

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.9.01:620.1

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-21-36

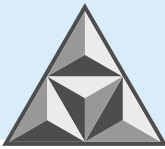
Динамические модели и алгоритмы оптимального управления в технологии строительных материалов

М.О. Баканов

Максим Олегович Баканов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация

mask-13@mail.ru



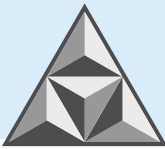
Современное производство строительных материалов сталкивается с вызовом интеграции фундаментальных физико-химических знаний о материале в контуры оперативного автоматизированного управления. Существующий разрыв между статическими лабораторными исследованиями и упрощенными эмпирическими моделями в автоматизации сдерживает переход к парадигме «Строительство 4.0» и интеллектуальному управлению качеством (Quality 4.0). Целью является разработка универсальной методологии управления качеством, объединяющей три ключевых компонента – фундаментальную физико-химическую модель процесса, алгоритм оценки текущего состояния материала по косвенным измерениям и оптимизатор управляющих воздействий. Триада «Модель – Оценка – Управление» позволяет рассматривать технологический процесс как динамическую систему с распределенными параметрами. Представлен математический аппарат, включающий уравнения тепломассопереноса и химической кинетики, а также современные методы оценки состояния материала (фильтры Калмана и фильтр частиц) и алгоритмы оптимального управления, принцип максимума Понтрягина и обучение с подкреплением. Применимость методологии продемонстрирована на примере транспортировки бетонной смеси. Предложенный подход создает основу для создания «умных» производств и цифровых двойников в строительной индустрии.

Ключевые слова: строительные материалы, кинетика твердения, модель предиктивного управления, Industry 4.0, Construction 4.0, фильтр Калмана, цифровой двойник

Для цитирования:

Баканов М.О. Динамические модели и алгоритмы оптимального управления в технологии строительных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 21-36.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-21-36



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-21-36

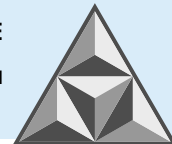
Dynamic models and algorithms for optimal control in building materials technology

M.O. Bakanov

Maksim Olegovich Bakanov

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

mask-13@mail.ru



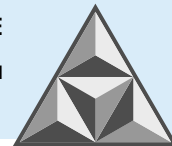
The modern production of building materials has to deal with the challenge of integrating fundamental physical and chemical knowledge of the material into operational automated control systems. The existing gap between static laboratory studies and simplified empirical models in automation is hindering the transition to the 'Construction 4.0' paradigm and intelligent quality management (Quality 4.0). The purpose of this study is to develop a universal quality control methodology that combines three key components, namely a fundamental physico-chemical model of the process, an algorithm for assessing the current state of the material based on indirect measurements, and an optimiser for control actions. The triad, designated as 'Model – Assessment – Control', allows the technological process to be viewed as a dynamic system with distributed parameters. A mathematical framework is presented, comprising heat and mass transfer equations and chemical kinetics, as well as modern state estimation methods (in particular, Kalman filters and particle filters) and optimal control algorithms, the Pontryagin maximum principle and reinforcement learning. The applicability of the methodology is demonstrated using the example of concrete mix transport. The proposed approach provides a basis for the creation of 'smart' manufacturing and digital twins in the construction industry.

Keywords: building materials, hardening kinetics, model predictive control, Industry 4.0, Construction 4.0, Kalman filter, digital twin

For citation:

Bakanov M.O. Dynamic models and algorithms for optimal control in building materials technology // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 2. P. 21-36.
URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-21-36



ВВЕДЕНИЕ

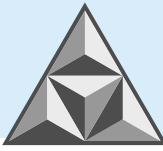
Современное производство строительных материалов представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных физико-химических, механических и технологических процессов. В их число входят подготовка сырья, перемешивание компонентов, формование, структурообразование, уплотнение, тепловая обработка и сушка. При этом важно отметить, что традиционно задачи материаловедения и автоматизации развивались параллельно. Действительно, первое направление сосредоточилось на изучении структуры и свойств материала в статических условиях, то есть на лабораторных образцах. Второе же направление ориентируется на контроль технологических параметров (температура, давление, время) без глубокой связи с внутренними процессами, протекающими в материале [1].

С учетом современных тенденций, текущий этап развития промышленности определяется концепцией «Индустрия 4.0» (*Industry 4.0*), ориентированной на интеграцию киберфизических систем, интернета вещей (*IoT*), искусственного интеллекта и облачных технологий в производственные процессы [2, 3]. Закономерным отражением представленных тенденций в строительной отрасли становится формирование парадигмы «Строительство 4.0» (*Construction 4.0*). Она предполагает создание «умных» производств, цифровых двойников технологических процессов и роботизированных комплексов [4]. При этом ключевым направлением развития признается цифровизация управления качеством (*Quality 4.0*), основанная на непрерывном мониторинге, аналитике данных в реальном времени и прогнозировании свойств готовой продукции [5, 6].

