

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА КАК ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Галицков К.С., Болховецкий А.С., Заварзин А.А.

Самарский государственный технический университет, Самара

Ключевые слова: математическое моделирование, численное моделирование, метод конечных элементов, ячеистый бетон, тоберморит, внутреннее тепловыделение, распределенные параметры, температурный перепад.

Аннотация. Создана вычислительная модель в программной среде SolidWorks процесса автоклавной обработки как объекта управления с распределенными параметрами. Проведена серия численных экспериментов с целью нахождения теплового поля $T_m(x,y,z,t)$ массива ячеистого бетона без учета и с учетом внутреннего тепловыделения при синтезе тоберморита в структуре бетона. Определен максимальный перепад температур в объеме автоклавируемого бетона при различных параметрах автоклавной обработки. Выполнена оценка адекватности разработанной вычислительной модели путем сравнения результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, полученных на действующем технологическом оборудовании.

NUMERICAL MODELING OF AUTOCLAVE PROCESSING OF CELLULAR CONCRETE PRODUCTS AS AN OBJECT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

Galitskov K.S., Bolkhovetsky A.S., Zavarzin A.A.

Samara State Technical University, Samara

Keywords: mathematical modeling, numerical modeling, finite element method, cellular concrete, tobermorite, internal heat generation, distributed parameters.

Abstract. A computational model of the autoclave processing process as a control object with distributed parameters was created in the SolidWorks software environment. A series of numerical experiments was carried out in order to find the thermal field $T_m(x,y,z,t)$ of the cellular concrete array without taking into account and taking into account the internal heat generation during the synthesis of tobermorite in the structure of concrete. The maximum temperature difference in the volume of autoclaved concrete at various parameters of the autoclaved concrete has been determined. Processing. The adequacy of the developed computational model is assessed by comparing the simulation results with the results of experimental studies obtained on the existing technological equipment.

Введение

Производство ячеисто-бетонных изделий (ЯБИ) включает в себя ряд последовательных процессов, одним из которых является автоклавная обработка, где формируются, в основном, прочностные характеристики готовых изделий [1-3]. Известно, что вид и количество синтезируемых в ЯБИ гидросиликатов зависит от множества условий, основным из которых является создание температурной среды внутри автоклава. Так при температурах 180-200°C в массиве образуется тоберморит, реакция синтеза которого сопровождается выделением теплоты и в значительной степени влияет на динамику температуры в среде автоклава [2, 3]. Данный эффект может быть использован для определения текущей величины

прочности автоклавируемых изделий, как показано в [4], при этом, параметры среды автоклава должны быть ограничены таким образом, что перепад температур в объеме ЯБИ не приведет к разрушению тела массива [5]. Для построения системы автоматического управления процессом автоклавной обработки с учетом экзотермической реакции и указанных ограничений необходимо выполнить исследования динамики температуры в массивах автоклавируемого бетона при вариации параметров среды автоклава с учетом изменения динамики внутреннего тепловыделения [6]. Предпринятые в [7, 8] попытки определения температурного поля в объеме массива экспериментальным методом, хотя и дали определенные положительные результаты, однако в представленных работах отсутствует достаточное описание как характеристик ЯБИ, так и технологических параметров автоклавных установок. В данной работе предлагается методами численного моделирования выполнить исследование процесса автоклавирования как объекта управления (ОУ) с целью определения его динамических характеристик с учетом данных о динамике внутреннего тепловыделения при синтезе гидросиликатов в массиве ЯБИ.

Описание подхода

Для решения поставленной задачи предлагается использовать итерационный подход [9], структурно представленный на рисунке 1.

