



СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА/STRUCTURAL MECHANICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7>

EDN: YEWWD0

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В БЕТОНЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ И ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ СВЧ-НАГРЕВА

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: 10.07.2026; Принята: 11.08.2026; Опубликовано: 21.08.2026

Аннотация

Методом конечных элементов исследована кинетика нестационарных пространственных температурных полей в бетоне при СВЧ-воздействии на частоте 2,45 ГГц. На основе сопряженного решения уравнений электродинамики и теплопроводности выполнен сравнительный анализ непрерывного и импульсно-периодического режимов подвода энергии мощностью 90 Вт для образца 100×100×100 мм. Установлен экстремальный характер распределения поглощенной мощности с локализацией пиков на наружных гранях. Показано, что импульсный режим без вращения образца формирует устойчивые температурные градиенты в зонах пучности волн, создавая циклические термические напряжения. Доказано, что применение непрерывного инверторного управления позволяет существенно снизить интенсивность локальных перегревов в статичном положении образца на начальном этапе нагрева. Это обеспечивает более высокую пространственную однородность температурного профиля по сравнению с импульсно-периодическим режимом и снижает риск температурного разрушения композита без обязательного использования вращающихся элементов на старте процесса.

Ключевые слова: строительная механика, бетон, СВЧ-нагрев, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, температурное поле, термические напряжения.

SIMULATION MODELLING OF THE KINETICS OF SPATIAL THERMAL FIELDS IN CONCRETE UNDER CONTINUOUS AND PULSE-PERIODIC MODES OF MICROWAVE HEATING

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: 10.07.2026; Accepted: 11.08.2026; Published: 21.08.2026

Abstract

The kinetics of non-stationary spatial thermal fields in concrete under microwave irradiation at a frequency of 2.45 GHz were studied using the finite element method. Based on a coupled solution of the equations of electrodynamics and heat conduction, a comparative analysis was carried out of continuous and pulse-periodic modes of energy input at a power of 90 W for a 100×100×100 mm specimen. The distribution of absorbed power was found to be extreme in nature, with peaks localised at the outer edges. It is shown that the pulse mode without sample rotation generates stable thermal gradients in the wave antinodes, creating cyclic thermal stresses. It is demonstrated that the use of continuous inverter control significantly reduces the intensity of local overheating when the sample is in a static position during the initial heating stage. This ensures greater spatial uniformity of the temperature profile compared with the pulse-periodic mode and reduces the risk of thermal failure of the composite without the need to use rotating elements at the start of the process.

Keywords: structural mechanics, concrete, microwave heating, computer modelling, finite element method, thermal field, thermal stresses.

Введение

В современной строительной практике сокращение сроков твердения бетона является важнейшей технологической задачей. Применяемые для этого традиционные методы прогрева (паро- и электропрогрев) высокоинтенсивны, энергоемки и создают опасный температурный перепад по сечению элементов. Это приводит к возникновению внутренних термических напряжений и, как следствие, к появлению микродефектов в структуре конструкции. Альтернативный метод СВЧ-нагрева лишен данных недостатков, так как обеспечивает прямой объемный подвод энергии за счет взаимодействия электромагнитного поля с полярными молекулами воды в порах цементного камня. Однако при неоптимальных импульсно-периодических режимах в статичном материале могут возникать локальные перегревы («пятна нагрева»).

В связи с этим актуальным направлением исследований является компьютерное имитационное моделирование кинетики пространственных тепловых полей. Научно обоснованное сопоставление непрерывного и импульсного

режимов работы СВЧ-источника необходимо для поиска закономерностей распределения тепла и создания безопасных автоматизированных систем ускоренного набора прочности цементных композитов.

Объектом исследования являются пространственно-временные температурные поля и кинетика распределения тепла в объеме цементного композита (бетона) при нестационарном сверхвысокочастотном (СВЧ) электромагнитном воздействии.

Степень разработанности темы

Экспериментально-теоретические вопросы воздействия сверхвысокочастотного излучения и электромагнитных полей на гидратацию и кинетику твердения цементных систем исследованы в фундаментальных трудах отечественных и зарубежных ученых: Ю. М. Баженова [1], В. Н. Нефедова [2], В. Г. Хозина, В. П. Селяева [3], Б. С. Ревенко [4], Н. П. Горленко [5] и других. В их работах доказана принципиальная применимость микроволновой энергии для интенсификации набора прочности бетона.

