

УДК 681.5

DOI [10.26102/2310-6018/2025.51.4.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.005)

Информационно-измерительная и управляющая система гидрирования ацетилена

М.Г. Баширов, К.А. Крышко✉

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Салават,
Российская Федерация*

Резюме. Процесс гидрирования ацетилена является важным этапом в производстве этилена и других ценных химических продуктов. Однако его эффективность во многом зависит от точности контроля технологических параметров, таких как температура, давление и расход реагентов. Несмотря на это, большинство исследований в области гидрирования ацетилена сосредоточено на совершенствовании технологических аспектов процесса, в то время как вопросы разработки современных информационно-измерительных и управляющих систем остаются недостаточно изученными. В рамках проведенного исследования была предложена информационно-измерительная и управляющая система, направленная на повышение эффективности процесса гидрирования ацетилена. В основе системы лежит виртуальный анализатор, который позволяет рассчитывать степень конверсии в режиме реального времени на основе данных с контрольно-измерительных приборов. Оптимизация модели виртуального анализатора была выполнена с использованием генетического алгоритма, что обеспечило высокую точность расчетов. На основе данных виртуального анализатора был разработан алгоритм управления, корректирующий параметры процесса для поддержания оптимальных условий реакции. Система управления была реализована в среде Centum VP, что позволяет интегрировать ее в существующую инфраструктуру автоматизации.

Ключевые слова: производство этилена, гидрирование ацетилена, нефтехимия, система управления, автоматизация процесса.

Для цитирования: Баширов М.Г., Крышко К.А. Информационно-измерительная и управляющая система гидрирования ацетилена. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1996> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.005

Information, measuring and control system for acetylene hydrogenation

M.G. Bashirov, K.A. Kryshko✉

Ufa State Petroleum Technical University, Salavat, the Russian Federation

Abstract. The acetylene hydrogenation process is an important step in the production of ethylene and other valuable chemical products. However, its effectiveness largely depends on the accuracy of control of technological parameters, such as temperature, pressure and consumption of reagents. Despite this, most research in the field of acetylene hydrogenation focuses on improving the technological aspects of the process, while the development of modern information, measuring and control systems remains poorly understood. As part of the study, an information-measuring and control system was proposed aimed at increasing the efficiency of the acetylene hydrogenation process. The system is based on a virtual analyzer, which allows you to calculate the degree of conversion in real time based on data from instrumentation. Optimization of the virtual analyzer model was performed using a genetic algorithm, which ensured high accuracy of calculations. Based on the data of the virtual analyzer, a control algorithm was developed that corrects the process parameters to maintain optimal reaction conditions. The control system was implemented in the Centum VP environment, which will allow it to be integrated into the existing automation infrastructure.

Keywords: ethylene production, acetylene hydrogenation, petrochemistry, control system, process automation.

For citation: Bashirov M.G., Kryshko K.A. Information, measuring and control system for acetylene hydrogenation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1996> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.005

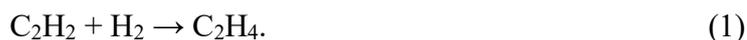
Введение

Гидрирование ацетилена является одним из важных этапов при производстве этилена. Технологический процесс гидрирования очень чувствителен к изменениям технологических параметров (температура процесса, давление, химический состав сырья). Любые отклонения технологических параметров от оптимальных значений могут привести не только к снижению выхода целевого продукта, но и увеличить возникновение побочных продуктов реакции [1]. Для решения этой проблемы предлагается разработка информационно-измерительной и управляющей системы, для более точного регулирования технологического процесса.

Основная цель данной системы заключается в обеспечении стабильности реакции за счет минимизации отклонений технологических параметров от заданных значений. Следствием является повышение эффективности процесса и качества продукции. Для достижения цели были решены следующие задачи: создана информационная модель конверсии ацетилена с применением методов искусственного интеллекта; разработан алгоритм управления процессом на основе полученной модели; реализовано программное обеспечение для алгоритма управления процессом; выполнена оценка эффективности предложенных решений

Материалы и методы

Гидрирование ацетилена – химический процесс, применяемый в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Суть процесса заключается в насыщении ацетилена, находящегося в сырье, водородом для получения этилена (1). Реакция протекает с применением катализатора, в основном с применением платины, палладия или никеля [2].



