

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Научная статья

УДК 681.513.6:66.042

ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА С УЧЁТОМ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ПАРАМЕТРОВ

**Игнатьев Максим Алексеевич, кандидат технических наук, ассистент,
Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю.А., Россия, Саратов, ignatev_maksim@yandex.ru**

Аннотация. Проблема поддержания заданного температурного профиля в трубчатых реакторах экзотермического синтеза усугубляется пространственной распределенностью термодинамических полей и нелинейностью химической кинетики. Классические алгоритмы регулирования неспособны упреждающе компенсировать конвективное транспортное запаздывание, что создает предпосылки для термического разгона. Целью работы выступает синтез робастного предиктивного регулятора, функционирующего в условиях параметрической неопределенности дезактивации катализатора. Методологическую основу исследования составляет конечно-разностная дискретизация гиперболических уравнений математической физики, параметры которой ограничиваются критерием Куранта-Фридрихса-Леви для предотвращения численных осцилляций. Архитектура замкнутого контура опирается на сценарную формулировку многокритериальной оптимизации, агрегирующую ансамбль из 20 дискретных реализаций кинетических констант. Вычислительные эксперименты на модели окисления о-ксилола фиксируют снижение интегральной квадратичной ошибки температурного профиля относительно каскадных схем при ступенчатых флуктуациях расхода сырья. Пиковые отклонения в зоне максимального тепловыделения ограничиваются

двумя градусами, надежно удерживая процесс в безопасном коридоре. Профилирование алгоритма квадратичного программирования подтверждает его вычислительную состоятельность на микропроцессорных платформах промышленных логических контроллеров. Среднее время решения задачи не превышает 80 миллисекунд, что позволяет использовать период квантования 200 мс и свидетельствует о возможности внедрения методики на действующих непрерывных производствах.

Ключевые слова: трубчатый реактор, распределенные параметры, предиктивное управление, робастная оптимизация, квадратичное программирование, критерий Куранта-Фридрихса-Леви, пространственная дискретизация, экзотермический синтез.

Original article

PREDICTIVE CONTROL OF THE TEMPERATURE REGIME OF A TUBULAR REACTOR TAKING INTO ACCOUNT DISTRIBUTED PARAMETERS

**Ignatev Maksim Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Assistant, Yuri
Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia,
ignatev_maksim@yandex.ru**

Annotation. The problem of maintaining a specified temperature profile in tubular exothermic synthesis reactors is exacerbated by the spatial distribution of thermodynamic fields and the nonlinearity of chemical kinetics. Classical control algorithms are unable to proactively compensate for convective transport lag, which creates the preconditions for thermal runaway. The goal of this study is to synthesize a robust predictive controller operating under parametric uncertainty of catalyst deactivation. The methodological basis of the study is the finite-difference discretization of hyperbolic equations of mathematical physics, the parameters of which are constrained by the Courant-Friedrichs-Lewy criterion to prevent numerical

oscillations. The closed-loop architecture relies on a scenario-based formulation of multi-objective optimization, aggregating an ensemble of 20 discrete realizations of kinetic constants. Computational experiments on the o-xylene oxidation model demonstrate a reduction in the integral square error of the temperature profile relative to cascade schemes with stepwise fluctuations in feedstock flow. Peak deviations in the zone of maximum heat release are limited to two degrees, reliably maintaining the process within a safe range. Profiling the quadratic programming algorithm confirms its computational feasibility on microprocessor platforms of industrial logic controllers. The average solution time does not exceed 80 milliseconds, allowing the use of a 200 ms quantization period and demonstrating the feasibility of implementing the method in existing continuous production systems.

Keywords: tubular reactor, distributed parameters, predictive control, robust optimization, quadratic programming, Courant-Friedrichs-Lewy criterion, spatial discretization, exothermic synthesis.

