



СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА/STRUCTURAL MECHANICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.1>

EDN: HGKYIE

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ОРТОТРОПНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ ПРИ СВЧ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Научная статья

Орехов А.В.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0006-3259-7034;¹ Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (orehov1975[at]mail.ru)

Предложена: 13.07.2026; Принята: 05.08.2026; Опубликовано: 21.09.2026

Аннотация

Применение СВЧ-энергии для ускорения твердения цементных композитов ограничено рисками термического растрескивания из-за ортотропии свойств и интерференции волн. В работе разработана пространственная конечно-элементная модель связанных электромагнитных и тепловых полей на базе уравнений Гельмгольца и Фурье. Численно доказано влияние масштабного фактора на характер нагрева при мощности магнетрона 800 Вт. Установлено, что уменьшение размеров кубических образцов со 125 до 25 мм меняет распределение источников тепла с неравномерного на объемное, однако в малых образцах начинает проявляться краевой эффект. Определено время достижения целевой температуры 80 °С: 129 с для крупных образцов (125 мм) и 6 с для маломасштабных (25 мм), требующих теплоизолирующих форм для снижения температурного градиента. Результаты применимы для проектирования промышленных установок СВЧ-нагрева строительных изделий.

Ключевые слова: строительная механика; СВЧ-нагрев; ортотропная среда; диэлектрические свойства; нестационарные тепловые поля; метод конечных элементов; уравнение Гельмгольца; мультифизическое моделирование; масштабный фактор.

NUMERICAL MODELLING OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF NON-STATIONARY THERMAL FIELDS IN ORTHOTROPIC DIELECTRIC ENVIRONMENTS UNDER MICROWAVE ENERGY EXPOSURE

Research article

Orehov A.V.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0006-3259-7034;¹ Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

* Corresponding author (orehov1975[at]mail.ru)

Suggested: 13.07.2026; Accepted: 05.08.2026; Published: 21.09.2026

Abstract

The use of microwave energy to accelerate the hardening of concrete composites is limited by the risks of thermal cracking due to the orthotropic nature of the material's properties and wave interference. The work develops a spatial finite-element model of coupled electromagnetic and thermal fields based on the Helmholtz and Fourier equations. The influence of the scale factor on the heating process at a magnetron power of 800 W has been numerically demonstrated. It has been established that reducing the dimensions of cubic specimens from 125 to 25 mm changes the distribution of heat sources from uneven to volumetric; however, an edge effect begins to manifest in small specimens. The time required to reach the target temperature of 80 °C has been determined: 129 s for large samples (125 mm) and 6 s for small-scale samples (25 mm), which require heat-insulating moulds to reduce the temperature gradient. The results are applicable to the design of industrial microwave heating installations for construction products.

Keywords: structural mechanics, microwave heating, orthotropic environment, dielectric properties, non-stationary heat fields, finite element method, Helmholtz equation, multiphysical modelling, scale factor.

Введение

Развитие методов контроля качества в строительстве требует перехода к управляемому воздействию на бетон связанных физических полей. Актуальной задачей является ускорение термообработки контрольных образцов для оперативного подтверждения их марочной прочности. Традиционные контактные методы обладают высокой тепловой инерцией. СВЧ-воздействие обеспечивает прямой объемный прогрев за счет взаимодействия электромагнитных волн с полярными молекулами воды в порах, что кардинально сокращает время обработки. Однако внедрение технологии сдерживается рисками локальных термических деструкций из-за неоднородности поглощения энергии в анизотропных телах.