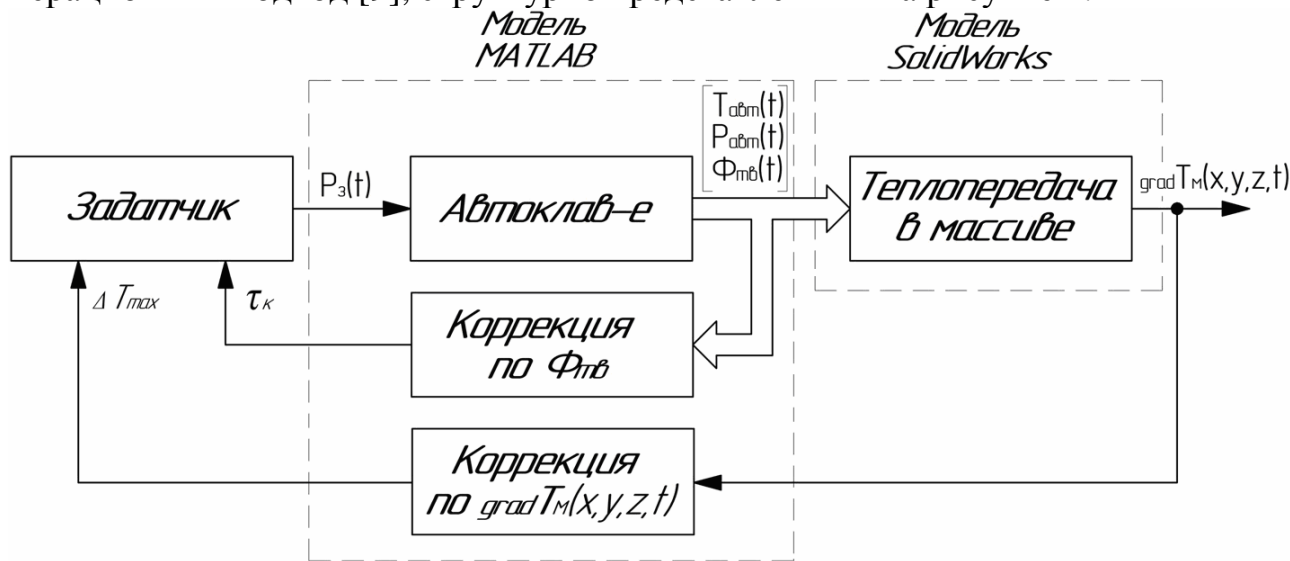


Рис. 1. Структура итерационного подхода для уточнения динамики модели процесса автоклавной обработки ячеистого бетона как ОУ

Здесь сначала формируются технологические параметры процесса автоклавной обработки такие как давление $P_{авт}(t)$ и функционально связанная температура $T_{авт}(t)$ среды в автоклаве, а также динамика внутреннего тепловыделения $\Phi_{мб}(t)$ в объеме массивов ячеистого бетона, которые могут быть получены на упрощенной модели [9], разработанной в программной среде Matlab. Полученные результаты используются в качестве начальных и граничных (краевых) условий на созданной модели автоклавирования ЯБИ с распределенными параметрами, например в программной среде SolidWorks Flow Simulation. На заключительном этапе осуществляется моделирование объекта управления с учетом уточнённых данных в условиях действующего ограничения

ΔT_{max} на скорость подъема температуры в автоклаве, определяемого допустимой величиной перепада температур $\Delta T_m(x,y,z,t)$ между внутренним и внешним слоем автоклавируемого изделия. Полученные на модели с распределенными параметрами данные о динамике температуры в объеме массива позволят скорректировать время τ_k выдержки изделий в автоклаве, а также описать данный процесс типовыми динамическими звеньями с целью дальнейшего синтеза системы автоматического управления (САУ) данным процессом.

Расчетная модель в программной среде Flow Simulation

При моделировании рассмотрим процесс автоклавной обработки одного массива с размерами 6000x640x1300 мм, помещенного в автоклав, пропорции объема и геометрия которого соразмерны и пропорциональны реальной технологической установке. Корпус автоклава выполнен из стали технической 3200; материал теплоизоляции автоклава – минеральная вата с коэффициентом теплопроводности 0,6 Вт/с.

Массив помещен в среду, где качестве начальных условий принимаем температуру пара, массива и стального корпуса автоклава равными $T_n(x,y,z,t) = T_m(x,y,z,0) = T_{cm} = T_0 = 70^\circ\text{C}$, начальное давление в среде автоклава $P_n(x,y,z,0) = 0,055$ МПа, начальная температура футеровки и внешней среды $T_\phi = T_c = 5,7^\circ\text{C}$.

В качестве граничных условий на одной из стенок автоклава термодинамические параметры температуры $T_n(x,y,z,t)$ и давления $P_n(x,y,z,t)$ пара зададим в виде графиков зависимостей температуры T_{ML} и давления P_{ML} , результаты которых получены на первом этапе моделирования в программной среде Matlab соответственно [9]. Время расчета соответствует сумме длительности этапов подъема давления и выдержки $t_p=36000$ с; шаг расчета 100 с; количество итераций – 360.