Введение. Трубчатые реакторы широко применяются в технологических процессах химической, нефтехимической и газоперерабатывающей отраслей, обеспечивая проведение целевых синтезов в непрерывном режиме [1]. Особенностью таких аппаратов является пространственная распределенность термодинамических и концентрационных параметров вдоль продольной оси, что обуславливает необходимость описания протекающих процессов уравнениями математической физики. В отличие от емкостных систем с сосредоточенными параметрами, где состояние описывается конечномерным вектором в фазовом пространстве, здесь технологические переменные образуют непрерывные пространственно-временные поля. Конвективный перенос реагентов сочетается с продольной диффузией и теплообменом через стенки корпуса, что приводит к распределенному транспортному запаздыванию и определяет особый характер инерционности объекта.

Аналитическое описание объекта усложняется нелинейным характером протекающей химической кинетики. Интенсивность экзотермических

превращений подчиняется закону Аррениуса, демонстрируя экспоненциальную чувствительность к флуктуациям локальной температуры. Указанная физическая закономерность диктует технологические ограничения на допустимый тепловой режим, поскольку превышение верхнего порога чревато термическим разгоном, дезактивацией катализатора и нарушением механической целостности конструкционных материалов, а локальное переохлаждение приводит к резкому падению степени конверсии и накоплению непрореагировавшего сырья. В результате поддержание заданного температурного профиля становится задачей управления распределенным объектом при наличии фазовых ограничений.

Инженерная практика автоматизации подобных тепловых процессов исторически базировалась на применении пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов и построении каскадных контуров. Алгоритмы, основанные на классических законах регулирования, обладают достаточной робастностью при сравнительно небольшой инерционности объекта, однако их применение к распределенным объектам связано с трудностями. Точечный датчик, устанавливаемый в произвольном сечении рубашки охлаждения, физически не способен отразить интегральную картину теплового поля, а управляющее воздействие на клапан теплоносителя оказывает влияние на весь объем аппарата с существенным фазовым сдвигом. Каскадные структуры с дополнительными контурами для компенсации возмущений частично уменьшают влияние запаздывания, но по-прежнему реагируют на рассогласование лишь после его возникновения и не учитывают прогнозируемые отклонения от регламентных значений.

Концептуальной альтернативой, лишенной указанных недостатков, выступает теория предиктивного управления, базирующаяся на использовании явной математической модели объекта для прогнозирования его эволюции на скользящем временном интервале. Фундаментальные положения данного направления, детально систематизированные в труде [2], предполагают

многократное решение задачи оптимизации в реальном масштабе времени. Вычислительное ядро на каждом такте дискретизации формирует последовательность управляющих сигналов, минимизирующих целевую функцию качества при безусловном соблюдении заданных лимитов на амплитуду и скорость изменения регулирующих органов. Применительно к трубчатому реактору это означает возможность заблаговременного распознавания тенденции к перегреву определенных зон и превентивного перераспределения охлаждающей способности до момента фактического возникновения аварийной ситуации.

Непосредственная аппаратно-программная реализация прогнозных алгоритмов для систем с распределенными параметрами наталкивается на вычислительные барьеры, связанные с необходимостью интегрирования уравнений в частных производных на каждом шаге цикла. Прямое использование бесконечномерных моделей несовместимо с быстроедействием промышленных микроконтроллеров, что вынуждает прибегать к процедурам пространственной дискретизации, в частности, к методу конечных разностей. Точность и устойчивость получаемой системы обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка подчиняются строгим критериям сеточной аппроксимации. Как отмечается в исследовании, посвященном моделированию распределенных потоков [3], центральное место занимает условие Куранта-Фридрихса-Леви, накладывающее жесткую взаимосвязь между разрешающей способностью по пространству и периодом квантования по времени, что ограничивает свободу выбора параметров вычислительной сетки.

Дополнительным фактором, осложняющим синтез замкнутой системы, выступает присутствие стохастических помех в измерительных трактах и неполнота информации о внутреннем состоянии аппарата. Физическая невозможность установки непрерывных профилемеров вдоль всей длины корпуса вынуждает опираться на зашумленные точечные замеры на границах и

в отдельных сечениях. Преодоление неопределенности требует внедрения процедур оптимальной фильтрации. Применение аппарата стохастической оценки, в частности модификаций расширенного фильтра Калмана, адаптированных для нелинейных гиперболических уравнений [4], позволяет реконструировать несмещенные оценки распределенного температурного поля. Интеграция стохастического наблюдателя с предиктивным регулятором обеспечивает замкнутый цикл, в котором расчеты опираются на очищенную от высокочастотного шума информацию о текущем термодинамическом состоянии объекта.