Расчет полей при наличии внутренних источников тепла изучен А. В. Лыковым [1], Н.М. Беляевым и А. А. Рядно [2]. Влияние температурных полей на деформации конгломератов исследовалось Н. И. Карпенко [3], Л.М. Абрамовым с соавторами [4], [5], а также Н.П. Горленко и Ю.С. Саркисовым [6]. Моделирование СВЧ-нагрева пористых сред — А. К. Даттой [7]. Однако большинство авторов рассматривают материалы как изотропные тела. На практике они

обладают ортотропией из-за послойной укладки смеси и капиллярной структуры. Игнорирование этого фактора занижает локальные температуры на 25–30%, исключая точный прогноз трещин. Малоизучена кинетика нагрева при форсированной мощности магнетрона (800 Вт), а связь волновой интерференции со скоростью тепловыделения не описана. При этом выбор температуры 80 °С обусловлен кинетикой гидратации цемента: этот предел максимально ускоряет рост прочности, а его превышение вызывает лавинообразное парообразование и деструкцию гидросиликатов [3].

Цель исследования — моделирование распределения СВЧ-волн и тепловых полей в ортотропных композитах для определения времени безопасного прогрева образцов разного масштаба до 80 °С при мощности 800 Вт.

Методы и принципы исследования

2.1. Объекты моделирования и параметры СВЧ-нагружения

Численное исследование нестационарных тепловых полей выполнялось для трех базовых типоразмеров кубических образцов строительного композита с технологически заданной ортотропией структуры: крупномасштабные ($a_1 = 125$ мм), среднемасштабные ($a_2 = 75$ мм) и маломасштабные ($a_3 = 25$ мм).

Процесс обработки моделировался в COMSOL Multiphysics на частоте $f = 2,45$ ГГц. Начальная температура образцов и воздуха составляла $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Выходная мощность магнетрона исследовалась в критическом форсированном режиме $P = 800$ Вт. Критерием оценки кинетики поглощения волновой энергии принято время достижения целевой температуры $T = 80^\circ\text{C}$ в контрольных зонах образцов: в точке абсолютного теплового максимума (геометрическом центре) для крупных и средних кубов, и на наружной поверхности граней — для маломасштабных образцов, где начинает доминировать краевой эффект. Для экспериментальной верификации разработанной пространственной конечно-элементной модели была проведена серия лабораторных опытов при мощности магнетрона 800 Вт. В качестве объектов физических испытаний использовались стандартные строительные кубические образцы с ребром 100 мм. Регистрация кинетики изменения температурных полей осуществлялась методом непрерывной регистрации на наружной поверхности с помощью инфракрасного пирометра. Для фиксации геометрии образцов рассматривались формы, изготовленные методом 3D-печати из ABS-пластика и фанерные (деревянные). Из-за локального термического размягчения полимера в интерференционных полях 3D-печатные формы не подошли, применение нашли деревянные емкости, обеспечивающие стабильность.

2.2. Физико-математическая модель

Уравнение Гельмгольца — рассчитывает, как электромагнитные волны затухают и отражаются внутри куба

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость;

j — мнимая единица;

σ — проводимость;

ω — угловая частота;

ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

Модель использует материальные параметры для воздуха: $\sigma = 0$ и $\mu_r = \epsilon_r = 1$.

Уравнение Фурье — рассчитывает нестационарный трехмерный нагрев с учетом тензора теплопроводности ортотропного композита в температурном диапазоне от 20 до 80° С [1], [2]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(x, y, z, T)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;

c_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг К);

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — главные компоненты тензора теплопроводности;

Вт/(м — главные компоненты тензора теплопроводности, Вт/(м К) [1], [2].

Интенсивность объемного выделения теплоты определялась на основе диэлектрических потерь [3]:

$$q_v = 2\pi f \epsilon_0 \left(\epsilon_x E_x^2 \tan \delta_x + \epsilon_y E_y^2 \tan \delta_y + \epsilon_z E_z^2 \tan \delta_z \right)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

Значения теплофизических и диэлектрических свойств принимаются как функции от текущей локальной температуры T , изменяющейся в ходе ускоренной волновой термообработки [8].