Для эффективного протекания процесса необходимо тщательно поддерживать оптимальные значения перечисленных ранее технологических параметров. Выход технологических параметров за диапазоны регламентируемых значений напрямую влияет на ход реакции. В данном случае подвержены скорости реакции, степени конверсии ацетилена, количеству полученного этилена. Повышенная температура способствует увеличению образования этана (C₂H₆), снижая выход целевого продукта. Низкая температура замедляет реакцию, делая процесс менее эффективным. Повышенное давление хоть и способствует ускорению реакции, но это вызывает дополнительные нагрузки на оборудование, что влечет к потенциальным повреждениям. Низкое давление, аналогично низкой температуре, замедляет реакцию. Дополнительно необходимо соблюдать правильное соотношение ацетилена и водорода. Нарушение соотношения может привести либо к малой конверсии ацетилена, либо к избыточному гидрированию ацетилена до этана [3].

Одним из показателей эффективности процесса является степень конверсии ацетилена – доля исходного ацетилена, которая была преобразована в этилен. Традиционно степень конверсии определяется с помощью лабораторных анализов. Однако этот подход характеризуется значительными временными задержками, что делает его непригодным для оперативного управления процессом.

Традиционно в системах управления химическими процессами используются ПИД-регуляторы. Подобный регулятор прост в реализации и обеспечивает базовый уровень регулирования технологических параметров. Однако их основной недостаток заключается в том, что они плохо справляются с нелинейными зависимостями между технологическими параметрами процесса.

В последнее время большое внимание уделяется использованию современных методов искусственного интеллекта для автоматизации химических процессов. В работе [4] описывается применение нечеткой логики для управления процессом гидрирования ацетилена. Этот метод позволяет учитывать неопределенности в данных, однако требует значительных усилий для настройки правил и плохо масштабируется на сложные процессы.

Недостатком большинства существующих решений является их ограниченная способность оперативно адаптироваться к изменениям в технологическом процессе. В этой связи становится очевидной необходимость создания инструментов для оперативного определения степени конверсии ацетилена в режиме реального времени. Такие решения должны быть интегрированы в информационно-измерительную и управляющую систему, чтобы своевременно корректировать параметры процесса и поддерживать их в заданных пределах¹. Оценка степени конверсии ацетилена в режиме реального времени позволит как минимизировать образование побочных продуктов реакции, так и увеличить выход целевого продукта.

Как было отмечено ранее, применяемые методы анализа степени конверсии ацетилена характеризуются значительными временными задержками, что затрудняет оперативное управление процессом. Для решения этой проблемы был разработан виртуальный анализатор, позволяющий рассчитывать степень конверсии ацетилена в режиме реального времени. Виртуальный анализатор выполняет расчет конверсии на основе текущих показаний контрольно-измерительных приборов (КИП) процесса [5, 6].

Модель виртуального анализатора была построена с использованием методологии множественной регрессии, где выходным параметром является степень конверсии ацетилена, а входными параметрами – данные от датчиков технологического процесса [7, 8]. Для повышения удобства мониторинга и контроля технологического процесса катализатор в реакторе разделен на три функциональных слоя. Каждому из этих слоев соответствует индивидуальный виртуальный анализатор, что позволяет оперативно отслеживать параметры процесса на каждом этапе и обеспечивать точную настройку условий для достижения максимальной эффективности.

$$\Delta U_i = F_{\text{Ээф}} \cdot K_{i1} + F_{\text{ВсГ}} \cdot K_{i2} + T_{i1} \cdot K_{i3} + T_{i2} \cdot K_{i4} + T_{i3} \cdot K_{i5} + \left(\frac{\Delta T_i}{T_{i1} \cdot \tau_i} \right) \cdot K_{i1..6}, \quad (2)$$

где U_i – глубина конверсии i -го слоя; τ_i – время пребывания сырья в реакторе; ΔT_i – перепад температуры i -го слоя; $F_{\text{Этилен}}, F_{\text{Водород}}$ – массовые расходы этилена и водорода соответственно; T_{i1}, T_{i2}, T_{i3} – температуры по высоте i -го слоя соответственно; T_i^-, T_i^+ – нижняя и верхняя границы допустимой температуры в реакторе соответственно; $K_{i1..6}$ – коэффициенты переменных i -го слоя.

