

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2023 А.И. Шинкевич, А.Р. Касимова, А.А. Алексеева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 03.07.2023

В статье описываются потенциальные преимущества внедрения и использования цифрового двойника нефтехимических предприятий как виртуального представления производственного процесса, включая его технологические параметры и аналитику в реальном времени для обеспечения экологически ответственного подхода к производству. Авторы указывают на возможность оптимизации производства путем использования датчиков и систем автоматического контроля, а также на возможности использования цифрового двойника для тестирования и уточнения предположений. Кроме того, внедрение цифрового двойника на химическом предприятии, в том числе с элементами ИИ позволит обеспечить оперативное управление процессом. Предложенное авторами дерево решений позволяет предприятию химического профиля снизить воздействия на окружающую среду, используя систему поддержки принятия решений для управления очисткой сточных вод на нефтехимическом предприятии. Трудоемкие расчеты прогнозирования модернизации с учетом производственных, экономических и экологических факторов могут быть получены с помощью цифрового двойника не только оперативно, но и заданной степенью вариаций и достоверности.

Ключевые слова: цифровой двойник, химическая промышленность, оптимизация, управленческие решения.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-87-94

EDN: QGNMGR

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности приносит множество преимуществ, однако сопровождается негативными последствиями для окружающей среды. По данным Международного Энергетического Агентства [1], нефтехимия является быстрорастущим сектором потребления нефти, однако получает недостаточно внимания, чем другие секторы, несмотря на свое растущее значение. Именно поэтому повышение экологичности нефтехимического производства является актуальной проблемой, которую необходимо решать.

Современное нефтехимическое производство обладает более развитыми технологиями и подходами к охране окружающей среды, чем раньше. За последние десятилетия индустрия нефтехимического производства стала более экологически ответственной и стремится минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Шинкевич Алексей Иванович, профессор, доктор экономических наук, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Логистика и управление».

E-mail: ashinkevich@mail.ru

Касимова Алина Ринадовна, старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность».

E-mail: alrkasimova@kstu.ru

Алексеева Анна Александровна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология».

E-mail: AlekseevaAA@corp.knrntu.ru

Нефтехимический комплекс традиционно является драйвером роста экономики России, прирастая на 6-7% в год. Несмотря на геополитическую обстановку, которая привела к временному физическому спаду в химическом производстве в 2022 году, химическая промышленность сегодня является одним из наибольших источников загрязнения окружающей среды в Российской Федерации. И это касается не только количества выбрасываемых веществ при работе производств, но и их токсичности и ядовитости при авариях [2]. Данный факт обусловлен значительным износом основных фондов, который является следствием отставания химического машиностроения в стране (в настоящее время в России работает не более 3-4 НИИ данного профиля) [3]. В 2014 году Минпромторг РФ и Минэнерго РФ утвердили стратегию развития химического и нефтехимического комплекса до 2030 года, в соответствии с которой должна повыситься эффективность производства предприятий сектора. Использование технологий, которые не наносят вреда окружающей среде, является одним из главных способов минимизации негативного вклада химической промышленности. Ориентация на достижение целей устойчивого развития особенно остро повысила интерес и обусловила необходимость выработки научных подходов к управлению производственными процессами на предприятиях, характеризующихся высокой экологической на-

грузкой на состояние природной среды [4].

Сегодня на рынке существует множество экологически чистых технологий, которые позволяют значительно снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и водоемы. Эти технологии используют более безопасные и эффективные способы производства, что минимизирует количество отходов и выбросов. Для интенсификации процесса перехода от устаревших технологий к обновлению производственной базы химических предприятий в России с 2014 года были введены принципы перехода на наилучшие доступные технологии (НДТ) наряду со стратегией развития нефтехимического комплекса [5]. В соответствии с ИТС 31-2021 [6] введение на предприятии контроля, автоматизации стадий технологического процесса, влияющих на образование и выделение загрязняющих веществ, относится к наилучшим доступным технологиям. Помимо этого, контроль, регулировка и автоматизация стадий технологического процесса относится к области НДТ и для других отраслей химической промышленности (производство полимеров, основных органических веществ) [7]. Внедрение на предприятиях химической промышленности системы автоматического контроля технологических показателей является сложным, затратным процессом. Использование новейших информационных технологий в реализации процессов порождает области и проблемы управления информацией, специфичные для конкретных решений в промышленности [8]. В целях осуществления контроля технологического процесса и управления выбросами, сбросами и отходами химического производства могут быть использованы цифровые двойники.

