

Научная статья
УДК 681.5
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-28-38>
EDN BEKFCD

Математическое описание процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона как объекта с распределенными параметрами

Константин Станиславович Галицков[✉], Андрей Сергеевич Болховецкий

*Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия, maes@samgtu.ru[✉]*

Аннотация. Выполнено математическое описание процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона как нестационарного объекта управления в условиях распределенности параметров в форме системы дифференциальных уравнений в частных производных. В уравнениях учитывается тепло- и массоперенос как в среде автоклава, так и в массивах ячеистого бетона, а также процесс диффузии пара через пограничный слой и внутреннее тепловыделение при синтезе гидросиликатов в структуре автоклавируемого сырья в форме тоберморита. Полученная система уравнений связывается граничными условиями в соответствии с предложенной в работе схемой. На основании полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных, а также с учетом разработанной схемы граничных условий составлена расчетная схема автоклава и соответствующая ей вычислительная модель в программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation. Проведены численные эксперименты по оценке динамики температуры в центре и на поверхности массивов, а также в среде автоклава. Сравнение результатов численного моделирования с известными данными натурных экспериментов путем определения среднеквадратичного отклонения значений температуры в центре и на поверхности массивов ячеистого бетона подтвердили адекватность разработанной модели в условиях принятых допущений. Данные, полученные в результате численного моделирования, могут быть использованы при синтезе системы автоматического управления процессом автоклавной обработки с целью определения градиента температур в объеме автоклавируемого ячеистого бетона, что, в свою очередь, позволит оптимизировать производственные процессы и повысить качество конечной продукции в условиях минимизации энергозатрат на ее производство.

Ключевые слова: математическое моделирование, численное моделирование, ячеистый бетон, тоберморит, внутреннее тепловыделение, распределенные параметры

Для цитирования: Галицков К. С., Болховецкий А. С. Математическое описание процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона как объекта с распределенными параметрами // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 1. С. 28–38. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-28-38>. EDN BEKFCD.

Original article

Mathematical description of aerated concrete products autoclave processing process as an object with distributed parameters

Konstantin S. Galitskov[✉], Andrey S. Bolkhovetsky

*Samara State Technical University,
Samara, Russia, maes@samgtu.ru[✉]*

Abstract. A mathematical description of the autoclave treatment process for cellular concrete products has been developed as a non-stationary control object under conditions of parameter distribution in the form of a system of partial differential equations. The equations take into account heat and mass transfer both in the autoclave medium and in the cellular concrete masses, as well as the process of steam diffusion through the boundary layer and internal heat release during the synthesis of hydro-silicates in the structure of the autoclaved raw material in the form of tobermorite. The

resulting system of equations is linked with boundary conditions according to the scheme proposed in the work. Based on the obtained system of partial differential equations, and considering the developed scheme of boundary conditions, a calculation scheme for the autoclave and its corresponding computational model in the SOLIDWORKS Flow Simulation software environment have been created. Numerical experiments were conducted to assess the temperature dynamics at the center and surface of the masses, as well as in the autoclave medium. A comparison of the results of numerical modeling with known data from field experiments by determining the root mean square deviation of temperature values at the center and surface of cellular concrete masses confirmed the adequacy of the developed model under the accepted assumptions. The data obtained from numerical modeling can be used in the synthesis of automated control systems with the autoclave treatment process to determine the temperature gradient in the volume of autoclaved cellular concrete, which, in turn, will optimize production processes and improve the quality of the final product while minimizing energy consumption for its production.

Keywords: mathematical modeling, numerical modeling, aerated concrete, tobermorite, internal heat dissipation, distributed parameters

For citation: Galitskov K. S., Bolkhovetsky A. S. Mathematical description of aerated concrete products autoclave processing process as an object with distributed parameters. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics. 2025;1:28-38.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-28-38>. EDN BEKFCO.

Введение

Основным показателем качества ячеистого бетона является величина его прочности R_m . Известно, что на начальном этапе производства прочность обуславливается гидратацией цемента в составе ячеисто-бетонного сырца, однако, в отличие от пенобетона, ее конечная величина формируется за счет синтеза гидросиликатов кальция в структуре ячеистого бетона [1] в форме тоберморита и ксонолита [2]. Анализ представленных в [2, 3] исследований показывает, что преобладающей фазой в структуре автоклавного бетона, характеризующей его конечную прочность, является тоберморит, для формирования которого необходимо создать в среде автоклава определенные температурно-влажностные условия.

При построении алгоритмов управления данным энергоемким технологическим процессом на современных предприятиях по производству автоклавных ячеистых бетонов не учитывается динамика формирования гидросиликатов в форме тоберморита, продолжительность автоклавной обработки не зависит от свойств исходного сырья и рецептуры автоклавированных массивов, а прочность готовых изделий определяется путем проведения лабораторных испытаний после завершения всех технологических операций. В результате наблюдается значительный разброс величины прочности готовых изделий в пределах одной марки по плотности [4]. Такого рода нестационарность также приводит к увеличению энергозатрат на изготовление данного вида строительных материалов, т. к. процесс выдержки изделий в автоклаве может продолжаться после достижения ими требуемой прочности. Данная проблема может быть решена путем оснащения автоклавного участка системой автоматического управления (САУ), учитывающей физико-химические

процессы, протекающие в массивах сырца ячеистого бетона в процессе твердения, в том числе повышение прочности автоклавированных изделий в ходе экзотермического синтеза тоберморита. Для создания такой САУ в первую очередь требуется разработка математического описания технологического процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона как нестационарного объекта управления в условиях распределенности параметров, чему и посвящена настоящая работа.