После разработки модели виртуального анализатора выполнили поиск оптимальных весовых коэффициентов модели. Для этого применили один из инструментов искусственного интеллекта – генетический алгоритм. Данный алгоритм является методом оптимизации, основанном на принципах «генетики», то есть с использованием естественного отбора.

¹ Пустовая О.А., Пустовой Е.А. *Информационно-измерительные системы и АСУ ТП*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия; 2022. 104 с.

Подобный метод нашел свое применение в вопросах моделирования процесса гидрирования ацетилена, так как значительное большинство нефтеперерабатывающих и нефтехимических процессов характеризуются сложными и объемными взаимосвязями между технологическими параметрами.

Для обучения генетического алгоритма использовались экспериментальные данные, полученные с действующей установки гидрирования ацетилена. В эти данные входят: температуры технологического процесса, массовые расходы этилена и водорода и лабораторные анализы степени конверсии ацетилена.

Алгоритм начинает работу с популяции случайных решений (весовых коэффициентов) и постепенно улучшает их, выбирая наиболее подходящие варианты на основе заданной целевой функции. Каждое решение представляется в виде хромосомы, где гены соответствуют значениям весовых коэффициентов. Размер популяции составил 50 хромосом, тем самым обеспечив достаточное разнообразие решений.

Для каждой хромосомы вычислялась целевая функция, которая оценивала ее пригодность. В качестве целевой функции использовалась среднеквадратичная ошибка между рассчитанными значениями степени конверсии ацетилена и реальными данными.

Далее проводилась селекция наиболее подходящих решений с использованием метода турнирного отбора. Случайным образом выбирались несколько хромосом, и лучшая из них переходила в следующее поколение.

После селекции выполнялись операции скрещивания и мутации для создания новых решений. При скрещивании две родительские хромосомы обменивались частями своих генов, создавая потомков с вероятностью 80 %. При мутации вносились небольшие случайные изменения в генах потомков с вероятностью 5 %.

Работа генетического алгоритма завершалась при отсутствии улучшения целевой функции в течение последних 20 поколений.

Целесообразность выбора генетического алгоритма заключается в устойчивости к нелинейностям, способности находить глобальный оптимум гибкости. В отличие от классических методов оптимизации, генетический алгоритм исследует всё пространство решений, а также метод способен адаптироваться к различным моделям, не требуя предварительных знаний о структуре данных.

Использование генетического алгоритма для оптимизации модели виртуального анализатора позволило повысить точность контроля технологических параметров, что подтвердилось экспериментальными данными.

На основе данных, получаемых от разработанного виртуального анализатора, был создан алгоритм управления технологическим процессом гидрирования ацетилена. Алгоритм представляет собой четкую последовательность инструкций, которые определяют дальнейшие действия системы управления в зависимости от текущего значения степени конверсии ацетилена [9]. Блок-схема алгоритма управления технологическим процессом представлена на Рисунке 1.

Для наглядного представления логики работы алгоритма была разработана блок-схема, демонстрирующая пошаговые действия системы управления.

Работа алгоритма начинается с определения степени конверсии ацетилена в режиме реального времени с использованием виртуального анализатора. Полученное значение сравнивается с заданными пороговыми уровнями, которые соответствуют оптимальным условиям проведения реакции. В зависимости от результатов сравнения алгоритм выбирает одно из нескольких направлений действий:

1. Если степень конверсии находится в пределах допустимого диапазона, система поддерживает текущие технологические параметры процесса без изменений.

2. Если степень конверсии ниже нижнего порогового значения, алгоритм инициирует корректировку параметров процесса для повышения эффективности реакции.

3. Если степень конверсии превышает верхний порог, что может свидетельствовать о риске образования побочных продуктов, система снижает интенсивность реакции.