Целью исследования является изучение возможности использования цифрового двойника химического предприятия для автоматизированного контроля и корректировки технологических параметров в интересах снижения воздействия на окружающую среду и его дальнейшее моделирование.

Для достижения поставленной цели авторами были поставлены следующие задачи:

- анализ концепции цифрового двойника производства;
- изучение возможности внедрения цифрового двойника в химическое производство и определение технологических параметров для моделирования;
- определение алгоритма работы цифрового двойника производства для контроля и автоматизированного принятия управленческих решений с последующим созданием модели.

В работе исследованы особенности создания цифрового двойника для процесса экологизации как не основного, но важного производ-

ственного процесса обеспечения устойчивого развития производства. Предложенный авторами алгоритм изменения оптимизации мощности производства основан на учёте данных, полученных с модели сбора и обработки информации цифрового двойника нефтехимического предприятия. Вопрос защищенности и сохранности данных в цифровом двойнике будет исследован авторами дополнительно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В производстве цифровой двойник – это виртуальное представление физического процесса в том виде, в каком он спроектирован, построен и обслуживается, которое дополнено технологическими параметрами и аналитикой в режиме реального времени. Представленные данные основываются на точных конфигурациях технологического процесса, параметрах входящих и выходящих потоков. По сути, это операционный контекст цифрового двойника, необходимый для поддержки оптимизации производительности технологической установки. В то время как цифровой двойник модели носят концептуальный характер, оперативные данные представляют собой цифровое представление реальных физических событий. Оперативные данные необходимы для запуска аналитических приложений, которые определяют состояние и поведение цифрового двойника, основанного на производительности, и позволяют оптимизировать и улучшать процессы.

Технология цифровых двойников позволяет смоделировать в виртуальной среде практически весь технологический процесс с его материальной базой, а также запустить предварительную оптимизацию производства, включая создание программ для логических контроллеров и виртуальную пусконаладку. Теоретически, если в цифровой двойник загрузить все параметры входящих потоков нефтехимического производства, технологические параметры установок, то система автоматически рассчитает параметры образующихся продуктов, в том числе концентрацию загрязняющих веществ в отходящих газах, сточных водах, количество и качество образующихся отходов, потери энергии и ресурсов на каждой стадии производства. При добавлении в цифровой двойник сценариев развития событий (изменение качественного состава основного сырья, производительности установки) можно спрогнозировать концентрации выбросов и сбросов и автоматически скорректировать процесс для обеспечения экологичности и эффективности установки, используя искусственный интеллект. На примере принципиальной блок-схемы технологического процесса химического производства, которое мо-

жет описывать нефтехимического предприятия (переработка нефти, производство полимеров и продуктов органического синтеза) авторы рассмотрели преимущества использования цифрового двойника предприятия. Принципиальная блок-схема нефтехимического предприятия представлена на рисунке 1.

Представленная на рисунке 1 блок-схема описывает примерную технологию нефтехимического производства. Технология, как правило включает несколько процессов, на каждом из которых есть вход и выход материальных потоков. При этом потоки выходы одних потоков могут является входами для других. На каждом процессе образуются отходы, которые могут быть направлены в ОС (окружающую среду) или возвращены в технологический процесс. Количество процессов и потоков на нефтехимическом предприятии может быть весьма большим (свыше 50 процессов и потоков на одном технологическом предприятии для производства целевого продукта). При этом каждый процесс, поток и технологическая схема в целом могут иметь до 50 контролируемых параметров (температура, давление, концентрация, расход и т.д.). Внедрение и использование цифрового двойника нефтехимического предприятия может дать ряд следующих преимуществ:

1. Оптимизация производства.

Датчики и системы автоматизированного контроля, уже имеющиеся на производственной линии, можно использовать для создания цифрового двойника технологии (процесса) и ана-

лиза важных показателей производительности. Корректировки цифрового двойника могут выявить новые способы оптимизации производства, уменьшения отклонений и помочь в анализе основных причин.

2. Тестирование, проверка и уточнение предположений.

Цифровые двойники могут быть виртуальными прототипами на этапе проектирования технологической линии и корректироваться для тестирования различных симуляций или проектов, прежде чем инвестировать в надежный прототип. Например, при заданных начальных значениях концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, цифровой двойник позволяет оперативно менять параметры оборудования, расход вод, концентрации реагентов, т.д., и на выходе получать концентрации химических веществ в очищенных водах. С использованием искусственного интеллекта цифровой двойник может предложить технологические решения по возврату сточных вод в производство.

3. Управление качеством.

