

УДК 004. 896 : 681.515.4

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_69

Архитектура интеллектуальных систем управления процессами дегидрирования углеводородов на основе нейросетевых технологий и цифровых двойников

Гулиева Нюбар Алимурад гызы  0000-0002-2634-3269

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан, д.ф.т., преподаватель
nubar.quliyeva@sdu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	РЕЗЮМЕ
История статьи Получено: 20.10.2025 Исправлено: 16.01.2026 Принято: 06.02.2026	<i>В данной статье анализируются современные подходы к управлению процессами дегидрирования углеводородов, основанные на технологиях искусственного интеллекта. Показаны перспективы перехода от классических методов математического моделирования к адаптивным системам управления на основе нейросетевых технологий и цифровых двойников. Предложены новые методы косвенного измерения каталитической активности и степени закоксованности. Результаты исследования демонстрируют возможности повышения эффективности промышленных реакторно-регенераторных блоков на 10-15%.</i>
Ключевые слова дегидрирование углеводородов, искусственный интеллект, нейронные сети, цифровые двойники, каталитические процессы, оптимизация, промышленные системы управления	

Введение

Нефтехимическая промышленность включает процессы каталитического дегидрирования, являющиеся фундаментальными в производстве олефинов и ароматических соединений. К классическим системам управления реакторно-регенераторными блоками (РРБ), которые в своей основе опираются на классическую методологию математического моделирования и на применение линейных регуляторов, в настоящее время предъявляются растущие требования к точности, адаптивности и энергоэффективности [3, 6].

Цифровое преобразование автоматизации в химической промышленности является современной тенденцией, которая предоставляет возможности для машинного обучения, искусственного интеллекта и концепцию цифровых двойников. Системы предиктивного управления и нейросетевые подходы к оптимизации каталитических процессов вызывают особый интерес.

Предлагается направление для интеграции современных методов искусственного интеллекта, таких как адаптивные нейро-нечеткие контроллеры и цифровые двойники, с традиционными методами процессного управления. Эта интеграция открывает новые возможности для повышения надежности и эффективности управления в сложных химических технологических процессах. Очевидно, данная представляет собой начальную стадию перед всеобъемлющей разработкой проекта автоматизации управления промышленными технологиями и предполагает ряда дополняющих решений в областях, как моделирования, так и адаптации и управления.

Анализ современного состояния проблемы. Классические системы управления РРБ основаны на математических моделях, описывающих кинетику химических реакций, тепло - и массообмен, гидродинамику потоков [6, с.205]. Однако такие системы имеют ряд принципиальных ограничений:

1. Сложность параметрической идентификации в условиях изменяющихся свойств сырья и старения катализатора;
2. Ограниченная адаптивность к нестационарным режимам работы;
3. Необходимость экспертного вмешательства при отклонениях от регламентных параметров;
4. Неточность косвенных измерений ключевых параметров (степень закоксованности катализатора).

Внедрение инноваций машинного обучения дает новые возможности в сфере управления многоуровневыми химическими процессами:

Глубокие нейронные сети демонстрируют способность к анализу сложных нелинейных зависимостей в многомерных данных процессов, достигая точности прогнозирования свыше 95% [7].

В качестве перспективного направления дальнейших исследований предлагается концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления процессами дегидрирования углеводородов, состоящая из нескольких ключевых уровней.

Уровень сбора данных включает использование современных интернета вещей-сенсоров для мониторинга технологических параметров, интеллектуальных анализаторов состава потоков, систем машинного зрения для диагностики оборудования, а также виртуальных датчиков на основе разработанных математических моделей, которые обеспечивают непрерывное и комплексное получение информации.

На уровне предобработки и фильтрации предлагаются алгоритмы очистки данных от выбросов и пропусков, синхронизация и объединение разнородных данных, а также статистическая обработка и нормализация, что повышает качество входной информации для последующего анализа.