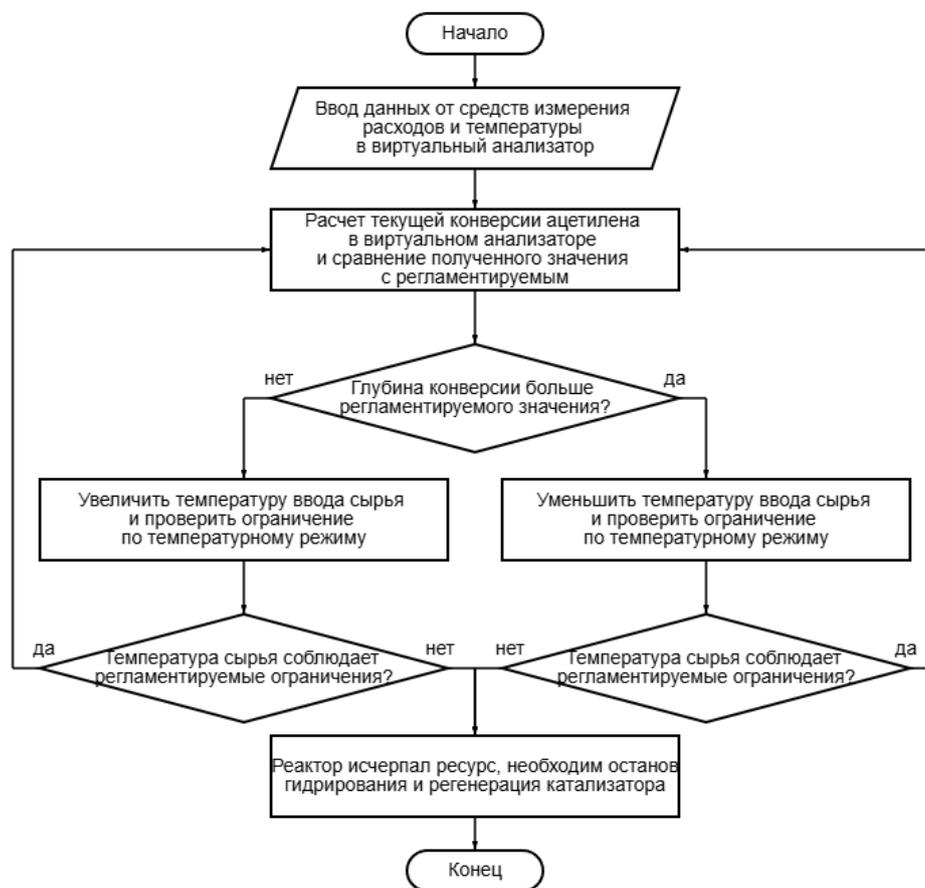


Рисунок 1 – Разработанный алгоритм управления технологическим процессом
Figure 1 – Developed process control algorithm

Однако кроме учета текущей конверсии ацетилена выполняется учет соблюдения температурного режима. Для безопасного протекания реакции гидрирования ацетилена предусмотрены максимально допустимые температурные ограничения. Выход за пределы температурных ограничений грозит возникновением аварийных ситуаций. При возникновении необходимости для обеспечения требуемой степени конверсии повышения температуры свыше максимально установленного значения, принимается решение о необходимости регенерации катализатора.

Разработанный алгоритм управления реализован в среде разработок систем управления технологическими процессами Centum VP – современной платформе для автоматизации технологических процессов, широко используемой в нефтехимической промышленности². Данная среда обеспечивает высокий уровень надежности, удобство интеграции с существующими системами и поддержку сложных алгоритмов управления [10, 11].

Разработка программного обеспечения началась с проектирования архитектуры системы. На Рисунке 2 изображены ключевые компоненты архитектуры и их взаимосвязи. Архитектура разделена на три основных модуля.

² CENTUM VP. Yokogawa Electric Corporation. URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/#Details> (дата обращения: 20.04.2025).

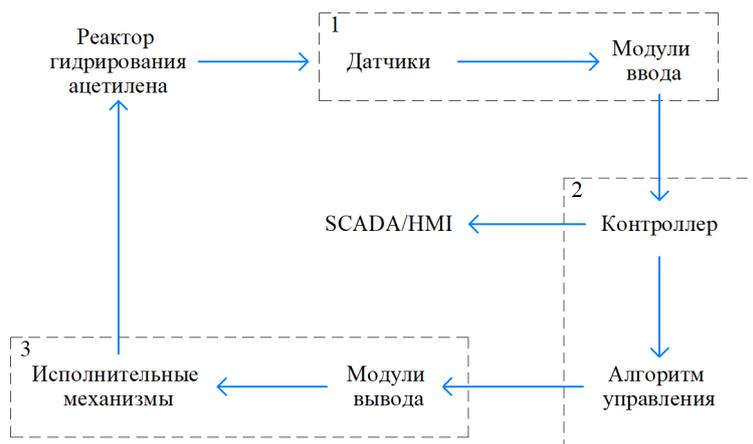


Рисунок 2 – Архитектура программного обеспечения
Figure 2 – Software architecture

Первый модуль – информационно-измерительная система (сбор, передача и обработки данных о состоянии объекта управления), второй модуль – управляющая система (анализ данных, принятие решений и формирование управляющих команд с учетом разработанного алгоритма управления), третий модуль – реализация управляющих воздействий (отработка регулирующих клапанов).