Именно здесь особенно остро проявляется существующий разрыв. Фундаментальные физико-химические модели, описывающие эволюцию структуры и свойств материала, до сих пор слабо интегрированы в контуры оперативного управления технологическими процессами. Поэтому переход к полностью цифровизированному производству строительных материалов затруднен [7, 8].

Анализ литературных источников подтверждает наличие разрыва между детализированными физико-химическими моделями и практическими задачами оперативного управления. К примеру, в [9, 10] представлены фундаментальные исследования кинетики гидратации цемента и теплофизики твердения. Однако они ориентированы сугубо на стационарные условия. С другой стороны, в исследованиях по автоматизации процессов обжига клинкера [11, 12] или сушки керамики [13] часто используют упрощенные эмпирические модели. Последние, хотя и позволяют эффективно обрабатывать возмущения, не учитывают внутреннюю эволюцию свойств материала. Так, в [11] описывается создание советующей системы управления обжигом клинкера на основе статистических методов и передаточных функций. Данный подход обеспечивает стабилизацию процесса, однако не раскрывает связи управляющих параметров с фазовым составом материала.

В связи с этим целью является разработка универсальной методологии управления качеством строительных материалов. Она служит идее объединить три ключевых компонента – фундаментальную физико-химическую модель процесса, алгоритм оценки текущего состояния материала по косвенным измерениям и оптимизатор управляющих воздействий. Данный подход, обозначаемый как «Модель – Оценка – Управление» (*Model – Estimation – Control*), позволяет рассматривать технологический процесс как динамическую систему с распределенными параметрами и, таким образом, активно влиять на конечные свойства продукта.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Общая концепция интегрального управления

Предлагаемая методология базируется на нескольких основополагающих принципах. Во-первых, это принцип неразрывности, согласно которому качество строительного материала в любой момент времени представляет собой функцию трех групп факторов, а именно: начального состава (рецептуры), истории внешних воздействий (условий среды) и вектора управляющих параметров (режимов обработки).

Далее рассматривается принцип «Модель – Оценка – Управление», предполагающий наличие трех взаимосвязанных компонентов для эффективного управления (рис. 1).



Рис. 1. Структура триады «Модель – Оценка – Управление»

Fig. 1. Structure of the Model-Evaluation-Control (MEC) triad

Первый компонент – фундаментальная модель, описывающая связь технологических параметров с эволюцией внутренних переменных состояния, то есть степени гидратации, пористости, фазового состава, а также полей температур и напряжений. Второй компонент – оценщик, который по косвенным измерениям восстанавливает полный вектор состояния системы и адаптирует модель к реальным условиям. Третий компонент – оптимизатор (регулятор), рассчитывающий управляющие воздействия на основе прогнозирования целевых критериев качества.

Кроме того, методология опирается на принцип полимасштабности. Он означает, что модель должна учитывать связь микроуровня, включающего кинетику реакций и фазовые переходы, и макроуровня, охватывающего теплообмен в агрегате и гидродинамику потоков. Благодаря предложенному подходу появляется возможность целенаправленно влиять на микроструктуру материала через макроскопические параметры управления.

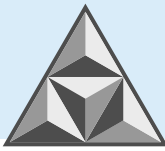
Наконец, важнейшее значение приобретает принцип адаптивности. Система управления должна непрерывно корректировать прогнозы, обучаясь на поступающих данных (*data assimilation*), поскольку это актуально при изменчивости сырья и внешних условий.

В формализованном виде объект управления описывается системой уравнений следующего вида:

$$\frac{\partial x(r,t)}{\partial t} = F(x, \nabla x, u(t), \theta, t), \quad (1)$$

$$y(t) = H(x(r_s, t)) + v(t), \quad (2)$$

где $x(r, t)$ – вектор состояния системы (распределение температуры, влажности, степени превращения);



$u(t)$ – вектор управляющих воздействий (скорость вращения, температура теплоносителя, частота вибрации);

θ – вектор параметров модели;

$y(t)$ – вектор выходных величин;

H – оператор наблюдения;

$v(t)$ – шум измерений;

∇x – пространственный градиент состояния;

F – нелинейный оператор, описывающий физико-химические процессы;

r_s – координаты размещения датчиков;

$x(r_s, t)$ – состояние в точках измерения.

Задача управления формулируется как поиск закона изменения $u(t)$ на интервале $[t_0, t_k]$, который обеспечивает минимум функционала качества, то есть

$$J = \Phi(x(t_k)) + \int_{t_0}^{t_k} L(x(t), u(t), t) dt \quad (3)$$

при ограничениях на управление и фазовые переменные.

Здесь J – функционал качества;

$x(t_k)$ – состояние в конечный момент времени (значения в конце интервала управления);

L – интегральный штраф за отклонения и затраты во всем интервале.

2. Математический аппарат управления

Основа предлагаемой методологии – адекватное описание динамики изменения свойств материала. Для большинства технологических процессов базовыми являются уравнения теплопереноса и химической кинетики. В их число, в частности, входит уравнение нестационарного теплопереноса [14, 15]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{эфф} \nabla T) + Q_{ист}(T, \alpha, u), \quad (4)$$

где ρ – плотность;

c_p – удельная теплоемкость;

$\lambda_{эфф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, зависит от структуры и влажности;

$Q_{ист}$ – мощность внутренних источников (экзотермические процессы, диссипативный нагрев);

α – степень химического превращения (безразмерная величина, принимает значения 0...1).