Определение объекта управления

Технологический процесс автоклавной обработки представляет собой совокупность нескольких последовательных этапов, при которых в среде автоклава и объеме ячеистого бетона создаются необходимые условия для формирования конечной прочности ячеисто-бетонных изделий [5]. В рамках данного научного исследования рассматриваются этапы подъема давления и выдержки изделий в автоклаве [6], при которых в условиях достижения массивами ячеисто-бетонного сырца температуры не ниже ~ 165 °C в его структуре синтезируется тоберморитовая фаза, что сопровождается внутренним тепловыделением и придает ячеистому бетону, произведенному по автоклавной технологии, дополнительную, по сравнению с безавтоклавной технологией, прочность.

Таким образом, под объектом управления понимается совокупность тепло- и массообменных процессов, а также диффузия пара и внутреннее тепловыделение при синтезе гидросиликатов в форме тоберморита в ячеистом бетоне на этапах подъема давления и выдержки изделий в автоклаве.

Обобщенная структура процесса автоклавной обработки как объекта управления может быть представлена в виде обобщенной структуры (рис. 1).

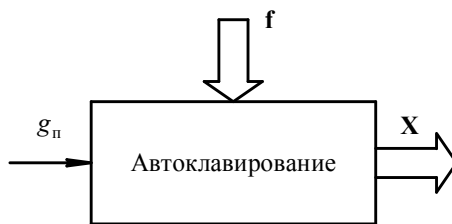


Рис. 1. Обобщенная структура процесса автоклавной обработки: $g_{\text{п}}$ – расход пара, подаваемого в автоклав; \mathbf{X} – вектор выходных координат; \mathbf{f} – вектор возмущающих воздействий

Fig. 1. Generalized structure of the autoclave treatment process: g_{c} – steam consumption supplied to the autoclave; \mathbf{X} is the vector of output coordinates; \mathbf{f} is the disturbance vector

На входе объекта формируется управляющее воздействие – расход $g_{\text{п}}$ пара, подаваемого в автоклав, с характерными для каждого из рассматриваемых этапов автоклавной обработки параметрами температуры $T_{\text{п}}$ и давления $P_{\text{п}}$. Состояние объекта характеризуется вектором выходных координат $\mathbf{X} = [T_{\text{м}}(x, y, z, t), T_{\text{авт}}, P_{\text{авт}}, T_{\text{ст}}, R_{\text{м}}]$, где $T_{\text{м}}(x, y, z, t)$ – распределение температуры в объеме массива, $T_{\text{авт}}, P_{\text{авт}}$ – температура и давление пара в автоклаве соответственно; $T_{\text{ст}}$ – температура стальной стенки автоклава, $R_{\text{м}}$ – прочность ячеистого бетона. Возмущающее воздействие на объект управления – вектор $\mathbf{f} = [Q_{\text{тб}}, T_{\text{о.с}}]$, включающий внутреннее тепловыделение $Q_{\text{тб}}$ при образовании гидросиликатов кальция в форме тоберморита и температуру $T_{\text{о.с}}$ окружающей среды, определяющей тепловые потери через ограждающие конструкции автоклава.

Допущения

Считаем, что химико-минералогический состав всех запариваемых массивов сырца является одинаковым и постоянным для заданной марки бетона по плотности, что соответствует использованию исходных компонентов из соответствующих неизменяемых месторождений.

Принимаем, что ячеистая структура массивов является равномерной и однородной (в том числе благодаря применению вибровспучивания на этапе

заливки ячеисто-бетонной смеси в форму).

Допускаем, что, учитывая существующую инерционность процесса и необходимость обеспечения технологически верного выполнения подготовительных этапов продувки и вакуумирования, температура массивов и автоклава равны, т. е. $T_{\text{м}} = T_{\text{авт}}$.

Считаем, что в процессе автоклавной обработки при достижении массивами ячеистого бетона температуры 165 °С в их объеме начинается процесс внутреннего тепловыделения, обусловленный химической реакцией формирования гидросиликатов кальция только в форме тоберморита.

Принимаем, что температура среды, окружающей автоклав, постоянна и соответствует среднему значению (~5,7 °С) для Самарской области.

Допускаем, что удаление конденсата происходит мгновенно, а тепловые потери и изменение параметров среды в автоклаве при этом незначительны.

Принимаем, что в объеме массива сырца швы после технологической операции струнной резки отсутствуют, а параметры стальных элементов внутренних конструкций учитываются при задании толщины стальной стенки автоклава.

Расчетная схема процесса

При решении поставленной задачи воспользуемся упрощенной расчетной схемой автоклава при производстве ячеисто-бетонных изделий (рис. 2).

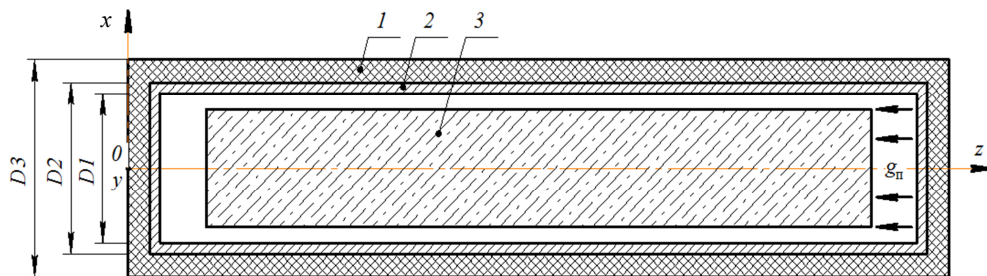


Рис. 2. Расчетная схема процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона: 1 – теплоизоляция; 2 – стальная стенка; 3 – ячеистый бетон;

$D1$ – внутренний диаметр стальной стенки; $D2$ – внешний диаметр стальной стенки и внутренний диаметр теплоизоляции; $D3$ – внешний диаметр теплоизоляции; $g_{\text{п}}$ – расход пара; x, y, z – пространственные координаты

Fig. 2. Calculation scheme of the autoclave treatment of cellular concrete products: 1 – thermal insulation; 2 – steel wall; 3 – cellular concrete; $D1$ – internal diameter of steel wall; $D2$ – external diameter of steel wall and internal diameter of thermal insulation; $D3$ – external diameter of thermal insulation; $g_{\text{п}}$ – steam flow; x, y, z – spatial coordinates

Здесь автоклав может быть представлен в виде двухслойного цилиндра, состоящего из слоя теплоизоляции 1 и стального корпуса 2, внутри которого располагается массив 3 сырца ячеистого бетона. В пространстве между массивом и стальным корпусом через одну из стенок корпуса подается пар с расходом g_n по заданной программной траектории. При достижении массивом температуры 165 °С в объеме автоклавируемого изделия начинается процесс внутреннего тепловыделения, обусловленного экзотермической реакцией синтеза гидросиликатов в форме тоберморита.

