

На правах рукописи



ДОМНИНА КСЕНИЯ ЛЕОНИДОВНА

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННО-КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в химических технологиях, нефтехимии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Научный руководитель: **Федосов Сергей Викторович**
академик РААСН, доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Чернышов Евгений Михайлович**
академик РААСН, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», Научно-исследовательский
институт Академии развития строительного комплекса,
директор

Матасов Алексей Вячеславович
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Российский
химико-технологический университет имени Д.И.
Менделеева», Управление информационных технологий,
начальник Управления

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»

Защита состоится «26» октября 2020 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.063.05 на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, пр-т Шереметевский, д. 7, ауд. Г-205.

Тел.: (4932) 32-54-33, факс: (4932) 32-54-33, e-mail: dissovet@isuct.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного химико-технологического университета по адресу 153000, г. Иваново, пр-т Шереметевский, д.10 и на официальном сайте университета www.isuct.ru по ссылке: https://www.isuct.ru/sites/default/files/department/ighu/dissertacionnye-sovety/files/domnina_kseniya_leonidovna-06032020/dissertaciya_domnina.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.212.063.05
д.ф.-м.н., профессор

Зуева Галина Альбертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема энергосбережения в строительстве определяет интенсивное развитие направления по созданию и производству эффективных недорогих композитных материалов с требуемыми теплофизическими характеристиками, к которым относится пенобетон неавтоклавного твердения. Производственный процесс получения неавтоклавных пенобетонов является сложным и многофакторным, имеющим иерархическую структуру, состоящую из множества операций, на каждой из которых решается своя конкретная элементарная задача. Последовательное и точное выполнение операций обеспечивает идентичность показателей качества получаемого пенобетонного изделия, а изменение любого элемента процесса влечет за собой изменение эксплуатационных свойств готового продукта. Следовательно, очень важно разработать такую технологию, которая позволит получать изделия с заданными свойствами.

Но на практике производственный процесс не всегда поддается контролю и регулированию ввиду наличия большого количества технологических факторов, влияющих на ход процесса. Частично эта проблема решается построением математических моделей эксплуатационных и технико-экономических показателей в виде физико-механических взаимозависимостей от значений параметров технологического процесса изготовления и факторов эксплуатации. Существующие математические модели, являясь решением частных случаев, не позволяют охватить всю динамику процесса производства пенобетона и получить изделия с требуемыми показателями свойств.

Процесс получения неавтоклавных пенобетонов необходимо представить в виде сложной производственной системы, а ее исследование проводить с помощью методов системного анализа, позволяющих выявлять связи и закономерности функционирования и развития таких систем, и многофакторного подхода. Это дает возможность формализовать математическую модель процесса, близкую к реальности, провести огромное число расчетных экспериментов, оценить ожидаемые результаты изменения состояния материала и выбрать теоретически оптимальное решение задачи получения требуемого по свойствам пенобетона.

Степень разработанности темы. Основы системного подхода при анализе и проектировании технологических процессов получения бетонов заложены в работах отечественных и зарубежных ученых: В.В. Кафарова, Ю.М. Баженова, И.Л. Чулковой, Т.А. Саньковой, И.А. Гарькиной, А.М. Данилова, Е.В. Королева, М.В. Малькова, Н.П. Бусленко, Ф.Ш. Файнера, Hein Htet Aung, Myo Lin Aung и др.

Системно-структурный подход для исследования пенобетонных систем, предложенный Л.Д. Шаховой, заключается в идентификации пенобетона как технической системы и построении иерархии системно-структурных уровней и их взаимосвязей. В исследованиях Л.И. Дворкина, О.Л. Дворкина для оптимизации технологических процессов используются многофакторные математические модели. Однако основное внимание в них уделяется отдельным стадиям технологического процесса: подбору состава и структурообразованию как ключевой стадии производства неавтоклавного пенобетона.

Таким образом, в диссертационной работе сделана попытка создать единый подход к оптимизации технологических процессов получения неавтоклавных пенобетонов одновременно по всему комплексу ситуаций, по технологическому оборудованию и по конкретным требованиям к готовой продукции.

Объектом исследования является производственный процесс получения теплоизоляционно-конструкционных неавтоклавных пенобетонов.

Предмет исследования – математические модели технологических процессов получения пенобетонов неавтоклавного твердения.

Целью диссертационной работы является разработка оптимального технологического процесса получения неавтоклавных теплоизоляционно-конструкционных пенобетонов с учетом кинетики тепловыделения.

В соответствии с целью были формализованы следующие **задачи исследования**:

1. Определить особенности технологии получения теплоизоляционно-конструкционного неавтоклавного пенобетона на всех этапах производственного процесса.
2. Провести анализ составляющих процесса получения неавтоклавных пенобетонов как сложной производственной системы с целью выявления входных факторов, управляющих воздействий и выходных параметров.
3. Построить математическую модель процесса получения неавтоклавных пенобетонов с заданным комплексом эксплуатационных свойств, удовлетворяющим требования заказчика.
4. Разработать методику уточнения математической модели технологического процесса на базе расчетного эксперимента.
5. Провести оценку оптимальных условий проведения производственного процесса по предложенной математической модели технологического процесса получения теплоизоляционно-конструкционных пенобетонов неавтоклавного твердения с заданными свойствами.

Научная новизна.

1. Определены структурная и функциональная схемы производственной системы «Процесс получения теплоизоляционно-конструкционного пенобетона неавтоклавного твердения», выявлены связи между ее подсистемами и элементами. В пределах каждой выделенной технологической подсистемы определены входные, выходные факторы и управляющие воздействия, позволяющие находить оптимальное соотношение параметров для получения качественных пенобетонных изделий.
2. Формализован метод решения многокритериальной задачи получения пенобетонов с заданным комплексом эксплуатационных свойств для каждой подсистемы процесса. Построен общий алгоритм решения, базирующийся на использовании лексикографического метода.
3. Построена математическая модель зависимости критериев (свойств готового пенобетонного изделия) от выбранных технологических факторов в отдельности и совместно. Выбрана схема компромисса между критериями оптимальности с использованием ранга каждого из них.
4. На базе системного подхода предложено математическое описание кинетики тепловыделения реакции гидратации в процессе твердения в рамках технологического процесса получения пенобетонов. Полученные уравнения позволяют рассчитать распределение температур по всему объему пенобетонного образца и объемную плотность источника тепловыделения в любой его точке.
5. Разработан алгоритм поиска оптимальных значений выходных параметров производственного процесса и реализован в виде программы для ЭВМ «Модуль расчета параметров ТП».