Для процессов сушки или влажностной обработки ключевым становится уравнение массопереноса влаги [16]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{эфф} \nabla \varphi) - \beta(\varphi - \varphi_{равн})f(T) - \rho_p \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \quad (5)$$

где φ – влагосодержание;

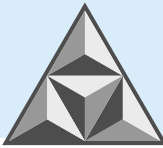
$D_{эфф}$ – эффективный коэффициент диффузии;

β – параметр десорбции;

α – степень химического превращения (например, гидратации);

$\varphi_{равн}$ – равновесное влагосодержание для окружающей среды;

$f(T)$ – температурная функция, описывающая зависимость скорости испарения от температуры;



ρ_p – плотность сухого вещества.

Далее кинетика структурообразования описывается обобщенной моделью:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_0 \exp\left(-\frac{E_a(T)}{RT}\right) f(\alpha), \quad (6)$$

где $E_a(T)$ – энергия активации, которая зависит от температуры [17];

k_0 – предэкспоненциальный множитель (константа скорости реакции);

$f(\alpha)$ – кинетическая функция; так, для гидратации цемента $f(\alpha) = (1 - \alpha)^{2/3}$.

Для процессов формирования важны реологические модели, связывающие напряжение и деформации. В частности, обобщенная модель Бингама для вязкопластичных сред [18, 19] представляется в виде:

$$\tau = \tau_0(T, \alpha) + K(T, \alpha)\dot{\gamma}^n, \quad (7)$$

где τ – касательное напряжение;

τ_0 – динамическое предельное напряжение сдвига;

K – коэффициент консистенции;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

3. Демонстрационный пример: транспортировка бетонной смеси

Для иллюстрации практической реализуемости предлагаемого методического подхода рассмотрим процесс транспортировки бетонной смеси в автобетоносмесителе. В данном случае система уравнений (4) – (6) конкретизируется с учетом параметров, идентифицированных для портландцемента ЦЕМ I 42,5Н:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{эфф} \nabla T) + (1 - \alpha) \Delta h \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \omega^b + q_{окр}, \quad (8)$$

где $\Delta h = 480 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$ – удельная теплота гидратации;

ω – скорость вращения барабана ($\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$);

a, b – эмпирические коэффициенты.

Внешний теплообмен $q_{окр}$ включает конвективную составляющую лучистого теплообмена и поглощение солнечного излучения.

Кинетика гидратации описывается модифицированной моделью Кнудсена с переменной энергией активации [20]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a(T)}{RT}\right) (1 - \alpha)^{2/3}, \quad (9)$$

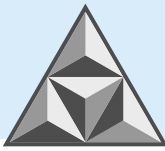
где $E_a(T) = 33.5 + 1.47T$ ($\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$).

Указанная зависимость позволяет учитывать ускорение реакции гидратации при повышении температуры, что имеет критическое значение при транспортировке строительных материалов и смесей в жарких климатических условиях.

Реологическая модель Бингама дополнена зависимостью от степени гидратации и температуры:

$$\tau = [\tau_0 e^{-0.021(T-293)} + 0.15\alpha] + K\dot{\gamma}^{0.78}. \quad (10)$$

Для оценки неизмеримых переменных состояния – полей α и T в объеме материала – по данным поверхностных датчиков используется ансамблевый фильтр Калмана ($EnKF$), алгоритм которого описывается ниже уравнениями (12),(13). Оптимизация управления $\omega(t)$ осуществляется в рамках модели предсказывающего управления (MPC) с целевым



функционалом, штрафующим за отклонения температуры в критической зоне и градиенты температур:

$$J[\omega(t)] = \int_t^{t+T_p} \left([T_{\text{крит}}(t) - T_{\text{цел}}]^2 + \lambda \|\nabla T(t)\|_{\text{max}} \right) dt \quad (11)$$

при технологических ограничениях $2 \leq \omega(t) \leq 15 \text{ мин}^{-1}$ и $|\dot{\omega}| \leq 3 \text{ мин}^{-1} (\text{с}^{-1})$.

4. Методы оценки состояния

Поскольку прямое измерение всех переменных состояния (например, степени гидратации в объеме изделия) часто бывает невозможным, ключевой становится задача их оценки, которая заключается в восстановлении $\hat{x}(t)$ по доступным измерениям $y(t)$.

