

УДК 51-74, 004.942

**О НЕОБХОДИМОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ  
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

***Кузина Валентина Владимировна,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-вычислительные  
системы»*

***Громов Артем Сергеевич,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*студент.*

**Аннотация**

Статья посвящена решению задачи тепломассопереноса при автоклавной обработке математическими методами. Приводится обоснование актуальности темы научного исследования по моделированию процессов тепломассопереноса в автоклаве для оптимизации режимов термообработки с целью получения строительных материалов с определенной пористой структурой и прочностью. Формулируются задачи научного исследования и возможные пути решения поставленных задач.

**Ключевые слова:** автоклав, тепломассоперенос, строительные материалы с пористой структурой, математическое моделирование

**ON THE NEED FOR A MATHEMATICAL DESCRIPTION OF HEAT AND  
MASS TRANSFER DURING AUTOCLAVE PROCESSING**

***Kuzina Valentina Vladimirovna,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department, Department of Information and Computing Systems*

***Gromov Artem Sergeevich,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, student.*

## **Abstract**

The article is devoted to solving the problem of heat and mass transfer during autoclave processing using mathematical methods. This article presents the rationale for conducting scientific research on modeling heat and mass transfer processes in an autoclave to optimize heat treatment regimes for producing building materials with a specific porous structure and strength. The research objectives and possible solutions are formulated.

**Keywords:** autoclave, heat and mass transfer, building materials with a porous structure, mathematical modeling.

## **Введение**

Математическое моделирование является мощным инструментом исследования и оптимизации сложных технологических процессов в различных отраслях промышленности. Особую актуальность методы математического моделирования приобретают в строительной индустрии, где необходимость снижения материальных и энергетических затрат при одновременном повышении качества продукции требует глубокого понимания физико-химических процессов, протекающих на всех этапах производства.

Процессы тепломассопереноса, происходящие при термической обработке строительных материалов, характеризуются высокой степенью сложности и нелинейностью. Экспериментальное исследование таких процессов связано со значительными временными и финансовыми затратами, а также не всегда

позволяет выявить количественные закономерности влияния различных параметров на конечный результат. В этих условиях применение методов математического моделирования и вычислительного эксперимента становится не просто целесообразным, но и необходимым подходом для решения задач оптимизации технологических режимов.

Тепловая обработка строительных материалов, на которую приходится около 30% себестоимости и до 80% энергозатрат производства [1], представляет собой типичный объект для математического моделирования. Особый интерес с точки зрения моделирования представляет автоклавная обработка – процесс термовлажной обработки материалов при повышенных давлении и температуре. Данный процесс характеризуется сложным взаимодействием теплопереноса, массопереноса и химических реакций, что требует построения комплексной математической модели, учитывающей множество взаимосвязанных факторов.

Автоклав представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат периодического действия с теплоизолированным корпусом и системами пароснабжения и конденсатоотвода [1]. С позиции математического моделирования автоклав является объектом с распределенными параметрами, описание которого требует применения дифференциальных уравнений в частных производных. Построение адекватной математической модели тепломассопереноса в автоклаве, разработка эффективных численных методов её решения и создание на этой основе алгоритмов оптимизации режимов обработки составляет актуальную научную задачу, решение которой имеет важное практическое значение для строительной отрасли.

### **Актуальность исследования**

Значимость данной темы исследования определяется комплексом взаимосвязанных обстоятельств, оказывающих влияние на эволюцию современных технологических процессов в области производства строительной продукции.

Первостепенным фактором выступает непрерывное ужесточение стандартов, предъявляемых как к производственным технологиям строительных изделий, так и к возможности контроля характеристик материалов на микроскопическом уровне. Современная строительная практика выдвигает строгие критерии к теплофизическим параметрам, несущей способности, долговечности и экологической безопасности материалов. Обеспечение требуемого комплекса свойств невозможно без фундаментального понимания явлений, протекающих на стадии высокотемпературной обработки.