Измерение температуры ячеистого бетона на модели будет производиться в двух характерных точках сечения массива – на поверхности (x_{out}) в центральной части (x_{ins}), а также в среде автоклава (x_{steam}) для оценки адекватности переноса данных о параметрах среды между моделями.

Экспериментальные исследования

Вычислительные эксперименты предложено провести в два этапа. На первом проведены исследования без учета тепловыделения в массиве ЯБИ. Результаты экспериментов представлены на рисунках 2, 3.

Оценка адекватности полученной модели осуществлялась с использованием метода среднеквадратичного отклонения. В результате величина среднеквадратичного отклонения для температурных кривых по результатам [7] составила $5,9^\circ\text{C}$ для внешнего слоя и $2,99^\circ\text{C}$ для внутреннего слоя. По результатам [8] среднеквадратичное отклонение составило $5,66^\circ\text{C}$ для внутреннего и $4,95^\circ\text{C}$ для внешнего слоев соответственно, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Для проведения следующего этапа численного моделирования учтем в модели внутренний источник тепла, параметры которого будут с достаточной степенью точности описывать процесс внутреннего тепловыделения в массиве автоклавируемого бетона, идентификация которого была выполнена в [6].

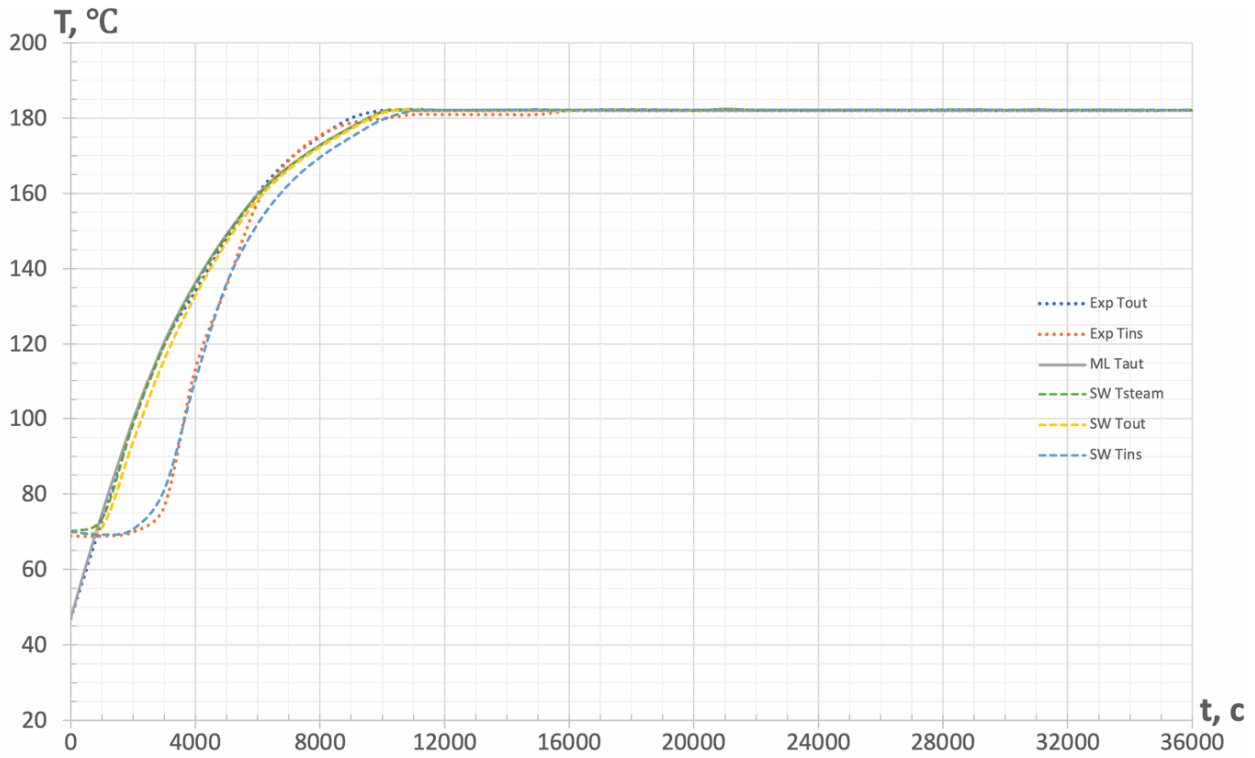


Рис. 2. Сравнительный анализ температурных кривых, полученных экспериментально [7] и на вычислительной модели: $Exp T_{out}$, $Exp T_{ins}$ – температуры на поверхности и внутри массива, получены экспериментально [7]; $SW T_{steam}$, $SW T_{out}$, $SW T_{ins}$ – температуры в среде автоклава, на поверхности и внутри массива, полученные на модели в Solid Works; $ML T_{out}$ – температура в автоклаве, полученная на модели с сосредоточенными параметрами в Matlab