В первую очередь, среди методов оценки следует выделить фильтр Калмана и его модификации. Для линейных систем оптимальным является классический фильтр Калмана; для нелинейных систем применяются более сложные подходы. Так, расширенный фильтр Калмана (*EKF*) предполагает линеаризацию модели в окрестности текущей оценки [21]. Действительно, он прост в реализации, но может давать сбой при сильной нелинейности. В отличие от него, сигма-точечный фильтр Калмана (*UKF*) использует детерминированный набор точек для распространения нелинейности, благодаря чему при решении многих задач он оказывается точнее, чем *EKF* [22]. Для систем большой размерности эффективен ансамблевый фильтр Калмана (*EnKF*), применяющий совокупность траекторий для аппроксимации ковариаций [23]:

$$x_k^{f,i} = M(x_{k-1}^{a,i}, u_{k-1}) + w_k^i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (12)$$

где $x_k^{f,i}$ – прогнозируемое состояние i -ансамбля на шаге k ;

$x_{k-1}^{a,i}$ – апостериорная оценка i -ансамбля на шаге $k-1$;

u_{k-1} – управление на шаге $k-1$;

w_k^i – шум модели для i -ансамбля;

i – индекс ансамбля;

N – размер ансамбля.

Затем производится коррекция по измерениям:

$$x_k^{a,i} = x_k^{f,i} + K_k(y_k - Hx_k^{f,i} + v_k^i), \quad (13)$$

где K_k – матрица усиления по Калману, вычисляемая по ансамблевым ковариациям;

$x_k^{a,i}$ – апостериорная оценка i -ансамбля после коррекции;

y_k – вектор измерений на шаге k (показания датчиков);

v_k^i – шум измерений для i -ансамбля.

Для негауссовых распределений и сильно нелинейных систем применяется фильтр частиц (*Particle Filter*), представляющий апостериорное распределение при достаточном наборе взвешенных частиц [23]. При этом их веса обновляются по правдоподобию измерений:

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i p(y_k | x_k^i), \quad (14)$$

где w_k^i – вес частицы на k -шаге (нормированная вероятность, сумма весов равна 1);

w_{k-1}^i – вес i -частицы на предыдущем шаге (априорный вес);

$p(y_k | x_k^i)$ – функция правдоподобия, то есть вероятность получить измерение y_k при данном состоянии x_k^i .

Сравнение методов оценки состояния представлено в табл. 1.

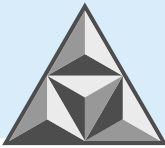


Таблица 1. Сравнение методов оценки состояния

Table 1. Comparison of condition assessment methods

Метод	Точность	Вычислительная сложность	Применимость	Обработка негауссовских помех
<i>EKF</i>	Средняя	Низкая	Умеренно нелинейные системы	Нет
<i>UKF</i>	Высокая	Средняя	Сильно нелинейные	Нет
<i>EnKF</i>	Высокая	Зависит от числа ансамблей	Сильно нелинейные, большая размерность	Ограниченно
<i>PF</i>	Очень высокая	Высокая	Любые нелинейности и распределения	Да

При наличии достаточного объема данных эффективны нейросетевые наблюдатели. В подобных ситуациях глубокие нейронные сети обучаются аппроксимировать обратную зависимость состояния от измерений [24]. Подобный метод особенно ценен, когда аналитическая модель слишком сложна или неизвестна.

5. Методы оптимального управления

Первоначально в рамках методологии рассматривается модель предсказывающего управления (*MPC*). Суть подхода заключается в том, что на каждом шаге решается задача оптимизации на горизонте прогноза $[t_k, t_k + T_p]$ [25, 26]:

$$\min_{u(\cdot)} J = \int_t^{t+T_p} (\|x(\tau) - x_{цель}\|_Q^2 + \|u(\tau)\|_R^2) d\tau, \tag{15}$$

где $u(\cdot)$ – траектория управления на горизонте (искомая функция управления);

t – текущий момент времени (начало горизонта прогноза);

T_p – горизонт прогноза (интервал планирования);

$x(\tau)$ – прогнозируемая траектория состояния (поведение при управлении u),

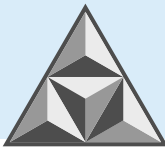
Есть ограничения: $u_{\min} \leq u(\tau) \leq u_{\max}$ и $x_{\min} \leq x(\tau) \leq x_{\max}$ при $\tau \in [t_k, t_k + T_p]$. На практике реализуется только первое значение $u(t)$, после чего горизонт сдвигается. Для нелинейных систем в таких схемах применяют последовательное квадратичное программирование (*SQP*) или иные методы нелинейной оптимизации.

Другим подходом является принцип максимума Понтрягина (см. табл. 2).

Таблица 2. Сравнение методов управления

Table 2. Comparison of control methods

Метод	Тип модели	Оптимальность	Вычислительная нагрузка	Учет ограничений
<i>MPC</i>	Любая (линейная/нелинейная)	Субоптимальное на горизонте	Высокая	Явно учитывает
Принцип максимума	Детерминированная, непрерывная	Глобальное (для задач с фиксированным временем)	Средняя (решение краевой задачи)	Через множители Лагранжа
Обучение с подкреплением	<i>Black-box</i> (без модели)	Стремится к оптимальному при обучении	Очень высокая на этапе обучения	Может учитываться через штрафы



В случаях, когда используется детерминированная модель с фиксированным временем, данный принцип позволяет свести исходную задачу к краевой для сопряженных переменных [27]. Показательный пример применения представлен в [28], где данный подход использован для оптимизации скорости виброуплотнения бетонных смесей. В результате удалось сократить время формования при одновременном повышении прочности на 25-30%.