Вторым существенным обстоятельством является исчерпание потенциала классических эмпирических подходов, что обуславливает необходимость развития аналитического аппарата, в первую очередь, математического моделирования, а также применения вычислительных экспериментов для изучения характеристик строительной продукции и совершенствования производственных режимов. Эмпирический путь предполагает существенные временные и финансовые расходы, не обеспечивает стабильного воспроизведения результатов и не дает возможности быстрого реагирования на изменения в характеристиках исходного сырья или спецификации готовой продукции.

Ячеистые бетонные материалы (газобетонные и пенобетонные изделия) относятся к числу наиболее результативных решений для возведения стеновых конструкций вследствие их малой теплопроводности и оптимального баланса между прочностью и массой. Вместе с тем, их изготовление, особенно фаза автоклавирования, характеризуется исключительно высокой энергоемкостью, требуя значительных объемов тепловой энергии. Совершенствование температурных режимов обработки на базе математических моделей дает возможность существенного уменьшения энергопотребления при сохранении, а в ряде случаев и улучшении качественных показателей изделий.

Основные эксплуатационные параметры ячеистобетонных материалов, включая несущую способность, теплоизоляционные характеристики и

морозоустойчивость, находятся в прямой зависимости от их внутренней пористой организации – величины пор, характера их распределения и степени однородности. Применяемые в настоящее время технологические решения зачастую не обеспечивают возможности направленного формирования материала с заданной микроархитектурой вследствие многофакторности процессов и недостаточной изученности причинно-следственных связей между технологическими параметрами и конечной структурой материала.

### **Моделирование тепломассопереноса в автоклаве**

Процесс математического описания тепломассопереноса в автоклавных установках предполагает выполнение комплексных вычислений пространственного распределения температурных полей, барометрических показателей и потоков парожидкостной фазы в объеме рабочей камеры с целью совершенствования процедур высокотемпературной обработки строительной продукции. Данный подход обеспечивает возможность прогнозирования временных интервалов достижения заданных технологических параметров, исключения неоднородности температурного распределения и гарантирования результативности обработки наряду с высоким качеством конечной продукции.

Фундаментальные этапы моделирования охватывают построение математического описания процессов переноса теплоты и вещества, определение адекватного программного инструментария для численной реализации системы уравнений и осуществление экспериментальной верификации полученных решений. Формализация тепловых и диффузионных процессов, определение степени воздействия разнообразных факторов (гидродинамические явления, характеристики теплоносителя, пространственная конфигурация загрузки) на интенсивность тепло- и массообмена, а также выполнение вычислительных экспериментов в существенной степени упрощает процедуру определения оптимальных технологических параметров.

Формализация и предсказание процессов, реализующихся в физических, биологических, экономических, социальных и иных системах, базируются на математических конструкциях, фундаментом которых служат дифференциальные уравнения с частными производными. Нахождение решений дифференциальных уравнений обеспечивает возможность предвидения будущих состояний изучаемых явлений, что, следовательно, создает основу для принятия аргументированных управленческих решений. В соответствии со степенью сложности моделируемого явления и природой процесса в математических конструкциях применяются уравнения разнообразных классов. Для формального описания процессов транспорта, таких как теплопроводность и диффузионный перенос, широко востребованы подходы к решению уравнений параболической категории [2–6].

#### **Анализ существующих подходов к моделированию**

В настоящее время сформирован обширный спектр моделей процессов тепломассопереноса, построенных на базе систем дифференциальных уравнений с частными производными. В научной литературе представлены как упрощенные одномерные конструкции, предназначенные для оперативной оценки базовых параметров процесса, так и более комплексные двумерные и трехмерные модели, обеспечивающие учет неоднородности пространственного распределения температурных и влажностных полей в объеме обрабатываемого материала [5–10].

Тем не менее, анализ существующих методологий выявляет ряд существенных ограничений. Первым недостатком является неполнота описания физико-химических явлений. В большинстве случаев разработанные модели концентрируются исключительно на процессах теплопроводности либо диффузионного переноса, не принимая во внимание в достаточной мере их взаимообусловленность и связь с кинетическими характеристиками химических преобразований при гидратации и формировании новообразованных фаз. Подобный редуцированный подход не обеспечивает адекватного воспроизведения реальных процессов, развивающихся в автоклавной установке.