Уровень аналитики и моделирования предполагает создание цифрового двойника реакторно-регенераторного блока на основе гибридного моделирования, использование нейросетевых предикторов для оценки ключевых параметров процесса и внедрение систем обнаружения аномалий и предиктивной диагностики, что дает возможность прогнозировать и предупреждать отклонения технологических режимов [7].

На уровне принятия решений целесообразно применить методы мультикритериальной оптимизации управляющих воздействий, адаптивные контроллеры, основанные на алгоритмах машинного обучения, и системы поддержки принятия решений операторами. Данный уровень обеспечивает интеллектуальное и адаптивное управление процессом, позволяя оперативно реагировать на изменения и поддерживать оптимальные режимы.

Как отмечено, настоящее исследование в большей степени несет в себе характер именно предпроектного анализа и структурного синтеза, следовательно, главной целью данного этапа исследования является структурная интеграция элементов современных технологий искусственного интеллекта и поиск эффективных конструкций в процессном управлении, обогащённом применением средств искусственного интеллекта и машинного обучения.

Принимая во внимание современные проблемы систем управления РРБ и прогресс интеллектуальных технологий управления, необходимо рассмотреть основные элементы процессов, лежащих в основе работы этих систем. Для полного понимания возможностей использования машинного обучения в управлении реакторно-регенераторными блоками необходимо изучить физико-химические основы процессов, которые происходят в них.

Технология псевдооживленного слоя с использованием мелкозернистого катализатора традиционно относится к продвинутым, быстро самоокупающимся системам. Гетерогенный каталитический процесс в псевдооживленном слое, как правило, состоит из нескольких этапов. Реагенты продвигаются к поверхности катализатора, адсорбируются активными центрами, происходит химическое превращение, после чего продукты десорбируются и

перемещаются в газовую фазу. Использование мелкозернистого катализатора в псевдооживленном состоянии повышает удельную поверхность контакта и интенсифицирует процессы массообмена. от 0,01 до 6 мм широко используется в реакторно-регенераторных блоках процессов дегидрирования углеводородов. Работа реакторного блока каталитического процесса основана на подаче газообразного реагента с определенной скоростью снизу вверх через слой катализатора, что приводит к образованию псевдожидкого состояния твердых частиц катализатора. В этом состоянии частицы катализатора перемешиваются очень интенсивно и образуют систему, напоминающую кипящую жидкость [6, с.114].

Гетерогенный каталитический процесс в псевдооживленном слое включает последовательность стадий: диффузию реагентов к поверхности катализатора, адсорбцию на активных центрах, химическое превращение, десорбцию продуктов и их диффузию в газовую фазу. Использование мелкозернистого катализатора в псевдооживленном состоянии обеспечивает значительное увеличение удельной поверхности контакта и интенсификацию массообменных процессов [1].

Наиболее распространенным методом математического описания процессов в реакторах этого типа является модель псевдооживленного слоя двух фаз. В модели псевдооживленный слой состоит из двух взаимосвязанных фаз. Плотная фаза содержит частицы катализатора и интерстициальный газ, а дискретная фаза состоит из газовых пузырей, проходящих через плотную фазу. В двухфазной модели эффективность определяется точностью описания межфазного массообмена, измеряемого коэффициентом массопередачи между фазами. Конвективный перенос в обеих фазах, диффузионное перемешивание в плотной фазе и потенциальное изменение реакционного объема – все это включено в модель, которая особенно важна для реакций, в которых изменяется количество молекул. Модель имеет практическую ценность из-за возможностей прогнозирования конверсии реагентов, селективности процесса и оптимизации режимных параметров. Современные изменения двухфазной модели включают нестационарные режимы работы и учет стефановского потока при изменении объема реакционной смеси. Использование двухфазной модели и современных методов машинного обучения предоставляет своего рода новый подход к созданию интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям процесса и обеспечивать оптимальные режимы работы реакторно-регенераторных блоков.

Процесс каталитического дегидрирования парафиновых углеводородов играет важную роль в получении мономеров для синтетических каучуков. Эндотермический процесс дегидрирования, проводимый в области высоких температур, приводит к быстрому коксованию катализатора. Непрерывная регенерация катализатора в псевдооживленном слое (ПС) является основным показателем эффективности процессов в системах реакторно-регенератор.