Теоретическая и практическая значимость работы. Методология многофакторного подхода и методы многокритериальной оптимизации применены впервые для разработки математических моделей технологического процесса получения пенобетонов. Это позволило построить новый метод формализации оптимального технологического процесса с применением расчетного эксперимента, значительно сокращающего поиски оптимального решения задачи.

Разработанные математические модели, программа для ЭВМ и решение на их основе проектных задач применялись на предприятии ООО «Воткинский бетонный завод» (Удмуртская Республика), что позволило значительно сократить время выбора из множества альтернатив и время построения производственного процесса получения теплоизоляционно-конструкционного

пенобетона и при необходимости проводить его корректировку в зависимости от требований заказчика.

Научные и практические результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе ВФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» для подготовки бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по дисциплинам «Система автоматизированного проектирования в строительстве», «Электронные вычислительные машины в расчетах строительных конструкций» и «Организация, планирование и управление в строительстве».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: математическое моделирование, методы системного анализа, многокритериальной оптимизации, математической статистики и априорного ранжирования.

На защиту выносятся:

1. Метод выбора критериев оптимальности и подход оценки влияния факторов на результат производственного процесса получения пенобетонов.
2. Применение методов системного анализа и многокритериальной оптимизации для математического моделирования с целью построения оптимального технологического процесса.
3. Результаты математического моделирования для нахождения режимов оптимального технологического процесса получения неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами.
4. Математическое описание кинетики тепловыделения реакции гидратации в процессе твердения пенобетонов.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования и совпадением расчетных и экспериментальных значений показателей эксплуатационных свойств.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса» (г. Ижевск, 2015, 2016); Международной научно-практической конференции «Статистика и бизнес-аналитика: через знания, интерес и ответственность к развитию информационного общества» (г. Саранск, 2016); II межрегиональной научно-практической конференции «Социально-экономическое развитие моногородов: традиции инновации» (г. Воткинск, 2017); IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Молодежь. Наука. Современность» (г. Воткинск, 2017); XXV Республиканской выставки-сессии инновационных проектов «Выставка инноваций-2018 (весенняя сессия)» (г. Ижевск, 2018).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 печатных работах, в том числе, 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий (в том числе, 2 статьи в журналах, индексируемых в международной базе Scopus); 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 183 наименования, и 8 приложений. Основное содержание диссертации изложено на 145 стр., включая 37 рисунков, 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, а также, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены теоретические положения развития и современного состояния технологии неавтоклавных пенобетонов.

Вопросы технологии пенобетона нашли отражение в работах А.А. Ахундова, Ю.М. Баженова, Е.Г. Величко, Н.А. Машкина, В.Н. Моргун, Л.В. Моргун, А.В. Хитрова, В.Д. Черкасова, Л.Д. Шаховой, Е.М. Чернышова и др.

Проведен анализ производственного процесса, в результате которого установлено, что процесс получения пенобетонов является сложным, многостадийным и многофакторным, состоящим из множества элементарных операций и переделов. Изменение любого элемента процесса влечет за собой изменение эксплуатационных свойств готового продукта, что делает получение пенобетонных изделий с заданными свойствами проблематичным. Особенности производственного процесса получения неавтоклавных пенобетонов требуют рассмотрения процесса декомпозиционно, применяя методы системного анализа, многофакторный подход и математическое моделирование. Основы теории системного подхода разработаны В.С. Анфилатовым, Л. Берталанфи, И.В. Блаубергом, А.А. Гухман, В.А. Карташевым, В.В. Кафаровым, Э. Квейд, М. Месарович, Ф.И. Перегудовым, И.Р. Пригожиным и др. Рассмотрение производственного процесса как системы позволит определить важнейшие факторы, которые влияют на эксплуатационные свойства пенобетона, и построить математическую модель оптимального технологического процесса получения пенобетонов с заданными свойствами.

Рассмотрено влияние гидратации вяжущего на процессы твердения в пенобетоне и итоговое качество получаемых изделий. Механизм реакции гидратации и скорость ее протекания изменяются во времени, о чем можно судить по кинетике тепловыделения процесса. Но существующие эмпирические формулы не описывают взаимосвязи тепловыделения, факторов и эксплуатационных свойств материала. Предполагается, что формализация условия влияния реакции гидратации на факторы технологического процесса будет являться требованием совместности всех математических закономерностей, но уже с учетом влияния реакции гидратации.

Во **второй главе** диссертации приведены характеристики применяемых материалов, используемые приборы и оборудование, а также методика проведения исследований.

Для получения теплоизоляционно-конструкционных неавтоклавных фибропенобетонов были использованы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108-2016, ГОСТ 30515-2013) производства ОАО «Сухоложскцемент»; кварцевый песок Волковского карьера Удмуртской Республики с модулем крупности 1,8 (ГОСТ 8736-2014); вода для затворения, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011; белковый пенообразователь Foamix C (ASTM 869-80) производства ООО «М-Альянс» (г. Москва).

При проведении исследований использовались стандартные методы испытаний, описанные в нормативно-технической документации. Экспериментальные исследования пенобетона проводились в лабораториях кафедры «Строительные материалы, механизация и геотехника» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»), лабораториях АО «Воткинский завод» и ООО «Воткинский бетонный завод».

Пенобетонная смесь готовилась по классической технологии. Прочность на сжатие пенобетонных образцов определялась на разрывной машине ИР 5145-500. Коэффициент теплопроводности определялся с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4. Исследование кинетики тепловыделения при гидратации цемента пенобетона проведено путем регистрации температурных изменений с помощью регулятора температуры ОВЕН МПР51-Ц4. Сигнал поступал от датчиков термосопротивления, установленных в центре и с краю массива.

В **третьей главе** построены структурная и функциональная схемы сложной производственной системы «Процесс получения теплоизоляционно-конструкционного пенобетона неавтоклавного твердения» и выявлены связи между ее подсистемами и элементами.

Процесс производства пенобетонов состоит из взаимосвязанных операций, на развитие которых оказывают влияние параметры окружающей среды, возможности оборудования, а также управляющие воздействия, которые совместно составляют сложную производственную систему (рис. 1).