Однако имеющиеся в литературе данные о характере распределения внутренних тепловых потоков остаются противоречивыми [6]: одни исследователи утверждают о наличии малых температурных градиентов, другие указывают на недопустимость СВЧ-обработки на ранних стадиях из-за риска локальных перегревов и возникновения разрушающих микротрещин на границах раздела фаз «раствор-заполнитель» при интенсивных режимах [7]. В то же время зарубежный опыт численного и экспериментального моделирования показывает, что характер растрескивания композита при СВЧ-воздействии напрямую зависит от диэлектрических и теплофизических свойств используемых заполнителей [13]. На сегодняшний день вопросы численного конечно-элементного сопоставления непрерывного (инверторного) и импульсного подвода энергии к неподвижным образцам, а также оценка кинетики пространственных температурных полей на начальной стадии СВЧ-воздействия (без учета вращения) изучены недостаточно широко. Разработка таких моделей необходима для оценки возможности минимизации «пятен нагрева» за счет оптимизации режимов питания магнетрона.

Цель – установление закономерностей формирования пространственных температурных полей в объеме бетона методом компьютерного моделирования для сравнительной оценки эффективности непрерывного и импульсного режимов СВЧ-нагрева.

Задачи исследования:

1. Построить трёхмерную конечно-элементную геометрическую модель СВЧ-камеры и бетонного образца кубической формы со стороной 100 мм в программном комплексе COMSOL Multiphysics.
2. Выполнить численный расчет пространственного распределения удельной поглощенной мощности электромагнитного поля в структуре бетона на частоте 2,45 ГГц.
3. Исследовать кинетику изменения нестационарного температурного поля по объему образца в условиях непрерывного инверторного подвода энергии при номинальной мощности источника 90 Вт.
4. Смоделировать импульсно-периодический режим работы СВЧ-источника без вращения образца и выявить зоны локализации экстремальных температурных градиентов («пятен нагрева»).
5. Провести сравнительный анализ полученных температурных профилей для обоснования безопасных режимов ускоренной тепловой обработки цементных композитов.

Методы и принципы исследования

В качестве материала исследования принят тяжелый бетон (цементный композит) с постоянной относительной влажностью 50 %. Исследуемый образец представляет собой куб размером 100×100×100 мм, расположенный неподвижно в центре стеклянной тарелки внутри СВЧ-камеры. Начальная температура образца и окружающей среды составляет 20 °С. Выбор данной кубической геометрии обусловлен её универсальностью для лабораторных тестов, а особенности распределения внутренних усилий и изменения напряженно-деформированного состояния бетонных кубов при силовых воздействиях подробно исследованы в работах [11], [12].

Основным методом исследования является численное имитационное моделирование на базе метода конечных элементов (МКЭ), реализованное в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для расчета нестационарного теплового состояния используется пространственная тетраэдрическая сетка. В рамках единой конечно-элементной модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics реализовано взаимосвязное сопряжение электромагнитной и тепловой задач [6]. При построении расчетной схемы за основу была взята модель теоретического сопряжения электромагнитного и теплового полей в многокомпонентных цементных системах под воздействием СВЧ-излучения. При расчете внутренних термических градиентов строительной механики учитывались общие модели трещинообразования и деформирования железобетона [10], а также базовые закономерности изменения напряженно-деформированного состояния цементных кубических образцов при силовых воздействиях. Решена сопряженная электромагнитно-тепловая задача, объединяющая:

1. Электродинамическую часть — решение трехмерного волнового уравнения Гельмгольца для вектора напряженности электрического поля (E) внутри волновода и рабочей камеры на частоте 2,45 ГГц (тип волны TE_{10}). Граничные условия на медных стенках учитывают импедансные потери энергии. Диэлектрические свойства бетона ($\epsilon_r = 4,5$; $\text{tg } \delta = 0,03$) соответствуют частоте 2,45 ГГц и влажности 50%. Параметры импульсов широтно-импульсной модуляции (ШИМ): длительность единичного импульса $\tau = 4,5$ с, период следования $T = 10$ с и коэффициент заполнения $D = 0,45$. Данные характеристики моделируют ШИМ-управление магнетроном с пиковой импульсной мощностью $P_{\text{imp}} = 200$ Вт. При данном соотношении средняя интегральная мощность источника P_{mean} составляет номинальные 90 Вт ($200 \times 0,45$). Выбор относительно короткого периода ШИМ ($T=10$ с) обусловлен необходимостью обеспечения сходимости МКЭ-расчета во временной области и предотвращения избыточной осцилляции шага интегрирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0$$

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.