Моделирование процессов с твердыми пылевидными катализаторами в ПС проводится на допущении о квазигомогенности реакционной среды окислительно-восстановительных реакций выжигания кокса, а также других химических реакций, имеющих место при регенерации катализатора. Основные вопросы проектирования конструкции, а также определения режима работы системы регенерации, связаны с необходимостью достижения нужной линейной скорости вводимого в регенератор воздуха. Этим фактором определяется структура ПС, начиная с порозности слоя, скорости фильтрационного течения газа через слой, до средней скорости реакций удаления кокса с поверхности катализатора.

В области гидромеханики ПС особое внимание уделяется на факт наличия пузырьковой фазы, образующейся и уничтожающейся в разных точках пространства в

регенераторе. Учет образования пузырей и их исчезновения введением дополнительной фазы, называемой разбавленной, приводит к двухфазным моделям ПС [1, 2].

Нами принята упрощающее допущение, что структура ПС состоит из плотной и разбавленной фаз. Между этими двумя фазами имеет место тепло – и массообмен.

На рисунке показана структура взаимосвязи фаз по материальному и тепловому балансам.

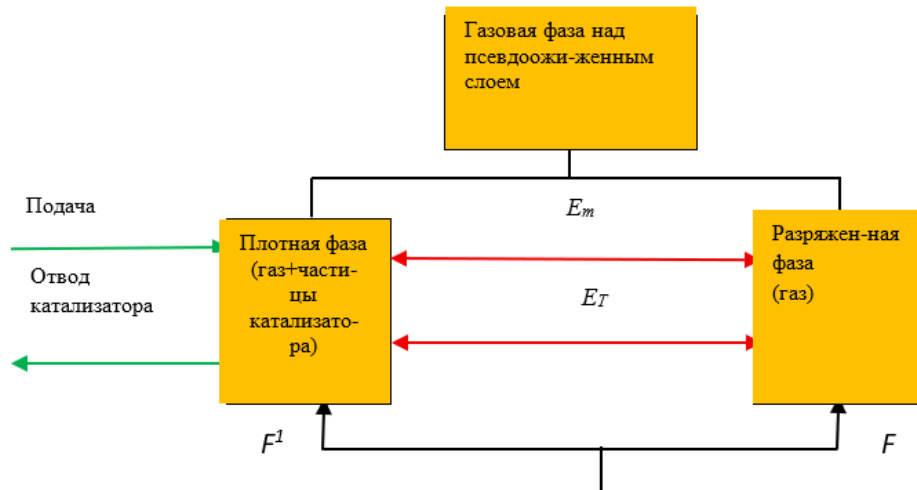


Рис.1. Двухфазная структура псевдоожиженного слоя регенерации катализатора.

Для разбавленной фазы уравнения, начальные и граничные условия имеют вид:

$$V^0 \frac{dC_i^0}{dt} + F^0 \frac{dC_i^0}{dh} = E_m A_c (C_i - C_i^0) - v_3 k_5 C_{mon}^0, \quad (1)$$

$$V^0 \frac{dC_{mon}^0}{dt} + F^0 \frac{dC_{mon}^0}{dh} = E_m A_c (C_{mon} - C_{mon}^0) + k_5 C_{mon}^0, \quad (2)$$

$$c_6 V^0 \frac{dT^0}{dt} + F^0 \frac{dT^0}{dh} = E_T A_c (T - T^0) - k_5 q_{mon} C_{mon}^0, \quad (3)$$

$$k_i = k_{0i} \exp(E_i / RT), i = 1, 3$$

Уравнения и начальные условия для газа в плотной фазе имеют вид:

$$V' \frac{dC_i}{dt} = F'(\beta_i - C_i) + E_m A_c \int_0^H (C_i^0 - C_i) dh - V'(k_1 C_C^2 C_i - k_2 C_C^2 C_i); \quad (4)$$

$$V' = \delta(1 - \varepsilon) V_{ПС}$$

$$t = 0, \quad C_{CO_2}(0) = C_{CO_2}^*, \quad C_{O_2}(0) = C_{O_2}^*,$$

$$C_{CO}(0) = C_{CO}^*, \quad C_{ad}(0) = C_{ad}^*, \quad C_{mon}(0) = C_{mon}^*,$$