Вторым значительным ограничением выступает то обстоятельство, что преобладающая часть моделей, находящихся применение в промышленной практике, имеют стационарный либо квазистационарный характер, что исключает возможность корректного описания динамических процессов повышения и понижения температуры, играющих критическую роль в формировании внутренней организации строительной продукции. Нестационарная природа температурно-влажностных процессов оказывает ключевое влияние на образование пористой архитектуры и, как результат, на прочностные параметры конечного материала.

Третьим недочетом является тот факт, что имеющиеся модели, как правило, обеспечивают предсказание пространственного распределения температуры и влагосодержания, однако не формируют прямую количественную зависимость между характеристиками технологического режима, возникающей пористой организацией и итоговой механической прочностью изделия. Отсутствие такой функциональной связи в значительной мере ограничивает потенциал целенаправленного регулирования свойств конечной продукции.

Дополнительно следует отметить, что имеющиеся математические конструкции преимущественно применяются для анализа предварительно заданных технологических режимов, а не для автоматизированного определения оптимальных параметров термической обработки с использованием современного вычислительного аппарата оптимизации. Данное обстоятельство существенно лимитирует их практическую применимость в условиях действующего производства.

### **Постановка задач исследования**

На основе проведенного анализа актуальности темы и существующих подходов к моделированию тепломассопереноса в автоклаве формулируется ряд взаимосвязанных задач научного исследования. Приведем их.

1. Тщательный анализ требований, предъявляемых к строительным материалам с определенной пористой структурой и прочностью. Установка количественных критериев качества, определение допустимых диапазонов изменения параметров пористой структуры и установка их связи с эксплуатационными характеристиками материалов.

2. Разработка нестационарной математической модели тепломассопереноса в автоклаве, учитывающей взаимосвязь тепловых и массообменных процессов, кинетику химических реакций и изменение теплофизических свойств материала в процессе обработки. Модель должна описывать динамику изменения температурных и влажностных полей как в теплоносителе (паровоздушной среде), так и в обрабатываемом материале.

3. Разработка нового математического аппарата для установления количественной связи между параметрами режима термообработки (температура, давление, скорость их изменения, продолжительность изотермической выдержки), макропараметрами пористой структуры (средняя плотность, распределение пор по размерам, общая пористость) и макроскопической прочностью материала. Для решения этой задачи планируется применение методов регрессионного анализа и современных методов машинного обучения.

4. Создание специализированных вычислительных алгоритмов и компьютерных процедур, реализующих численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений модели. Алгоритмы должны обеспечивать приемлемую точность решения при разумных вычислительных затратах и обладать устойчивостью к возмущениям входных данных.

5. Постановка задачи оптимизации режимов термообработки с использованием современных методов оптимизации (например, генетических алгоритмов, методов роя частиц или других эволюционных алгоритмов). Целевыми функциями должны являться минимизация энергозатрат при одновременной максимизации прочности и достижении заданной пористости

материала. Задача оптимизации является многокритериальной, что требует применения соответствующих методов.

6. Создание унифицированного программного комплекса (цифрового двойника автоклавного процесса), включающего три блока: моделирования тепломассопереноса, анализа пористой структуры и оптимизации режимов обработки. Такой комплекс представляет собой новое слово в управлении технологическими процессами производства ячеистых бетонов и может стать основой для создания интеллектуальных систем управления производством.

### **Ожидаемые результаты и практическая значимость**

Выполнение поставленных задач способно привести к существенным практическим результатам, имеющим важное значение для строительной индустрии.

Во-первых, ожидается снижение себестоимости продукции за счет оптимизации и сокращения времени автоклавного цикла, а также снижения удельного расхода энергоресурсов (пара, электроэнергии). По предварительным оценкам, экономия энергоресурсов может составить от 15 до 25% в зависимости от типа производства и характеристик оборудования.

Во-вторых, целенаправленное управление пористой структурой и, как следствие, прочностными и теплотехническими характеристиками строительных материалов позволит повысить их качество и конкурентоспособность на рынке. Возможность получения материалов с заранее заданными свойствами открывает новые перспективы для создания специализированных продуктов под конкретные требования заказчиков.