Обзор литературы. Трубчатые реакторы химического синтеза представляют сложные динамические объекты с распределенными параметрами, эволюция которых описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического и гиперболического типов [5]. Исторически доминировавшие подходы к автоматизации подобных агрегатов базировались на редукции бесконечномерных пространственных полей к конечномерным передаточным функциям и применении классических пропорционально-интегрально-дифференциальных алгоритмов. Подобная идеализация нивелирует эффекты транспортного запаздывания и конвективного переноса, что при наличии экзотермической кинетики создает фундаментальные предпосылки для возникновения стационарной неустойчивости и локализованных зон термического разгона. Основы предиктивного управления, систематизированные в [6], [7], предполагают последовательную минимизацию целевого функционала на скользящем временном интервале с явным учетом фазовых ограничений на амплитуду и скорость изменения управляющих воздействий.

Для численной реализации распределенных моделей необходима их пространственно-временная дискретизация. В исследованиях, посвященных диагностике потоков в протяженных магистралях, в частности, [8], [9] строго обосновывается необходимость соблюдения критерия Куранта-Фридрихса-Леви

(CFL) при использовании явных разностных схем. Игнорирование данного условия приводит к накоплению вычислительной диссипации и генерации нефизичных осцилляций, делающих невозможным синтез адекватных наблюдателей состояния. Вместе с тем высокая размерность получаемых систем обыкновенных дифференциальных уравнений порождает вычислительные барьеры при многокритериальной оптимизации. Дополнительным дестабилизирующим фактором выступает необратимый дрейф кинетических параметров, обусловленный дезактивацией каталитических центров. Детерминированные прогнозные модели, калиброванные на этапе пусконаладочных работ, по мере эксплуатации накапливают рассогласование, вследствие чего возникает необходимость применения методов робастного управления [10]. Сценарные формулировки предиктивных регуляторов, предполагающие одновременное вычисление траекторий для ансамбля вероятностных реализаций объекта, обеспечивают требуемый запас устойчивости, ценой кратного возрастания трудоемкости решаемых задач квадратичного программирования.

Материалы и методы исследования. Физико-химические процессы в аппарате описываются сопряженной системой уравнений материального и теплового балансов для дифференциальных объемов вдоль продольной оси z . Для экзотермической реакции окисления органических соединений конвективный перенос реагентов и тепловой энергии сочетается с продольной диффузией и теплообменом через металлическую стенку корпуса. Интенсивность тепловыделения подчиняется закону Аррениуса, экспоненциальная зависимость которого от локальной температуры формирует положительную обратную связь, создающую условия для формирования пиковых зон перегрева.

Переход от непрерывных пространственных полей к конечномерному представлению осуществляется посредством метода конечных разностей. Аппроксимация производных по пространственной координате производится на

равномерной сетке, включающей $n = 50$ контрольных объемов. Выбор пространственного шага сетки Δz и шага квантования по времени T_s ограничивается условием устойчивости CFL, задающим допустимое соотношение между скоростью конвективного переноса и параметрами пространственно-временной сетки. Результирующая система из 150 нелинейных ОДУ агрегирует переменные состояния: концентрации компонентов, температуры реакционной смеси и теплоносителя в каждом сечении. Управляющим воздействием является изменение расхода хладагента F_c через рубашку охлаждения.

Архитектура синтезируемого регулятора базируется на минимизации квадратичного функционала качества J , интегрирующего взвешенные квадраты отклонений текущего температурного профиля $T(z,t)$ от технологически оптимальной траектории $T_{ref}(z)$. Целевая функция дополняется штрафными слагаемыми, ограничивающими чрезмерно резкие изменения управляющих воздействий в соответствии с формулой (1):

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^n Q_k (T_k(t+i|t) - T_{ref,k})^2 + \sum_{j=1}^{N_u} R(\Delta F_c(t+j|t))^2 \quad (1)$$

Наличие жестких двусторонних ограничений на амплитуду $F_{c,min} \leq F_c \leq F_{c,max}$ и скорость изменения расхода теплоносителя трансформирует задачу безусловной оптимизации в проблему квадратичного программирования (QP). Положительная полуопределенность матрицы Гессе целевого функционала гарантирует существование единственного глобального экстремума, отыскиваемого методами активного множества.