2. Теплофизическую часть — расчет нестационарных полей теплопроводности с распределенными объемными источниками тепла, на основе классических уравнений тепломассопереноса [8], [9]. Мощность внутренних источников тепла эквивалентна поглощенной бетоном СВЧ-энергии (интегрированный модуль Heat Transfer), которая определяется на основе электродинамического расчета. При номинальной мощности магнетрона 90 Вт с учетом коэффициента отражения и диэлектрических потерь моделируется реальный баланс энергии, поглощаемой цементным композитом. Теплофизические константы: $\rho = 2300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\lambda = 1,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $c_p = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Сравнительный анализ выполнен для двух способов подвода энергии мощностью 90 Вт: непрерывного регулируемого (инверторного) и импульсно-периодического, настроенных с помощью алгоритмов надстройки Events. Вращение образца на данном этапе исследования не предусматривалось, поскольку оно привело бы к «размытию» температурного профиля и сделало бы невозможным фиксацию локальных экстремумов. В лабораторных условиях это было реализовано путем принудительной блокировки поворотного стола СВЧ-печи. Такое статичное позиционирование строго в геометрическом центре камеры позволило изолировать и зафиксировать распределение пучностей стоящих волн в чистом виде, что было необходимо для проверки адекватности трехмерной математической модели.

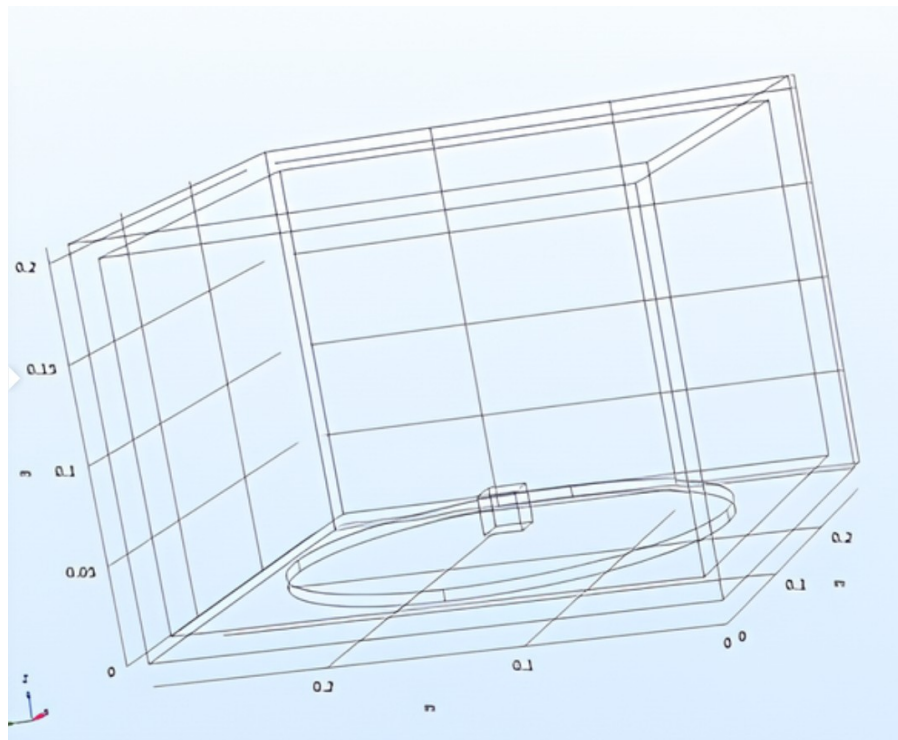


Рисунок 1 - Расчетная схема геометрии волноводного тракта и рабочей камеры СВЧ-установки

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7.1>

Для подтверждения адекватности разработанного математического аппарата выполнено сопоставление теоретических расчетов с данными натурных экспериментов по СВЧ-обработке стандартных кубиков размером 100×100×100 мм. Экспериментальные исследования проводили на дискретных режимах на кафедре строительных конструкций с использованием лабораторной СВЧ-установки на базе печи Elenberg. Начальная температура образцов составляла 20°C. Нагрев осуществлялся строго в импульсно-периодическом режиме подвода энергии при мощности 90 Вт. Образец фиксировался неподвижно в центре рабочей камеры без вращения для точного воспроизведения условий формирования стоячих волн. Фиксация температурного профиля поверхности осуществлялась бесконтактным цифровым пирометром GM320 (инструментальная погрешность ±1,5%, оптическое разрешение 12:1), настроенным на коэффициент излучения бетона, равный 0,93.