Для построения логики информационно-измерительной и управляющей системы был применен язык функциональных блоков (Function Block Diagram, FBD). В рамках инструментов разработки распределенных систем управления при этом использовались ключевые функциональные блоки, включая индикаторы входа (PVI), блоки установки соотношения (RATIO), вычислительные блоки (CALCU) и ПИД-регуляторы (PID).

Завершением программной реализации стала мнемосхема реактора гидрирования, которая была разработана с учетом конфигурации действующей установки. Мнемосхема представляет собой графическое отображение технологического процесса, позволяющее операторам контролировать ключевые параметры в реальном времени. На мнемосхеме были отображены все контрольно-измерительные приборы (КИП), установленные на реальной установке, такие как датчики температуры, датчики давления, расходомеры, поточные анализаторы.

Дополнительно на мнемосхеме были добавлены интерфейсные элементы, предназначенные для визуализации данных, получаемых от виртуальных анализаторов. Интеграция виртуального анализатора позволила создать замкнутый контур управления, в котором корректировка параметров процесса осуществляется на основе актуальных данных о степени конверсии.

Результаты

Для оценки эффективности разработанного алгоритма управления процессом гидрирования ацетилена были проанализированы лабораторные данные о степени конверсии ацетилена. Исследовался диапазон с 33 по 37 день, так как в этом диапазоне происходило падение конверсии ацетилена. 33-му дню соответствовала температура процесса 52,92 °С, а 37-му дню – 55 °С. Для возвращения высокой степени конверсии ацетилена, согласно алгоритму управления, рекомендовано снижение температуры подачи смеси в реактор. Следовательно, оптимальным режимом является поддержание температуры смеси на входе в реактор 52,92 °С на исследуемом диапазоне времени. Таким образом, температура снижена на 2,08 °С или 3,85 %.

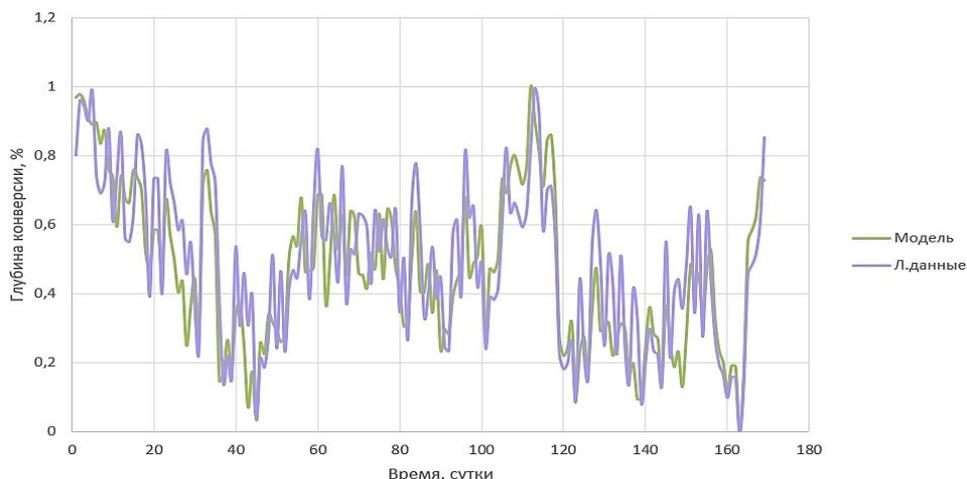


Рисунок 3 – Сравнение лабораторных данных и результатов моделирования степени конверсии ацетилена на третьем слое катализатора
Figure 3 – Comparison of laboratory data and simulation results of the degree of acetylene conversion on the third catalyst layer

Далее была апробирована система информационной поддержки оператора, формирующая рекомендации по корректировке температурного режима в реакторе гидрирования ацетилена на основе данных виртуальных анализаторов. Результаты показали, что точность виртуальных анализаторов составляет 97,2 % в штатных режимах и 92,5 % при возмущениях. Ложные срабатывания наблюдались менее чем в 2 % случаев, что подтверждает надежность системы.