Мониторинг и реагирование на данные датчиков интернета вещей (IoT) во время технологического процесса необходимы для поддержания высокого качества производимой продукции. Цифровой двойник может моделировать каждый процесс технологической линии, чтобы определить, где возникают отклонения, будет ли превышение концентрации загрязняющих веществ на выходе из очистительного оборудования или можно ли использовать иные

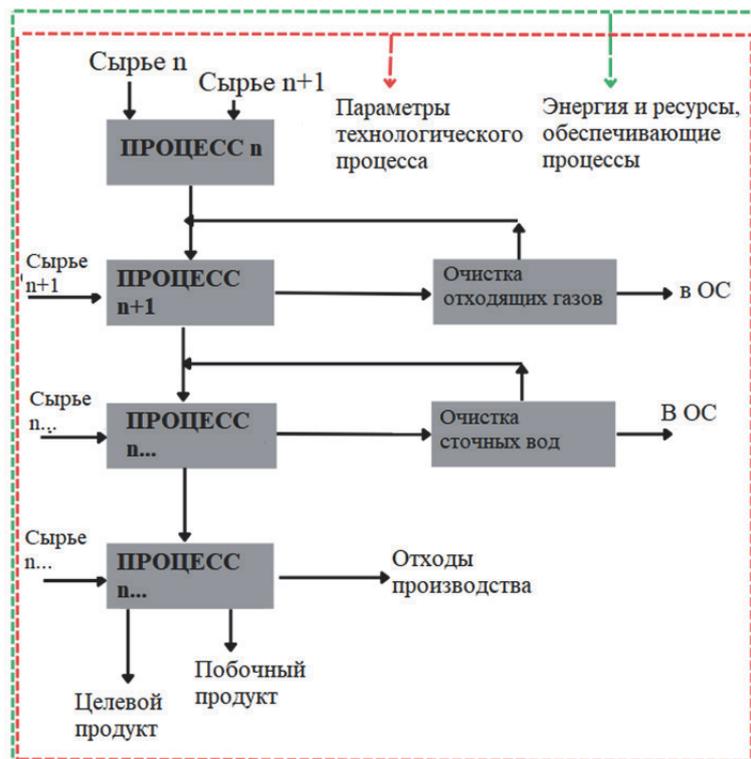


Рис. 1 – Принципиальная блок-схема технологического процесса производства/переработки органических веществ (предложено авторами)

реагенты, методы очистки, возврат потока на определенный процесс, чтоб избежать загрязнения ОС

4. Профилактическое обслуживание.

Цифровые двойники для отдельного оборудования или производственных процессов могут выявлять отклонения, указывающие на необходимость профилактического ремонта или технического обслуживания до того, как возникнет отклонение в технологическом процессе. Они также могут помочь оптимизировать уровни нагрузки на оборудование изменением технологических параметров.

5. Повышение уровня интеграции между несвязанными системами.

Оперативный доступ к данным со всех автоматизированных датчиков и систем, возможность обмена информацией между процессами сможет обеспечить контроль за всем технологическим процессом в целом, что улучшит коммуникацию и позволит уменьшить время принятия решений. Датчики входного контроля сигнализируют о несоответствии входящего в технологический процесс сырья, а цифровой двойник рассчитывает возможные последствия и превышения ПДК на выходе из систем очистки.

Наличие на предприятии нефтехимического профиля (в особенности непрерывного цикла) автоматизированной системы управления технологическим процессом дает преимущество при моделировании цифрового двойника предприятия, поскольку большая часть параметров уже отслеживается в режиме реального времени. В любом случае для создания модели цифрового двойника изначально необходимо составляется прототип, в котором воспроизводится все процессы, их характеристики, параметры потоков, оборудования, характеристики при различных условиях эксплуатации.

На следующем этапе происходит объединение математических моделей, полученных на первом этапе, текущие данные и интерфейс для управления цифровым двойником в агрегированный цифровой двойник. К текущим данным относятся данные в режиме реального времени от датчиков оборудования, выходные данные производственных платформ и систем, а также выходные данные систем по всей цепочке распределения.

