

УДК 004.896

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сабитов М.А., Сенкевич Л.Б.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень,  
e-mail: [sabitov.m.a@yandex.ru](mailto:sabitov.m.a@yandex.ru), [liydmila1@yandex.ru](mailto:liydmila1@yandex.ru)

В статье рассматривается применение интеллектуальных технологий в химической промышленности, при этом производится условное деление на теоретический и прикладной аспект. Прикладной аспект характеризует конкретные достижения научно-технического прогресса и представлен крупными компаниями, производящими средства промышленной автоматизации, такими как SIEMENS, Valmet, Rockwell Automation, ABB Group, EMERSON, Yokogawa, Endress + Hauser. Теоретический аспект характеризует перспективные направления, имеющие математическое обоснование и подтверждение средствами имитационного моделирования, но ограниченные или мало используемые на производстве. Поскольку научно-исследовательская деятельность компаний направлена на практическое применение и имеет большие возможности для осуществления этой цели, теоретический аспект описывает достижения отдельных исследовательских коллективов, продвигающих преимущественно модели на основе нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Произведенный анализ показывает широкую область применимости указанных технологий, а также способность малых коллективов разрабатывать эффективные технологии для автоматизации и оптимизации технологических процессов. Полученные результаты ярко характеризуют следующие тенденции: развивающуюся интеграцию знаний различной природы, высокие темпы цифровизации промышленности, широкое внедрение интеллектуальных технологий во все уровни управления, в том числе в сфере химической и перерабатывающей промышленности.

**Ключевые слова:** химическая промышленность, цифровизация промышленности, автоматизированная система управления, интеллектуальные технологии, прогнозирующая модель, нечеткая логика, искусственные нейронные сети, Интернет вещей

## THE USE OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN THE CHEMICAL INDUSTRY

Sabitov M.A., Senkevich L.B.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: [sabitov.m.a@yandex.ru](mailto:sabitov.m.a@yandex.ru), [liydmila1@yandex.ru](mailto:liydmila1@yandex.ru)

The article discusses the use of intelligent technologies in the chemical industry. It is conditionally dividing into theoretical and applied aspects. The applied aspect characterizes the specific achievements of scientific and technological progress and it is represented by large industrial automation companies, such as SIEMENS, Valmet, Rockwell Automation, ABB Group, EMERSON, Yokogawa, Endress + Hauser. The theoretical aspect characterizes perspective directions that have confirmed by mathematical and simulation tools, but are limited or little used in production. Since the research activities of companies are aimed at practical application and have great potential for achieving this goal, the theoretical aspect describes the achievements of individual research groups. These groups promote mainly models based on fuzzy logic and artificial neural networks. These models show the high level of local and private research. The obtained results vividly characterize the following trends: the developing integration of knowledge of various nature, the high rate of digitalization of the industry, the widespread introduction of intelligent technologies at all levels of control.

**Keywords:** chemical industry, digitalization of industry, automated control system, intellectual technologies, predictive model, fuzzy logic, artificial neural networks, Internet of things

Химическая промышленность представляет одну из самых перспективных отраслей производства, отличающуюся большим разнообразием продукции и огромным влиянием на образ жизни современного общества. Это своеобразный мост между сырьевой базой и такими секторами экономики, как машиностроение, строительство, металлургия. Химическая отрасль позволяет сырье, получаемое в нефтяной и газовой промышленности, довести до уровня готовых изделий, обладающих четкими функциональными и потребительскими свойствами. Подобная особенность открывает большие перспективы интеграции и совместного развития нефтегазового сектора экономики и сектора химического. Кроме того, химическая продукция является ос-