2.3. Граничные условия и особенности конечно-элементной дискретизации

На открытых внешних гранях кубических образцов задавались нестационарные граничные условия III рода, описывающие конвективный теплообмен с воздушной средой камеры [1].

$$-\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \alpha (T_{\text{пов}} - T_0)$$

где n_i — направляющие косинусы внешней нормали к поверхности;

α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Численная реализация выполнена методом конечных элементов (МКЭ) в среде COMSOL Multiphysics на тетраэдральной сетке с адаптивным сгущением на ребрах куба. Максимальный размер элемента не превышал $0,1\lambda$.

Основные результаты

Разработанная конечно-элементная модель адекватно описывает исследуемый процесс: расхождение между расчетом и данными пирометра составило всего 8–12%. Характер нагрева полностью зависит от того, соразмерен ли куб длине волны СВЧ в бетоне (а это около 4–5 см).

Результаты моделирования времени достижения целевой температуры 80 °С при критической мощности магнетрона 800 Вт систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 - Кинетика нестационарного СВЧ-нагрева образцов до температуры 80 °С (Р = 800 Вт)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.1.1>

Типоразмер образца	Характер распределения СВЧ-волн	Время до 80 °С	Локализация критической зоны	Риск растрескивания
Крупный (125 мм)	Выраженная интерференционная топология	129 секунд	Геометрический центр куба (пучность интерференции)	Критический (термический взрыв)
Средний (75 мм)	Ослабленная интерференция волн	27 секунд	Смещенные максимумы вдоль осей ортотропии	Высокий (требуется импульсный режим)
Малый (25 мм)	Объемное поглощение с краевым эффектом	6 секунд	Центральная зона куба (абсолютный максимум)	Повышенный (требуется теплоизолирующие формы)

Визуализация пространственного распределения нестационарных тепловых полей в момент достижения целевой температуры показана на рисунке 1.

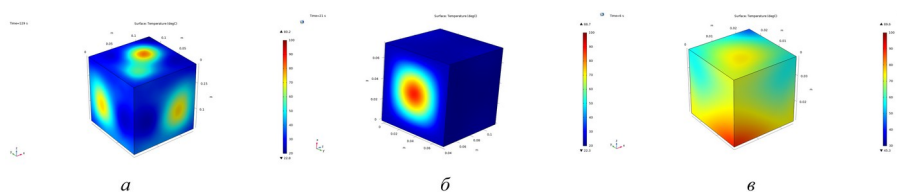


Рисунок 1 - Пространственное распределение нестационарных тепловых полей в образцах бетонного композита в зависимости от масштабного фактора при достижении целевой температуры 80 °С (Р = 800 Вт)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.1.2>

Примечание: а) 3D-изотермы крупномасштабного куба (125 мм) с интерференционной «горячей точкой» в центре; б) сглаживание полей в среднемасштабном кубе (75 мм) вдоль осей ортотропии; в) объемное поле в маломасштабном кубе (25 мм)

Пространственное распределение физических полей и масштабный эффект при 800 Вт:

1. **Крупномасштабные образцы** ($a_1 = 125$ мм). Линейные размеры куба существенно превышают длину волны СВЧ в бетоне, что формирует жесткую интерференционную картину. При мощности 800 Вт в пучностях поля энергия выделяется лавинообразно. Центральная зона достигает 80 °С за **129 секунд**. Внутренние перетоки тепла вдоль осей ортотропии (λ_i) не успевают компенсировать этот приток, вызывая критический температурный градиент (более 25 °С/см) и макроразрушение структуры.

2. **Среднемасштабные образцы** ($a_2 = 75$ мм). Электродинамический волновой характер поглощения энергии сохраняется, но общее число интерференционных максимумов внутри тела снижено. При 800 Вт скорость генерации тепла в пучностях опережает скорость его релаксации вдоль главных осей ортотропии. Точка 80 °С фиксируется на 21-й секунде. Пространственный перепад температур в объеме куба превышает безопасные 25 °С, требуя импульсного ввода мощности.