Математическое описание

Математическое описание процесса автоклавной обработки как нестационарного объекта управления в условиях распределенности параметров включает

в себя тепло- массообменные процессы во внутренней среде автоклава (динамика текучей среды – пара), тепло- и массообмен в твердом теле (массивы ячеистого бетона, стальной корпус, теплоизоляция), которые связываются краевыми (граничными и начальными) условиями. Динамика паровой среды может быть описана следующей системой уравнений, которая включает уравнения движения газа (пара) по трем координатам (уравнение Навье – Стокса для декартовых координат); законы сохранения массы (уравнение неразрывности) и энергии в условиях ее диссипации; уравнение термодинамического состояния пара; уравнения, связывающие коэффициент вязкости пара и его температуру, а также давление и концентрацию пара; дифференциальное уравнение теплопроводности [7]:

$$\left. \begin{aligned} \rho^n \cdot \frac{Dv_x^n}{D\tau} &= X - \frac{\partial P^n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_x^n}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_x^n}{\partial y} + \frac{\partial v_y^n}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_x^n}{\partial z} + \frac{\partial v_z^n}{\partial x} \right) \right] \\ \rho^n \cdot \frac{Dv_y^n}{D\tau} &= Y - \frac{\partial P^n}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_y^n}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_y^n}{\partial z} + \frac{\partial v_z^n}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_y^n}{\partial x} + \frac{\partial v_x^n}{\partial y} \right) \right] \\ \rho^n \cdot \frac{Dv_z^n}{D\tau} &= Z - \frac{\partial P^n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_z^n}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_z^n}{\partial x} + \frac{\partial v_x^n}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu^n \left(2 \frac{\partial v_z^n}{\partial y} + \frac{\partial v_y^n}{\partial z} \right) \right] \\ &\frac{\partial \rho^n}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho^n \cdot v_x^n)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho^n \cdot v_y^n)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho^n \cdot v_z^n)}{\partial z} = 0 \\ \rho^n \cdot c_p^n \frac{DT^n}{D\tau} &= \frac{DP^n}{D\tau} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^n \frac{\partial T^n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda^n \frac{\partial T^n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^n \frac{\partial T^n}{\partial z} \right) \right] + \mu^n \cdot \Phi \\ &P^n - \rho^n \cdot R \cdot T^n = 0 \\ &\mu^n = \mu_0^n \cdot (T^n) \\ &P^n = C_b^n \cdot k \cdot T^n \\ &\frac{\partial C_b^n(P^n)}{\partial \tau} = D_n \left(\frac{\partial^2 C_b^n(P^n)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_b^n(P^n)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_b^n(P^n)}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ρ^n , v^n , P^n , T^n , λ^n , c_p^n , μ^n – давление, скорость, плотность, температура, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость (при постоянном давлении) и коэффициент вязкости пара соответственно; $\operatorname{div} v$ – дивергент скорости; v – скорость движения текучей среды (пара); x , y , z – пространственные координаты; τ – время; X , Y , Z – проекции

массовой силы пара, отнесенной к единице объема; k – коэффициент фильтрации [8]; $\frac{DT^n}{D\tau}$, $\frac{DP^n}{D\tau}$, $\frac{Dv^n}{D\tau}$ – субстанциональные производные температуры, давления и скорости соответственно; Φ – диссипативная функция рассеивания,

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial v_x^n}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y^n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z^n}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y^n}{\partial x} + \frac{\partial v_x^n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z^n}{\partial y} + \frac{\partial v_y^n}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x^n}{\partial z} + \frac{\partial v_z^n}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x^n}{\partial x} + \frac{\partial v_y^n}{\partial y} + \frac{\partial v_z^n}{\partial z} \right)^2, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная; C_b^n – концентрация воды в паре; D_n – коэффициент диффузии воды в среде автоклава.

Тепло- и массообмен (молекулярная диффузия)

в массивах ячеистого бетона, а также теплообмен в стальном корпусе и слое теплоизоляции, согласно [9], могут быть представлены следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_M(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{c_p^M \cdot \rho_M} \left[\lambda_M \left(\frac{\partial^2 T_M(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_M(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_M(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + Q_{ТВ}(T_M) \right] \\ \frac{\partial C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= D_M \left(\frac{\partial^2 C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial T_{CT}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_{CT}}{c_p^{CT} \cdot \rho_{CT}} \left(\frac{\partial^2 T_{CT}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{CT}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{CT}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_T}{c_p^T \cdot \rho_T} \left(\frac{\partial^2 T_T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$D_M = \frac{1,863 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T_M^n}{273} \right)^{1,81} \int_{r_{Kn}}^r f_v(r) dr}{T_M^n \left(1 - \frac{p_1}{P_0} \right) d_1}$$

где $T_M, T_{CT}, T_T, c_p^M, c_p^{CT}, c_p^T, \rho_M, \rho_{CT}, \rho_T, \lambda_M, \lambda_{CT}, \lambda_T$ – температура, удельный коэффициент теплоемкости, плотность и коэффициент теплопроводности ячеисто-бетонных массивов, стальной стенки и слоя теплоизоляции автоклава соответственно; C_B^M – концентрация воды в массивах ячеистого бетона; P_M^n, T_M^n – давление и температура пара в порах массивов ячеистого бетона, принимаем $T_M^n = T_M$ массива при соответствующем давлении P_M^n ; $Q_{ТВ}(T_M)$ – удельная объемная тепловая мощность внутреннего тепловыделения при образовании гидросиликатов в форме тобер-

морита в объеме массивов сырца ячеистого бетона в функции температуры массивов; D_M – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в массиве ячеистого бетона; r_{Kn} – максимальный радиус капилляра, где возможно кнудсеновское течение; r – радиус капилляров ячеистого бетона ($r = 0,8-1,5$ мм для бетона марки D400); p_1 и P_0 – давление водяного пара и общее парогазовой смеси соответственно; d_1 – коэффициент извилистости пор.