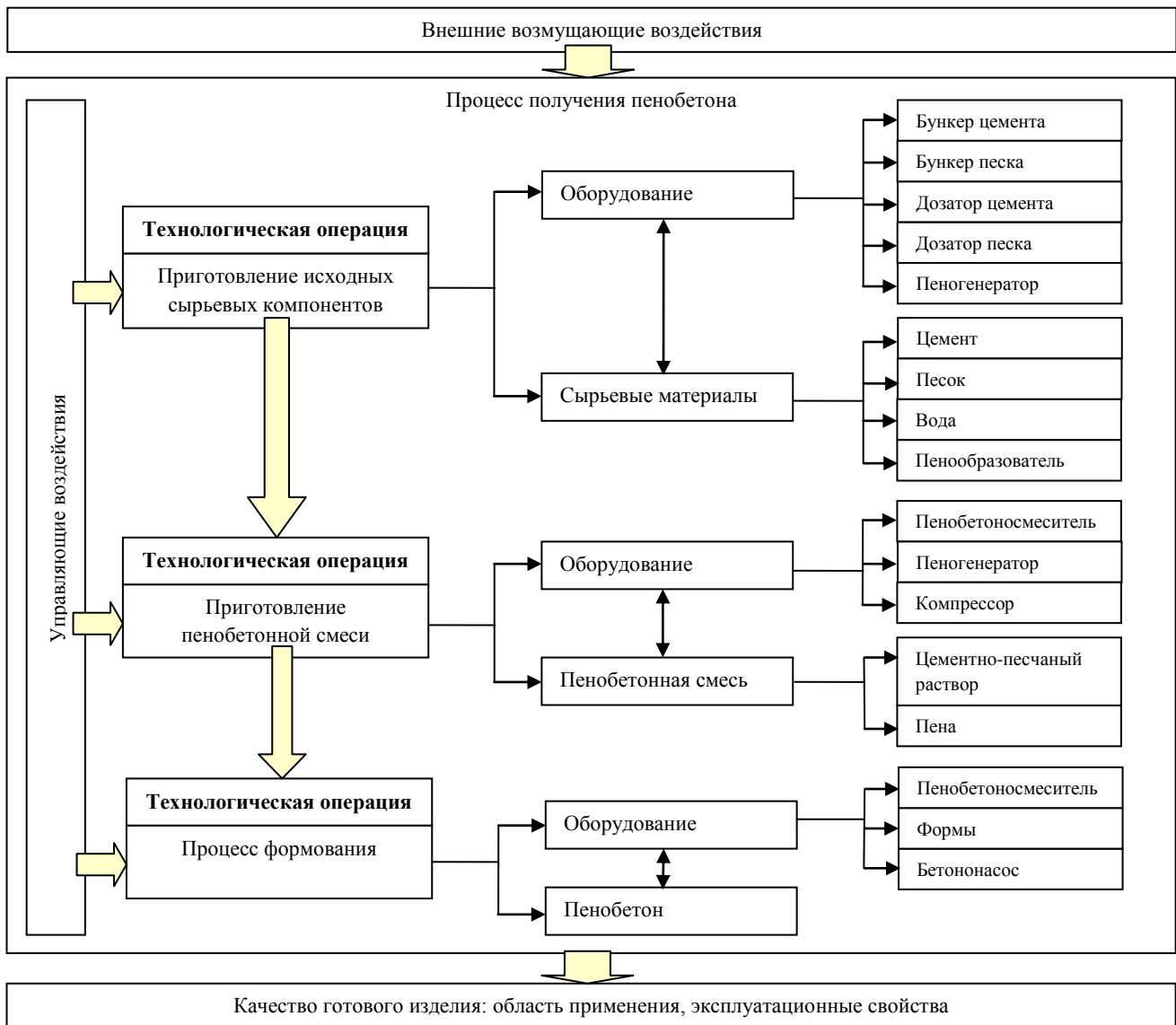


Рисунок 1 – Структурная схема сложной производственной системы «процесс получения пенобетона»

Элементами данной производственной системы являются подсистемы «приготовление исходных сырьевых компонентов», «приготовление пенобетонной смеси» и «процесс формования», связанные между собой функциональными зависимостями и связями (рис. 2).

Декомпозиция производственной системы позволила в пределах каждой выделенной подсистемы определить входные, выходные факторы и управляющие воздействия, построить принципиальную схему взаимного влияния параметров на различных стадиях производственного процесса, упорядоченных в строгую систему по времени (рис. 3), и формализовать общий алгоритм решения многокритериальной задачи получения неавтоклавных пенобетонов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