новой для функционирования текстильной, мебельной, целлюлозно-бумажной, пищевой отраслей. В то же время для химической промышленности характерны такие черты, как высокий уровень энергетических расходов, повышенные требования к качеству управления, безопасности и устойчивости технологических процессов, метрологическим характеристикам измерительных каналов. Процессы химической технологии имеют двойственную детерминированно-стохастическую природу, описываемую в терминах химической термодинамики, химической кинетики, гидродинамики, электродинамики, тепломассообмена и других научных дисциплин. Из-за большого количества переменных, влияющих на поведение физико-химических процессов, и слож-

ности математического описания на языке механистического моделирования (моделей типа «белый ящик», созданных на основе фундаментальных законов физики и химии) все большее внимание уделяется так называемым технологиям искусственного интеллекта (ИИ) – в основном искусственным нейронным сетям (ИНС) и нечеткой логике. Для последних неполнота знаний о процессе является менее существенной, в силу чего могут преодолеть недостатки механистического подхода при работе со сложными и нелинейными системами.

Сейчас можно с уверенностью сказать, что ожидания вполне оправдались – технологии ИИ стали одним из базовых инструментов вычислительных экспериментов. Часть методов, суть которой составляет обучение на основе данных, была выделена в отдельную категорию – машинное обучение. На волне роста имитационного моделирования элементы ИИ стали рассматриваться в качестве полноценного метода описания систем и процессов самой различной природы, а в химической отрасли эти элементы оцениваются в качестве одной из движущихся сил трансформации. При этом зачастую игнорируются свойственные элементам ИИ проблемы вычислительной эффективности и переобучения.

Целью данной работы является анализ современных подходов к использованию технологий искусственного интеллекта для управления технологическими процессами химической технологии и их описания в рамках контура «модель-регулятор».

### Материалы и методы исследования

Описание объектов химической промышленности – реакторов, абсорберов, экстракторов, ректификационных колонн, теплообменников, насосов, компрессоров, участков трубопроводов – является ключевым этапом для проектных, научно-исследовательских и диагностических работ; в частности, на основе модели возможен синтез системы управления. Управление химическими процессами составляет одну из основных научных проблем в современной теории автоматического управления в силу указанных ранее причин. Использование методов ИИ в процессах управления – интеллектуальное управление – служит целесообразной альтернативой в следующих достаточно общих случаях:

- процессы слишком сложны для математического представления;
- модели процессов сложно и дорого оценивать;
- существуют неопределенности в работе процесса;

– процесс носит нелинейный, распределенный, неполный и стохастический характер [1].

Нечеткость используемых понятий не позволяет с полной уверенностью гарантировать, что такая альтернатива является наилучшим подходящим средством. Многие задачи вполне приемлемо подвергнуть декомпозиции, если сложность полученных подзадач ниже исходной (относительно требований к необходимым вычислительным ресурсам). Задачи управления удобно ранжировать в зависимости от уровня в структуре системы управления. Чаще всего рассматривают трехуровневую структуру распределенной АСУ ТП:

1. Нижний уровень (КИП, датчики, исполнительные механизмы) – на этом уровне сбор информации и выдача управляющих воздействий.

2. Средний уровень (ПЛК, регуляторы) – на этом уровне реализуются алгоритмы автоматического управления и регулирования, пуска и останова оборудования, аварийных отключений и защит.

3. Верхний уровень (SCADA, HMI) – на этом уровне производятся визуализация, диспетчеризация и оптимизация технологического процесса.

Поскольку управление производственными процессами во многом основывается на результатах системного анализа, будем рассматривать как единое целое связку «модель – система управления».

На нижнем уровне интеллектуальные технологии могут быть физически реализованы в виде интеллектуальных датчиков – адаптивных устройств, содержащих в себе изменяемые по внешним сигналам алгоритмы работы и параметры и в которых, кроме этого, реализована функция метрологического самоконтроля. При этом интеллектуальность, как правило, заключается во встроенном микроконтроллере, что, согласно некоторым классификациям, определяет третью стадию развития микросхем измерительных приборов. В качестве управляющего ядра наиболее часто используются следующие типы ядер: 8051, 8052, AVR, MSP430, ARM-CortexM0, ARM-CortexM3.