Разработанные системы уравнений (1)–(3) могут быть связаны краевыми условиями в соответствии со схемой граничных условий (рис. 3).

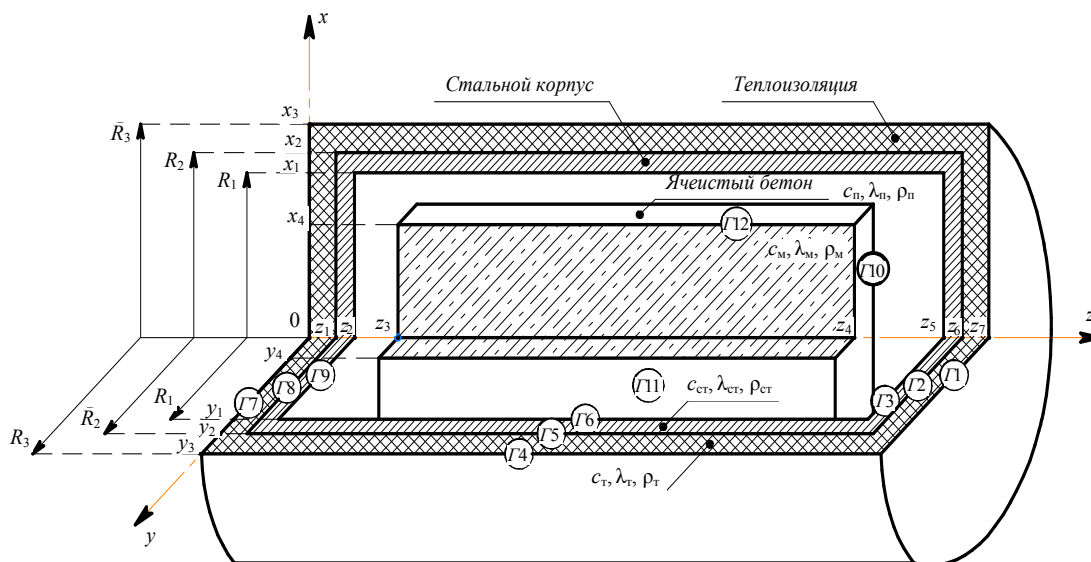


Рис. 3. Схема граничных условий: $\Gamma 1-\Gamma 12$ – граничные условия; R_1-R_3 – радиусы границ раздела сред; $x_1-x_4, y_1-y_4, z_1-z_7$ – координаты граничных условий; $c_{п}, c_{ст}, c_{т}, \rho_{п}, \rho_{ст}, \rho_{т}, \lambda_{п}, \lambda_{ст}, \lambda_{т}$ – удельный коэффициент теплоемкости, плотность и коэффициент теплопроводности пара, ячеисто-бетонных массивов, стальной стенки и теплоизоляции автоклава соответственно

Fig. 3. Scheme of boundary conditions: $\Gamma 1-\Gamma 12$ – boundary conditions; R_1-R_3 – radii of the interfaces between materials; $x_1-x_4, y_1-y_4, z_1-z_7$ – coordinates of boundary conditions; $c_{п}, c_{ст}, c_{т}, \rho_{п}, \rho_{ст}, \rho_{т}, \lambda_{п}, \lambda_{ст}, \lambda_{т}$ – specific heat capacity, density and thermal conductivity of steam, cellular concrete massifs, steel wall and thermal insulation of the autoclave, respectively

При определении начальных условий рассматривается начальный момент технологического этапа

на подъема давления в автоклаве. Тогда в качестве начальных условий принимается:

$$\left. \begin{aligned}
 & \vartheta_x^n(x, 0) = 0, x \in [-R_1; R_1] \\
 & \vartheta_y^n(y, 0) = 0, y \in [-R_1; R_1] \\
 & \vartheta_z^n(z, 0) = 0, z \in [z_2; z_5] \\
 & T^n(x, y, z, 0) = T_B^k \text{ при } (x, y, z) \in V_{\text{ст}}^{\text{BH}} \setminus V_M, \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ст}}^{\text{BH}} : \{x^2 + y^2 \leq R_1^2, z \in [z_2; z_5]\} \\ V_M : \{x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4]\} \end{array} \right. \\
 & \rho^n(x, y, z, 0) = \rho_0 \text{ при } (x, y, z) \in V_{\text{ст}}^{\text{BH}} \setminus V_M, \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ст}}^{\text{BH}} : \{x^2 + y^2 \leq R_1^2, z \in [z_2; z_5]\} \\ V_M : \{x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4]\} \end{array} \right. \\
 & P^n(x, y, z, 0) = P_0^n \text{ при } (x, y, z) \in V_{\text{ст}}^{\text{BH}} \setminus V_M, \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ст}}^{\text{BH}} : \{x^2 + y^2 \leq R_1^2, z \in [z_2; z_5]\} \\ V_M : \{x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4]\} \end{array} \right\}, \quad (4) \\
 & T_M(x, y, z, 0) = T_0, x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4] \\
 & \rho_M^n(x, y, z, 0) = \rho_0, x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4] \\
 & P_M^n(x, y, z, 0) = P_0^n, x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4] \\
 & T_{\text{ст}}(x, y, z, 0) = T_0, R_1^2 \leq x^2 + y^2 \leq R_2^2, z \in [z_2; z_5]; 0 \leq x^2 + y^2 \leq R_2^2, z \in [z_1; z_2], [z_5; z_6] \\
 & T_T(x, y, z, 0) = T_{\text{oc}}, R_2^2 \leq x^2 + y^2 \leq R_3^2, z \in [z_1; z_6]; 0 \leq x^2 + y^2 \leq R_3^2, z \in [0; z_1], [z_6; z_7] \\
 & C_B^M(x, y, z, 0) = C_0^M, x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4] \\
 & C_B^n(x, y, z, 0) = C_0^n \text{ при } (x, y, z) \in V_{\text{ст}}^{\text{BH}} \setminus V_M, \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{ст}}^{\text{BH}} : \{x^2 + y^2 \leq R_1^2, z \in [z_2; z_5]\} \\ V_M : \{x \in [-x_4; x_4], y \in [-y_4; y_4], z \in [z_3; z_4]\} \end{array} \right.
 \end{aligned} \right\}$$