Далее происходит процедура тестирования полученного цифрового двойника перераспределение производственных процессов с целью их автоматизации, корректировка. Таким образом для моделирования цифрового двойника нефтехимического предприятия необходимо определить технологические параметры, влияющие на производство, конечный продукт и на ОС. Для каждого предприятия 1 и 2 категории в соответствии с НДТ существуют маркерные

вещества. В целях защиты ОС необходим обязательный мониторинг и контроль выбросов, сборов маркерных веществ. Помимо маркерных веществ необходим мониторинг и контроль технологических параметров каждого процесса, потока, оборудования, а также информация о воздействии на технологический процесс человеческих и непроизводственных факторов, таких как погода, ошибка персонала при управлении техпроцессом. В соответствии с ИТС, связанным нефтехимической промышленностью (ИТС 18-2019, ИТС 30-2021, ИТС 31-2021, ИТС 32-2022) необходимо проводить оптимизацию процессов водопотребления, системы обращения с отходами, мониторинг выбросов маркерных загрязняющих веществ в воздухе в соответствии с установленными требованиями. На основании этих данных можно сформировать модель сбора и обработки данных цифровым двойником, которая представлена на рисунке 2. Помимо данных представленных на рисунке 2, также могут включаться данные с камер наружного наблюдения, а также данные из открытых источников, позволяющих обогатить модели интеллектуального анализа данных.

Если рассматривать информационную структуру цифрового двойника, то она включает в себя следующие компоненты:

- датчики IoT;
- сети передачи данных;
- серверы;
- система поддержки принятия решений, включающая в себя системы, занимающиеся очисткой данных и их интеллектуальным анализом.

Алгоритм работы цифрового двойника производства включает в себя следующие шаги:

1. Сбор данных с производственного оборудования. Для этого используются различные датчики и датчиковые системы, которые передают информацию о состоянии оборудования и производственных процессах.

2. Обработка данных. Собранные данные обрабатываются и анализируются для выявления проблемных мест и улучшения производительности.

3. Создание виртуальной модели производственного процесса. На основе собранных и обработанных данных создается виртуальная модель производственного процесса, которая точно отражает реальный процесс.

4. Мониторинг производственных процессов. Цифровой двойник производства используется для мониторинга производственных процессов и выявления любых отклонений от нормы. На данном этапе можно использовать как кадровые ресурсы предприятия (онлайн-мониторинг человеком), так и системы искусственного интеллекта, которые самостоятельно смогут детектировать отклонения, при соответствующем обучении.

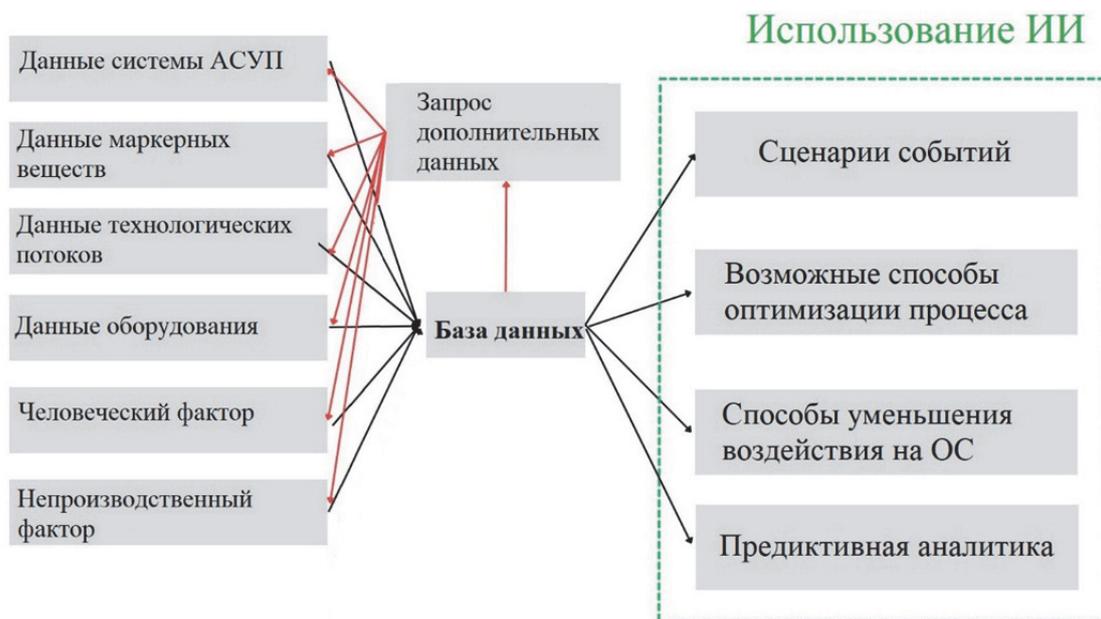


Рис. 2 – Модель сбора и обработки информации цифрового двойника нефтехимического предприятия (предложено авторами)

5. Принятие управленческих решений. Алгоритм работы цифрового двойника производства позволяет автоматически принимать управленческие решения, производить построение рекомендательных систем на основе данных, полученных с виртуальной модели производственного процесса

6. Создание модели. На основе собранных данных и выявленных проблемных мест создается модель производственного процесса, которая может быть использована для оптимизации производительности и улучшения качества продукции.