В химической промышленности использование интеллектуальных измерительных приборов представляется целесообразным по следующим соображениям:

- повышение надежности и точности измерений в сложных технологических условиях;
- встроенная функция самодиагностики приборов;
- возможность проведения первичной обработки измерительной информации

в датчике, преобразования выходного сигнала в масштабах разных единиц измерения;

- наличие встроенных интерфейсов для визуализации мнемонических символов команд, цифровых индикаторов, а также взаимодействия с персоналом;

- поддержка множества коммуникационных протоколов (Profibus, Fieldbus Foundation).

Внедрение интеллектуальных устройств – это первый шаг на пути к цифровому производству, реализуемый на нижнем и среднем уровне автоматизации и позволяющий получить полный и оперативный контроль всех технологических процессов и состояния оборудования. Дальнейшие шаги (средний и верхний уровень) предполагают глубокий анализ данных о технической системе – здесь можно выделить концепцию цифровых двойников, предиктивную диагностику, оптимизацию в режиме реального времени, облачные технологии и сервисы, виртуальную и дополненную реальность. Как правило, коммуникация оборудования в рамках цифровизации попадает под влияние концепции промышленного Интернета вещей (IIoT), что обуславливает возникновение проблемы информационной безопасности.

Многие бренды выделяют решения в области автоматизации производства для химической отрасли в отдельный каталог или группу товаров – таковы, например, SIEMENS, Valmet, Rockwell Automation, ABBGroup, EMERSON, Yokogawa, Endress + Hauser.

Широкий ассортимент микропроцессорных средств, представляемый указанными компаниями, на нижнем уровне автоматизации преимущественно однороден по функциональным и техническим характеристикам. Большой интерес представляют решения, внедрение которых предполагается на втором и последующих шагах цифровизации производства (упоминалось ранее), опыт и эффект применения подобных решений.

Так, инструмент Yokogawa Process Data Analytics позволяет извлекать функциональные зависимости между характеристиками процесса и влияющими факторами для выявления причин аномалий, что особенно полезно в процессах, включающих химические реакции. В 2018 г. для компании Sumitomo Seika Chemicals Company команда специалистов Yokogawa произвела анализ аномалий процесса радикальной полимеризации с использованием Yokogawa Process Data Analytics. После того, как факторы, вызывающие колебания качества продукта, были определены, команда проекта разработала новые рабочие процедуры

по корректировке количества добавок в зависимости от хода реакции, а также дисплей для сравнения текущих показателей с показателями прошлых партий [2].

На выявление производственных аномалий с использованием технологий искусственного интеллекта ориентирован и модуль FactoryTalk Analytics LogixAI от компании Rockwell Automation, ранее известный как Project Sherlock. Этот дополнительный модуль для контроллеров ControlLogix, по словам разработчиков, выполняет работу специалиста по анализу данных, а поскольку он встраивается непосредственно в шасси управления и передает данные контроллера через объединительную панель для построения прогнозных моделей, то обеспечивается непрерывный контроль производственного процесса. Рабочие могут быть уведомлены о проблемах путем настройки сигналов тревоги на человеко-машинном интерфейсе (HMI) или на панели мониторинга [3].

Проект Siemens MindSphere, по мнению разработчиков, соединяет «оборудование и физическую инфраструктуру с цифровым миром». Эта открытая облачная платформа действительно предоставляет мощные промышленные приложения с расширенными аналитическими и цифровыми услугами. MindSphere предлагает ускоренную разработку надежных решений для промышленного Интернета вещей, открытый PaaS с доступом к собственной облачной разработке (управление идентификацией и доступом), широкие возможности подключения устройств, предприятий и баз данных. С помощью библиотеки MindConnect FB 1500 контроллеры S7-1500 могут напрямую подключаться к MindSphere и цифровому миру посредством TIA Portal STEP 7. Структура безопасности MindSphere соответствует принципам отраслевых стандартов (IEC 62443, ISO / IEC 2700) и государственным рекомендациям по обработке данных в облачных средах [4].