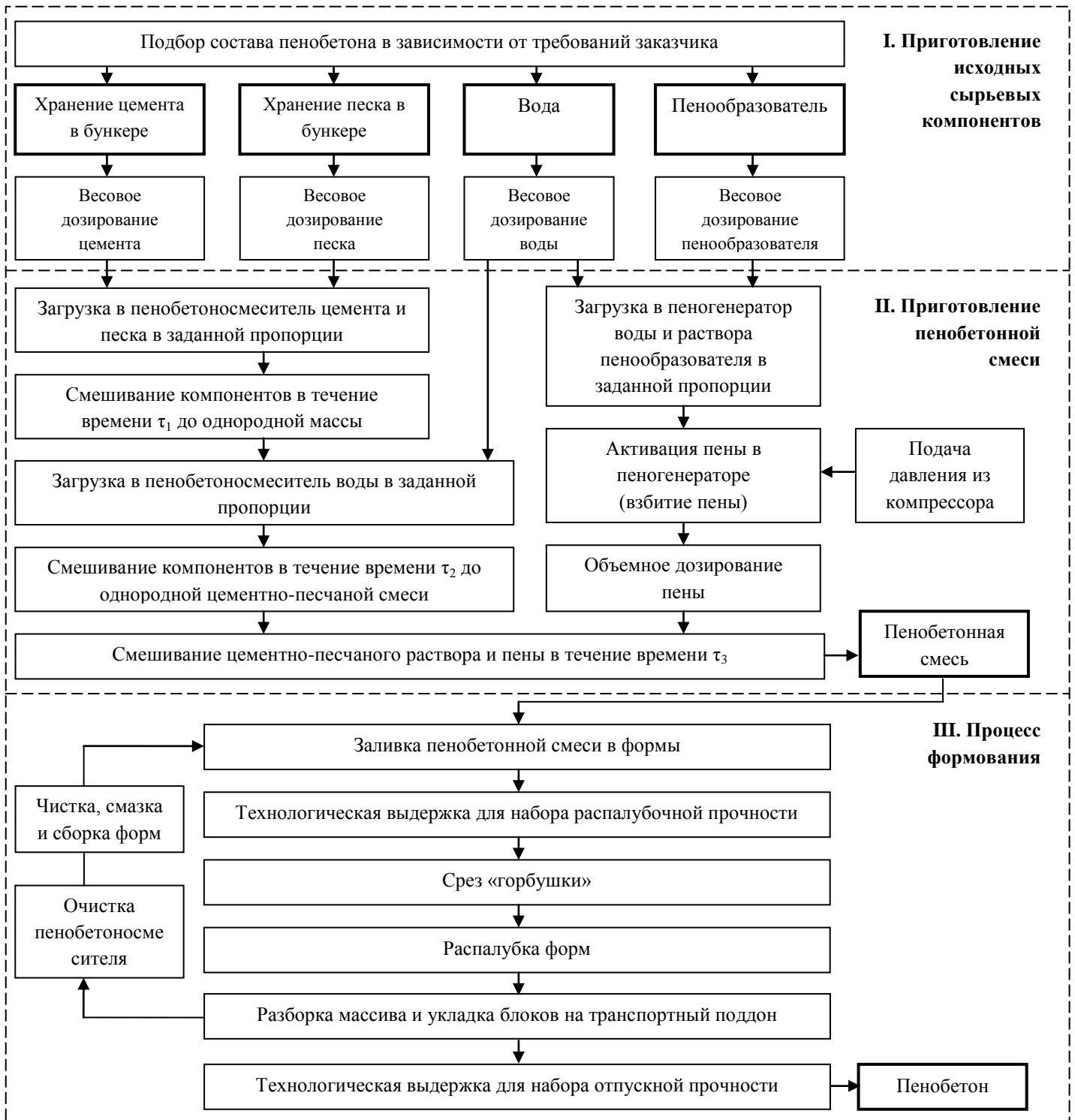


Рисунок 2 – Функциональная схема сложной производственной системы «процесс получения пенобетона»

Это означает, что для построения оптимального технологического процесса получения пенобетонов необходимо:

1. Выбрать конкретный набор k управляемых факторов x_k , влияющих на критерии оптимальности y_n согласно требованиям заказчика:

$$x_k \in [x_1, \dots, x_i]; k \in [1; i] \quad (1)$$

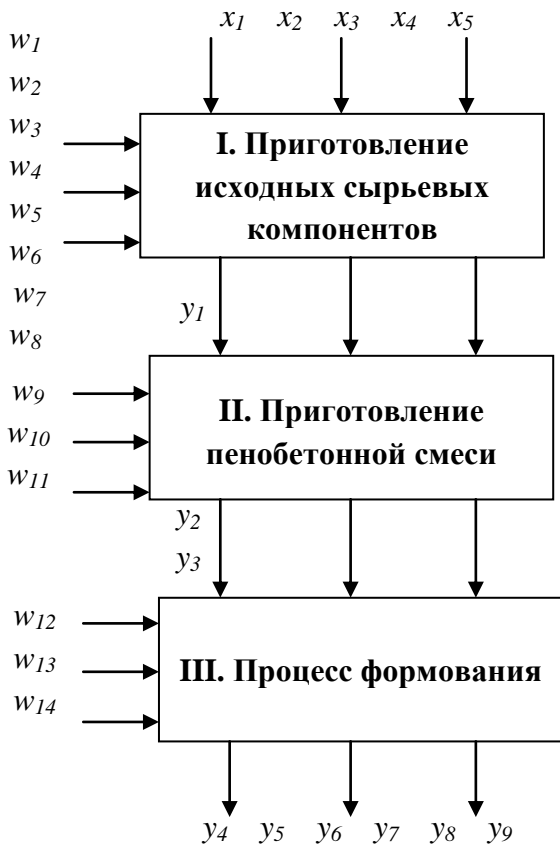


Рисунок 3 – Взаимное влияние параметров на различных стадиях технологического процесса производства неавтоклавного пенобетона:

x_1-x_5 – входные факторы;
 w_1-w_{14} – управляющие воздействия;
 y_1-y_9 – выходные параметры (критерии оптимальности)

Для получения пенобетонных изделий с требуемым качеством с требуемыми качественными показателями необходимо построить количественные зависимости, характеризующие влияние факторов на критерии оптимальности. Для этих целей формализован метод выбора критериев оптимальности в рамках построения оптимального технологического процесса получения пенобетонных изделий:

1. В результате реального эксперимента получают статистические данные, по которым находят аналитические зависимости:

$$y_n = y_n(x_k); k \in [1; i]; n \in [1; j]; \quad (6)$$

$$y_n(x_k) = y_n(y_j(x_k)); n \in [1; q]; j \in [1; q]; n \neq j. \quad (7)$$

Если все показатели y_n заданы заказчиком, то они определяют и все значения x_k для себя.

2. Проводится поиск компромисса между критериями: т.е. определяется область допустимых значений. Зона допустимых значений для каждого y_n определяется заказчиком в виде:

$$\theta_n = [y_{n_{\min}}; y_{n_{\max}}] \text{ или } y_{n_{\min}} \leq \theta_n \leq y_{n_{\max}}. \quad (8)$$

Компромисс в решении поставленной задачи возможен при нахождении наиболее зависимого показателя y_n . Выбирается самый деформируемый промежуток θ_n : для каждого в отдельности x_k задают значения $x_k = x_{k0} \pm \Delta x_k$, где x_{k0} – натуральное значение основного уровня k -того фактора, Δx_k – шаг

и построить зависимость:

$$y_n(x_1, x_2, \dots, x_k) = y_n \quad (2)$$

или взаимозависимости факторов в виде:

$$x_1 = y_0(x_2). \quad (3)$$

2. Выбрать систему нормализации единиц измерения факторов с целью приведения к единому измерению.

3. Построить функциональные зависимости для факторов управления:

$$y_n(x_k) = y_n(y_j(x_k)); \quad (4)$$

$$n \in [1; q]; j \in [1; q]; n \neq j.$$

4. Формализовать или принять к исполнению граничные условия и для факторов $a_k \leq x_k \leq b_k; k \in [1; i]$, и для области допустимых решений задачи заказчика $c_n \leq y_n \leq d_n; n \in [1; q]$.

5. Назначить цели – построить целевые функции с формализацией их зависимости от выбранных управляемых факторов:

$$\left. \begin{aligned} F_l &\rightarrow \max, l \in [1, q]; \\ F_r &\rightarrow \min, r \in [1, q]; \\ l &\neq r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Четвертая глава посвящена разработке математической модели оптимального технологического процесса получения неавтоклавных пенобетонных изделий с заданными свойствами.