Неопределенность кинетических параметров, проявляющаяся в разбросе предэкспоненциального множителя k_0 и энергии активации E по мере выработки ресурса катализатора, компенсируется применением сценарного подхода (Scenario-based MPC). Вместо единой номинальной модели в оптимизационный цикл параллельно интегрируются $S = 20$ дискретных реализаций параметров, образующих доверительный эллипсоид в пространстве неопределенностей.

Итоговая целевая функция формируется как математическое ожидание индивидуальных критериев качества при условии тождественности управляющих воздействий на первом шаге горизонта предсказания N_u для всех ветвей сценарного дерева. Это обеспечивает робастность замкнутого контура к изменениям параметров объекта без введения консервативных запасов, снижающих общую энергоэффективность агрегата.

Результаты исследования и их обсуждение. Верификация предложенной архитектуры осуществлялась на имитационной модели реактора окисления оксилола во фталевый ангидрид. Для сопоставления были использованы альтернативные контуры управления: классический ПИД-регулятор, стабилизирующий температуру в точке предполагаемого максимума, и каскадная структура, в которой внешний контур корректирует уставку внутреннего регулятора температуры хладагента. Возмущающие воздействия имитировались путем ступенчатого изменения объемного расхода сырья на входе в аппарат, что эквивалентно резкому изменению времени пребывания и, как следствие, тепловыделения (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительный анализ критериев качества замкнутых контуров управления

Метрика эффективности	ПИД (точечный)	Каскадная схема	Сценарный MPC
Интегральная квадратичная ошибка (ISE) профиля температуры, $^{\circ}\text{C}^2 \cdot \text{с}$	1450,2	412,8	38,4
Максимальное отклонение в зоне максимального тепловыделения, $^{\circ}\text{C}$	12,5	6,8	1,9
Дисперсия расхода хладагента, $(\text{м}^3/\text{ч})^2$	4,12	2,85	1,34
Среднее время расчета шага (решение задачи QP), мс, мс	< 1	5	82

Источник: разработано автором.

Снижение ISE по сравнению с ПИД-аналогом обусловлено способностью прогнозного алгоритма упреждающе реагировать на транспортное

запаздывание. Каскадная схема демонстрирует промежуточные результаты, эффективно демпфируя флуктуации теплоносителя, но сохраняя инерционность при отработке возмущений по сырью. Максимальное отклонение температуры в зоне максимального тепловыделения при использовании МРС не превышает двух градусов, что позволяет удерживать процесс в безопасном диапазоне, тогда как ПИД-регулятор реагирует на уже возникшее отклонение и допускает локальные перегревы, чреватые спеканием катализатора. Дисперсия расхода хладагента для МРС оказывается минимальной, что отражает плавный характер упреждающих воздействий и снижает механический износ регулирующей арматуры.

Графическая интерпретация пространственно-временной эволюции теплового поля выявляет различия в стратегиях управления (рисунок 1). В начальный момент времени после приложения ступенчатого возмущения МРС-регулятор формирует превентивный импульс охлаждения, заблаговременно распределяя хладагент по зонам ожидаемого экзотермического пика. Классические алгоритмы инициируют корректирующее воздействие по факту регистрации рассогласования датчиком, когда фронт повышенной температуры уже сформирован и конвективно перемещается к выходу аппарата.