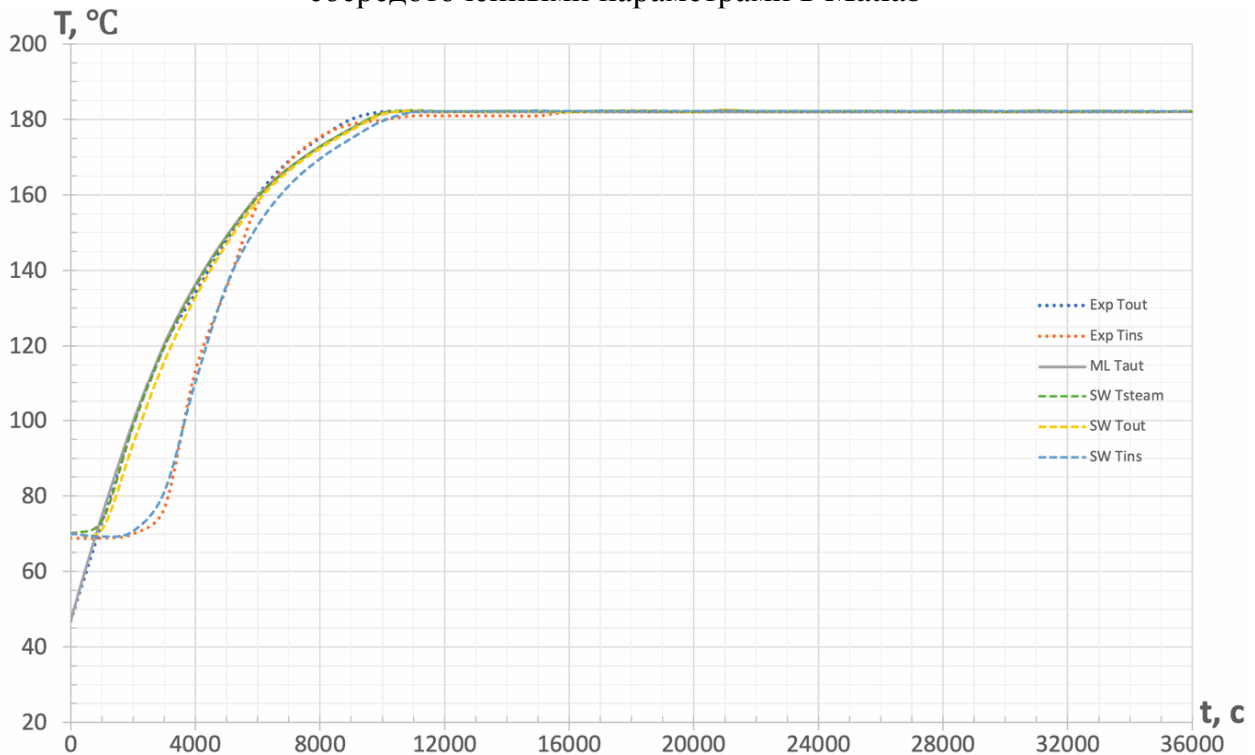


Рис. 3. Сравнительный анализ температурных кривых, полученных экспериментально [8] и на вычислительной модели: $Exp T_{out}$, $Exp T_{ins}$ – температуры на поверхности и внутри массива, получены экспериментально [8]; $SW T_{steam}$, $SW T_{out}$, $SW T_{ins}$ – температуры в среде автоклава, на поверхности и внутри массива, полученные на модели в Solid Works; $ML T_{out}$ – температура в автоклаве, полученная на модели с сосредоточенными параметрами в Matlab