изменения (интервал варьирования) k -того фактора, и по (6) находят все значения y_n . Затем определяются скорости изменения каждого y_n вправо и влево от x_k :

$$V_{П}(y_n) = \frac{y_n(x_k + \Delta x_k) - y_n}{y_n(x_k)}; \quad (9)$$

$$V_{Л}(y_n) = \frac{y_n(x_k - \Delta x_k) - y_n}{y_n(x_k)}. \quad (10)$$

Самая деформируемая θ_n та, где значение $V_{П}$ или $V_{Л}$ максимально. Такой показатель y_n самый опасный, и он в первую очередь требует проверки: хватит ли компромиссной уступки. Если уступки не хватает, необходимо найти новые условия для исправления y_n , т.е. построить новые зависимости (6) показателей y_n от ранее не учтенных факторов x_k , важностью которых пренебрегали. Т.е. еще какой-то новый фактор необходимо вводить в ряд $x_k \in [x_1, \dots, x_i, x_{\text{новый}}]$ и заново формализовать все соотношения (6)-(10).

В случае установления компромисса и определения всех x_k для заказчика определяется область применения каждого из факторов. В этом случае скорость изменения $V_{П}$ и $V_{Л}$ позволяет исчерпать компромисс (8) без ущерба для остальных y_n .

В качестве основного критерия оптимальности принят показатель прочности на сжатие пенобетона в 28-суточном возрасте. Дополнительным критерием оптимизации принят показатель коэффициента теплопроводности.

Обоснование выбора управляющих факторов осуществлялось с использованием методов экспертных оценок и априорного ранжирования факторов. Для принятия коллективного решения были сформированы опросные листы, содержащие мнение пяти экспертов. По результатам ранжирования факторов, построения диаграммы рангов и ее анализа были отброшены факторы, слабо влияющие на процесс, и оставлены только четыре: соотношение между песком и портландцементом (П/Ц), водотвердое отношение (В/Т), расход пенообразователя (Д, %), время цикла смешивания пенобетонной смеси (τ , мин.). Эти факторы были приняты для построения математической модели оптимального технологического процесса получения пенобетонов.

Факторы, влияющие на выбранные критерии оптимальности, отражаются на интенсивности твердения и тепловыделении пенобетона. Для описания кинетики тепловыделения реакции гидратации приготавливалась пенобетонная смесь средней плотности 600 кг/м^3 и формовались массивы-кубы размерами $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ в теплоизолированных формах. Регистрация температур велась с помощью датчиков термосопротивления в центре и с краю массивов в течение 3 суток.

В пенобетонном массиве наблюдается активный рост температур, начиная с первых часов твердения (рис. 4). На 16 час твердения температуры в центре и с краю массивов достигают максимальных значений, равных $34,6^\circ\text{C}$ и $31,6^\circ\text{C}$ соответственно. После достижения экстремальных значений температуры снижаются более плавно, асимптотически приближаясь к значению окружающей среды.

Анализ полученных кривых показал, что их можно описать с помощью систем уравнений в виде полиномов 5-й степени:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{центр}1} &= 2,239\tau - 1,135\tau^2 + 0,2106\tau^3 - 0,015\tau^4 + (36,62 \cdot 10^{-5})\tau^5 + 25,8; \quad \tau \in [0;16] \\ t_{\text{центр}2} &= 0,552\tau - (69,74 \cdot 10^{-3})\tau^2 + (2,23 \cdot 10^{-3})\tau^3 - (30,04 \cdot 10^{-6})\tau^4 + (14,76 \cdot 10^{-8})\tau^5 + \\ &+ 36,31; \quad \tau \in [16;72]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{край}1} &= 1,759\tau - 0,9086\tau^2 + 0,1595\tau^3 - 0,01081\tau^4 + (25,31 \cdot 10^{-5})\tau^5 + 25,8; \quad \tau \in [0;16] \\ t_{\text{край}2} &= 1,405\tau - 0,109\tau^2 + (3,17 \cdot 10^{-3})\tau^3 - (41,13 \cdot 10^{-6})\tau^4 + (19,85 \cdot 10^{-8})\tau^5 + 26,59; \\ \tau &\in [16;72]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где t – температура; τ – время, час.

На основании полученных систем уравнений получаем вид кривых тепловыделения твердеющих пенобетонных массивов (рис. 4). Точками обозначены показатели температур, полученные экспериментально.

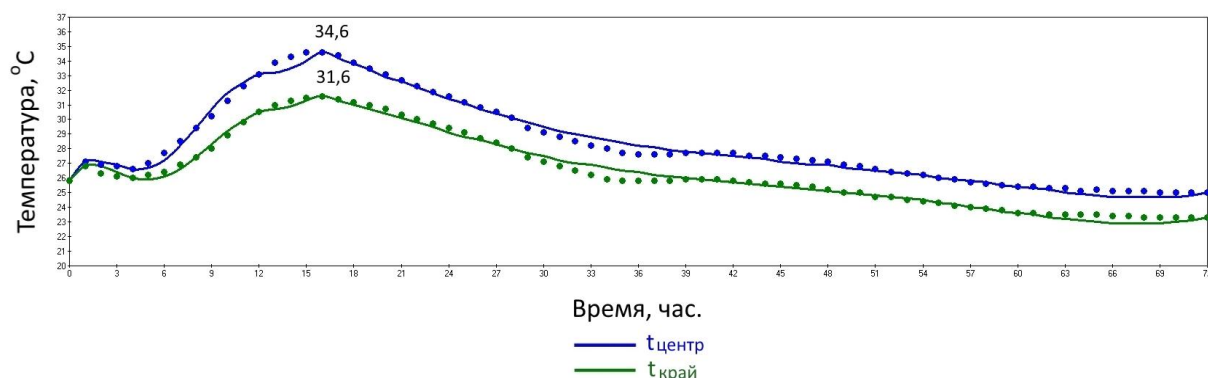


Рисунок 4 – Экспериментальные и расчетные кривые тепловыделения твердеющих пенобетонных массивов размерами 100x100x100 мм: $t_{центр}$ – температура в центре массива, °С; $t_{край}$ – температура с краю массива, °С.

Теоретической основой для изучения и моделирования тепловых процессов гидратационного твердения является нелинейное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с источником, распределённым по координатному пространству и времени:

$$\rho(u,t) \cdot c(u,t) \frac{\partial t(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \lambda(u,t) \cdot \nabla^2 t(x,y,z,\tau) + q_v(x,y,z,\tau), \quad (13)$$

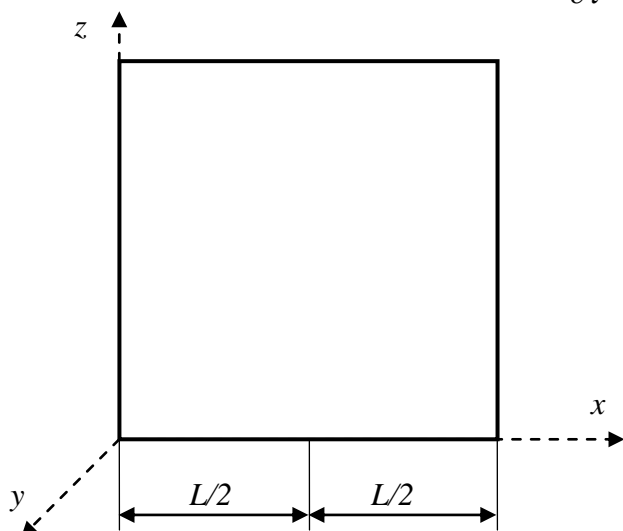
где $\rho(u,t)$, $c(u,t)$, $\lambda(u,t)$ – плотность, кг/м³, теплоемкость, Дж/К, теплопроводность, Вт/(м·К), в общем случае зависящие от влагосодержания u и температуры t ; $q_v(x,y,z,\tau)$ – объемная плотность источника теплоты гидратации, Вт/м³; t – температура, °С; τ – время, час.; x, y, z – текущие координаты по размерам пенобетонного блока, м.