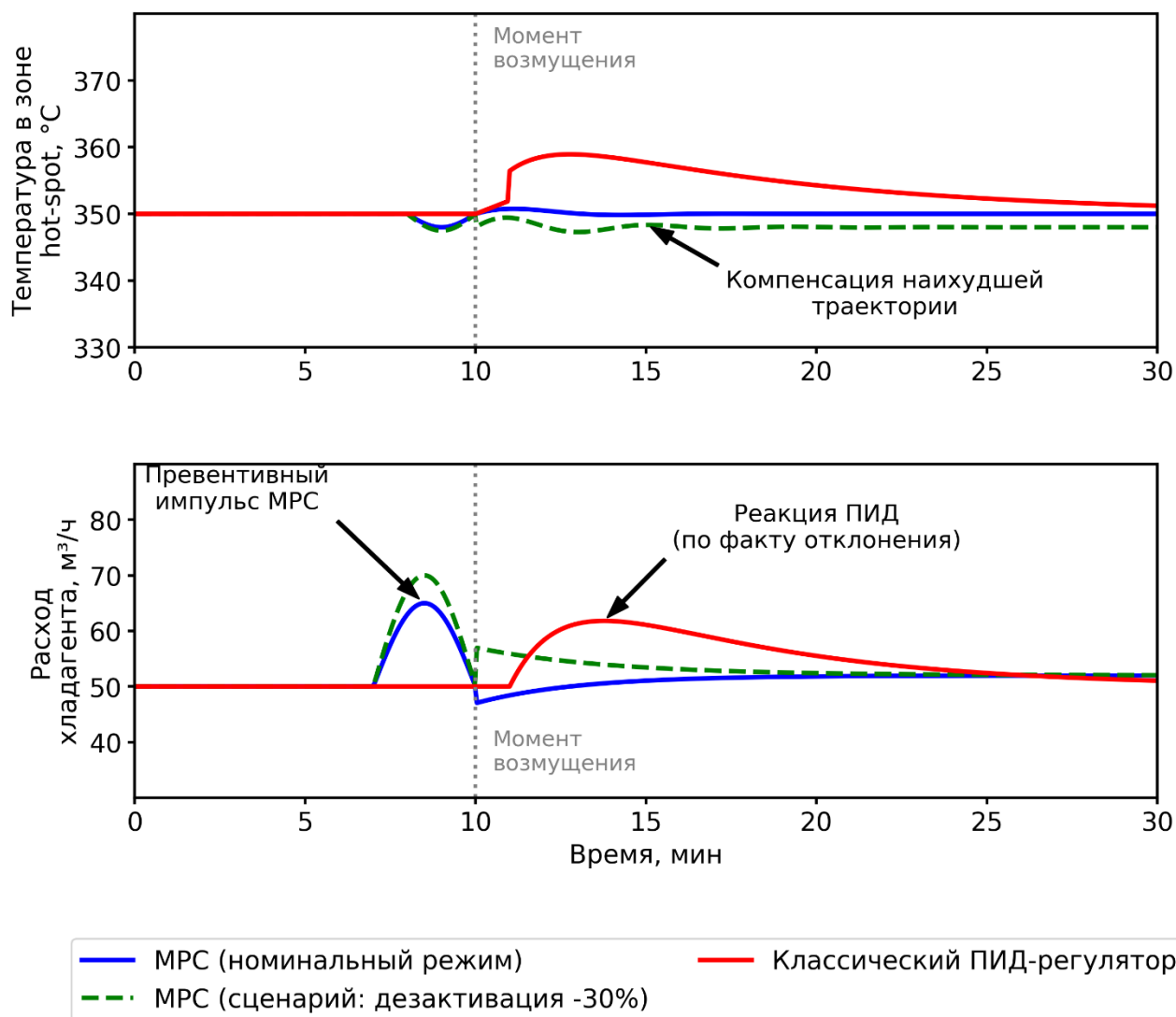


Рисунок 1 - Пространственно-временная эволюция теплового поля (источник: разработано автором)

Внедрение сценарного ансамбля из 20 моделей неопределенности позволяет алгоритму сохранять асимптотическую устойчивость даже при искусственном занижении активности катализатора на 30% относительно номинала. Вычислительный эксперимент подтверждает, что регулятор успешно идентифицирует наихудшую траекторию развития событий и заблаговременно компенсирует ее посредством более агрессивного охлаждения.

