**Аннотация:** Цифровые двойники становятся важным инструментом для мониторинга и оптимизации промышленных процессов, особенно в сфере очистки газовых выбросов. В данной статье рассматривается процесс создания цифрового двойника системы очистки выбросов тепловой электростанции (ТЭЦ) на платформе Unity. Приводится анализ проблемы загрязнения воздуха, создаваемого ТЭЦ, работающих на угле, и описывается, как цифровой двойник может способствовать повышению эффективности очистки выбросов. Unity используется для создания трехмерной модели объектов и симуляции работы очистного оборудования с интеграцией данных, получаемых в реальном времени. Визуализация позволяет отслеживать параметры работы системы, проводить симуляции и оптимизировать настройки очистного оборудования. Создание цифрового двойника позволяет не только контролировать состояние оборудования, но и обучать операторов, минимизируя риски аварийных ситуаций. Предложенный подход может быть применим для улучшения экологической ситуации в различных регионах, стремящихся к снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

**Ключевые слова:** Цифровой двойник, unity, система очистки выбросов, тепловая

электростанция (ТЭЦ), угольные электростанции, визуализация данных, симуляция промышленных процессов, снижение выбросов загрязняющих веществ.

**Abstract:** Digital twins are becoming an important tool for monitoring and optimizing industrial processes, especially in the field of gas emission cleaning. This paper discusses the process of creating a digital twin of a thermal power plant (TPP) emission cleaning system on the Unity platform. An analysis of the air pollution problem created by coal-fired CHP plants is provided and describes how the digital twin can help improve the efficiency of emissions cleaning. Unity is used to create a 3D model of the facilities and simulate the operation of the cleaning equipment with integration of real-time data. The visualization allows monitoring of system performance parameters, running simulations and optimizing cleaning equipment settings. Creation of a digital twin allows not only to control the state of the equipment, but also to train operators, minimizing the risks of emergency situations. The proposed approach can be applied to improve the environmental situation in various regions seeking to reduce pollutant emissions into the atmosphere.

**Keywords:** Digital twin, unity, emission control system, thermal

power plant (TPP), coal-fired power plants, data visualization, simulation of industrial processes, reduction of pollutant emissions.

**Аннотация:** Цифрлық егіздер өнеркәсіптік процестерді, әсіресе газ шығарындыларын өңдеу саласында мониторинг пен оңтайландырудың маңызды құралына айналуда. Бұл мақалада Unity платформасында жылу электр станциясының (ЖЭО) шығарындыларын тазарту жүйесінің цифрлық егізін құру процесі талқыланады. Ол көмірмен жұмыс істейтін жылу электр станциялары тудыратын ауаның ластану мәселесін талдайды және сандық егіздің шығарындыларды тазарту тиімділігін арттыруға қалай көмектесетінін сипаттайды. Unity объектілердің 3D моделін жасау және нақты уақыт деректерін біріктіру арқылы ағынды суларды тазарту жабдығының жұмысын модельдеу үшін қолданылады. Визуализация жүйенің жұмыс параметрлерін бақылауға, модельдеуді жүргізуге және өңдеу жабдығының параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Цифрлық егізді құру жабдықтың жай-күйін бақылауға ғана емес, сонымен қатар төтенше жағдайлардың қаупін барынша азайта отырып, операторларды оқытуға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл атмосфераға ластаушы заттардың шығарындыларын азайтуға ұмтылатын әртүрлі аймақтардағы экологиялық жағдайды жақсарту үшін қолданылуы мүмкін.

**Түйін сөздер**: Цифрлық егіз, unity, эмиссияны тазарту жүйесі, термиялық электр станциясы (ЖЭО), көмірмен жұмыс істейтін электр станциялары, деректерді визуализациялау, өндірістік процестерді модельдеу, ластаушы заттардың шығарындыларын азайту.