Рассмотрим более подробно систему поддержки принятия решений для управления очисткой сточных вод на нефтехимическом предприятии [9]. К примеру, модернизация технологической линии позволит увеличить производительность на 4 %, как данный фактор отразится на очистке сточных вод, которые образуются в данном процессе. Изменения параметров химического процесса могут значительно повлиять на очистку сточных вод. Если концентрация или расход загрязняющих веществ выше, то требуется более интенсивная очистка или использование более продвинутых технологий, чтобы снизить уровень загрязнения.

Например, если концентрация загрязняющих веществ в сточных водах повышается, может потребоваться использование более эффективных методов очистки, таких как фильтрация на мембранах, аэрационный процесс, биологическая очистка или дополнительные ступени очистки, такие как денитрификация или обеззараживание.

С другой стороны, если концентрация загрязнения понижается, то можно использо-

вать более простые методы очистки, такие как физико-химическая очистка или обеззараживание.

Также важно отметить, что изменение параметров химического процесса может повлиять на эффективность выбранной технологии очистки. Например, уменьшение концентрации загрязняющих веществ может снизить эффективность использования определенного типа оборудования, такого как мембранный процесс или обратный осмос, и привести к необходимости выбора другого типа оборудования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим вопрос необходимости увеличения мощности производства, используя дерево принятых решений. Для построения дерева решений необходимо исходить из основных вопросов, которые представлены на рисунке 3.

После принятия управленческого решения о необходимости увеличения мощности производства, исходя из его целесообразности ИИ, имея все необходимые параметры технологического процесса, сведения о нормах сброса сточных вод в ОС, а также обладая современными данными о методах и способах очистки из открытых источников и из закрытых сведений (внесенный вручную новейших технологических разработках) может оперативно и с высокой степенью достоверности рассчитать целесообразность модернизации производства, затрат, воздействия на ОС и предложить наиболее рациональные пути модернизации производства [10].

Кроме того, ИИ позволяет разработать заданное количество сценариев и представить в заданном графическом или табличном виде.