В-третьих, использование компьютерного моделирования вместо длительных натуральных экспериментов приведет к сокращению времени на переналадку производства при переходе на выпуск новых марок бетона или при изменении свойств сырья. Это особенно важно в условиях динамично

меняющихся требований рынка и необходимости быстрой адаптации производства.

В-четвертых, внедрение элементов цифрового производства уменьшит зависимость от человеческого фактора при настройке оборудования, повысит стабильность качества продукции и снизит процент брака. Автоматизация процесса принятия решений на основе математических моделей обеспечит более высокую повторяемость результатов.

В-пятых, появится инструмент для виртуального проектирования составов и режимов обработки новых видов ячеистых бетонов с заранее заданными свойствами. Это откроет возможности для разработки инновационных материалов, ранее труднодостижимых опытным путем.

При разработке программного комплекса для проведения исследовательских работ следует учесть необходимость обучения персонала и, возможно, создать специальный функциональный блок для этих целей. Успешное внедрение разработанной системы требует не только технического совершенства программного обеспечения, но и подготовки квалифицированных специалистов, способных эффективно использовать его возможности.

### **Заключение**

Математическое моделирование тепломассопереноса в автоклаве представляет собой актуальную и перспективную область исследований, имеющую важное практическое значение для строительной индустрии. Разработка комплексной модели, учитывающей взаимосвязь тепловых, массообменных и химических процессов, позволит создавать экономичные технологические процессы для получения строительных материалов заданного качества при минимальных затратах энергии.

Предложенный подход к решению проблемы оптимизации автоклавной обработки строительных материалов основан на синтезе современных методов математического моделирования, численного анализа и оптимизации.

Комплексное решение поставленных задач позволит не только снизить энергозатраты и повысить качество продукции, но и создать научную основу для разработки новых, более совершенных технологий производства ячеистых бетонов.

Создание цифрового двойника автоклавного процесса открывает путь к интеллектуализации управления производством, что является приоритетным направлением развития современной промышленности. Внедрение разработанной системы будет способствовать переходу от традиционных эмпирических методов к научно обоснованному управлению технологическими процессами на основе математических моделей и компьютерного моделирования.

Дальнейшие исследования в данном направлении будут направлены на детальную проработку математических моделей, разработку эффективных численных алгоритмов, создание программного комплекса и его валидацию на основе экспериментальных данных. Успешная реализация проекта позволит внести существенный вклад в развитие технологии производства строительных материалов и повысить конкурентоспособность отечественной строительной индустрии.

### **Библиографический список:**

1. Конструктивный и теплотехнический расчет автоклава: метод. указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теплотехническое оборудование технологии строительных материалов» для студ. 4-ого курса напр. подг. 270800.62 «Строительство», профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» / Воронежский ГАСУ; сост.: В.В. Власов, А.И. Макеев, А.М. Усачев. – Воронеж, 2015. – 24 с.

2. Варенцов, В.К. Использование математического моделирования при создании композитов на основе углеродных волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев // В сборнике: Информационно-

вычислительные технологии и их приложения. сборник статей XXIV Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2020. – С. 28-30.

3. Кузина, В.В. Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах / В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3 (60). – С. 142-147.

4. Koshev, A.N. Mathematical models in tasks of construction / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // IOP: World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016. "Procedia Engineering" 2016. P. 1874-1878.

5. Лыков, А.В. Теория тепло- и массообмена / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1969. – 362 с.

6. Будаков, Б.М. Сборник задач по математической физике / Б.М. Будаков, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. – 4-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 688 с. – ISBN 5-9221-0311-3.

7. Ольшанский, А.И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А.И. Ольшанский, А.Н. Голубев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – Т. 66. – № 5. – 2023. – С. 461-477.

8. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса: постановка задач и методы решения дифференциальных уравнений параболического типа : учебное пособие / Е.А. Елфимова, А.Б. Добросердова, А.Ю. Соловьева [и др.]; под общей редакцией Е. А. Елфимовой. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2025. – 160 с.

9. Кузина, В.В. Вычислительная математика: учеб. пособие по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии» / В.В. Кузина, А.Н. Кошев. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 172 с.

10. Кузина, В.В. Численные методы и методы оптимизации: учеб. пособие по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии» / В.В. Кузина, А.Н. Кошев. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 60 с.