Результаты и их обсуждение

На основе конечно-элементного анализа установлено, что характер пространственного распределения удельной поглощенной СВЧ-мощности в бетонном образце имеет ярко выраженную неоднородность. Пространственное распределение напряженности электрического поля и температурных градиентов в объеме бетонного куба при непрерывном инверторном и импульсно-периодическом режимах подвода энергии наглядно продемонстрировано на рисунках 2 и 3 соответственно. Поля тепловых потерь характеризуются резкими пиками на наружных гранях и в центре куба. Данная топология тепловыделения указывает на то, что геометрические размеры образца сопоставимы с длиной волны СВЧ-излучения в диэлектрической среде бетона, что приводит к выраженному резонансному эффекту вместо монотонного затухания поглощенной мощности по глубине. Исследование кинетики нагрева за 40 секунд облучения выявило коренное различие между рассматриваемыми режимами. При номинальной мощности инверторного источника 90 Вт обеспечивается равномерный прогрев: температура на облучаемой поверхности достигает 28,3 °С, а в геометрическом центре — 25,6 °С (зеленый график на рис. 4). В то же время импульсно-периодический режим за аналогичный отрезок времени формирует контрастные «пятна нагрева» в зонах пучностей волн: локальная температура поверхности куба достигает пиковых значений 35,5-37,5 °С (красный график на рис. 4 и опытные данные на рис. 5).

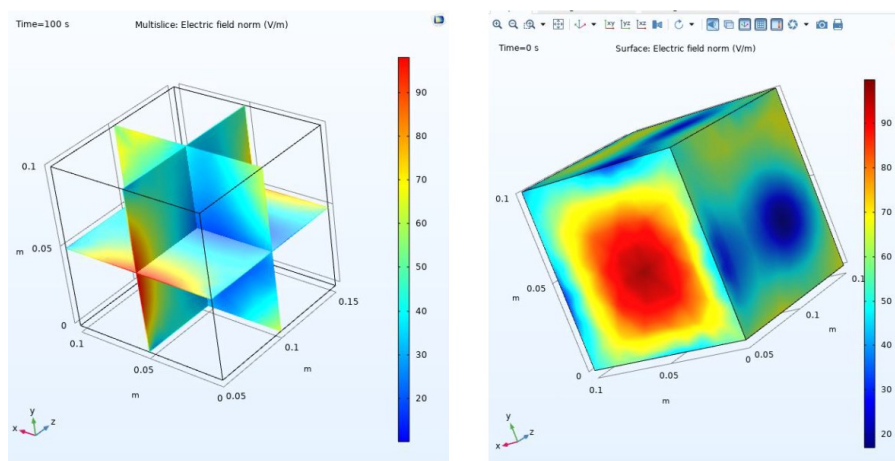


Рисунок 2 - Распределение напряженности электрического поля и температурного градиента в плоскости симметрии бетонного куба (инверторный нагрев)
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7.2>

Расчетное распределение градиента температур по высоте (толщине) кубических образцов в общем виде подчиняется экспоненциальной тенденции затухания энергии по мере удаления от облучаемой поверхности. Однако из-за размеров образца и возникновения переотражений от граней, чистая экспоненциальная зависимость: $T_z = T_0 \times e^{-2az}$, где a — коэффициент затухания электромагнитного поля, определяющий глубину проникновения СВЧ-излучения в объем цементного композита в зависимости от его диэлектрических свойств, m^{-1} , трансформируется в интерференционный профиль. Локальные гармонические колебания температуры обуславливаются формированием стоячих волн, где максимумы соответствуют пучностям электрического поля.

При моделировании импульсно-периодического режима подвод энергии от магнетрона описывался разрывной функцией времени с помощью алгоритмической надстройки Events. Математически этот процесс выражается через коэффициент заполнения D и импульсную мощность источника P_{imp} :

$$P_{mean} = P_{imp} \times D = P_{imp} \times \frac{\tau}{T},$$

где τ и T принятые ранее длительность и период следования импульсов соответственно, определяющие коэффициент заполнения D , а средняя интегральная мощность P_{mean} — поддерживалась эквивалентной инверторному режиму — 90 Вт (при $P_{imp} = 200$ Вт и $D=0,45$).

На границах раздела сред «воздух – цементный композит» выполнялись условия непрерывности тангенциальных составляющих векторов электромагнитного поля:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0, \quad \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$$

Для наглядного представления волновых процессов ниже приведена пространственная картина распределения напряженности электрического поля и температурного градиента в плоскости симметрии бетонного куба.