3. **Маломасштабные образцы** ($a_3 = 25$ мм). Выявлен режим форсированного объемного нагрева с высоким темпом роста температуры. При фиксации времени на 6-й секунде целевой показатель в 80,0 °С достигается на наружной поверхности граней куба. При этом из-за объемного характера СВЧ-нагрева в глубине (в центральной зоне куба) температура опережает поверхностную и достигает абсолютного максимума 89,6 °С. В то же время из-за интенсивной теплоотдачи в окружающую среду температура в слабопрогреваемых угловых ребрах составляет 51,6 °С. Таким образом, максимальный пространственный перепад температур между внутренними и угловыми зонами в объеме маломасштабного образца достигает 38,0 °С.

Общая динамика форсированного термического нагрева во времени приведена на рисунке 2.

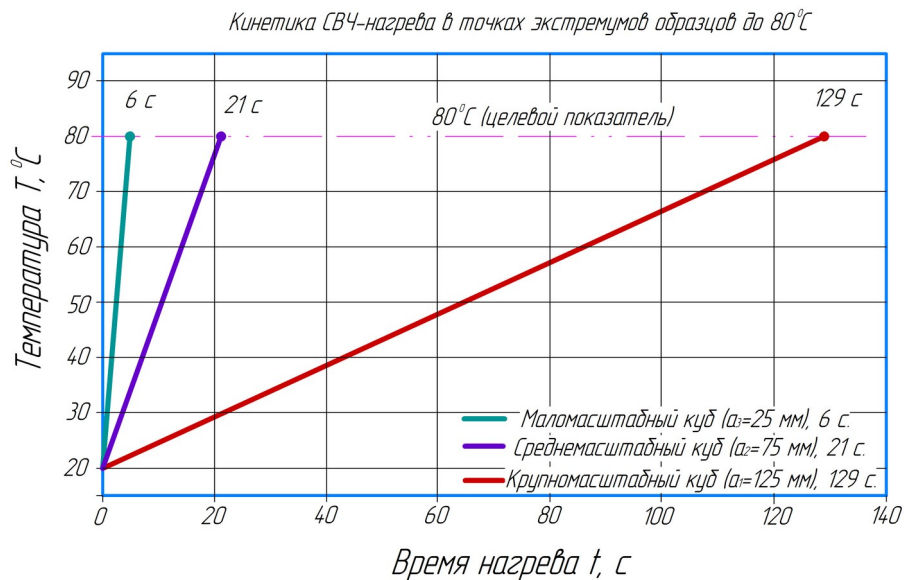


Рисунок 2 - Кинетика нестационарного СВЧ-нагрева в точках экстремумов кубических образцов различного масштаба до целевой температуры 80 °С при мощности 800 Вт
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.1.3>

Для подтверждения адекватности предложенного математического аппарата и оценки чувствительности результатов к физическим параметрам среды выполнено сопоставление теоретических расчетов с данными натурального эксперимента, где рассматривались стандартные строительные кубы размером 100 мм (рисунок 3).

Расчетная 3D-топология полей (рисунок 3а) указывает на формирование высокочастотной волновой картины с локализацией температурного максимума в центре образца. Экспериментальная кинетика изменения температуры на поверхности стандартного куба (рисунок 3б) подтверждает данный физический тренд. В то время как в геометрическом центре куба температура достигает целевых 80 °С, на его поверхности за счет конвективного теплообмена с воздушной средой фиксируется температура 57,4 °С. Волнообразные отклонения опытной кривой (пунктир на рисунке 3б) от модели в интервале 35–55 °С наглядно демонстрируют высокую чувствительность системы к динамическому изменению диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса потерь ($\lg \delta$) материала в момент интенсивных фазовых переходов и связывания свободной влаги. Численная модель в COMSOL Multiphysics для поверхностной точки контроля показала значение 54,91 °С, что обеспечивает стабильную сходимость с результатами натурального эксперимента с погрешностью не более 8–12% при коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,9310$).