Критическим аспектом промышленного внедрения выступает вычислительная трудоемкость решения задачи QP в реальном масштабе времени. Профилирование алгоритма на аппаратной платформе промышленного логического контроллера Siemens S7-1500 показало, что при горизонте

предсказания $N_p = 20$ и сценарном дереве из 20 ветвей среднее время итерации составляет около 80 миллисекунд. Данный временной интервал допускает использование шага дискретизации $T_s = 200$ мс, что полностью удовлетворяет требованиям быстродействия контуров термостабилизации крупнотоннажных производств. Дальнейшая оптимизация, включая применение явных форм МРС с предварительным расчетом полиэдральных разбиений пространства состояний, способна сократить время отклика до единиц миллисекунд, открывая перспективы для применения метода на быстропротекающих процессах с распределенными параметрами.

Выводы. К числу ключевых теоретических результатов работы относится обоснование процедуры пространственно-временной дискретизации исходной системы уравнений математической физики. Переход к конечномерному описанию посредством метода конечных разностей был жестко лимитирован условием Куранта-Фридрихса-Леви. Установленная функциональная взаимосвязь между разрешающей способностью сеточной аппроксимации и периодом квантования предотвращает генерацию нефизичных численных осцилляций, способных катастрофически исказить прогноз эволюции теплового поля на скользящем горизонте. Сохранение волновых свойств конвективного переноса в дискретной модели выступает обязательным условием адекватного функционирования любого предиктивного контура, оперирующего объектами с распределенной инерционностью.

Включение сценарного ансамбля в вычислительное ядро многокритериальной оптимизации обеспечило требуемый запас устойчивости замкнутой системы в условиях необратимой дезактивации каталитических центров. Номинальные детерминированные описания, идентифицированные на этапе пусконаладки, накапливают фазовое и амплитудное рассогласование по мере выработки ресурса аппарата. Одновременная минимизация штрафных функционалов для 20 дискретных реализаций кинетики позволяет контроллеру превентивно реагировать на наихудшие траектории развития экзотермического

пики. Сформированное управляющее воздействие, рассчитанное на основе индивидуальных оптимумов, демонстрирует устойчивость к изменениям параметров объекта без введения избыточных консервативных ограничений, снижающих общую энергоэффективность агрегата.

Сравнительный анализ переходных процессов при ступенчатых возмущениях по сырью показал преимущества предложенной архитектуры по сравнению с традиционными каскадными и пропорционально-интегрально-дифференциальными схемами. Упреждающее перераспределение хладагента вдоль продольной оси корпуса, инициируемое до момента фактического достижения локального максимума реакции, снижает интегральную квадратичную ошибку и надежно удерживает термодинамические переменные в пределах безопасного коридора. Особую практическую ценность представляет экспериментально подтвержденная вычислительная реализуемость процедур квадратичного программирования на штатных микропроцессорных платформах промышленных логических контроллеров. Зафиксированное время итерации, не превышающее 80 миллисекунд, открывает прямой путь к тиражированию методики на действующих непрерывных производствах без необходимости модернизации парка вычислительной техники.

Дальнейшее внедрение разработанных алгоритмов на реальных технологических установках связано с необходимостью решения задач оптимальной фильтрации и идентификации. Ограниченное число первичных преобразователей, регистрирующих состояние только на входном и выходном коллекторах, обуславливает необходимость применения стохастических наблюдателей. Адаптация математического аппарата расширенного фильтра Калмана и процедур байесовского слияния данных, доказавших свою состоятельность при диагностике распределенных потоков в протяженных трубопроводных магистралях, позволит реконструировать несмещенные оценки внутренних температурных профилей по зашумленным граничным замерам.