Уравнения и начальные условия для твердой фазы имеют вид:

$$\rho_\kappa V \frac{dC_C}{dt} = F_\kappa [z(T, C_C) - C_C] - 2C_C^2 C_{O_2} (k_1 + k_2) V, \quad (5)$$

$$\rho_k c_k V \frac{dT}{dt} = c_k F_k (t_0 - T) + c_b F_b (T_b - E) - \int_0^H (T - T_0) dh + V \sum_{i=1}^S w_i q_i - D_{cp} (T - T_{cp}), \quad (6)$$

Обозначения:

t – время;

h – пространственная координата;

H – высота псевдоожиженного слоя;

δ – доля объема, занятого плотной фазой;

ε – доля объема, занятого твердой фазой;

C_i – концентрации в плотной фазе - кислорода (O_2), двуокиси углерода (CO_2), монооксида углерода (CO), адсорбированных углеводородов (ад), дополнительного топлива, подаваемого в регенератор (топ);

C_i^0, T^0 – концентрации вышеуказанных веществ и температура в разбавленной фазе;

C_c, T – концентрация кокса на катализаторе и температура плотной фазы, равная температуре частиц;

ρ_l, ρ_b – плотности катализатора и воздуха при температуре T ;

$V_{пс}$ – объем псевдоожиженного слоя;

$V^0 = (1 - \delta)V_{пс}$ – объем псевдоожиженного слоя разбавленной фазы;

$V' = \delta(1 - \varepsilon)V_{пс}$ – объем псевдоожиженного слоя плотной фазы;

$V = \delta\varepsilon V_{пс}$ – объемы псевдоожиженного слоя твердой фаз;

F^0, F', F_k, F_c – массовые расходы газов в разбавленной и плотной фазах, циркулирующего катализатора, а также сырья, подаваемого в реактор;

k_i, k_{0i}, E_i – параметры температурной зависимости скоростей вышеуказанных реакций;

E_m, E_T – коэффициенты массо – и теплообмена между пузырями и плотной фазой, рассчитанные на единицу объема;

A_c – эффективная поверхность контакта между разбавленной и плотной фазами;

q_i – тепловые эффекты реакций;

c_b, c_c, c_k – теплоемкости воздуха, сырья каталитического крекинга, и катализатора;

D_{cp}, T_{cp} – коэффициент теплопотерь в окружающую среду и температура окружающей среды;

n – кратность циркуляции катализатора;

v_i – стехиометрические коэффициенты;

C_i^* – начальные концентрации веществ на входе в ПС;

Интеграция методов искусственного интеллекта и концепции цифровых двойников открывает новые возможности для управления сложными каталитическими процессами дегидрирования углеводородов. Использование нейросетевых моделей в сочетании с физико-химическими уравнениями реакторно-регенераторных систем позволяет значительно повысить точность прогнозирования, устойчивость и адаптивность технологических режимов. Тем самым формируется основа для перехода к интеллектуализированным производственным комплексам нового поколения, где взаимодействие данных, моделей и решений становится непрерывным и самообучающимся процессом.

Такое развитие отражает естественную эволюцию инженерной мысли: от строгих моделей и регламентов – к гибким системам, способным понимать и предвосхищать поведение живой технологической среды. В этом переходе соединяются кинетическое моделирование процессов, происходящих в сложной реакционно-регенерационной системе, аналитика применения технологии искусственного интеллекта, которые образуя новый синтез, где как традиционная математическая формализация задачи управления, так и современные принципы управления соединяются во едином, в котором традиционные

элементы автоматизации принимают разумное сочетание с алгоритмами адаптации и искусственного интеллекта.