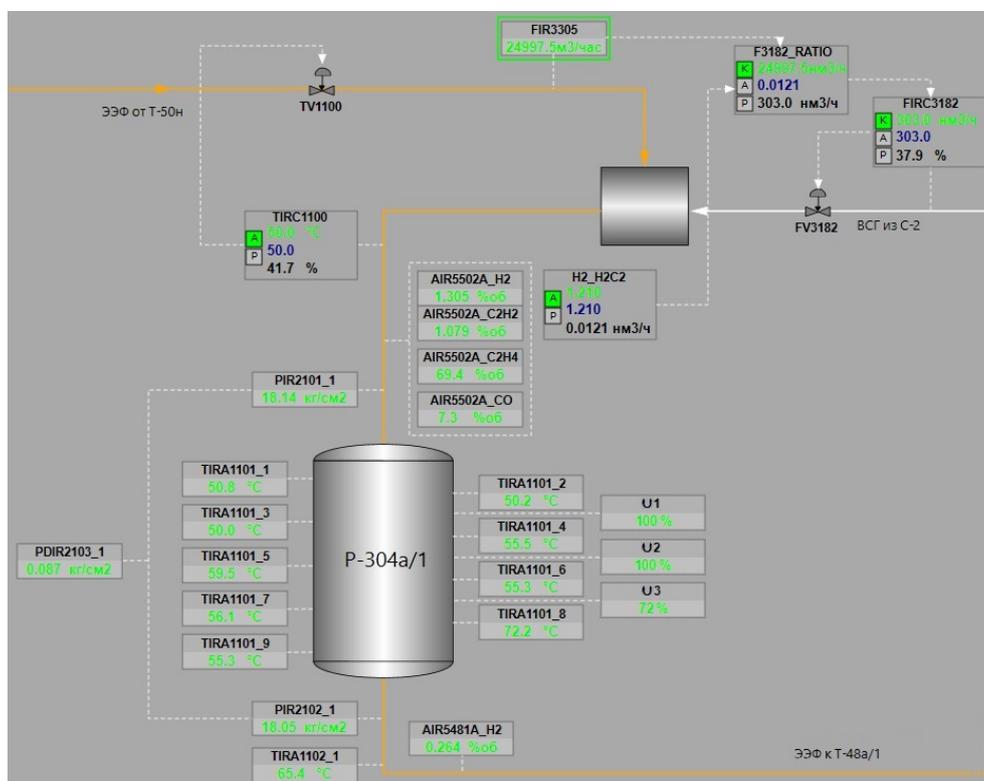


Рисунок 4 – Мнемосхема информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена
Figure 4 – Mnemonic diagram of the information-measuring and control system of the acetylene hydrogenation process

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют значительное улучшение точности управления процессом гидрирования ацетилена при использовании разработанного алгоритма. Сравнение лабораторных данных о степени конверсии ацетилена и предложенного подхода показывает, что применение разработанного алгоритма управления позволит повысить эффективность процесса на 3,85 %. Однако разработанная система имеет потенциал для дальнейшего совершенствования. Текущая модель виртуального анализатора основана на данных о температуре процесса, давлении и расходе сырья. Потенциально возможно расширение набора входных параметров, учитывая состав исходной смеси и наличие примесей. Кроме совершенствования модели виртуального анализатора, возможно масштабирование системы. Масштабирование заключается в управлении несколькими реакторами гидрирования ацетилена одновременно.