Для этого в модели внутренний источник тепла задается в форме удельной мощности объемного тепловыделения, которая определяется как найденная в [9] $q_{вн}$, отнесенная к объему 12 массивов, при этом динамика этого тепловыделения имеет полученную в той же работе форму симметричной гладкой кривой. Известно, что процесс внутреннего тепловыделения начинается при достижении массивом ЯБИ определенной температуры ($T_{мс}=165^{\circ}\text{C}$), поэтому в модель необходимо ввести функцию «переключатель» для внутреннего источника тепловыделения по параметру «цель», которой соответствует достижению твердым телом указанного значения температуры активации экзотермического процесса. Однако в случае, если внешний слой массива достигает заданной температуры, то наблюдается активация всего объемного источника, т.е. внутреннее тепловыделение происходит равномерно во всем объеме автоклавируемого массива, что не корректно отражает физику протекающего процесса. Для компенсации такого рода неточности предлагается представить ячеистый бетон в виде сопряженных объемных тел, составленных таким образом, чтобы сформировать единый массив, состоящий из n слоев, параметры которых задаются обособленно. Таким образом в модели задаются объемные «цели» в виде условия $T_{вн}^n = 1 \{ \bar{T}_M^n \geq T_{мс} \}$, где n – количество сопрягаемых слоев, по которым активируются соответствующие модели удельной мощности объемного тепловыделения.

В результате численного моделирования получена динамика температуры в характерных точках объема массива автоклавируемого ячеистого бетона в рамках исследуемых моделей (рис. 4, 5) с учетом внутреннего тепловыделения.

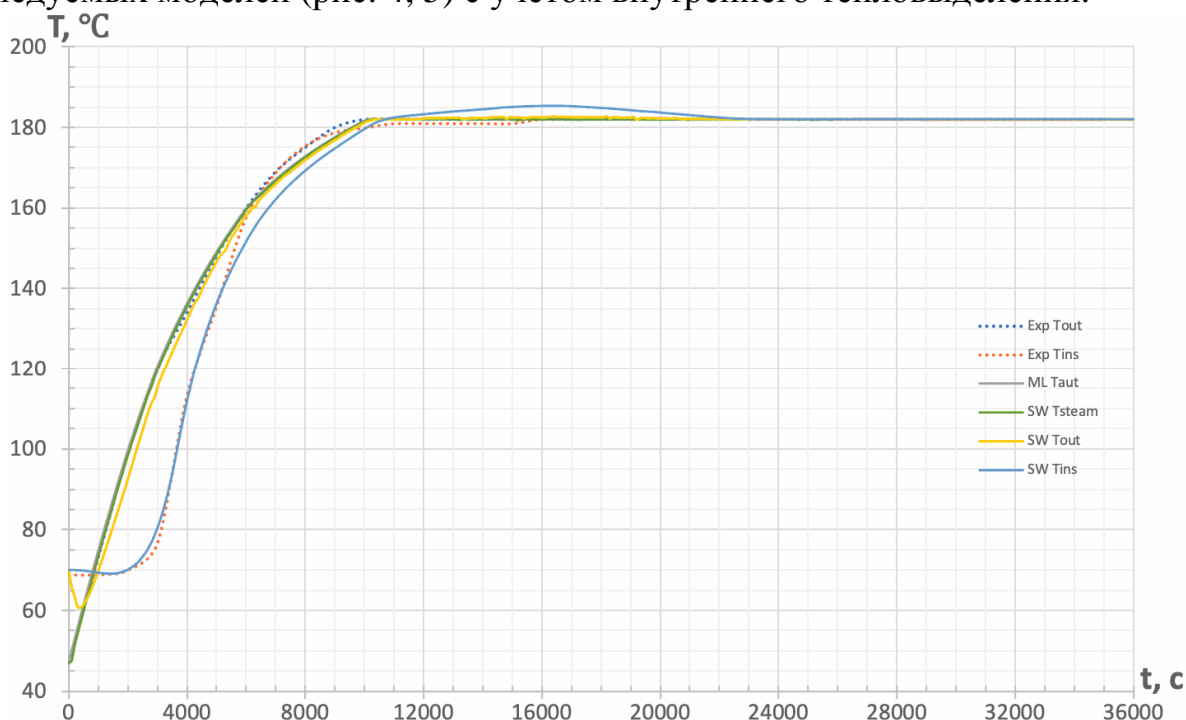


Рис. 4. Сравнительный анализ температурных кривых, полученных экспериментально [7] и на вычислительной модели с учетом модели внутреннего тепловыделения:

Exp T_{out} , Exp T_{ins} – температуры на поверхности и внутри массива, получены экспериментально [7]; SW T_{steam} , SW T_{out} , SW T_{ins} – температуры в среде автоклава, на поверхности и внутри массива, полученные на модели в Solid Works; ML T_{out} – температура в автоклаве, полученная на модели с сосредоточенными параметрами в Matlab