Заключение

Разработанная ранее двухфазная модель кипящего слоя катализатора, является базовой для создания интеллектуальной системы управления процессами дегидрирования. Используя, комбинация этой модели с глубоким математическим моделированием, цифровыми двойниками и адаптивными алгоритмами вполне возможно существенно повысить точность и надежность регулирования. Этот подход, предоставляет способ расширения детализации модели реакторно-регенераторного блока для виртуальной диагностики, а для анализа многомерных данных целесообразно применить комплекс специализированных нейросетей в целях оценки состояния катализатора и прогнозирования параметров. Перспективным направлением является внедрение нейро-нечетких контроллеров, которые обеспечат самообучающуюся адаптивность к изменению режимов и сырья. Это предложение создает прочный фундамент для развития систем управления в нефтехимии, направленных на повышение энергоэффективности и экологической безопасности.

Литература

- [1]. Антонюк, С.Н. Термокаталитические процессы переработки тяжелых нефтей: учебное пособие / С.Н.Антонюк, – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, – 2023, –35 с.
- [2]. Губайдуллин, И.М. Математическое моделирование каталитических процессов и реакторов / И.М.Губайдуллин, В.И.Быков, М.Г.Слинко. –М.: Химия, –2021. –368 с.
- [3]. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. –М.: Наука, –2019. –502 с.
- [4]. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. Учебное пособие. <https://studfile.net/preview/8848175/page:22/>
- [5]. Нагиев, А.Г. Моделирование нестационарных тепловых режимов реакторного блока установки каталитического крекинга для пуска и управления в критических ситуациях / А.Г.Нагиев, Н.А.Амрахова // Азербайджанский химический журнал, №4, –Баку, –2001, – с.40-45.
- [6]. Островский, Г.М. Методы оптимизации химических реакторов / Г.М.Островский, Ю.М.Волин. –М.: Химия, –2020. –296 с.
- [7]. Подольный, В.А. Применение машинного обучения и нейросетей в химической промышленности // Вестник науки. –2025. №3 (84).

Xülasə

Neyroset texnologiyaları və rəqəmsal əkilərə əsaslanan karbohidrogen dehidrogenləşmə proseslərinin ağıllı idarəetmə sistemlərinin arxitekturası

Quliyeva N.Ə.

Açar sözlər: karbohidrogen dehidrogenləşməsi, süni intellekt, neyron şəbəkələri, rəqəmsal əkilər, katalitik proseslər, optimallaşdırma, sənaye idarəetmə sistemləri.

Məqalədə karbohidrogenlərin dehidrogenləşməsi proseslərinin idarə edilməsi üçün süni intellekt texnologiyalarına əsaslanan müasir yanaşmalar tədqiq edilir. Klassik riyazi modelləşdirmə metodlarından neyron şəbəkə texnologiyalarına və rəqəmsal əkilər konsepsiyasına əsaslanan adaptiv idarəetmə sistemlərinə keçidin perspektivləri göstərilir. Katalizator aktivliyinin və kokslaşma dərəcəsinin dolayı ölçülməsi üçün yeni metodlar təklif edilir. Tədqiqat nəticələri sənaye reaktor-regeneratör bloklarının effektivliyinin artırılması imkanlarını nümayiş etdirir.

Summary

Architecture of intelligent systems for managing hydrocarbon dehydrogenation processes based on neural network technologies and digital twins

Guliyeva N.A.

Keywords: *hydrocarbon dehydrogenation, artificial intelligence, neural networks, digital twins, catalytic processes, optimization, industrial control systems.*

This article investigates modern approaches to hydrocarbon dehydrogenation process control based on artificial intelligence technologies. The prospects of transition from classical mathematical modeling methods to adaptive control systems based on neural network technologies and digital twins are shown. New methods for indirect measurement of catalytic activity and coking degree are proposed. Research results demonstrate possibilities for 10-15% efficiency improvement of industrial reactor-regenerator units.

Architecture of intelligent control systems for hydrocarbon dehydrogenation processes based on neural network technologies and digital twins