Уравнение (13) представляется в виде:

$$\rho c \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right] + q_v(\tau). \quad (14)$$

Из (14) выражается $q_v(\tau)$:

$$q_v(\tau) = \rho c \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right]. \quad (15)$$



Процесс тепловыделения по всем направлениям (осям x, y, z) в блоке подобен (рис. 5). Поэтому целесообразно рассмотреть теплоперенос вдоль одной оси x : $0 \leq x \leq L$, $L = 0,1$ м.

Распределение температур вдоль оси x можно найти из их сравнения в одно и то же время на границах и в центре блока:

$$\left. \begin{aligned} t(\tau, x=0) &= t_{край}(\tau) \\ t(\tau, x=L/2) &= t_{центр}(\tau) \\ t(\tau, x=L) &= t_{край}(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Рисунок 5 – Схема пенобетонного блока размером: $L = 100$ мм – ширина пенобетонного блока

Эксперименты показали, что динамика полей температур в процессе твердения подчиняется параболическому закону:

$$t(x, \tau) = ax^2 + bx + c, \quad (17)$$

где a, b, c – эмпирические размерные коэффициенты.

Подставляя граничные условия (16) в уравнение (17), получается зависимость температуры в блоке от времени и координаты в общем виде:

$$t(x, \tau) = 40x^2(t_{\text{центр}}(\tau) - t_{\text{край}}(\tau)) - 4x(t_{\text{центр}}(\tau) - t_{\text{край}}(\tau)) + t_{\text{край}}(\tau). \quad (18)$$

Тогда элементы уравнения (15) будут представлены в виде:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = 40x^2 \left(\frac{\partial t_{\text{центр}}(\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau} \right) - 4x \left(\frac{\partial t_{\text{центр}}(\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau} \right) + \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \{ \lambda(t) \cdot [80x(t_{\text{центр}}(\tau) - t_{\text{край}}(\tau))] - 4[t_{\text{центр}}(\tau) - t_{\text{край}}(\tau)] \}. \quad (20)$$

В итоге, уравнение (15) можно записать в виде:

$$q_v(\tau) = \rho c \left[40x^2 \left(\frac{\partial t_{\text{центр}}(\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau} \right) - 4x \left(\frac{\partial t_{\text{центр}}(\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau} \right) + \frac{\partial t_{\text{край}}(\tau)}{\partial \tau} \right] - [\lambda(t) \cdot 80(t_{\text{центр}}(\tau) - t_{\text{край}}(\tau))]. \quad (21)$$

Решая уравнение (21), получаем математическую модель кинетики тепловыделения реакции гидратации по всему объему пенобетонного образца в любой его точке. Это позволит определить ход процесса и, соответственно, распределение температур в каждой точке объема блока. На рисунке 6 представлены результаты расчета объемной плотности источника тепловыделения в пенобетонном массиве.

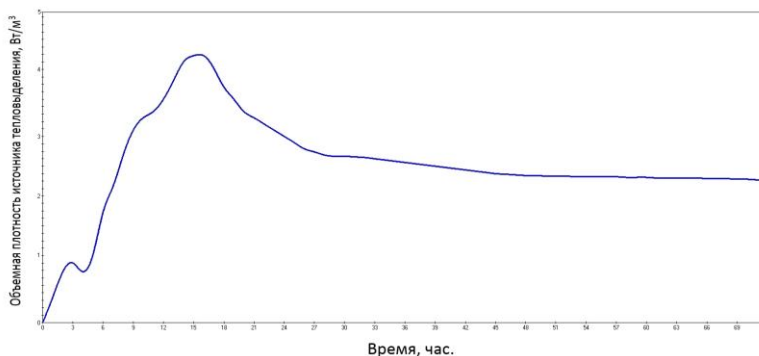


Рисунок 6 – Расчетная объемная плотность источника тепловыделения пенобетонных массивов размерами 100x100x100 мм

Построение математической модели оптимального технологического процесса получения неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами осуществлялось с помощью методов планирования экспериментов. Исходные значения факторов и интервалы их варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные значения факторов и интервалы варьирования

Фактор, x_k	Уровни факторов			Интервал варьирования, Δx_k
	$x_k = -1$	$x_k = 0$	$x_k = +1$	
П/Ц, x_1	0,5	0,8	1,1	0,3
В/Т, x_2	0,25	0,30	0,35	0,05
Д, x_3	0,8	1,0	1,2	0,2
$\tau_{\text{см}}$, x_4	2	3	4	1

В результате проведения промышленного эксперимента и обработки статистических данных получены целевые функции в виде многочленов, описывающие изменение критериев оптимальности от выбранных факторов:

$$\left. \begin{aligned} y_1(x_k) &= -46,875x_1x_2x_3x_4 + 159,58x_1x_2x_3 + 44,917x_1x_2x_4 + 15,26x_1x_3x_4 + \\ &+ 54,58x_2x_3x_4 - 129,67x_1x_2 - 47,73x_1x_3 - 15,288x_1x_4 - 128,792x_2x_3 - 32,36x_2x_4 - \\ &- 13,56x_3x_4 + 39,72x_1 + 76,43x_2 + 38,47x_3 + 11,204x_4 - 20,49; \\ y_2(x_k) &= -0,125x_1x_2x_3x_4 - 1x_1x_2x_3 + 0,483x_1x_2x_4 + 0,077x_1x_3x_4 + 0,375x_2x_3x_4 - \\ &- 0,3x_1x_2 + 0,304x_1x_3 - 0,172x_1x_4 + 0,2x_2x_3 - 0,687x_2x_4 - 0,132x_3x_4 + 0,067x_1 + \\ &+ 0,69x_2 - 0,12x_3 + 0,223x_4 - 0,009. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где y_1 – прочность на сжатие, МПа; y_2 – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; x_1 – соотношение между портландцементом и песком П/Ц; x_2 – водотвердое отношение В/Т; x_3 – расход пенообразователя Д, % от массы портландцемента; x_4 – время цикла смешивания $\tau_{см}$, мин.