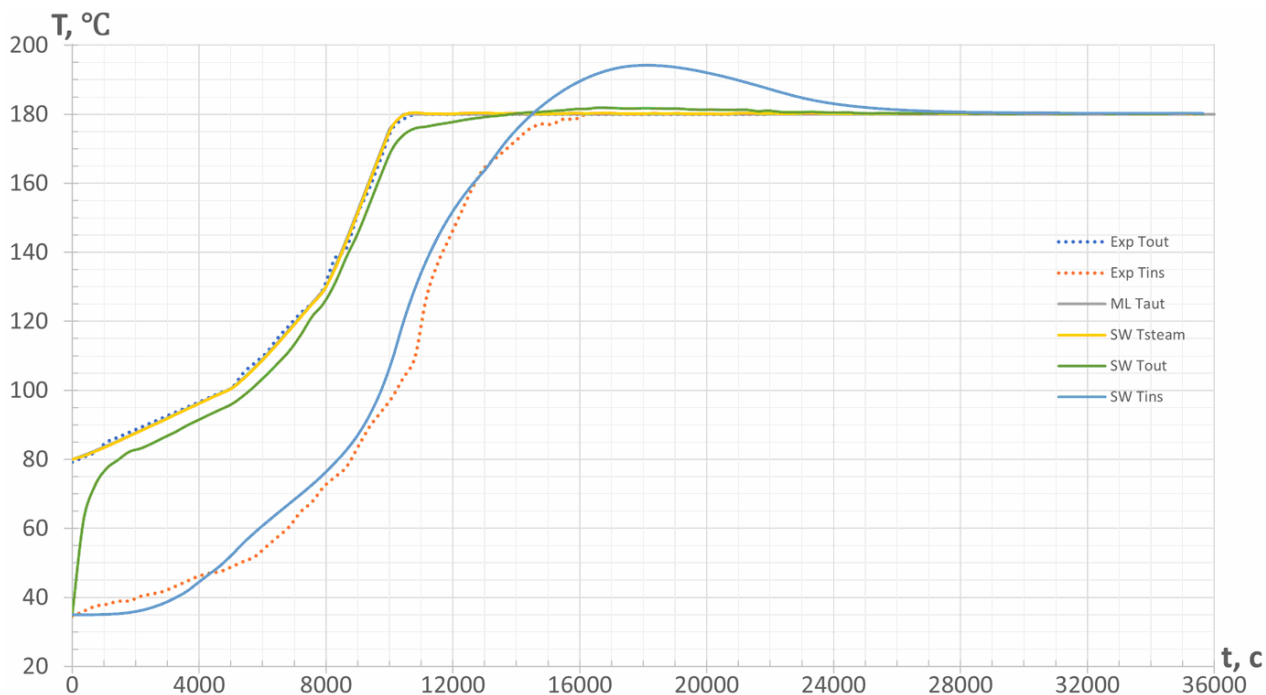


Рис. 5. Сравнительный анализ температурных кривых, полученных экспериментально [8] и на вычислительной модели с учетом модели внутреннего тепловыделения:

Exp T_{out} , Exp T_{ins} – температуры на поверхности и внутри массива, получены экспериментально [8]; SW T_{steam} , SW T_{out} , SW T_{ins} – температуры в среде автоклава, на поверхности и внутри массива, полученные на модели в Solid Works;

ML T_{out} – температура в автоклаве, полученная на модели с сосредоточенными параметрами в Matlab

Выполнена оценка разработанной модели, в результате величина среднеквадратичного отклонения составила 4,16°C, 2,5°C по данным [7] и 5,42°C, 5,29°C по данным [8] для внешнего и внутреннего слоев массива ЯБИ соответственно.

Определены значения перепадов температур $\Delta T = T_{out}(t) - T_{ins}(t)$ для внешнего и внутреннего слоя массива (рис. 6, 7) с учетом и без учета модели внутреннего тепловыделения. Здесь максимальная величина перепада по данным [7] и на соответствующей ей модели не превышает значения 43°C и 35°C. По данным [8] и полученным в результате численных экспериментов, величина перепада составляет 78°C и 62°C соответственно, а величина среднеквадратичного отклонения между экспериментальными данными и данными по модели представлены в таблице 1.