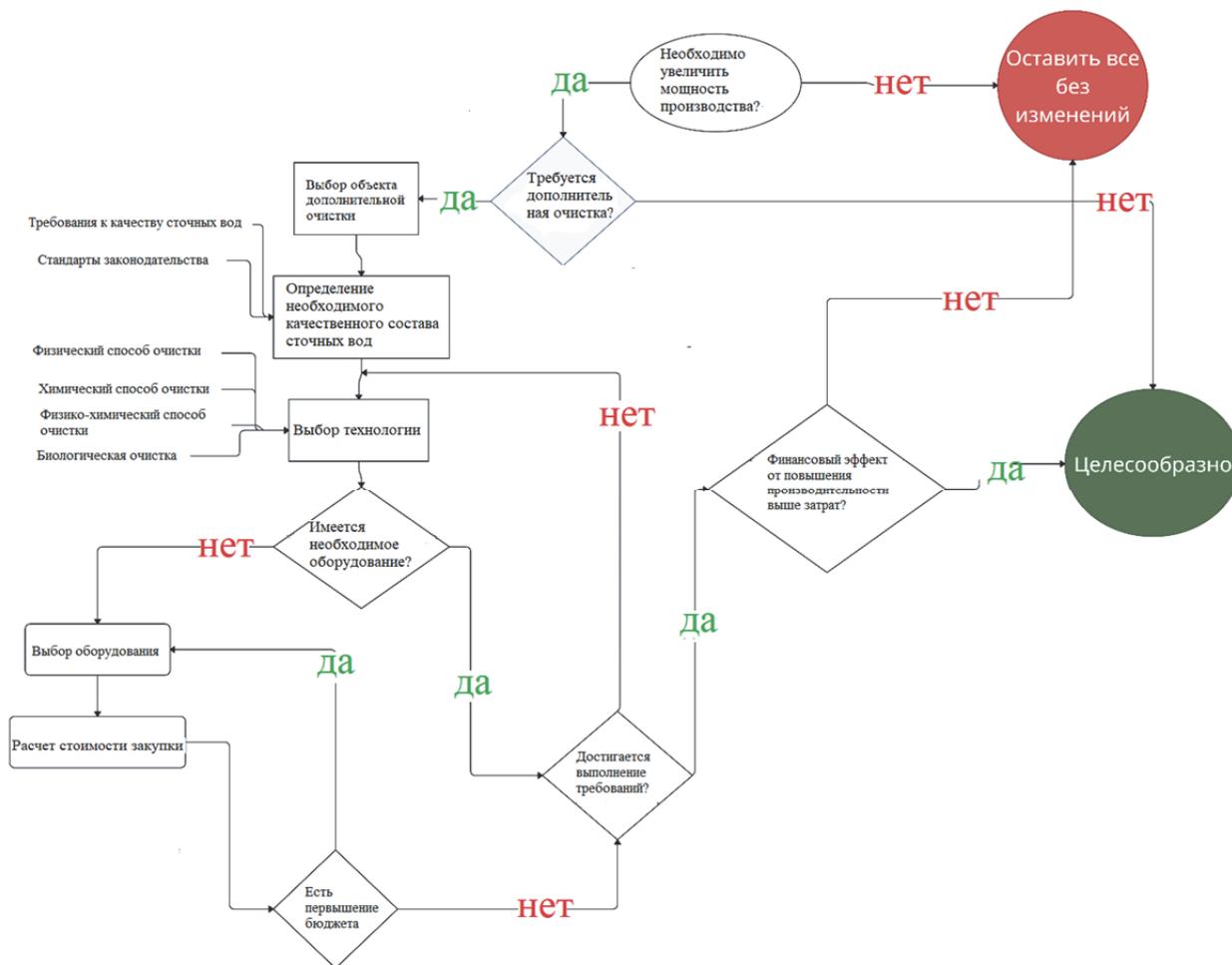


Рис. 3 – Дерево решения по вопросу увеличения мощности производства (предложено авторами)

Примером может служить график, представленный на рисунке 4.

Такое представление поможет лицам, принимающим решение не только определить наиболее эффективные варианты, но и посмотреть зависимость повышения производительности от затрат [9,11].

Использование цифрового двойника обеспечит внедрение и постоянное использование наилучших доступных технологий на нефтехимическом предприятии, что позволит значительно сократить воздействие на ОС. Помимо того, использование цифрового двойника на нефтехимическом предприятии, в т.ч. с использованием искусственного интеллекта позволяет оптимизировать энергопотребление, вероятность возникновения аварийных ситуаций из-за износа оборудования. Не смотря на высокие затраты на установку и внедрение дополнительных датчиков, разработку программного продукта, внедрения его на каждом процессе, цифровой двойник является долгосрочной инвестицией, которая позволит сократить затраты на внедрение опытных разработок, изменение технологического процесса и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описываются возможности повышения экологичности химического производства с помощью цифровых технологий, таких как создание цифровых моделей производственных процессов, внедрение систем мониторинга выбросов и управления рисками, применение алгоритмов машинного обучения и создание цифровых систем управления качеством выпускаемой продукции и утилизации отходов. Внедрение цифрового двойника на химическом предприятии, в том числе с элементами ИИ позволит обеспечить оперативное управление процессом. Трудоемкие расчеты прогнозирования модернизации с учетом производственных, экономических и экологических факторов могут быть получены с помощью цифрового двойника не только оперативно, но и заданной степенью вариаций и достоверности. Преимущества применения цифрового двойника промышленного предприятия для окружающей среды и организации производства очевидны, остается вопрос защищенности и сохранности данных, которые будут исследованы авторами дополнительно.