Наконец, современным направлением является обучение с подкреплением (*Reinforcement Learning*). В данной парадигме агент (система управления) обучается методом проб и ошибок на модели или реальном процессе, максимизируя накопленное вознаграждение [29]. Этот подход представляется перспективным для многостадийных процессов, характеризующихся неполной информацией о модели.

Отсюда следует, что выбор конкретных алгоритмов определяется характеристиками технологического процесса. Например, для процессов с ярко выраженными распределенными параметрами и сложной нелинейностью предпочтительным сочетанием является ансамблевый фильтр Калмана (*EnKF*) совместно с нелинейным *MPC*. В свою очередь, для быстрых процессов, где вычислительные ресурсы ограничены, оправдано применение *UKF* или *EKF* в комбинации с линеаризованным *MPC*.

Кроме того, при наличии экспертных знаний эффективным инструментом может стать нечеткая логика (*Fuzzy Logic Control*) [30], позволяющая формализовать качественные представления технологов. В ситуациях, где возможно накопление данных, а кинетика процессов отличается особой сложностью, наиболее перспективным направлением оказывается обучение с подкреплением.

6. Результаты вычислительного эксперимента

Для верификации предложенной методологии и демонстрации ее эффективности проведена серия вычислительных экспериментов, моделирующих процесс транспортировки бетонной смеси в автобетоносмесителе в течение 60 мин. Начальные условия соответствовали типовой смеси, имеющей температуру $T_0 = 293$ К, влажность $\varphi_0 = 0.15$ и нулевую степень гидратации ($\alpha = 0$). Внешние условия: $T_{\text{окр}} = 298$ К, относительная влажность $RH = 60\%$. Моделирование выполняли на сетке контрольных объемов с использованием неявной схемы Гира второго порядка.

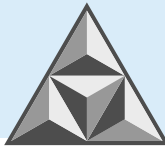
На первом этапе осуществляли сравнение прогнозных данных, полученных по модели (8), с измерениями, выполненными на лабораторном стенде (табл. 3).

Таблица 3. Результаты валидации математической модели

Table 3. Results of the mathematical model validation

Параметр	RMSD	Диапазон изменений	Относительная ошибка, %
Температурное поле	0.94 К	0.5 К	188
Кинетика гидратации	0.01	1.0	1.0
Влажностный режим	0.02	1.0	2.0

Верификация показала высокую точность прогноза кинетики гидратации (среднеквадратичное отклонение $RMSD = 1.0\%$) и влажностного режима ($RMSD = 2.0\%$). Значительное расхождение по температурному полю ($RMSD = 188\%$) указывает на необходимость дальнейшего уточнения граничных условий и учета адгезии смеси. Однако данное обстоятельство не является критичным для демонстрации работоспособности управляющего алгоритма, поскольку гидратация, представляющая ключевой процесс,



моделируется с высокой точностью. На втором этапе решалась задача оптимизации профиля скорости вращения барабана $\omega(t)$. В качестве базового режима была принята максимальная скорость вращения $\omega = 15 \text{ мин}^{-1}$, предусмотренная конструкцией антиблокировочной системы (АБС). Целевой функционал $J[\omega(t)]$ был направлен на минимизацию градиентов температуры в массиве смеси и поддержание ее в заданном диапазоне.

Оптимизация выполнялась методом SQP; результаты представлены на рис. 2 и в табл. 4.

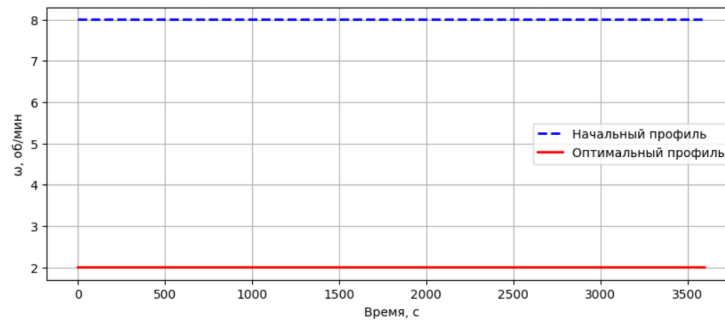


Рис. 2. Сравнение начального и оптимального профилей скорости вращения тормозного барабана АБС

Fig. 2. Comparison of the initial and optimal ABS drum speed profiles

Таблица 4. Эффективность предложенной системы адаптивного управления

Table 4. Efficiency of the proposed management system

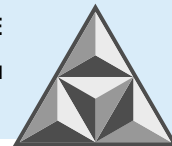
Показатель	Значение
Снижение скорости вращения	86.7% (с 15 до 2 мин^{-1})
Снижение функционала стоимости	85.0% (с 425620 до 35100)
Расчетное снижение энергозатрат	42%
Стандартное отклонение температурного поля	0.046 К
Контроль степени гидратации	$\alpha < 0.0023$ за время транспортировки

Полученные данные демонстрируют, что предложенная система адаптивного управления позволяет радикально (на 86.7%) снизить скорость вращения барабана без нанесения ущерба качеству смеси. Ее использование приводит к снижению механического воздействия на смесь, предотвращая ее расслоение. При этом достигается высокая однородность температурного поля (стандартное отклонение 0.046 К) и гарантируется, что степень гидратации не превысит критического порога ($\alpha < 0.0023$) до момента укладки.