Химические процессы обычно демонстрируют нелинейную, многопараметрическую динамику с учетом ограничений на вход и выход. Поскольку любая модель выражает некий компромисс между полнотой и простотой описания, выгодно представить функциональные зависимости между входами и выходами в ином виде, нежели представляемыми дифференциальным исчислением. С учетом этих особенностей в противовес классическому ПИД-регулированию развивается направление интеллектуальных регуляторов: нейрорегуляторов и нечетких регуляторов. Поскольку человек-опера-

тор становится важной частью системы управления, архитектура такой системы не может быть четкой, следовательно, интеллектуальные регуляторы выглядят вполне целесообразным элементом современной системы управления. Реализации нечеткого контроля в некотором смысле являются имитацией законов управления, которые используют люди, а нейронные сети – имитацией алгоритмов поиска решения. Нейронные методы обеспечивают способность к обучению, тогда как нечеткие методы обеспечивают гибкую способность представления знаний. Интеграция этих двух методологий, которая использует преимущества своих компонентов, способна преодолеть некоторые ограничения отдельных методов. Наглядным примером развития данного направления является, например, модель нечеткого ПИД-регулятора контура управления температуры в колонне деизобутанизации [5], разработанная с использованием пакета System Identification Tool (Matlab). В работе [6] ИНС была использована для решения задачи оптимального управления процессом дегидрирования метилбутена в изопрен; нейросетевая модель была разработана в пакете Statistica компании Statsoft с применением модуля Neural Networks.

Поскольку нечеткие контроллеры по существу являются нелинейными, а динамическое поведение системы не очень хорошо известно, важно, чтобы стабильность нечетких контроллеров была исследована перед развертыванием, чтобы убедиться, что система управления безопасна для работы и желаемая производительность гарантируется при наличии изменений, помех и неопределенностей во время работы.

С 1970-х гг. активно развивается управление на основе прогнозирующей модели, которое в настоящий момент активно поддерживается всевозрастающей неудовлетворенностью традиционными инструментами теории управления. Так, в статье [7] прогнозирующая модель была разработана для предсказания выхода химических продуктов коксования по характеристикам качества исходных углей. Применение метода прогноза в практике коксохимического производства показало, что точность прогнозирования предлагаемого метода выше, чем у аналогов. В другой научной статье [8] показано применение ИНС для прогнозирования коэффициента теплопроводности сложных углеводородных смесей. Как прогнозирующая модель может быть использована ИНС, построенная для решения обратной задачи спектроскопии.

### Результаты исследования и их обсуждение

Информационные системы, подобные MindSphere и развиваемые под флагом цифровизации промышленности, можно встретить у разных брендов: ABBAbility – ПО от ABBGroup, где ИИ реализован совместно с IBM (IBM Watson Internet of Things); Netilion – промышленный Интернет вещей от Endress+Hauser; Plantweb – цифровая экосистема от Emerson. Все эти системы реализуют, хотя и в различной степени, аналитику данных, диагностику состояния оборудования, поддержку принятия решений, что обеспечивает снижение проектных рисков и улучшение экономических показателей предприятия.

Некоторые научные работы продвигают методы ИИ не как альтернативу механистическому подходу, а как инструмент для поиска решения уравнений и их систем. Разработаны методы решения дифференциальных уравнений в частных производных с использованием нейронных различной архитектуры. Так, в работе [9] изучаются свойства приближенного параметрического нейросетевого решения дифференциального уравнения, описывающего процессы в неизотермическом химическом реакторе. В статье [10] предложена архитектура нейронной сети для решения уравнений математической физики.

Представленные направления демонстрируют лишь часть перспективных направлений, выделенную с акцентом на моделирование и управление в химической промышленности. Те не менее даже эта часть позволяет судить о том, насколько обширны возможности использования технологий ИИ в химической промышленности.