где знак «\» – исключение из объема, указанного до знака, объема, указанного после знака; 1–3-е уравнения – линейная скорость движения пара по соответствующим координатам; 4-е уравнение – температура пара $T_B^k = 35^\circ\text{C}$ в автоклаве к концу этапа вакуумирования, когда давление внутри автоклава составляет $P_B^k = 56$ кПа; уравнение 5 формирует соответствие плотности пара ρ^n начальной плотности ρ_0 при нормальных условиях; 6–7-е уравнения показывают соответствие температур материала T_M и стальных элементов внутренней конструкции автоклава $T_{\text{ст}}$ начальной температуре T_0 , достигаемой на промежуточном этапе подогрева ячеистого бетона в камере предварительной выдержки с квазистационарным температурным режимом, включая продувку в автоклаве, допуская, что за время вакуумирования температура поверхности массивов ячеистого бетона и стальных элементов внутренней конструкции автоклава не изменяется; 8-е уравнение – температура теплоизоляции автоклава T_T равна температуре окружаю-

щей среды T_{oc} ; 9 и 10-е уравнения – концентрация воды в массиве ячеистого бетона и в паровой среде автоклава, равные C_0^M и C_0^n соответственно, которые определяются применяемой рецептурой и параметрами внешних условий в процессе предварительной выдержки.

Для определения граничных условий теплообмена между паром и твердыми телами (как стальной стенкой автоклава, так и массивами ячеистого бетона) лучистый теплообмен может быть описан уравнением Стефана – Больцмана для абсолютно черного тела (граничные условия Г3, Г9–Г12, см. рис. 3). Кроме того, массообменные процессы на границе раздела сред между массивом ячеистого бетона и паром, в соответствии с теорией диффузии [10], могут быть описаны, применительно к рассматриваемой задаче, граничными условиями III-го рода (Г10–Г12). Таким образом, с учетом принятых допущений, система уравнений для граничных условий процесса автоклавной обработки примет вид

$$\left. \begin{aligned}
 &(\Gamma 1) \quad \lambda_{cr} \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \alpha(T_{oc}(\tau) - T_T(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 \leq R_3^2, \quad z = z_7 \\
 &(\Gamma 2) \quad \lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial z}, \quad x^2 + y^2 \leq R_2^2, \quad z = z_6 \\
 &(\Gamma 3) \quad \lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \alpha_2(T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)) + \frac{\sigma \varepsilon_{II} \varepsilon_{cr} (T_{II}^4(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}^4(x, y, z, \tau))}{T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)} \\
 &\quad \quad \quad x^2 + y^2 \leq R_1^2, \quad z = z_5 \\
 &(\Gamma 4) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_1(T_{oc}(\tau) - T_T(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 = R_3^2, \quad z \in [0; z_7] \\
 &\lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial y} = \alpha_1(T_{oc}(\tau) - T_T(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 = R_3^2, \quad z \in [0; z_7]
 \end{aligned} \right. \\
 &(\Gamma 5) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial x}, \quad x^2 + y^2 = R_2^2, \quad z \in [z_1; z_6] \\
 &\lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial y} = \lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial y}, \quad x^2 + y^2 = R_2^2, \quad z \in [z_1; z_6]
 \end{aligned} \right. \\
 &(\Gamma 6) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_2(T_{oc}(\tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 = R_1^2, \quad z \in [z_2; z_5] \\
 &\lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial y} = \alpha_2(T_{oc}(\tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 = R_1^2, \quad z \in [z_2; z_5]
 \end{aligned} \right. \\
 &(\Gamma 7) \quad \lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \alpha_1(T_{oc}(\tau) - T_T(x, y, z, \tau)), \quad x^2 + y^2 \leq R_3^2, \quad z = 0 \\
 &(\Gamma 8) \quad \lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \lambda_T \frac{\partial T_T(x, y, z, \tau)}{\partial z}, \quad x^2 + y^2 = R_2^2, \quad z = z_1 \\
 &(\Gamma 9) \quad \lambda_{cr} \frac{\partial T_{cr}(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \alpha_2(T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)) + \frac{\sigma \varepsilon_{II} \varepsilon_{cr} (T_{II}^4(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}^4(x, y, z, \tau))}{T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_{cr}(x, y, z, \tau)} \\
 &\quad \quad \quad x^2 + y^2 \leq R_1^2, \quad z = z_2 \\
 &(\Gamma 10) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_M \frac{\partial T_M(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \alpha_3(T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)) + \frac{\sigma \varepsilon_{II} \varepsilon_{cr} (T_{II}^4(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M^4(x, y, z, \tau))}{T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)} \\
 &D_M \frac{\partial C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \beta_{II} (C_B^{II}(p^{II}) - C_B^{II}(x, y, z, \tau)), \quad x \in [-x_4; x_4], \quad y \in [-y_4; y_4], \quad z \in [z_3; z_4]
 \end{aligned} \right. \\
 &(\Gamma 11) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_M \frac{\partial T_M(x, y, z, \tau)}{\partial y} = \alpha_3(T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)) + \frac{\sigma \varepsilon_{II} \varepsilon_{cr} (T_{II}^4(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M^4(x, y, z, \tau))}{T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)} \\
 &D_M \frac{\partial C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial y} = \beta_{II} (C_B^{II}(p^{II}) - C_B^{II}(x, y, z, \tau)), \quad x \in [-x_4; x_4], \quad y \in [-y_4; y_4], \quad z \in [z_3; z_4]
 \end{aligned} \right. \\
 &(\Gamma 12) \quad \left\{ \begin{aligned}
 &\lambda_M \frac{\partial T_M(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_3(T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)) + \frac{\sigma \varepsilon_{II} \varepsilon_{cr} (T_{II}^4(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M^4(x, y, z, \tau))}{T_{II}(x, y, z - \Delta z, \tau) - T_M(x, y, z, \tau)} \\
 &D_M \frac{\partial C_B^M(x, y, z, \tau)}{\partial x} = \beta_{II} (C_B^{II}(p^{II}) - C_B^{II}(x, y, z, \tau)), \quad x \in [-x_4; x_4], \quad y \in [-y_4; y_4], \quad z \in [z_3; z_4]
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где Δz – толщина пограничного слоя между границами раздела сред; α_1 – α_3 – коэффициенты теплообмена между поверхностью внешней футеровки