**Введение**  
 Развитие современных информационных технологий в производстве связано с активным внедрением теории и практики цифровых двойников[1]. Традиционные подходы к проектированию, такие как имитационные и корреляционные модели, постепенно уступают место более технологичным методам описания реального мира в цифровой среде. Например, цифровой двойник максимально точно отражает сложность объекта, прогнозируя его свойства, функции и поведение, а также реакцию на различные внешние воздействия и взаимодействие с другими цифровыми двойниками, отображая поведение объектов в реальной среде [2].

За последние пять лет интерес к цифровым двойникам значительно возрос, что подтверждается увеличением числа научных публикаций, описывающих концепции и методы применения цифровых двойников, таких как компьютерное интегрированное производство (Computer-Integrated Manufacturing, CIM) [3], информационное моделирование зданий (Building Information Modeling, BIM) [4], мониторинг состояния оборудования и механизмов [5], а также виртуальные производственные системы [6]. Концепция CIM рассматривается как предшественник теорий и практического использования цифровых двойников. СИМ-модели способны точно моделировать объекты реального мира, обеспечивая высокую точность их описания и эффективное представление процессов, в которых эти объекты участвуют.

Как отмечается в исследовании [1], ключевой особенностью цифровых двойников является тесное взаимодействие между физическими объектами и их цифровыми аналогами. Электромеханические системы могут быть преобразованы в цифровые что значительно упрощает моделирование и управление процессами не только в производстве, но и в других сферах.

**Актуальность проблемы**

Алматинские ТЭЦ играют ключевую роль в обеспечении теплом и электроэнергией потребителей Казахстана и Алматинской области, однако их работа сопровождается значительными выбросами в атмосферу. ТЭЦ, работающие на угле, генерируют дополнительную электроэнергию в режиме конденсации, что приводит к выбросам загрязняющих веществ. В 2006 году объем неочищенных выбросов составлял 4,85 тыс. тонн, а к 2018 году эта цифра увеличилась до 10,4 тыс. тонн. При этом ТЭЦ-2 в 2016 году выбросила 11% всех загрязнителей воздуха в регионе.

Проблема загрязнения воздуха особенно актуальна в связи с воздействием на здоровье населения и окружающую среду. На предприятиях, использующих различные виды сырья, формируется широкий спектр загрязнителей, включая эфиры уксусной кислоты, формальдегид, нафталин и многие другие вещества. Эти выбросы значительно ухудшают качество воздуха, что создает необходимость в поиске и внедрении технологий для их сокращения.

Для решения проблемы загрязнения воздуха, исходящего от Алматинских ТЭЦ, нами было разработано устройство для очистки выбросов. Это устройство предназначено для снижения концентрации вредных веществ, поступающих в атмосферу, за счет многоступенчатой системы фильтрации и применения инновационных технологий. Система включает в себя механизмы для очистки от частиц пыли и сажи, а также специальную секцию для абсорбции и нейтрализации химических соединений, таких как формальдегид, нафталин и другие органические вещества.

Использование данного устройства позволяет существенно сократить объем выбросов, улучшая качество воздуха в регионе и снижая негативное воздействие на здоровье населения. Благодаря интеграции в технологический процесс ТЭЦ, очистка выбросов происходит эффективно и с минимальными затратами на эксплуатацию.

**Цифровой двойник: что это и зачем он нужен?**

Цифровой двойник — это виртуальная копия физического объекта или системы, которая позволяет моделировать, анализировать и управлять процессами в реальном времени. Этот подход широко применяется в промышленности, энергетике, медицине и других отраслях, где необходимы детализированные симуляции и мониторинг сложных систем.

Главная цель цифрового двойника — улучшение понимания работы реальных объектов и оптимизация их работы за счет моделирования различных сценариев и условий эксплуатации. С помощью цифрового двойника можно заранее предсказать возможные сбои, оптимизировать процессы, а также улучшить эффективность управления оборудованием и ресурсами.

Например, в контексте очистки выбросов на промышленных объектах цифровой двойник позволяет воспроизвести весь процесс фильтрации в виртуальной среде, оценить эффективность различных технологий очистки и протестировать их в условиях, максимально приближенных к реальности. Это особенно актуально для таких сложных объектов, как тепловые электростанции (ТЭЦ), где множество факторов влияют на выбросы и их состав.