При анализе результатов моделирования выявлена тесная связь параметров: коэффициент корреляции между временем и степенью гидратации составил 0.9999, что подтверждает экспоненциальный характер кинетики. Также установлена зависимость, имеющая значимость при осуществлении экспресс-контроля: снижение температуры на 0.1 К приводит к замедлению гидратации на 3.7%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение разработанной системы управления с традиционными методами управления транспортировкой бетона показывает ее преимущество по ключевым параметрам. В отличие от эмпирических регламентов, предписывающих поддерживать постоянную скорость вращения в диапазоне 2-6 мин^{-1} [31], предложенный подход динамически адаптируется к текущему состоянию смеси и внешним условиям. Благодаря этому достигается экономия энергии на 42% при сохранении качества строительного материала. Зарубежные аналоги, использующие упрощенные модели [32], не обеспечивают подобной глубины интеграции физико-химических процессов.

**Таблица 5.** Сравнительный анализ систем управления транспортировкой бетонных смесей**Table 5.** Comparative analysis of concrete mix transportation control systems

Параметр	Традиционные системы	Зарубежные аналоги	Предлагаемая система
Основа управления	Эмпирические регламенты (ГОСТ)	Упрощенные модели	Комплексная физико-химическая модель
Учет внешних воздействий	Ограниченный	Частичный	Полный (Т, влажность, теплообмен излучением)
Адаптивность	Отсутствует	Ограниченная	Полная (EnKF, MPC)
Энергоэффективность	Базовая	Улучшенная на 15-20%	Улучшенная на 42%
Прогноз качества	Отсутствует	Косвенный	Прямой (контроль α, T)

Следовательно, предлагаемая методология создает основу для перехода к интеллектуальным системам управления качеством в строительной отрасли. В рамках данного подхода свойства продукции становятся результатом целенаправленного управления динамикой структурообразования в реальном времени.

ВЫВОДЫ

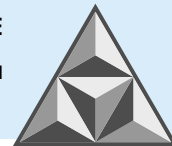
На основе ансамблевого фильтра Калмана (EnKF) синтезирована модель предсказывающего управления (MPC) с возможностью оптимизации методом последовательного квадратичного программирования (SQP). Данная комбинация является эффективной при неполной информации о состоянии материала. Основные преимущества разработанной системы: снижение скорости вращения барабана на 86.7% (с 15 до 2 мин⁻¹) и сопутствующее уменьшение энергозатрат; обеспечение высокой однородности температурного поля ($\sigma = 0.046$ К); контроль степени гидратации ($\alpha < 0.0023$) – в пределах допустимых значений. При этом выявленная погрешность прогноза температурного поля составила 188%, что требует уточнения граничных условий и последующего перехода к трехмерному моделированию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Баженов Ю.М.** Технология бетона: учебник для студ. высш. учеб. заведений, обучающихся по строительным специальностям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 524 с. ISBN 978-5-93093-138-9.
2. **Манин П.** Уберизация строительства. Как отрасль переходит в цифровую среду // РБК Компании: [сайт]. 2025. 31 июля. URL: <https://companies.rbc.ru/news/yZw0YPjwPI/uberizatsiya-stroitelstva-kak-otrasl-perehodit-v-tsifrovuyu-sredu> (дата обращения: 12.03.2026).
3. Industry 4.0, Smart Factory and Connected Operations // SG Systems Global : [сайт]. 2024. URL: <https://sgsystemsglobal.com/ru/glossary/industry-4-0-smart-factory-and-connected-operations> (дата обращения: 12.03.2026).
4. **Гинзбург А.В., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О.** Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор // Вестник МГСУ. 2021. № 7. С. 885-902. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelnaya-otrasl-i-kontseptsiya-industriya-4-0-obzor> (дата обращения: 12.03.2026).
5. **Tanane B., Bentaha M.L., Dafflon B., Moalla N.** Bridging the gap between Industry 4.0 and manufacturing SMEs: A framework for an end-to-end Total Manufacturing Quality 4.0's implementation and adoption // *Journal of Industrial Information Integration*. 2025. Vol. 45. P. 100833.
6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Повышение качества продукции как инструмент обеспечения экономической безопасности отрасли приборостроения в условиях развития индустрии 4.0 // Вестник Удмуртского университета. Сер. Экономика и право. 2025. Т. 35. № 5. С. 835-844.