автоклава и окружающей средой, стальным корпусом автоклава и паром, ячеистым бетоном и паром соответственно; σ – постоянная Стефана – Больц-

мана; $\epsilon_{п}$, $\epsilon_{м}$ – степень черноты пара и автоклавируемого бетона соответственно; $\beta_{п}$ – коэффициент массообмена между паром и массивом ячеистого бетона; граничные условия Г1, Г7 и Г4 соответствуют теплообмену между окружающей средой и поверхностью теплоизоляции по торцам $[0; R_3]$ и длине $[0; z_7]$ автоклава соответственно через коэффициент теплообмена α_1 . Границы Г2, Г8 и Г5 образуются между поверхностями теплоизоляции и стальным корпусом автоклава с коэффициентами теплопередачи $\lambda_{т}$, $\lambda_{ст}$ по торцам $[0; R_2]$ и длине $[z_1; z_6]$ автоклава соответственно. Границы Г3, Г9 и Г6 соответствуют теплообмену между внутренней средой автоклава (паром) и поверхностью стального корпуса автоклава по торцам $[0; R_1]$ и длине $[z_2; z_5]$ автоклава соответственно через ко-

эффициент теплообмена α_2 . Границы Г10–Г12 соответствуют тепло- и массообмену между внутренней средой автоклава (паром) и гранями массива ячеистого бетона по трем координатам $[-x_4; x_4]$, $[-y_4; y_4]$, $[z_3; z_4]$ через коэффициенты теплообмена α_3 и массообмена $\beta_{п}$ соответственно.

Проверка адекватности модели

Численное решение полученной системы уравнений может быть найдено методом конечных элементов в программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation. Здесь на основе разработанного математического описания (1)–(3), с учетом начальных (4) и граничных (5) условий, создана вычислительная модель технологического процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона (рис. 4).

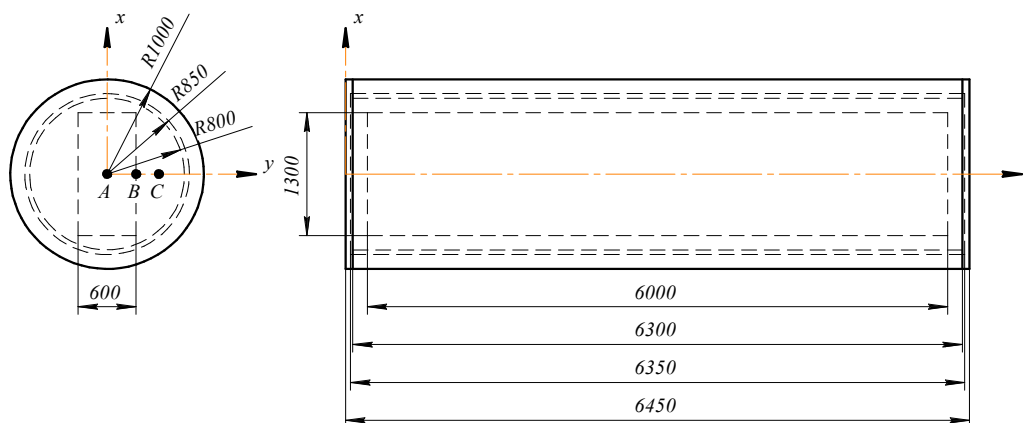


Рис. 4. Вычислительная модель технологического процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона: A, B, C – характерные точки измерения температуры; R800–R1000 – радиусы границ раздела сред; 6000–6450 – геометрические размеры ячеистого бетона, стальной стенки и теплоизоляции

Fig. 4. Computational model of the technological process of autoclave treatment of cellular concrete products: A, B, C – characteristic points of temperature measurement; R800–R1000 – radii of the interfaces between the media; 6000–6450 – geometric dimensions of cellular concrete, steel wall and thermal insulation

В качестве источника пара задано давление текучей среды в форме *граничного условия* на внутренней стенке автоклава. Динамика среды автоклава (пара) определяется из модели, полученной в [10], и задается в виде графиков зависимостей температуры $T_{авт}(t)$ и давления $P_{авт}(t)$ в автоклаве.