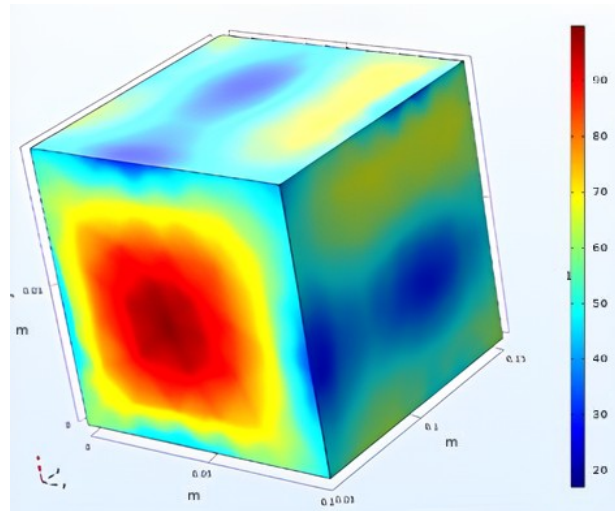


Рисунок 3 - Распределение напряженности электрического поля и температурного градиента в плоскости симметрии бетонного куба (импульсно-периодический нагрев)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7.3>

Импульсно-периодический подвод энергии мощностью 90 Вт без вращения образца формирует контрастные нестационарные «пятна нагрева» в зонах пучностей стоячих волн (см. рис. 3).

Численный эксперимент показал коренное различие в кинетике формирования внутренних термических полей при непрерывном и импульсно-периодическом подводе энергии.

При импульсно-периодическом режиме работы магнетрона образец неподвижно зафиксирован в центре камеры (см. рис. 1). Локальный нагрев бетона прямо пропорционален квадрату напряженности электрического поля:

$Q = \omega \times \epsilon_0 \times \epsilon'' \times |\mathbf{E}|^2$. В периоды максимальной импульсной нагрузки в зонах пучностей поля происходит резкое выделение энергии. Поскольку интенсивность генерирования тепловой энергии существенно превышает скорость её перераспределения за счет внутренней теплопроводности, в его объеме формируются контрастные «пятна нагрева» (см. рис. 3).

Перепад температур между центром наружной грани и краями образца становится критическим. Характер изменения температуры от облучаемой поверхности по глубине куба представлен на рисунке 4.

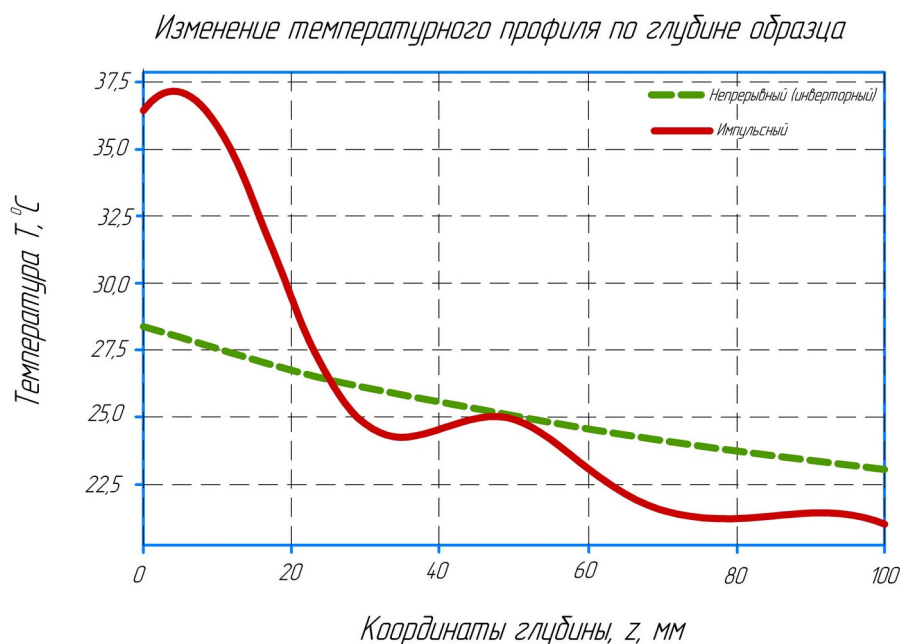


Рисунок 4 - Пространственные температурные профили по глубине цементного композита при различных режимах нагрева