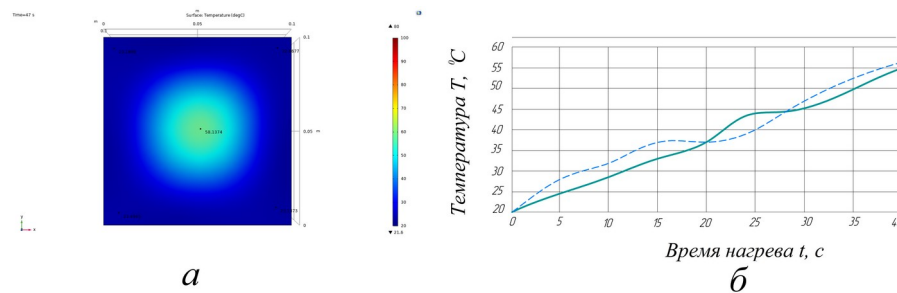


Рисунок 3 - Верификация пространственно-временных параметров СВЧ-нагрева стандартных образцов (100 мм) бетонного композита при мощности $P=800$ Вт
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.1.4>

Примечание: а) расчетное 3D распределение структуры волновых тепловых полей с фиксацией экстремума 80 °С в центре куба по данным конечно-элементного моделирования; б) экспериментальная нелинейная кинетика изменения температуры на поверхности образца, экспериментальные данные и результаты моделирования

Обсуждение

Переход от традиционных пропарочных камер к объемному СВЧ-воздействию при учете ортотропии снизил погрешность мультифизических расчетов с 30 % до 8–12 %. Моделирование подтвердило, что фиксация температуры 57,4 °С на поверхности (при расчетных 54,91 °С по модели) при 80 °С в центре обусловлена конвективным охлаждением граней и волновым характером распределения поля в 100-мм кубе. масштаб образца определяет топологию полей, а форсированная мощность 800 Вт — кинетику процесса.



В крупных кубах (125 мм) интерференция волн и длительный нагрев до 80 °С (129 с) создают критический градиент (более 25 °С/см). Согласно концепциям Н. И. Карпенко [3] и Y. Zheng [9] и Б.С. Ревенко [10], это активизирует микротрещинообразование на границе «раствор — заполнитель». Данный вывод подтверждают опыты Н. Д. Смирновой [11], зафиксировавшей падение проектной прочности крупных образцов на 25,61%. Такие разрушающие процессы существенно снижают общую долговечность цементных композитов при температурных воздействиях [12].

В кубах размером 25 мм наблюдается выраженный краевой эффект: за 6 секунд форсированного нагрева температура на поверхности граней достигает контрольных 80,0 °С, в то время как в глубине образца она доходит до 89,6 °С. При этом из-за конвективного охлаждения угловые ребра куба остаются слабопрогретыми (51,6 °С). Применение малых образцов ограничено растворами и мелкозернистыми бетонами с крупностью заполнителя до 5–6 мм. Высокий пространственный градиент (38 °С) требует обязательного использования теплоизолирующих форм для выравнивания температурного поля. Для тяжелых бетонов со стандартными габаритами (100–125 мм) требуется адаптация геометрии волноводов или снижение частоты излучения СВЧ-установки. Полученные закономерности согласуются с результатами численного моделирования нестационарных температурных полей методом конечных элементов при локальных тепловых воздействиях, представленными В.А. Ерышевым [13].

Ограничением работы является фиксация мощности СВЧ-излучения на уровне 800 Вт. Исследование влияния мощности магнетрона на динамику полей и поиск оптимальных режимов, чувствительность результатов к изменению теплофизических и диэлектрических характеристик материалов, а также условия теплообмена на закрытых гранях куба были приняты идеализированными. Разработка уточненной контактной модели на границе «бетон — деревянная форма» с учетом термического сопротивления воздушных микрозазоров и диэлектрических свойств материала оснастки составят предмет будущих публикаций.