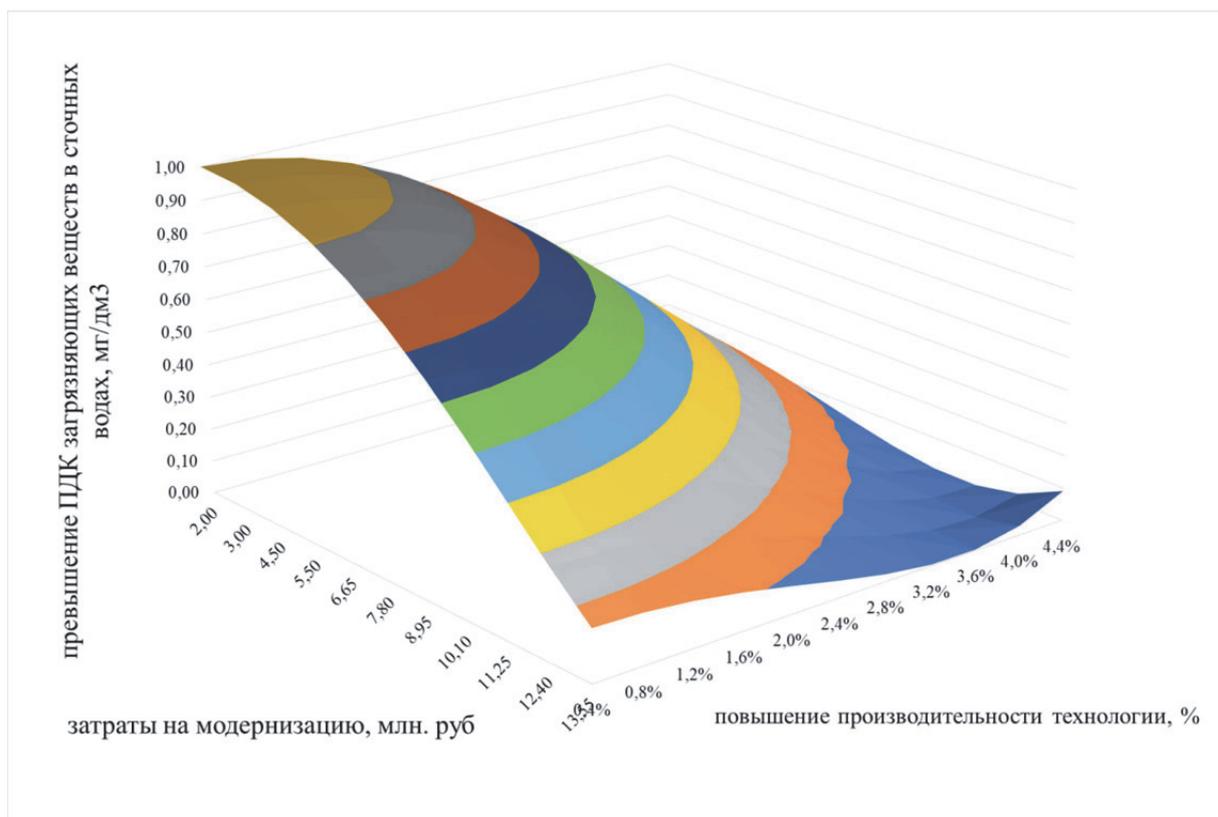


Рис. 4 – Анализ превышения ПДК в сточных водах при заданных затратах на производство и повышение производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Energy Outlook 2020 // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (дата обращения: 21.05.2023).
- Экология химической промышленности // Химия-2023. – URL: <https://www.chemistry-expo.ru/articles/ekologiya-himicheskoy-promyshlennosti> (дата обращения: 21.05.2023).
- Химическая отрасль России: Новые горизонты // Информационное агентство Tank Container World. – URL: <https://tankcontainerworld.ru/analytics/himicheskaya-otrasl-rossii-novye-gorizonty/> (дата обращения: 22.05.2023).
- Кудрявцева, С.С. Экологические инновации предприятий нефтехимической промышленности в достижении целей устойчивого развития / С.С. Кудрявцева, М.В. Шинкевич, Г.Р. Гарипова // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – №. 8. – С. 51-56.
- Распоряжение Правительства Российской Федерации «Комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий» от 19 марта 2014 № 398-р. – URL: <http://static.government.ru/> (дата обращения: 23.05.2023).
- ИТС 31-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство продукции тонкого органического синтеза // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728318741?ysclid=ljebwapob9995718405> (дата обращения: 23.05.2023).
- Мальшева, Т.В. Управление цепями поставок эколого-ориентированных наукоемких нефтехимических производств / Т.В. Мальшева, А.И. Шинкевич // Тенденции развития логистики и управления цепями поставок в условиях цифровой экономики. – 2021. – С. 157-164.
- Касимова, А.Р. Использование цифровых двойников при построении системы безопасности предприятия / А.Р. Касимова, Л.Х. Сафиуллина // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2022: сборник материалов / Сост.: Р.Ш. Ахмадиева, Р.Н. Минниханов [под общей ред. член-корр. Академии наук Республики Татарстан, д-ра техн. наук, проф. Р.Н. Минниханова]. – Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2022. – Ч. 1. – С. 291-298
- Industrial Internet of Things.Cybermanufacturing Systems / Sabina Jeschke, Christian Brecher, Houbing Song, Danda B. Rawat, Springer Cham, 2018.
- Hitesh Hinduja, Shreya Kekkar, Smruti Chourasia, Hrishikesh Bharadwaj Chakrapani. Industry 4.0: Digital Twin and its Industrial Applications. – URL: https://www.researchgate.net/publication/343713676_Industry_4_0_Digital_Twin_and_its_Industrial_Applications (дата обращения 25.05.2023).
- Fakhrudin Ali Ahmed, Kabeer Jasuja. Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Tools and Techniques. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128218892000042> (дата обращения 25.05.2023).