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7.4>

Прерывистый подвод энергии формирует циклические знакопеременные термические напряжения. Локальное температурное расширение в «пятнах нагрева» ограничивается окружающими более холодными слоями бетона. Это вызывает напряжения сжатия в нагретой зоне и, как следствие, компенсирующие растягивающие термические напряжения в периферийных (холодных) зонах, которые могут превысить предел прочности раннего бетона на растяжение. Схожие физические эффекты и закономерности развития термических напряжений отмечаются исследователями и при конечно-элементном моделировании массивных железобетонных конструкций [14]. Наличие таких дефектов структуры в контактных зонах способно существенно снизить итоговые прочностные характеристики материала при его последующих механических испытаниях на осевое сжатие, закономерности деформирования при которых описаны в [12]. Напротив, инверторный (непрерывный) режим подводит энергию малой интенсивности непрерывно. Внутренние тепловые потоки успевают релаксировать параллельно процессу диссипации СВЧ-энергии. Это сглаживает локальные перепады, обеспечивает пространственную однородность температурного профиля и исключает возникновение опасных термических макронапряжений в структуре твердеющего композита.

Натурные исследования импульсно-периодического режимов нагрева проводились на серии из 5 идентичных образцов с использованием СВЧ-установки на базе печи Elenberg. Локальные температурные замеры поверхности бетона выполнялись после отключения магнетрона бесконтактным пирометром.

Результаты верификации пространственного распределения температур на поверхности бетонного куба по пяти опорным точкам приведены на рисунке 5.

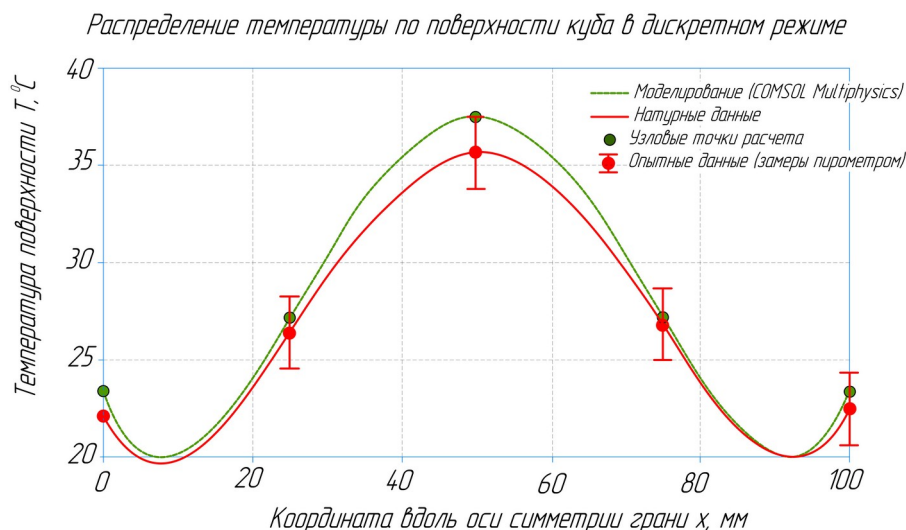


Рисунок 5 - Сравнение расчетного и экспериментального температурных профилей поверхности в импульсно-периодическом режиме СВЧ нагрева (90 Вт, 40 с.)
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.75.7.5>

Суммарная погрешность экспериментальных измерений поверхности с учетом случайной составляющей по ГОСТ Р8.736-2011 и точности пирометра не превысила $\pm 1,85^\circ\text{C}$. Максимальное локальное расхождение между моделью и средними показателями в центре составило $1,8^\circ\text{C}$, а статистический коэффициент детерминации $R^2=0,954$, что доказывает высокую адекватность модели.

Проведенный натурный эксперимент с принудительной блокировкой поворотного механизма полностью подтвердил адекватность разработанной математической модели (см. рис. 5). Статическое позиционирование образца позволило экспериментально зафиксировать расчетные координаты пучностей стоячих волн («пятна нагрева»). При этом сопоставление данных выявило важную физико-химическую особенность процесса, которая не учитывалась в чисто тепловой модели: интенсивный локальный нагрев в пучностях волн вызывает ускоренную миграцию и испарение влаги, приводя к локальному пересушиванию структуры цементного композита. Это указывает на необходимость сопряжения уравнений электродинамики не только с теплопроводностью, но и уравнениями влагопереноса при последующем совершенствовании численных моделей. В связи с этим, дальнейшим развитием представленного исследования станет разработка комплексной мультифизической модели СВЧ-нагрева, учитывающей динамическое изменение диэлектрических параметров бетона как функцию от локальной температуры и относительной влажности. Это позволит учесть фазовые переходы влаги в порах цементного камня и повысить точность прогнозирования температурных полей при переходе от начального разогрева к полному технологическому циклу СВЧ-обработки. Проведенное сопоставление экспериментальных данных и имитационного моделирования доказывает, что для обеспечения гарантированной пространственной однородности температурного профиля при импульсном режиме СВЧ-нагрева необходимо обязательное техническое внедрение вращения образцов или СВЧ-потока, характерного для классической микроволновой обработки.