Заключение

На основе моделирования связанных термоэлектродинамических полей в ортотропных композитах при СВЧ-воздействии сформулированы выводы:

1. Верифицирована пространственная конечно-элементная модель на базе уравнений Гельмгольца и Фурье, погрешность численного расчета относительно данных натурного эксперимента на стандартных кубических образцах размером 100 мм составила не более 8–12% при коэффициенте детерминации 0,9310. Лабораторные испытания подтвердили стабильность геометрии деревянных форм при мощности 800 Вт, в то время как формы из ABS-пластика признаны неприменимыми из-за термических деформаций.

2. Доказан масштабный эффект при мощности 800 Вт: уменьшение ребра куба со 125 до 25 мм устраняет волновую интерференцию и переводит нагрев в объемный режим, в котором, однако, начинает проявляться выраженный краевой эффект.

3. Установлено время достижения целевого нагрева: 129 секунд для крупных образцов (125 мм) до пика в геометрическом центре и 6 секунд для малых (25 мм) до достижения контрольного показателя 80,0 °С на поверхности при абсолютном внутреннем максимуме 89,6 °С.

4. Обоснована возможность модернизации классических пропарочных камер за счет волнового СВЧ-воздействия для объемного прогрева изделий, однако метод имеет ограничение: нагрев в 25-мм кубах применим только для мелкозернистых смесей (заполнитель до 5–6 мм) и требует обязательного использования теплоизолирующих форм для снижения пространственного градиента, тогда как термообработка тяжелых бетонов в крупномасштабных габаритах (125 мм) или стандартных образцах (100 мм) требует обязательной адаптации геометрии волноводов СВЧ-установки.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. — Москва: Высшая школа, 1967. — 600 с.
2. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев. — Москва: Высшая школа, 1982. — 327 с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. — Москва: Стройиздат, 1996. — 416 с.
4. Абрамов Л.М. Напряженно-деформированное состояние при испытании на сжатие кубических образцов анизотропного бетона / Л.М. Абрамов, А.В. Орехов, И.Л. Абрамов // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 1. — С. 58–61.
5. Абрамов Л.М. Анализ напряженно-деформированного образца при испытании на сжатие / Л.М. Абрамов, А.В. Орехов, С.Н. Маклакова // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 9. — С. 62–66.
6. Горленко Н.П. Влияние электромагнитных полей на процессы структурообразования в вяжущих системах / Н.П. Горленко, Ю.С. Саркисов // Известия вузов. Строительство. — 2020. — № 4. — С. 22–29.
7. Datta A.K. Porous media architecture and electromagnetic heating / A.K. Datta // American Institute of Chemical Engineers Journal. — 2007. — Vol. 53, № 1. — P. 12–21.