USING DIGITAL TWINS FOR GREENING THE CHEMICAL INDUSTRY

© 2023 A.I. Shinkevich, A.R. Kasimova, A.A. Alekseeva

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

The article describes the potential benefits of implementing and using a digital twin of petrochemical plants as a virtual representation of the production process, including its technological parameters and real-time analytics to ensure an environmentally responsible approach to production. The authors point out the possibility of optimizing production by using sensors and automatic control systems, as well as using the digital twin for testing and refining assumptions. In addition, the implementation of a digital twin in a chemical plant, including with elements of AI, will allow for operational process management. The decision tree proposed by the authors allows a chemical enterprise to reduce its impact on the environment by using a decision support system to manage wastewater treatment at a petrochemical plant. Laborious calculations for forecasting modernization taking into account production, economic, and environmental factors can be obtained using a digital twin not only promptly but also with a specified degree of variation and reliability.

Keywords: digital twin, chemical industry, optimization, management decisions

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-87-94

EDN: QGNMGR

REFERENCES

1. World Energy Outlook 2020 // IEA. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (data obrashcheniya: 21.05.2023).
2. Ekologiya himicheskoy promyshlennosti // Himiya-2023. – URL: <https://www.chemistry-expo.ru/ru/articles/ekologiya-himicheskoy-promyshlennosti> (data obrashcheniya: 21.05.2023).
3. Himicheskaya otrasl' Rossii: Novye gorizonty // Informacionnoe agentstvo Tank Container World. – URL: <https://tankcontainerworld.ru/analytics/himicheskaya-otrasl-rossii-novye-gorizonty/> (data obrashcheniya: 22.05.2023).
4. Kudryavceva, S.S. Ekologicheskie innovacii predpriyatij neftekhimicheskoy promyshlennosti v dostizhenii celej ustojchivogo razvitiya / S.S. Kudryavceva, M.V. Shinkevich, G.R. Garipova // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. – 2020. – № 8. – S. 51-56.
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii "Kompleks mer, napravlennyh na otkaz ot ispol'zovaniya ustarevshih i neeffektivnyh tekhnologij, perekhod na principy nailuchshih dostupnyh tekhnologij i vnedrenie sovremennyh tekhnologij" ot 19 marta 2014 № 398-r . – URL: <http://static.government.ru/> (data obrashcheniya: 23.05.2023).
6. ITS 31-2021 Informacionno-tekhnicheskij spravocnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Proizvodstvo produkcii tonkogo organicheskogo sinteza // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728318741?ysclid=ljebwapob9995718405> (data obrashcheniya: 23.05.2023).
7. Malysheva, T.V. Upravlenie cepyami postavok ekologo-orientirovannyh naukoemkih neftekhimicheskikh proizvodstv / T.V. Malysheva, A.I. SHinkevich // *Tendencii razvitiya logistiki i upravleniya cepyami postavok v usloviyah cifrovoj ekonomiki*. – 2021. – S. 157-164.
8. Kasimova, A.R. Ispol'zovanie cifrovyyh dvojniki pri postroenii sistemy bezopasnosti predpriyatiya / A.R. Kasimova, L.H. Safiullina // *Mezhdunarodnyj forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2022: sbornik materialov / Sost.: R.SH. Ahmadiyeva, R.N. Minnihanov [pod obshchey red. chlen-korr. Akademii nauk Respubliki Tatarstan, d-ra tekhn. nauk, prof. R.N. Minnihanova]*. – Kazan': GBU «NCBZHD», 2022. – CH. 1. – S. 291-298
9. Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems / Sabina Jeschke, Christian Brecher, Houbing Song, Danda B. Rawat, Springer Cham, 2018.
10. Hitesh Hinduja, Shreya Kekkar, Smruti Chourasia, Hrishikesh Bharadwaj Chakrapani. Industry 4.0: Digital Twin and its Industrial Applications. – URL: https://www.researchgate.net/publication/343713676_Industry_40_Digital_Twin_and_its_Industrial_Applications (data obrashcheniya 25.05.2023).
11. Fakhruddin Ali Ahmed, Kabeer Jasuja. Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Tools and Techniques. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128218892000042> (data obrashcheniya 25.05.2023).

Aleksey Shinkevich, Professor, Doctor of Economics, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Logistics and Management. E-mail: ashinkevich@mail.ru

Alina Kasimova, Senior Lecturer of the Department of Information Security. E-mail: alrkasimova@kstu.ru

Anna Alekseeva, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Ecology. E-mail: AlekseevaAA@corp.knrtu.ru