7. **Nahmad Vazquez A., Garivani S., Dackiw J.N.** Decentralized, data-informed, robotic-based digital timber micro-factories // *Construction Robotics*. 2024. Vol. 8. № 2. P. 24.
8. **Kosse S. [et al.]** Industry 4.0 enabled modular precast concrete components: a case study // *International RILEM Conference on Synergising expertise towards sustainability and robustness of CBMs and concrete structures* : proc. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. P. 229-240.
9. **Карпенко Н.И.** Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 413 с. ISBN 5-274-01682-0.
10. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: моногр. Иваново : ПресСто, 2010. 363 с.
11. **Порхало В.А., Рубанов В.Г., Луценко О.В.** Советующая система управления процессом обжига клинкера с применением локальных подсистем на основе принципов автономности и каскадности // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2014. № 9. С. 4-9.
12. **Пиров Ф.С.** Автоматизация и управление технологическими процессами обжига клинкера при производстве цемента : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.06; Московский автомоб.-дор. гос. техн. ун-т (МАДИ). М., 2011. 23 с.
13. **Чумак Л.И., Лавренюк И.В., Платонова Т.О.** Математическое моделирование процесса сушки керамического кирпича в туннельных сушилах // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 10 (151). С. 26-30.
14. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967. 600 с.
15. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
16. **Гагарин В.Г.** Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : спец. 05.23.01, 05.23.03; НИИ строительной физики РААСН. М., 2000. 47 с.
17. **Хузин А.Ф.** Кинетика тепловыделения при гидратации цемента, модифицированного комплексной наномодифицированной добавкой // *Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та*. 2016. № 1 (35). С. 216-220.
18. **Reiner M., Leaderman H.** Deformation, strain, and flow // *Physics Today*. 1960. Vol. 13. № 9. P. 47-48.
19. **Шмигальский В.Н.** Формование изделий на виброплощадках. М.: Стройиздат, 1968. 104 с.
20. **Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Аниканова Л.А., Старенченко В.А.** Термодинамическое моделирование гидратации портландцемента с разным содержанием воды // *Вестник Томского гос. арх.-строит. ун-та*. 2022. № 24 (5). С. 122-132. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-5-122-132>.
21. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82. № 1. P. 35-45.
22. **Julier S.J., Uhlmann J.K.** Unscented filtering and nonlinear estimation // *Proceedings of the IEEE*. 2004. Vol. 92. № 3. P. 401-422.
23. **Evensen G.** The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation // *Ocean dynamics*. 2003. Vol. 53. № 4. P. 343-367.
24. **Johansen A.** A tutorial on particle filtering and smoothing: Fifteen years later. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2009. 40 p.
25. **Гудфеллоу Я, Бенджио И., Курвилль А.** Глубокое обучение; пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с. ISBN 978-5-97060-618-6.
26. **García C.E., Prett D.M., Morari M.** Model predictive control: Theory and practice – A survey // *Automatica*. 1989. Vol. 25. № 3. P. 335-348.
27. **Черешко А.А.** Методы управления технологическими процессами на основе ассоциативных прогнозирующих моделей: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 2.3.3; Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова. М., 2022. 116 с.
28. **Понтрягин Л.С. Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.** Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 384 с.
29. **Сторожук Н.А., Дехта Т.Н.** Оптимальное управление уплотнением бетонных смесей вибрационным способом и его особенности // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 4 (243-244). С. 56-64.
30. **Sutton R.S., Barto A.G.** Reinforcement learning: An introduction. Cambridge: MIT Press, 1998. 322 p.
31. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия // Стандартинформ: Москва, Россия. 2012. 19 с.



32. **Сограби Т.В.** Роль взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы в ее движении при больших числах Кнудсена: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2022. 123 с.

Поступила в редакцию 17.03.2026

Одобрена после рецензирования 16.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