8. Нефедов В.Н. Микроволновый метод обработки бетона / В.Н. Нефедов, А.В. Мамонтов, В.П. Симонов и др. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т. 10, № 8. — С. 79–82.
9. Zheng Y. Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: An experimental and numerical study / Y. Zheng, Z. He, H Fu et al. // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 470. — P. Art. 140667.
10. Ревенко Б.С. Термические напряжения при высокочастотной обработке строительных материалов / Б.С. Ревенко, В.А. Грушко. — Киев: Будивельник, 1988. — 142 с.
11. Смирнова Н.Д. Экспериментальное исследование воздействия СВЧ-излучения на физико-механические характеристики бетона / Н.Д. Смирнова // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vozdeystviya-svch-izlucheniya-na-fiziko-mekhanicheskie-kharakteristiki-betona> (дата обращения: 12.07.26).
12. Селяев В.П. Термические напряжения при высокочастотной обработке строительных материалов / В.П. Селяев, В.Н. Куприянов // Региональная архитектура и градостроительство. — 2019. — № 2. — С. 84–91.
13. Ерышев В.А. Численное моделирование нестационарных температурных полей в бетонных элементах методом конечных элементов при локальных тепловых воздействиях / В.А. Ерышев, Д.С. Тошин, Е.В. Латышева // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2022. — № 6(762). — С. 34–42.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ly'kov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conduction] / A.V. Ly'kov. — Moscow: Vysshaya shkola, 1967. — 600 p. [in Russian]
2. Belyaev N.M. Metody' teorii teploprovodnosti [Methods of heat conduction theory] / N.M. Belyaev. — Moscow: Vysshaya shkola, 1982. — 327 p. [in Russian]
3. Karpenko N.I. Obshhie modeli mexaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics] / N.I. Karpenko. — Moscow: Strojizdat, 1996. — 416 p. [in Russian]
4. Abramov L.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri ispy'tanii na szhatie kubicheskix obrazczov anizotropnogo betona [Stress-strain state in compression testing of cubic anisotropic concrete specimens] / L.M. Abramov, A.V. Orehov, I.L. Abramov // Industrial and Civil Engineering. — 2016. — № 1. — P. 58–61. [in Russian]
5. Abramov L.M. Analiz napryazhenno-deformirovannogo obrazcza pri ispy'tanii na szhatie [Stress-strain analysis of a specimen under compression testing] / L.M. Abramov, A.V. Orehov, S.N. Maklakova // Industrial and Civil Engineering. — 2015. — № 9. — P. 62–66. [in Russian]
6. Gorlenko N.P. Vliyanie e'lektromagnitny'x polej na processy' strukturoobrazovaniya v vyazhushhix sistemax [Effect of electromagnetic fields on structure formation processes in binding systems] / N.P. Gorlenko, Yu.S. Sarkisov // Proceedings of Universities. Construction. — 2020. — № 4. — P. 22–29. [in Russian]
7. Datta A.K. Porous media architecture and electromagnetic heating / A.K. Datta // American Institute of Chemical Engineers Journal. — 2007. — Vol. 53, № 1. — P. 12–21.
8. Nefedov V.N. Mikrovolnovii metod obrabotki betona [Microwave method of concrete processing] / V.N. Nefedov, A.V. Mamontov, V.P. Simonov et al. // T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]. — 2016. — Vol. 10, № 8. — P. 79–82. [in Russian]
9. Zheng Y. Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: An experimental and numerical study / Y. Zheng, Z. He, H Fu et al. // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 470. — P. Art. 140667.
10. Revenko B.S. Termicheskie napryazheniya pri vy'sokochastotnoj obrabotke stroitel'ny'x materialov [Thermal stresses in high-frequency processing of building materials] / B.S. Revenko, V.A. Grushko. — Kiev: Budivelnik, 1988. — 142 p. [in Russian]
11. Smirnova N.D. Eksperimentalnoe issledovanie vozdeystviya SVCh-izlucheniya na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki betona [Experimental study of the microwave radiation effect on the physical and mechanical characteristics of concrete] / N.D. Smirnova // Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2023. — № 8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vozdeystviya-svch-izlucheniya-na-fiziko-mekhanicheskie-kharakteristiki-betona> (accessed: 12.07.26). [in Russian]
12. Selyaev V.P. Termicheskie napryazheniya pri vy'sokochastotnoj obrabotke stroitel'ny'x materialov [Thermal stresses in high-frequency processing of building materials] / V.P. Selyaev, V.N. Kupriyanov // Regional architecture and urban planning. — 2019. — № 2. — P. 84–91. [in Russian]
13. Ery'shev V.A. Chislennoe modelirovanie nestacionarny'x temperaturny'x polej v betonny'x e'lementax metodom konechny'x e'lementov pri lokal'ny'x teplovy'x vozdeystviyax [Numerical finite element modeling of transient temperature fields in concrete elements under local thermal effects] / V.A. Ery'shev, D.S. Toshin, E.V. Laty'sheva // Proceedings of Universities. Construction. — 2022. — № 6(762). — P. 34–42. [in Russian]