Появление внутреннего тепловыделения в массах сырья ячеистого бетона обуславливается экзотермической реакцией образования гидросиликатов в форме тоберморита. В соответствии с [2] температура нижнего порога образования тоберморита, соответствующая началу фазовых превращений, составляет $T_{т6} = 165$ °С. Прогрев массивов ячеистого бетона происходит благодаря тепло- и массообмену последовательно от внешних слоев массива к внутренним. Появление внутреннего

тепловыделения в каждом i -м слое будет определяться его нагревом до температуры $T_{м}^i > T_{т6}$, где $T_{т6}$ – минимально необходимая температура для образования тоберморита, а его динамика может быть описана в соответствии с разработанной авторами моделью [6] в виде симметричной гладкой кривой. Таким образом, в процессе численного моделирования общее удельное объемное внутреннее тепловыделение $Q_{тв}$ (3) будет определяться суммой его послойных экзотерм, динамика каждой из которых определяется как отношение величины общего внутреннего тепловыделения $Q_{т6}$ в соответствии с моделью [11] к объему V^i каждого i -го слоя, а время начала тепловыделения в i -м слое определяется при условии $T_{м}^i > T_{т6}$, т. е.

$$Q_{тв} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{т6}}{V^i} (T_{м}^i) \forall T_{м}^i > T_{т6}, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n.$$

Кроме того, ввиду отсутствия в применяемой программной среде модуля расчета массопереноса в твердом теле, в модель может быть введен эквивалентный коэффициент теплопроводности, определяемый, с учетом известных экспериментальных данных, методом подбора. Для точного определения коэффициента тепло- и массопроводности необходимо решить обратную задачу теплопроводности [12, 13].

В условиях принятых допущений проведен ряд численных экспериментов по оценке динамики температуры в центральной части массива *A* и на поверхности массива *B* [14]. Для проверки адекватности модели реальным экспериментальным данным, приведенным в [15, 16], использован метод расчета среднеквадратичного отклонения *S* значений температуры в указанных точках, величина которого не превышает 5,9 °С (табл.), что подтверждает адекватность разработанной модели.

**Среднеквадратичное отклонение
температуры массива**

The standard deviation of the array temperature

Экспериментальные данные [источник]	<i>S</i> , °С	
	<i>A</i>	<i>B</i>
[15]	2,99	5,9
[16]	5,66	4,95

Полученная модель позволяет с достаточной для инженерной практики степенью точности определить температуру в центре и на поверхности массива при известных параметрах температуры и давления паровой среды в автоклаве, а также данных о внутреннем тепловыделении в массивах ячеистого бетона при образовании тоберморита в его структуре. Применение результатов численного моделирования при синтезе системы автоматического управления данным процессом позволит получить изделия со стабильной заданной величиной прочности *R_m* ячеистого бетона за счет определения времени достижения изделиями требуемой температуры во всем объеме и путем вычисления на основании полученных данных времени окончания этапа выдержки массивов в автоклаве.

Заключение

Полученные результаты численного моделирования по оценке динамики температуры в центре и на поверхности массивов, а также в среде автоклава могут быть использованы при синтезе САУ процессом автоклавной обработки с целью определения градиента температур в объеме автоклавируемого ячеистого бетона, что, в свою очередь, позволит стабилизировать качественные характеристики конечной продукции в условиях минимизации энергозатрат на ее производство.

Список источников

1. Книгина Г. И., Загоренко В. Д. Значение пластичности газобетонной массы при формировании макроструктуры // *Строительные материалы*. 1966. № 1. С. 35–36.
2. Кафтаева М. В., Рахимбаев И. Ш. Тепловыделение при синтезе гидросиликатной связки автоклавного газобетона // *International journal of applied and fundamental research*. 2013. № 10. С. 373–376.
3. Галицков К. С., Баранова М. Н., Болховецкий А. С. Исследование влияния структурно-фазового состава ячеистого бетона на внутреннее тепловыделение в процессе его автоклавной обработки // *Градостроительство и архитектура*. 2023. Т. 13. № 2 (51). С. 73–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.10.
4. Ключев В. Ю. О системном разрыве между требованиями нормативных документов и современном уровне технологии ячеистого бетона // *Технические науки. Научные исследования*. 2008. № 2 (6). С. 58–63.
5. Галицков С. Я., Болховецкий А. С., Стулов А. Д. Структурное моделирование процессов продувки и вакуумирования ячеисто-бетонных изделий в автоклаве // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст.* Самара: Изд-во Самар. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. С. 439–441.
6. Галицков С. Я., Михелькевич В. Н., Болховецкий А. С. Идентификация тепловыделения при автоклавировании ячеистого бетона // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XVIII Междунар. конф.* (Самара, 20–25 сентября 2016 г.). Самара: ООО «Офорт», 2016. С. 346–350.
7. Ишанхождаева М. М. *Физическая химия*. СПб.: Изд-во СПб ГТУ РП, 2012. Ч. I. Диффузия в системах с твердой фазой. 35 с.
8. Ошкина Л. М., Сарайкин А. С. Явления массопереноса в капиллярно-пористых материалах // *Огарёв-Online*. 2015. № 13 (54). С. 1.
9. Михеев М. А., Михеева И. М. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1977. 345 с.
10. Лыков А. В. *Теория теплопроводности: учеб. пособие для вузов*. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
11. Галицков С. Я., Галицков К. С., Болховецкий А. С. Моделирование процесса автоклавной обработки ячеисто-бетонных изделий как объекта управления // *Техника и технология транспорта*. 2019. № S (13). С. 47.
12. Колибаба О. Б., Габитов Р. Н., Муратова Т. В. Математическое моделирование тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки // *Вестн. ИГЭУ*. 2016. Вып. 6. С. 43–48.
13. Мацевитый Ю. М. *Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т.* Киев: Наукова думка, 2002. Т. 1. Методология. 408 с.
14. Галицков К. С., Болховецкий А. С., Заварзин А. А. Численное моделирование процесса автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона как объекта с распределенными параметрами // *Мехатроника, автоматика*

и робототехника. 2024. № 13. С. 115–123. DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-115-123.

15. Белкин Я. М., Хаимский З. М. Теплообмен в ячеистом бетоне и эффективные режимы автоклавной обработки // Строительные материалы. 1973. № 2. С. 31–32.