Заключение

В рамках проведенного исследования была разработана информационно-измерительная и управляющая система гидрирования ацетилена, направленная на повышение эффективности процесса за счет оптимизации степени конверсии ацетилена в режиме реального времени. Полученные результаты подтверждают, что разработанная система позволяет повысить стабильность процесса, увеличить выход этилена и снизить количество побочных продуктов. В дальнейшем планируется расширение функционала системы за счет интеграции дополнительных параметров и увеличения масштабов охватываемых объектов управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Крышко К.А., Баширов М.Г., Хафизов А.М. Система контроля закоксованности катализатора гидрирования ацетилена в этан-этиленовой фракции. *Химия и технология топлив и масел*. 2022;(2):38–41. <https://doi.org/10.32935/0023-1169-2022-630-2-38-41>
 Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Coking Control System Acetylene Hydrogenation Catalyst in Ethane-Ethylene Fraction. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022;58(2):38–41. <https://doi.org/10.1007/s10553-022-01385-5>
2. Глыздова Д.В., Афонасенко Т.Н., Темерев В.Л., Шляпин Д.А. Гидрирование ацетилена на PD-ZN/сибунит-катализаторе: влияние растворителя и монооксида углерода. *Нефтехимия*. 2021;61(3):388–396. <https://doi.org/10.31857/S0028242121030102>
 Glyzdova D.V., Afonassenko T.N., Temerev V.L., Shlyapin D.A. Acetylene Hydrogenation on PD-ZN/Sibunit Catalyst: Effect of Solvent and Carbon Monoxide. *Petroleum Chemistry*. 2021;61(4):490–497. <https://doi.org/10.1134/S0965544121050169>
3. Стыщенко В.Д., Мельников Д.П. Селективное гидрирование диеновых и ацетиленовых соединений на металлсодержащих катализаторах. *Журнал физической химии*. 2016;90(5):691–702. <https://doi.org/10.7868/S0044453716040300>
 Stytsenko V.D., Mel'nikov D.P. Selective Hydrogenation of Dienic and Acetylenic Compounds on Metal-Containing Catalysts. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016;90(5):932–942. <https://doi.org/10.1134/S0036024416040294>
4. Меликов Э.А. Принципы управления каталитическим процессом в нечетких условиях. *Булатовские чтения*. 2018;5:176–178.

- Melikov E.A. Principles of Catalytic Process Control in Fuzzy Conditions. *Bulatovskie chteniya*. 2018;5:176–178. (In Russ.).
5. Веревкин А.П., Денисов С.В., Муртазин Т.М., Устюжанин К.Ю. Подготовка данных для построения виртуальных анализаторов в задачах усовершенствованного управления. *Автоматизация в промышленности*. 2019;(3):12–17.
 6. Тугашова Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2013;9(3):97–103.
Tugashova L.G. Virtual Analyzers Indicators of the Quality of the Rectification Process. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*. 2013;9(3):97–103. (In Russ.).
 7. Диго Г.Б., Диго Н.Б., Можаровский И.С., Торгашов А.Ю. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации. *Информатика и системы управления*. 2011;(4):17–27.
Digo G.B., Digo N.B., Mozharovskiy I.S., Torgashov A.Yu. Models Evaluation of Virtual Analyzers for Mass Transfer Rectification Process. *Information Science and Control Systems*. 2011;(4):17–27. (In Russ.).
 8. Мусаев А.А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными ТП. *Автоматизация в промышленности*. 2003;(8):28–44.
 9. Муртазин Т.М., Линецкий Р.М., Веревкин А.П., Хусниyarov М.Х. Оптимизация управления технологическими процессами переработки нефти по показателям технико-экономической эффективности (на примере висбрекинга гудрона). *Территория Нефтегаз*. 2013;(5):20–24.
Murtazin T.M., Linetsky R.M., Verevkin A.P., Husniyarov M.H. Optimization of Control Technological Oil Refining Processes According to Indices of Technical and Economic Efficiency (On the Example of Tar Viscosity Breaking). *Oil and Gas Territory*. 2013;(5):20–24. (In Russ.).
 10. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (АРС): 10 лет в России. *Автоматизация в промышленности*. 2013;(1):12–19.
 11. Малышкин А.Б. Проблемы и перспективы автоматизации технологических процессов на нефтехимических предприятиях. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;(5–3):134–137. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.097>
Malyshkin A.B. Problems and Prospectives Technological Process Automation at Petrochemical Plants. *International Research Journal*. 2016;(5–3):134–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.097>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTORS

Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Салават, Российская Федерация.
e-mail: eapp@yandex.ru

Mussa G. Bashirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Salavat, the Russian Federation.

Крышко Константин Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Салават, Российская Федерация.

e-mail: kryshko.usptu@mail.ru

Konstantin A. Kryshko, Senior Lecturer at the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Salavat, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; одобрена после рецензирования 05.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.

The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 05.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.