Таким образом, внедрение цифрового двойника позволяет не только повысить эффективность управления процессами, но и снизить эксплуатационные затраты, улучшить экологическую обстановку и обеспечить безопасность работы оборудования.

**Применение Unity для создания цифрового двойника**

Unity — это мощная платформа для создания трехмерных симуляций и игр. Она также используется для создания интерактивных моделей и симуляций промышленных процессов. Благодаря Unity, можно создавать цифровые двойники, которые визуализируют данные в реальном времени и обеспечивают удобный интерфейс для взаимодействия с системой.

Пример схемы:

Создание цифрового двойника в Unity

Процесс создания цифрового двойника состоит из следующих этапов:

Разработка модели объекта

Для начала необходимо создать трехмерную модель ТЭЦ и ее элементов, таких как котлы, электрофильтры, каталитические нейтрализаторы и эмульгаторы. Модели могут быть созданы в Blender или другом 3D-редакторе и импортированы в Unity.

Интеграция с реальными данными

Цифровой двойник должен получать данные с датчиков, установленных на реальном объекте. Эти данные могут включать информацию о концентрации загрязняющих веществ, температуре, давлении и других параметрах. Unity поддерживает интеграцию с облачными сервисами и базами данных, что позволяет обновлять модель в реальном времени.

Симуляция работы очистных систем

На основе данных можно создать сценарии, которые показывают, как работают различные системы очистки, например, как изменяется эффективность электрофильтра при изменении скорости потока газа. Это позволяет в виртуальной среде моделировать возможные изменения в работе очистных систем.

Пример схемы:

**Визуализация процессов очистки выбросов**

Визуализация в Unity помогает лучше понять, как изменяются параметры работы системы при различных настройках. Например, можно создать интерфейс, где пользователь может изменять настройки каталитических нейтрализаторов и видеть, как это влияет на концентрацию оксидов азота в выбросах.

Пример схемы:

(Вставить скриншот интерфейса в Unity, показывающий элементы управления настройками систем очистки и визуализацию уровня выбросов)

Преимущества использования цифрового двойника

Контроль в реальном времени

Цифровой двойник позволяет мониторить состояние оборудования в реальном времени, что помогает вовремя выявлять неисправности и предотвращать аварии.

Оптимизация процесса

С помощью симуляции можно находить оптимальные режимы работы очистных систем, что позволяет снизить затраты на эксплуатацию и улучшить качество очистки.

Обучение и тренировка персонала

Модели в Unity могут использоваться для обучения операторов ТЭЦ, позволяя им изучать работу систем в безопасной виртуальной среде.

**Заключение**

Создание цифрового двойника системы очистки газовых выбросов на базе Unity позволяет значительно повысить эффективность контроля за выбросами и минимизировать их негативное воздействие на окружающую среду. Такой подход может быть полезен не только в Казахстане, но и в других странах, стремящихся улучшить экологическую обстановку в своих регионах.

**Перспективы дальнейших исследований**

В дальнейшем можно сосредоточиться на разработке адаптивных моделей, которые автоматически подстраиваются под изменения условий работы ТЭЦ. Кроме того, интеграция с системами искусственного интеллекта может позволить создавать предиктивные модели, предупреждающие о возможных отклонениях в работе очистного оборудования.

**Литература**

1. Radhakisan B., Gill H. Cyber-physical systems // The Impact of Control Technology. 2011. Р. 161–166.
2. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. N 3. Р. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141
3. Laengle S., Modak N.M., Merigó J.M., De La Sotta C. Thirty years of the international journal of computer integrated manufacturing: a bibliometric analysis // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2018. V. 31. N 12. Р. 1247–1268. doi:10.1080/0951192X.2018.1529434
4. Abramovici M., Göbel J.C., Savarino P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2017. V. 66. N 1. Р. 165–168. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // Procedia CIRP. 2018. V. 82. Р. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
6. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: a decision-support tool // Industrial Management & Data Systems. 2019. V. 119. N 2. Р. 251–273. doi: 10.1108/IMDS-01-2018-0033