Табл. 1. Среднеквадратичное отклонение перепада температур между экспериментальными данными и моделью Solid Works

Экспериментальные данные, [источник]	Среднеквадратичное отклонение S, °C	
	SolidWorks без тепловыделения	SolidWorks с тепловыделения
[7]	4,22	4,44
[8]	7,71	6,71

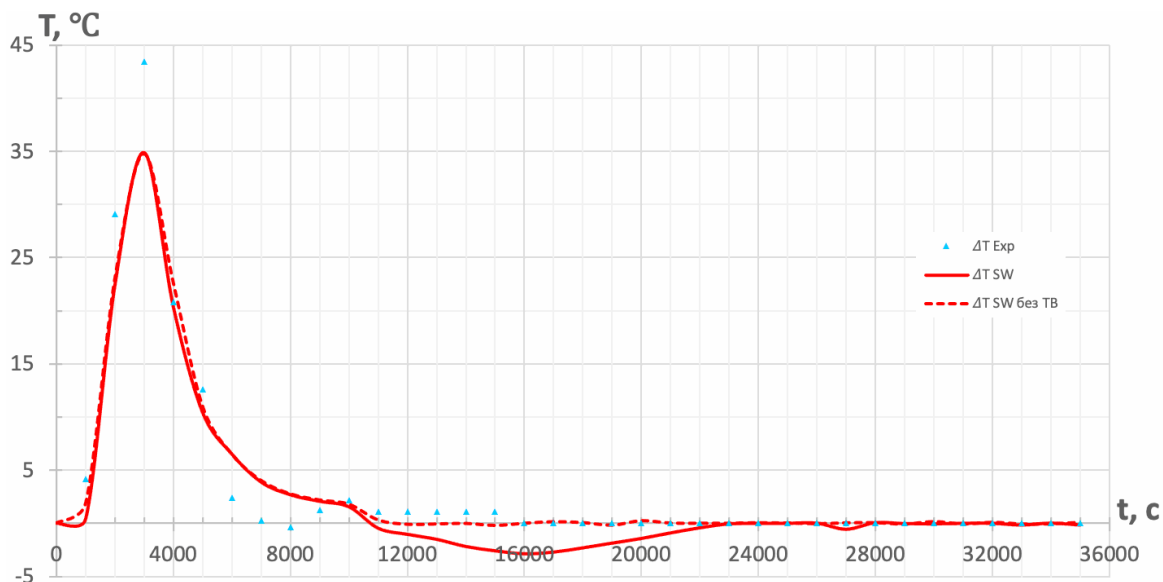


Рис. 6. Температурный перепад по данным [7] и по модели SolidWorks: ΔT Exp, ΔT SW, ΔT SW без ТВ – перепад температур для внешнего и внутреннего слоя массива для экспериментальных, данных [7] и модели SolidWorks с учетом и без учета тепловыделения, соответственно