Функции y_1 и y_2 из (22) зависят от каждого x_k линейно (при остальных постоянных):

$$\left. \begin{aligned} y_{1k} &= A_{0k_i}x_k + A_{0k_i}, \\ y_{2k} &= C_{0k_i}x_k + C_{0k_i}, \\ i &\in [1;8], k \in [1;4]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Установлено, что при необходимости можно корректировать значения критериев оптимальности под требования заказчиков: задавая $y_{1зак}$ и $y_{2зак}$, для каждого x_k можем найти необходимые значения, причем границы области их задания принимаем по таблице 1:

$$\left. \begin{aligned} y_{1зак} &= A_{0k_i}x_k + B_{0k_i}, \\ y_{2зак} &= C_{0k_i}x_k + D_{0k_i}, \\ i &\in [1;8], k \in [1;4]. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Значения коэффициентов A_{0k_i} и B_{0k_i} и C_{0k_i} и D_{0k_i} просчитываются для конкретной технологии получения неавтоклавного пенобетона на предприятии согласно полученным экспериментальным данным.

Полученные уравнения (22)-(24) описывают процесс нахождения экстремальных значений критериев оптимальностей или значений, заданных заказчиком. Но итоговое решение может не всегда удовлетворять заказчика. В этом случае необходимо применить метод компромисса. Тогда комплексная целевая функция для поиска оптимальных значений критериев сводится к:

$$\begin{aligned} y_{компл}(x_k) &= \frac{y_1(x_k)}{y_2(x_k)} \rightarrow \max, \\ y_1 &\rightarrow \max, \quad y_2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (25)$$

и является компромиссной.

Если реального решения не существует, необходимо выбрать наиважнейший показатель качества и определить компромисс между заказчиком и предприятием. Чаще всего заказчик дает одинаковый процент потерь для всех критериев, т.е. каждый критерий y_1 и y_2 изменяется на одинаковую долю K :

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{y_{1зак} - y_1(x_{k \max})}{\Delta y_1}, \\ \Delta y_1 &= y_1(x_{k \min}) - y_1(x_{k \max}); \\ K_2 &= \frac{y_2(x_{k \max}) - y_{2зак}}{\Delta y_2}, \\ \Delta y_2 &= y_2(x_{k \max}) - y_2(x_{k \min}), \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где K_1 – уступка по уменьшению критерия y_1 ; K_2 – уступка по увеличению критерия y_2 .

При этом $K_1 = K_2$, т.е. процентные потери критериев $y_{1зак}$ и $y_{2зак}$ должны быть одинаковые:

$$\left. \begin{aligned} y_{1зак}^{ycm} &= y_{1зак} - K_1 \cdot \frac{y_{1зак}}{100} = A_{0k_i} \cdot x_{k_0} + B_{0k_i} \\ y_{2зак}^{ycm} &= y_{2зак} - K_1 \cdot \frac{y_{2зак}}{100} = C_{0k_i} \cdot x_{k_0} + D_{0k_i} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Уступка согласуется с заказчиком. Если она его удовлетворяет, то технологический процесс построен. Такое решение, как правило, существует и формализовано в виде (28).

$$\left. \begin{aligned} y_{компл}(x_k) &= \frac{y_1(x_k)}{y_2(x_k)} \rightarrow \max \\ y_1(x_k) &= -46,875x_1x_2x_3x_4 + 159,58x_1x_2x_3 + 44,917x_1x_2x_4 + 15,26x_1x_3x_4 + \\ &+ 54,58x_2x_3x_4 - 129,67x_1x_2 - 47,73x_1x_3 - 15,288x_1x_4 - 128,792x_2x_3 - 32,36x_2x_4 - \\ &- 13,56x_3x_4 + 39,72x_1 + 76,43x_2 + 38,47x_3 + 11,204x_4 - 20,49 \\ y_2(x_k) &= -0,125x_1x_2x_3x_4 - 1x_1x_2x_3 + 0,483x_1x_2x_4 + 0,077x_1x_3x_4 + 0,375x_2x_3x_4 - \\ &- 0,3x_1x_2 + 0,304x_1x_3 - 0,172x_1x_4 + 0,2x_2x_3 - 0,687x_2x_4 - 0,132x_3x_4 + 0,067x_1 + \\ &+ 0,69x_2 - 0,12x_3 + 0,223x_4 - 0,009 \\ y_1(x_k) &\geq y_{1зак} \cdot (1 - K_1) \geq y_{1\max} \\ y_2(x_k) &\geq y_{2зак} \cdot (1 + K_2) \geq y_{2\min} \\ y_{1k} &= A_{0k_i}x_k + A_{0k_i}, \quad i \in [1; 8], k \in [1; 4] \\ y_{1зак} &= A_{0k_i}x_k + B_{0k_i}, \quad i \in [1; 8], k \in [1; 4] \\ y_{2k} &= C_{0k_i}x_k + C_{0k_i}, \quad i \in [1; 8], k \in [1; 4] \\ y_{2зак} &= C_{0k_i}x_k + D_{0k_i}, \quad i \in [1; 8], k \in [1; 4] \\ 0,5 &\leq x_1 \leq 1,1 \\ 0,25 &\leq x_2 \leq 0,35 \\ 0,8 &\leq x_3 \leq 1,2 \\ 2 &\leq x_4 \leq 4 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Пятая глава посвящена реализации результатов работы в промышленных условиях. Разработана и апробирована на предприятии ООО «Воткинский бетонный завод» (Удмуртская Республика) программа для ЭВМ «Модуль расчета параметров ТП» по решению обратной задачи получения теплоизоляционно-конструкционных пенобетонов с заданными эксплуатационными свойствами, позволяя на основании требований заказчика построить варианты технологического процесса.

Реальный эксперимент показал точность совпадения показателей эксплуатационных свойств с расчетными значениями по разработанной программе в пределах 2-5%, и, следовательно, адекватность формализованной математической модели. Это приемлемо для предприятия-производителя пенобетона и заказчиков.

В случае отступления от точности совпадения на каком-либо этапе производственного процесса возможность его корректировки обеспечена математической моделью и созданным программным продуктом.