REFERENCES

1. **Bazhenov, Iu.M.** (2011), Concrete Technology: a textbook for students of higher educational institutions studying in construction specialties. Moscow: ASV Publishing House, 524 p. (in Russian).
2. **Manin, P.** (2025), Uberization of Construction. How the Industry is Transitioning to a Digital Environment / RBC Companies: Available at: <https://companies.rbc.ru/news/yZw0YPjwPI/uberizatsiya-stroitelstva-kak-otrasl-perehodit-v-tsifrovuyu-sredu> (accessed 12.03.2026) (in Russian).
3. Industry 4.0, Smart Factory and Connected Operations // SG Systems Global: [website]. (2024), Available at: <https://sgsystemsglobal.com/ru/glossary/industry-4-0-smart-factory-and-connected-operations> (accessed 12.03.2026) (in Russian).
4. **Ginzburg, A.V., Adamtsevich, L.A. and Adamtsevich, A.O.** (2021), The construction industry and the concept of "Industry 4.0": an overview, *Bulletin of MGSU*, no. 7, pp. 885-902. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/stroitel'naya-otrasl-i-kontseptsiya-industriya-4-0-obzor> (accessed 12.03.2026) (in Russian).
5. **Tanane, B., Bentaha, M.L., Dafflon, B. and Moalla, N.** (2025), Bridging the gap between Industry 4.0 and manufacturing SMEs: A framework for an end-to-end Total Manufacturing Quality 4.0's implementation and adoption, *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 45, p. 100833.
6. **Mikaeva, S.A. and Mikaeva A.S.** (2025), Improving product quality as a tool for ensuring economic security of the instrument-making industry in the context of Industry 4.0 development, *Bulletin of Udmurt University. Series Economics and Law*, vol. 35, no. 5, pp. 835-844 (in Russian).
7. **Nahmad Vazquez, A., Garivani, S. and Dackiw J.N.** (2024), Decentralized, data-informed, robotic-based digital timber micro-factories, *Construction Robotics*, vol. 8, no. 2, p. 24.
8. **Kosse, S. [et al.]** (2023), Industry 4.0 enabled modular precast concrete components: a case study, *International RILEM Conference on Synergising expertise towards sustainability and robustness of CBMs and concrete structures: proc. Cham: Springer Nature Switzerland*, pp. 229-240.
9. **Karpenko, N.I.** (1996), General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat, 413 p. (in Russian).
10. **Fedosov, S.V.** (2010), Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry: monograph. Ivanovo: PresSto, 363 p. (in Russian).
11. **Porkhalo, V.A., Rubanov, V.G. and Lutsenko, O.V.** (2014), Advisory control system for the clinker burning process using local subsystems based on the principles of autonomy and cascade, *Devices and systems. Management, control, diagnostics*, no. 9, pp. 4-9 (in Russian).
12. **Pirov, F.S.** (2011), Automation and control of technological processes of clinker burning in cement production: abstr. diss. ... cand. tech. sc.: 05.13.06; Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). Moscow, 23 p. (in Russian).
13. **Chumak, L.I., Lavreniuk, I.V. and Platonova T.O.** (2010), Mathematical Modeling of the Drying Process of Ceramic Bricks in Tunnel Dryers, *News of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture*, vol. 10, no. 151, pp. 26-30 (in Russian).
14. **Lykov, A.V.** (1967), Theory of Heat Conductivity. Moscow: Vyssh. shk., 600 p. (in Russian).
15. **Carslaw, G. and Eger, D.** (1964), Thermal conductivity of solids. Moscow: Nauka, 488 p. (in Russian).
16. **Gagarin, V.G.** (2000), Theory of the state and transfer of moisture in building materials and thermal insulation properties of building enclosing structures: abstr. diss. ... doc. eng. sc.: 05.23.01, 05.23.03; Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering. Moscow, 47 p. (in Russian).



17. **Khuzin, A.F.** (2014), Kinetics of heat release during hydration of cement modified with a complex nanomodified additive, *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, no. 1 (35), pp. 216-220 (in Russian).
18. **Reiner, M. and Leaderman, H.** (1960), Deformation, strain, and flow, *Physics Today*, vol. 13, no. 9, pp. 47-48.
19. **Shmigal'skii, V.N.** (1968), Forming products on vibrating platforms. Moscow: Stroyizdat, 104 p. (in Russian).
20. **Abzaev, Iu.A., Korobkov, S.V., Anikanova, L.A. and Starenchenko, V.A.** (2022), Thermodynamic modeling of hydration of Portland cement with different water contents, *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 122-132 (in Russian). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-5-122-132>.
21. **Kalman, R.E.** (1960), A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35-45.
22. **Julier, S.J. and Uhlmann, J.K.** (2004), Unscented filtering and nonlinear estimation, *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 3, pp. 401-422.
23. **Evensen, G.** (2003), The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation, *Ocean dynamics*, vol. 53, no. 4, pp. 343-367.
24. **Johansen, A.** (2009), A tutorial on particle filtering and smoothing: Fifteen years later. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 40 p.
25. **Goodfellow, Ian, Bengio, Yoshua and Courville, Aaron** (2018), *Deep Learning; translated from English by A.A. Slinkin*. Moscow: DMK Press, 652 p. (in Russian).
26. **Garcia, C.E., Prett, D.M. and Morari M.** (1989), Model predictive control: Theory and practice – A survey, *Automatica*, vol. 25, no. 3, pp. 335-348.
27. **Chereshko, A.A.** (2022), Methods of technological process control based on associative predictive models: diss. ... cand. eng. sc.: 2.3.3. Moscow, 116 p. (in Russian).
28. **Pontriagin, L.S., Boltianskii, V.G., Gamkrelidze, R.V. and Mishchenko, E.F.** (1969), *Mathematical theory of optimal processes*. Moscow: Nauka, 384 p. (in Russian).
29. **Storozhuk, N.A. and Dekhta, T.N.** (2018), Optimal control of concrete mixture compaction by vibration and its features, *News of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture*, no. 4 (243-244), pp. 56-64 (in Russian).
30. **Sutton, R.S. and Barto, A.G.** (1998), *Reinforcement learning: An introduction*. Cambridge: MIT Press, 322 p.
31. GOST 7473-2010. Concrete Mixes. Specifications. Standartinform: Moscow, Russia. 2012. 19 p. (in Russian).
32. **Sograbi, T.V.** (2022), The Role of Gas Interaction with the Surface of an Aerosol Particle in its Motion at Large Knudsen Numbers: diss. ... cand. phys. and math. sc. Yekaterinburg, 123 p. (in Russian).

Received 17.03.2026

Approved 16.04.2026

Accepted 12.05.2026