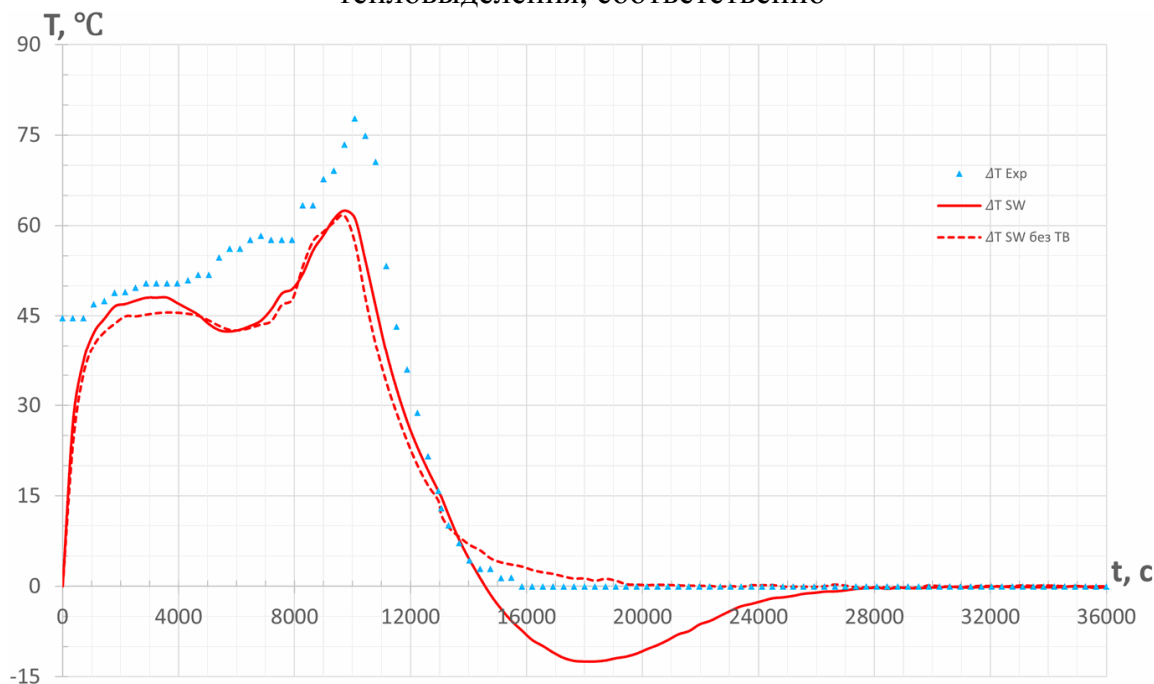


Рис. 8. Температурный перепад по данным [8] и по модели SolidWorks: ΔT Exp, ΔT SW, ΔT SW без ТВ – перепад температур для внешнего и внутреннего слоя массива для экспериментальных, данных [8] и модели SolidWorks с учетом и без учета тепловыделения, соответственно

В результате показано, что характер динамики нагрева изделий и формируемый при этом температурный перепад между центральным и внешним слоями массива имеют значительный разброс, величина которого зависит как от применяемой технологии (интенсивности нагрева, наличия этапа вакуумирования и т.д.), так и от параметров автоклавируемого бетона, что характеризует данный процесс как нестационарный объект управления с распределенными параметрами. Кроме того, определено, что процесс внутреннего тепловыделения приводит к появлению обратного температурного перепада. Отсутствие при этом

роста температуры среды обусловлено тем, что ее параметры изменяются по заданному на модели закону, обеспечивающему постоянство параметров среды, в которую помещается массив ЯБИ. Для исследования влияния динамики внутреннего тепловыделения на среду в автоклаве требуются дополнительные исследования, учитывающие возможность моделирования перепуска пара через пароперепускной клапан при превышении допустимых значений давления.

Выводы

Разработана вычислительная модель процесса автоклавной обработки как объекта управления с распределенными параметрами. Проведены вычислительные эксперименты по определению динамики теплового поля $T_m(x,y,z,t)$ ячеистого бетона в процессе его автоклавной обработки в характерных точках. Выполнена оценка влияния динамики внутреннего тепловыделения при синтезе тоберморита в структуре бетона на динамику его нагрева. Осуществлена оценка адекватности разработанной модели путем сравнительного анализа результатов моделирования с данными экспериментальных исследований, полученных на действующем технологическом оборудовании.

Разработанная модель может быть использована для идентификации автоклавной обработки как объекта управления, необходимой для синтеза системы автоматического управления данным процессом в условиях оптимизации программной траектории давления в автоклаве при производстве изделий со стабильными заданными показателями прочности готовых изделий и минимизации энергозатрат.

Список литературы

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. Патент №2716764 РФ. Способ автоклавирования изделий из ячеистого бетона / С.Я. Галицков, А.С. Болховецкий, О.О. Усик. – Заявка № 2019121049 от 03.07.2019; опубл. 16.03.2020, Бюл. № 8.
5. 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.
6. Галицков С.Я., Михелькевич В.Н., Болховецкий А.С. Идентификация тепловыделения при автоклавировании ячеистого бетона // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVIII Международной конференции. – Самара: ООО «Офорт», 2016. – С. 346-350.
7. Белкин Я.М., Хаимский З.М. Теплообмен в ячеистом бетоне и эффективные режимы автоклавной обработки // Строительные материалы. – 1973. – № 2. – С. 31-32.
8. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Шейнич Л.А., Гелевера А.Г. Основы технологии отделочных, тепло- и гидроизоляционных материалов. – Киев.: Высшая школа, 1986. – 303 с.

9. Галицков С.Я., Галицков К.С., Болховецкий А.С. Моделирование процесса автоклавной обработки ячеисто-бетонных изделий как объекта управления // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 5 (13). – С. 47.
10. Колибаба О.Б., Габитов Р.Н., Муратова Т.В. Математическое моделирование тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 43-48.
11. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т. – Киев: Наук. думка, 2002. – Т. 1. Методология, 2002. – 408 с.

Сведения об авторах:

Галицков Константин Станиславович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства;

Болховецкий Андрей Сергеевич – заведующий лабораторией кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства;

Заварзин Андрей Александрович – магистрант.