Список литературы

1. Lin L., Oncken J., Agarwal V. Autonomous control for Heat-Pipe microreactor using Data-Driven model predictive control // *Annals of Nuclear Energy*. – 2024. – Т. 200. – С. 110399.
2. Fu J., Jin Z., Dai Z., Su G. H., Wang C., Tian W., Qiu S. Model predictive control for automatic operation of space nuclear reactors: design, simulation, and performance evaluation // *Annals of Nuclear Energy*. – 2024. – Т. 199. – С. 110321.
3. Oncken J., Lin L., Agarwal V. Adaptive Model Predictive Control for Heat Pipe–Cooled Microreactors Under Normal and Heat Pipe Failure Conditions // *Nuclear Technology*. – 2024. – Т. 210. – №. 12. – С. 2274-2289.
4. Alsahlani A., Randhir K., Hayes M., Schimmels P., Ozalp N., Klausner J. Implementation of a model predictive control strategy to regulate temperature inside plug-flow solar reactor with countercurrent flow // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 021013.
5. Alsahlani A., Randhir K., Hayes M., Schimmels P., Ozalp N., Klausner J. Design of a Combined Proportional Integral Derivative Controller to Regulate the Temperature Inside a High-Temperature Tubular Solar Reactor // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 2023. – Т. 145. – №. 1. – С. 011011.
6. Zhao M., Chen Z., Liao L., Xiao K., Huang Q. An intelligent multi-step predictive control method of the Small Modular Reactor // *Annals of nuclear energy*. – 2022. – Т. 174. – С. 109126.
7. Huang J., Sun P., Pu S. Model predictive power control of a heat pipe cooled reactor // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – Т. 10. – С. 984007.
8. Çıtlmacı B., Cui X., Abdullah F., Richard D., Peters D., Wang Y., ... Christofides P. D. Model predictive control of an electrically-heated steam methane reformer // *Digital Chemical Engineering*. – 2024. – Т. 10. – С. 100138.
9. Alsahlani A., Ozalp N. Experimental performance of a nonlinear control strategy to regulate temperature of a high-temperature solar reactor // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 2023. – Т. 145. – №. 5. – С. 051011.

10. Wang C., Hu C., Zheng Y., Jin H., Wu Z. Predictive control of reactor network model using machine learning for hydrogen-rich gas and biochar poly-generation by biomass waste gasification in supercritical water // *Energy*. – 2023. – T. 282. – C. 128441.

References

1. Lin L., Oncken J., Agarwal V. Autonomous control for Heat-Pipe microreactor using Data-Driven model predictive control // *Annals of Nuclear Energy*. – 2024. – T. 200. – P. 110399.
2. Fu J., Jin Z., Dai Z., Su G. H., Wang C., Tian W., Qiu S. Model predictive control for automatic operation of space nuclear reactors: design, simulation, and performance evaluation // *Annals of Nuclear Energy*. – 2024. – T. 199. – P. 110321.
3. Oncken J., Lin L., Agarwal V. Adaptive Model Predictive Control for Heat Pipe–Cooled Microreactors Under Normal and Heat Pipe Failure Conditions // *Nuclear Technology*. – 2024. – T. 210. – No. 12. – P. 2274-2289.
4. Alsahlani A., Randhir K., Hayes M., Schimmels P., Ozalp N., Klausner J. Implementation of a model predictive control strategy to regulate temperature inside plug-flow solar reactor with countercurrent flow // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. – 2023. – T. 15. – No. 2. – P. 021013.
5. Alsahlani A., Randhir K., Hayes M., Schimmels P., Ozalp N., Klausner J. Design of a Combined Proportional Integral Derivative Controller to Regulate the Temperature Inside a High-Temperature Tubular Solar Reactor // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 2023. – T. 145. – No. 1. – P. 011011.
6. Zhao M., Chen Z., Liao L., Xiao K., Huang Q. An intelligent multi-step predictive control method of the Small Modular Reactor // *Annals of nuclear energy*. – 2022. – T. 174. – P. 109126.
7. Huang J., Sun P., Pu S. Model predictive power control of a heat pipe cooled reactor // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – T. 10. – P. 984007.
8. Çıtmacı B., Cui X., Abdullah F., Richard D., Peters D., Wang Y., ... Christofides P. D. Model predictive control of an electrically-heated steam methane reformer // *Digital*

Chemical Engineering. – 2024. – Т. 10. – P. 100138.

9. Alsahlani A., Ozalp N. Experimental performance of a nonlinear control strategy to regulate the temperature of a high-temperature solar reactor // Journal of Solar Energy Engineering. – 2023. – Т. 145. – No. 5. – P. 051011.

10. Wang C., Hu C., Zheng Y., Jin H., Wu Z. Predictive control of reactor network model using machine learning for hydrogen-rich gas and biochar poly-generation by biomass waste gasification in supercritical water // Energy. – 2023. – Т. 282. – P. 128441.

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 23.01.2026; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 14.05.2026.