Предлагаемый подход позволяет предприятию значительно сократить время выбора из множества альтернатив и построения технологического процесса получения теплоизоляционно-конструкционного пенобетона. По совокупности полученных результатов можно утверждать о высокой эффективности предложенного подхода, реализованного в программном продукте «Модуль расчета параметров ТП».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ производственного процесса получения теплоизоляционно-конструкционных пенобетонов неавтоклавного твердения. Установлено, что для получения изделий с заданными свойствами необходимо построить многофакторную математическую модель процесса, близкую к реальности, которая должна включать в себя взаимосвязности критериев качества от технологических и структурных факторов. Предложена структурная и функциональная схемы производственной системы «Процесс получения теплоизоляционно-конструкционного пенобетона неавтоклавного твердения», выявлены связи между ее подсистемами и элементами.

2. Предложен метод выбора критериев оптимальности, базирующийся на использовании лексикографического метода, и подход к оценке влияния факторов на результат производственного процесса получения пенобетонов. В качестве основного критерия оптимизации принят показатель прочности на сжатие пенобетона в 28-суточном возрасте. Дополнительным критерием оптимизации принят показатель коэффициента теплопроводности. Обоснование выбора управляющих факторов производилось на основе метода априорного ранжирования факторов и подтвердилось полученными экспериментальными данными характера развития процессов тепловыделения в твердеющем пенобетоне в процессе гидратации. Управляющими факторами выбраны соотношение между массовыми количествами песка и портландцемента (П/Ц), водотвердое отношение (В/Т), расход пенообразователя (Д) и время цикла смешивания пенобетонной смеси ($\tau_{см}$). Выбранные критерии и факторы позволяют однозначно определить параметры производственного процесса для получения продукции требуемого качества и сориентировать его под выбранное оборудование. При изменении технологических факторов в соответствующих диапазонах ($0,5 \leq \text{П/Ц} \leq 1,1$; $0,25 \leq \text{В/Т} \leq 0,35$; $0,8 \leq \text{Д} \leq 1,2$; $2 \leq \tau_{см} \leq 4$) показатель прочности на сжатие увеличивается на 26% при одновременном снижении коэффициента теплопроводности на 12% по сравнению с нормативными значениями.

3. Разработанная математическая модель технологического процесса получения неавтоклавных пенобетонов позволяет учесть требуемые показатели эксплуатационных свойств при производстве изделий. Выбранная схема компромисса дает возможность корректировать значения критериев оптимальности с учетом мнения заказчика и предприятия. Разработанный на базе системного подхода метод учета тепловыделения реакции гидратации в процессе твердения в рамках технологического процесса получения пенобетонов уточняет влияние управляющих факторов для последующего включения в математическую модель технологического процесса. Формализованный метод определения объемной плотности источника тепловыделения является составной частью метода учета реакции гидратации.

4. Построенная методика уточнения идентификации параметров математических моделей по результатам реального эксперимента позволяет вносить изменения в технологический процесс получения пенобетонов на основании сравнения результатов реального и расчетного экспериментов, тем самым сокращая затраты на переоборудование и перезапуск производства.

5. Разработана и апробирована программа для ЭВМ «Модуль расчета параметров ТП», в которой реализованы разработанные методы и модели для построения вариантов технологического процесса получения пенобетона с заданными показателями свойств. Внедрение разработанного программного продукта позволило значительно сократить время выбора из множества альтернатив и время построения технологического процесса получения теплоизоляционно-конструкционного пенобетона и при необходимости проводить его корректировку в зависимости от требований заказчика к качеству изделий. Брак при производстве пенобетонных изделий был снижен до 4%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в перечень рецензируемых научных изданий

1. Домнина, К.Л. Анализ методов расчета расхода материалов для изготовления пенобетонов неавтоклавного твердения с заданными эксплуатационными показателями / К.Л. Домнина, М.Н. Каракулов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2015. – №3 (67). – С. 45-47. (ВАК)
2. Домнина, К.Л. Основы алгоритма оптимизации структуры теплоизоляционных пористых материалов / К.Л. Домнина, М.Н. Каракулов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2017. – №1. – С. 108-110. (ВАК)
3. Домнина, К.Л. О применении расчетного эксперимента в теории фибропенобетонов / К.Л. Домнина, В.Н. Репко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №10. – С. 90-93. (ВАК)
4. Domnina, K. Mathematical Model for Improvement of Concrete Quality / K. Domnina, E. Pivarčiová // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 952. – P. 356-362. (Scopus)
5. Pivarčiová, E. Interferometric Measurement of Heat Transfer above New Generation Foam Concrete / E. Pivarčiová, P. Božek, K. Domnina, E. Škultéty, S. Fedosov // Measurement Science Review. – 2019. – no. 4. – P. 153-160. (Scopus)

Статьи и тезисы докладов

1. Домнина, К.Л. Выявление и диагностика проблем управления качеством строительных материалов в Удмуртской Республике [Электронный ресурс] / К.Л. Домнина, О.В. Титова // Статистика и бизнес-аналитика: через знания, интерес и ответственность к развитию информационного общества: сб. докл. Международной науч.-прак. конф. в 2 томах, т.2, Саранск, 26-27 февраля 2016 г. / НИУ ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева», Мордовиястат, РАС. – Саранск, 2016 – С. 68-76.
2. Домнина, К.Л. Сравнительный анализ нормативных характеристик для различных изделий из ячеистого бетона / К.Л. Домнина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 20-21 апреля 2016 года / ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Ижевск, 2016. – С. 707-710.
3. Домнина, К.Л. Выбор управляемых параметров процесса получения пенобетонов неавтоклавного твердения определенной структуры / К.Л. Домнина // Приволжский научный вестник. – 2017. – № 3 (67). – С. 18-21.
4. Домнина, К.Л. Многофакторный подход к решению задач определения оптимальных параметров пористых материалов / К.Л. Домнина, В.Н. Репко, И.А. Соломенников // Выставка инноваций-2018 (весенняя сессия): сборник материалов XXV Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – С. 30-35.
5. Domnina, K. The calculated experiment in the theory of fiber foam concrete / K. Domnina, V. Repko // 10th International Technical Conference “Technological Forum 2019”. Czech Technical University in Prague. – 18-20.06.2019. – P. 15-17.
6. Fedosov, S. The construction of the function of the ultimate goal of the technological process of non-autoclaved foam concrete obtaining / S. Fedosov, K. Domnina, E. Pivarčiová // Acta Technologia Slovaca. – 2019. – Vol. 5, Is. 3. – P. 59-62.

Монографии

1. Домнина, К.Л. Проектное управление развитием качества строительных материалов : монография / В.П. Грахов, О.В. Титова, К.Л. Домнина. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2016. – 112 с.: ил. + вкл. 2 с. ISBN 978-5-7526-0737-0.