Практическая значимость: результаты работы закладывают научно-техническую базу для проектирования мобильных лабораторных СВЧ-комплексов оперативного контроля прочности бетона. Разработанный подход позволяет с высокой точностью рассчитывать параметры стартового теплового импульса на начальном этапе твердения.

Научная новизна заключается в том, что методом конечных элементов впервые исследована сравнительная кинетика формирования пространственных температурных полей в бетоне при непрерывном и импульсно-периодическом СВЧ-нагреве. Выявлено, что импульсно-периодический подвод энергии без вращения образца формирует в зонах пучностей волн контрастные «пятна нагрева» и локальные термические напряжения. Доказано, что непрерывное инверторное управление мощностью 90 Вт обеспечивает практически равномерное распределение тепла по всему объему бетона за 40 секунд воздействия.

Заключение

1. На основе компьютерного моделирования в программе COMSOL Multiphysics построена трехмерная модель СВЧ-нагрева бетонного образца кубической формы размером $100 \times 100 \times 100$ мм на частоте 2,45 ГГц.

2. Численный расчет показал, что в данных геометрических условиях характер поглощения СВЧ-энергии бетонным композитом имеет выраженный резонансный характер с локализацией пиков тепловых потерь в центре наружных граней. За 40 секунд инверторного (непрерывного) воздействия мощностью 90 Вт достигается равномерное распределение теплоты по объему, обеспечивая плавный прогрев центра куба до $25,6^\circ\text{C}$ и поверхности до $28,3^\circ\text{C}$, что свидетельствует об отсутствии опасных деструктивных температурных градиентов.

3. Проведено сравнительное исследование режимов работы магнетрона: непрерывный инверторный режим обеспечивает плавную релаксацию внутренних тепловых потоков без опасных перепадов температур. Напротив, импульсно-периодический режим без вращения образца формирует контрастные «пятна нагрева» в зонах пучностей волн, что создает пульсирующие локальные перепады температур и циклические термические напряжения.



4. Намеренное исключение вращения в ходе численного и натурного эксперимента позволило доказать, что статичное положение материала при импульсно-периодическом режиме СВЧ-нагрева критически опасно из-за возникновения термических напряжений. На основе полученных данных сделан вывод о практическом применении исследованных режимов: в реальных технологических процессах при использовании импульсных магнетронов длительный нагрев неподвижной среды недопустим и требует обязательного внедрения механизмов вращения образцов или СВЧ-потока. В то же время применение инверторного управления позволяет значительно расширить временной интервал безопасного статического нагрева и добиться относительной равномерности распределения тепла на начальном технологическом этапе (разогреве).

5. Сопоставление данных моделирования и натурного эксперимента показало их высокую сходимость (до 95%). Высокая точность расчетной модели подтверждается полученным статистическим коэффициентом детерминации $R^2=0,954$. Это создает надежную теоретическую и практическую базу для проектирования лабораторных СВЧ-установок ускоренного контроля прочности бетона.

6. Намечено направление дальнейших теоретических и экспериментальных изысканий, связанных с переходом от бытовой электромагнитно-тепловой задачи к связанной модели тепло- и влагопереноса. Планируется исследовать нелинейную кинетику диэлектрических свойств цементных композитов в процессе их обезвоживания под действием микроволнового излучения, что позволит оптимизировать инверторное управление для сложнопрофильных строительных конструкций.

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. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. — Москва : АСВ, 2011. — 524 с.
2. 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.
3. Селяев В.П. Прогнозирование долговечности цементных композитов с учетом температурных воздействий / В.П. Селяев, В.Н. Куприянов // Региональная архитектура и градостроительство. — 2019. — № 2. — С. 84–91.
4. Ревенко Б.С. Термические напряжения при высокочастотной обработке строительных материалов / Б.С. Ревенко, В.А. Грушко. — Киев : Будивельник, 1988. — 142 с.
5. 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.
6. Wei W. Theoretical investigation of electromagnetic-thermal coupling of double-layer cylindrical concrete under microwave irradiation / W. Wei, R. Qiao, Y.S. Jiang // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. — 2024. — Vol. 10, № 1. — P. Art. 72. — DOI: 10.1007/s40948-024-00780-y.
7. 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.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков. — Москва : Высшая школа, 1967. — 600 с.
9. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. — Москва : Высшая школа, 1982. — 327 с.
10. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. — Москва : Стройиздат, 1996. — 416 с.
11. 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.
12. 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.
13. Zheng Y. Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: An experimental and numerical study / Y. Zheng, Z. He, H. Fu // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 470. — P. Art. 140667. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061825008153> (accessed: 07.08.26).
14. Несветаев Г.В. К вопросу моделирования температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных плит / Г.В. Несветаев, Ю.И. Корянова, А.С. Чепурненко и др. // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 6. — URL: <https://ivdon.ru/en/magazine/archive/n6y2022/7691> (дата обращения: 07.08.26).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology] / Yu.M. Bazhenov. — Moscow : ASV, 2011. — 524 p. [in Russian]