### Заключение

Промышленная автоматизация, развиваемая и продвигаемая известными брендами, обнаруживает нескрываемый интерес к реализации интеллектуальных технологий, постепенно занимая нишу на рынке наукоемкого производства. Каталоги продукции таких компаний охватывают все три уровня автоматизации производства, а внедрению этой продукции способствует сложившаяся общественная оценка бренда, функциональные, технические характеристики и потребительские свойства. Такие организации, как и компании предпринимательского сектора, в большей степени тяготеют к достижениям прикладной науки, поэтому спектр исследований сужен программами развития, целями и потребностями организаций.



Теоретические исследования наиболее интересны при рассмотрении относительно независимых исследовательских коллективов, которые в большей степени свободны в выборе научных изысканий, хотя зачастую, будучи отнесенными к конкретной образовательной или научной организации, имеют конкретную специфику. Стоит отметить, что сама возможность проведения вычислительных экспериментов с использованием различных технологий ИИ обусловлена наличием широкого спектра специализированного открытого программного обеспечения: такие библиотеки языка Python, как Tensorflow, Keras, Theano, Scikitlearn, PyTorch, уже успели завоевать популярность не только среди специалистов в области машинного и глубокого обучения, но и специалистов инженерного профиля, стремящихся использовать новейшие разработки в своих исследованиях.

Внедрение технологий ИИ порождает новые вызовы, которые деформируют исходные представления о целях и методах цифровизации. Применение ИИ в промышленности требует тщательного анализа рисков и ограничений. Применительно к химической отрасли важно обеспечить минимизацию опасностей химических производств, следовательно, любые нововведения должны быть обоснованы, целесообразны и надежны в смысле однозначности производимого эффекта.

#### Список литературы

1. Siddique N. Intelligent Control A Hybrid Approach Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms. Springer, 2013. 282 p.

2. High-quality Production with the Fusion of Process Knowledge and Data Analysis Technology – Process Data Analysis Using Machine Learning [Electronic resource]. URL: <https://www.yokogawa.com/at/library/resources/references/successstory-sumitomoseika-chemicals-en/> (date of access: 21.09.2021).

3. Rockwell Automation Releases AI Module to Improve Industrial Production [Electronic resource]. URL: <https://ir.rockwellautomation.com/press-releases/press-releases-details/2019/Rockwell-Automation-Releases-AI-Module-to-Improve-Industrial-Production/default.aspx> (date of access: 21.09.2021).

4. MindSphere The cloud-based, open IoT operating system [Electronic resource]. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:5c6ea6fd89061eba2c6d226949104c8f7af38e6f/version:1516878408/dfpl-b10042-00-7600-flyer-mindsphere-en.pdf> (date of access: 21.09.2021).

5. Джембеков А.М., Щербатов И.А. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23. № 4. С. 557–571.

6. Шаймухаметов Д.Р., Мустафина С.А., Шаймухаметова Д.В. Создание искусственной нейронной сети для определения оптимального температурного режима ведения химического процесса // Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24. № 3. С. 551–558.

7. Васильева Е.В., Черкасова Т.Г., Неведров А.В., Папин А.В. и др. Кластерный анализ результатов экспериментальной оценки выхода химических продуктов коксования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2 (132). С. 87–96.

8. Григорьев Б.А., Александров И.С., Герасимов А.А. Прогнозирование коэффициента теплопроводности сложных углеводородных смесей с помощью искусственных нейронных сетей // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2017. № 2 (30). С. 32–38.

9. Коваленко А.Н., Черноморец А.А., Петина М.А. О применении нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Научные ведомости. Серия: Экономика. Информатика. 2017. № 9 (258). С. 103–110.

10. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Модель неізотермічного хімічного реактора на основі параметричних нейронних мереж. Гібридний метод // Сучасні інформаційні технології та ІТ-освіта. 2015. № 2 (11). С. 271–278.