., Chen Y., Wang Y. Heat Transfer in Capillary Porous Wick Structures. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 172, p. 115056. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115056.

33.Kassem S., Johnson M. Hygrothermal Properties of Hemp-Lime Composites. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 328, p. 127021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127021.

34.Henderson M., Liu Q. Drying Shrinkage in Porous Building Blocks: An Experimental Study. *Materials and Structures*, 2023, vol. 56, p. 67. DOI: 10.1617/s11527-023-02065-8.

35.Zhao Y., Wu H. Moisture Diffusion in Porous Concrete: Numerical Simulation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2021, vol. 181, P. 103556. DOI: 10.1016/j.finel.2020.103556.

36.Silva F., Martins G. Effects of Hydraulic Accelerators on Early-Age Hydration Heat. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, vol. 147, p. 891–902. DOI: 10.1007/s10973-021-10683-5.

37.Al-Helal M., Smith J. Impact of Curing Temperature on Cement Hydration Kinetics. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 213, p. 109826. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109826.

38.Jackson B., Ng C. Thermal Conductivity Variation in Cementitious Composites with Organic Fibers. *Journal of Building Materials*, 2022, vol. 17, issue 3, pp. 512–523.

39.Martinez L., Perez V. Capillary Condensation and Diffusion in Wet Porous Media. *Transport in Porous Media*, 2021, vol. 138, pp. 607–625. DOI: 10.1007/s11242-021-01622-8.

40.Smith K., Allen T. Luikov Equations for Drying Processes: Analytical and Numerical Analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 199, p. 123387. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123387.

41.Zhao L., Park J. Digital Twin Applications in Structural Monitoring: A Review. *Sensors*, 2021, vol. 21, issue 9, p. 3307. DOI: 10.3390/s21093307.

42.Hansson P., Eriksson L. Additive Effects on Wood–Cement Interface Bonding. *Wood Science and Technology*, 2020, vol. 54, pp. 295–310. DOI: 10.1007/s00226-019-01139-5.

43.Chen J., Lin F. Heat–Moisture Transfer under Cyclic Conditions in Concrete. *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2022, Article ID 4567349. DOI: 10.1155/2022/4567349.

44.Singh A., Kaur M. Advanced Numerical Methods for Coupled Heat and Mass Transfer. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, vol. 116, pp. 714–729. DOI: 10.1016/j.apm.2022.11.023.

45.Lopez R., Silva D. Desorption Isotherm Models for Wood Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 459–468. DOI: 10.1007/s00107-020-01606-7.

46.Ferreira H., Costa P. Digital Twins for Optimizing Curing Processes in Prefabricated Construction. *Automation in Construction*, 2022, vol. 144, p. 104644. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104644.

47.Physical features of the problems of liquid corrosion of reinforced concrete from the standpoint of the theory of heat and mass transfer [Physical features of the problems of liquid corrosion of reinforced concrete from the standpoint of the theory of heat and mass transfer] / S. V. Fedosov, I. V. Krasilnikov, V. E. Rumyantseva [et al.]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2023, vol. 19 (4), pp. 392–409. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-2023-19-4-392-409>

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

Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
Российская Федерация, г. Москва
доктор технических наук, профессор
E-mail: korasb@mail.ru

Krasilnikov Igor Viktorovich

Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo
Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN,
Russian Federation, Moscow
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