2. Nefedov V.N. Mikrovolnovii metod obrabotki betona [Microwave concrete curing] / 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]
3. Selyaev V.P. Prognozirovaniye dolgovechnosti cementny'x kompozitov s uchetom temperaturny'x vozdeystviy [Predicting the durability of cement composites considering temperature effects] / V.P. Selyaev, V.N. Kupriyanov // Regional Architecture and Urban Planning. — 2019. — № 2. — P. 84–91. [in Russian]
4. Revenko B.S. Termicheskie napryazheniya pri vysokochastotnoi obrabotke stroitelnykh materialov [Thermal stresses during high-frequency processing of building materials] / B.S. Revenko, V.A. Grushko. — Kiev : Budivelnik, 1988. — 142 p. [in Russian]
5. Gorlenko N.P. Vliyanie e'lektromagnitny'x poley na processy' strukturoobrazovaniya v vyazhushhix sistemax [Influence of electromagnetic fields on the processes of structure formation in binder systems] / N.P. Gorlenko, Yu.S. Sarkisov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2020. — № 4. — P. 22–29. [in Russian]
6. Wei W. Theoretical investigation of electromagnetic-thermal coupling of double-layer cylindrical concrete under microwave irradiation / W. Wei, R. Qiao, Y.S. Jiang // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. — 2024. — Vol. 10, № 1. — P. Art. 72. — DOI: 10.1007/s40948-024-00780-y.
7. Ery'shev V.A. Chislennoe modelirovaniye nestacionarny'x temperaturny'x poley v betonny'x e'lementax metodom konechny'x e'lementov pri lokal'ny'x teplovy'x vozdeystviyax [Numerical simulation of transient temperature fields in concrete elements by the finite element method under local thermal effects] / V.A. Ery'shev, D.S. Toshin, E.V. Laty'sheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2022. — № 6(762). — P. 34–42. [in Russian]
8. Likov A.V. Teoriya teploprovodnosti. [Thermal Conduction Theory] / A.V. Likov. — Moscow : Visshaya shkola, 1967. — 600 p. [in Russian]
9. Belyaev N.M. Metodi teorii teploprovodnosti [Methods in Heat Conduction] / N.M. Belyaev, A.A. Ryadno. — Moscow : Visshaya shkola, 1982. — 327 p. [in Russian]
10. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General Models in Mechanics of Reinforced Concrete] / N.I. Karpenko. — Moscow : Stroiizdat, 1996. — 416 p. [in Russian]
11. Abramov L.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye pri ispy'tanii na szhatie kubicheskix obrazczov anizotropnogo betona [Stress-strain state of anisotropic concrete cubic specimens under compression testing] / L.M. Abramov, A.V. Orexov, I.L. Abramov // Industrial and Civil Construction. — 2016. — № 1. — P. 58–61. [in Russian]
12. Abramov L.M. Analiz napryazhenno-deformirovannogo obrazcza pri ispy'tanii na szhatie [Analysis of the stress-strain state of a specimen under compression] / L.M. Abramov, A.V. Orexov, S.N. Maklakova // Industrial and Civil Construction. — 2015. — № 9. — P. 62–66. [in Russian]
13. Zheng Y. Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: An experimental and numerical study / Y. Zheng, Z. He, H. Fu // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 470. — P. Art. 140667. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061825008153> (accessed: 07.08.26).
14. Nesvetaev G.V. K voprosu modelirovaniya temperaturny'x napryazhenij pri betonirovanii massivny'x zhelezobetonnny'x plit [On the issue of modeling thermal stresses during concreting of massive reinforced concrete slabs] / G.V. Nesvetaev, Yu.I. Koryanova, A.S. Chepurnenko et al. // Engineering Journal of Don. — 2022. — № 6. — URL: <https://ivdon.ru/en/magazine/archive/n6y2022/7691> (accessed: 07.08.26). [in Russian]