References

1. Knigina G. I., Zagorenko V. D. Znachenie plastichnosti gazobetonnoj massy pri formirovanii makrostruktury [The importance of plasticity of aerated concrete mass in the formation of a macrostructure]. *Stroitel'nye materialy*, 1966, no. 1, pp. 35–36.

2. Kaftaeva M. V., Rahimbaev I. Sh. Teplovydelenie pri sinteze gidrosilikatnoj svyazki avtoklavного gazobetonа [Heat generation in the synthesis of hydrosilicate bundles of autoclaved aerated concrete]. *International journal of applied and fundamental research*, 2013, no. 10, pp. 373–376.

3. Galickov K. S., Baranova M. N., Bolhoveckij A. S. Issledovanie vliyaniya strukturno-fazovogo sostava yacheistogo betona na vnutrennee teplovydelenie v processe ego avtoklavnoj obrabotki [Investigation of the effect of the structural and phase composition of cellular concrete on internal heat generation during its autoclave treatment]. *Gradostroitel'stvo i arhitektura*, 2023, vol. 13, no. 2 (51), pp. 73–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.10.

4. Klyuev V. Yu. O sistemnom razryve mezhdru trebovaniyami normativnykh dokumentov i sovremennom urovne tekhnologii yacheistogo betona [About the systemic gap between the requirements of regulatory documents and the modern level of cellular concrete technology]. *Tekhnicheskie nauki. Nauchnye issledovaniya*, 2008, no. 2 (6), pp. 58–63.

5. Galickov S. Ya., Bolhoveckij A. S., Stulov A. D. Strukturnoe modelirovanie processov produvki i vakuumirovaniya yacheisto-betonnykh izdelij v avtoklave [Structural modeling of the processes of purging and vacuuming cellular concrete products in an autoclave]. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'nye tekhnologii: sbornik statej*. Samara, Izd-vo Samar. gos. arhitekt.-stroit. un-ta, 2015. Pp. 439–441.

6. Galickov S. Ya., Mihel'kevich V. N., Bolhoveckij A. S. Identifikaciya teplovydeleniya pri avtoklavirovanii yacheistogo betona [Identification of heat release during autoclaving of cellular concrete]. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah: trudy XVIII Mezhdunarodnoj konferencii (Samara, 20–25 sentyabrya 2016 g.)*. Samara, OOO «Ofort», 2016. Pp. 346–350.

7. Ishanhozhaeva M. M. *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Saint Petersburg, Izd-vo SPb GTU RP, 2012. Part I. Diffuziya v sistemah s tverdoj fazoj. 35 p.

16. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Шейнич Л. А., Гелевера А. Г. Основы технологии отделочных, тепло- и гидроизоляционных материалов. Киев: Высш. шк., 1986. 303 с.

8. Oshkina L. M., Sarajkin A. S. *Yavleniya massoperenosa v kapillyarno-poristykh materialah* [Mass transfer phenomena in capillary-porous materials]. Ogaryov-Online, 2015, no. 13 (54). P. 1.

9. Miheev M. A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 345 p.

10. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti: uchebnoe posobie dlya vuzov* [The theory of thermal conductivity: a textbook for universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p.

11. Galickov S. Ya., Galickov K. S., Bolhoveckij A. S. Modelirovanie processa avtoklavnoj obrabotki yacheisto-betonnykh izdelij kak ob"ekta upravleniya [Modeling of the autoclave treatment of cellular concrete products as an object of management]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*, 2019, no. S (13), p. 47.

12. Kolibaba O. B., Gabitov R. N., Muratova T. V. Matematicheskoe modelirovanie teplomassoperenosa v sloe tverdykh bytovykh othodov v processe ego sushki [Mathematical modeling of heat and mass transfer in a solid waste layer during its drying]. *Vestnik IGEU*, 2016, iss. 6, pp. 43–48.

13. Macevityj Yu. M. *Obratnye zadachi teploprovodnosti: v 2-h t.* [Inverse problems of thermal conductivity: in 2 vol.]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2002. Vol. 1. Metodologiya. 408 p.

14. Galickov K. S., Bolhoveckij A. S., Zavarzin A. A. CHislennoe modelirovanie processa avtoklavnoj obrabotki izdelij iz yacheistogo betona kak ob"ekta s raspredelennymi parametrami [Numerical simulation of the autoclave treatment of cellular concrete products as an object with distributed parameters]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*, 2024, no. 13, pp. 115–123. DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-115-123.

15. Belkin Ya. M., Haimskij Z. M. Teploobmen v yacheistom betone i effektivnye rezhimy avtoklavnoj obrabotki [Heat transfer in cellular concrete and efficient autoclave treatment modes]. *Stroitel'nye materialy*, 1973, no. 2, pp. 31–32.

16. Gluhovskij V. D., Runova R. F., Shejnich L. A., Gelevera A. G. *Osnovy tekhnologii odelochnykh, teplo- i gidroizolyacionnykh materialov* [Fundamentals of technology of finishing, thermal and waterproofing materials]. Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1986. 303 p.

Статья поступила в редакцию 19.07.2024; одобрена после рецензирования 03.12.2024; принята к публикации 27.12.2024
The article was submitted 19.07.2024; approved after reviewing 03.12.2024; accepted for publication 27.12.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Константин Станиславович Галицков – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства; Самарский государственный технический университет; maes@samgtu.ru

Андрей Сергеевич Болховецкий – соискатель кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства; Самарский государственный технический университет; bolkhovetskiy.as@samgtu.ru

Konstantin S. Galitskov – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Mechanization, Automation and Energy Supply of Construction Chair; Samara State Technical University; maes@samgtu.ru

Andrey S. Bolkhovetsky – Applicant of the Department of Mechanization, Automation and Energy Supply of Construction Chair; Samara State Technical University; bolkhovetskiy.as@samgtu.ru

