**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 [7].

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.

Отталкиваясь от данной статьи [8], эту проблему можно решить через декарбонизацию, используя мультимодульные системы, которые включают модули предварительной очистки дымовых газов, а также системы для улавливания, сбора и утилизации выбросов от тепловых устройств, работающих на ископаемом топливе. Модули предварительной очистки являются необходимыми, поскольку дымовые газы содержат не только диоксид углерода, но и множество других вредных веществ, включая пылевые частицы различной дисперсии. После предварительной очистки полученный чистый диоксид углерода можно использовать в тепличных хозяйствах, производстве соды, в пищевой промышленности, а также для производства метанола, удобрений и других продуктов.

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 зачем он нужен?**

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 универсальная платформа для разработки 3D-симуляций и игр, которая нашла широкое применение не только в индустрии развлечений, но и в промышленности. Одним из наших ключевых направлений использования Unity стало создание цифровых двойников - интерактивных виртуальных моделей реальных объектов и систем. Это позволяет нам визуализировать данные в реальном времени и эффективно управлять процессами, что значительно облегчает мониторинг и оптимизацию работы оборудования.

Процесс разработки цифрового двойника состоит из нескольких ключевых этапов:

Наш подход к разработке цифрового двойника на платформе Unity состоит из нескольких ключевых этапов:

1. **Разработка 3D-модели объекта**

На первом этапе мы создаем трехмерные модели целевых объектов, таких как системы очистки выбросов и её ключевых элементов: электрофильтр, катализатор, эмульгаторы и Сбор углекислый газ. Эти модели мы создавали при помощи Blender, а затем импортировали их в Unity для дальнейшей работы. Мы стремимся к тому, чтобы виртуальные модели максимально точно отражали особенности реального.

1. Матиматические модель

В этом разделе мы подробно описываем расчеты, которые используются в моделировании процессов очистки и улавливания углекислого газа (CO₂) в системе. Эти формулы помогают точно описать физические и химические процессы, которые происходят в таких установках, и дают возможность построить реалистичную симуляцию в Unity.

Основные типы формул, которые мы используем, включают:

1. Массовый баланс

Массовый баланс используется для описания движения вещества через систему и помогает определить количество загрязняющих веществ на каждом этапе. Для расчетов массового баланса можно использовать следующую формулу:

(1)

Где — масса загрязняющих веществ, входящих в систему, выходящих из нее и накапливающихся на различных этапах. Этот баланс помогает установить равновесие системы и оценить эффективность фильтров.

1. Энергетический баланс

Энергетический баланс позволяет учитывать количество энергии, необходимой для работы системы и поддержания процессов фильтрации и улавливания газа. Основное уравнение энергетического баланса:

(2)

где — количество тепла, — работа, и — изменение внутренней энергии системы. Этот баланс помогает оценить тепловые потери и эффективность процессов нагрева и охлаждения на различных этапах установки.

1. **Закон Кулона для точечного заряда**

Закон Кулона описывает силу, с которой взаимодействуют два точечных заряда. Если поле создается точечным зарядом , напряженность электрического поля в любой точке на расстоянии от этого заряда определяется следующим уравнением:

(3)

где:

* — напряженность электрического поля (В/м),
* — величина точечного заряда (Кл),
* — расстояние от заряда до точки, в которой измеряется поле (м),
* ​ — электрическая постоянная, приблизительно равная 8.85×Ф/м.

Эта формула позволяет рассчитать напряженность электрического поля в зависимости от расстояния и величины заряда, что важно для моделирования электрических характеристик системы, если в проекте присутствуют элементы, работающие на основе электростатических принципов.

1. Уравнение **Пуассона для описания электрического поля**

Для описания распределения электрического потенциала в пространстве, создаваемого электродами, применяется уравнение Пуассона. В случае, если в пространстве присутствует объемный заряд с плотностью , уравнение Пуассона принимает вид:

(4)

где:

* — лапласиан потенциала, описывающий кривизну потенциала в пространстве,
* — плотность заряда (Кл/м³),
* ​ ​ — электрическая постоянная (8.85×Ф/м.).

Это уравнение помогает описывать распределение электрического поля вокруг электродов, учитывая наличие зарядов в среде.

1. Скорость химических реакций (каталитическая очистка)

Для моделирования движения воздушного потока в пространстве, что может быть важно для расчета движения частиц или потоков вокруг электродов и в системе очистки, применяется уравнение Навье-Стокса. Оно записывается следующим образом:

(5)

где:

* + (кг/м³),
  + (м/с),
  + — производная скорости по времени,
  + — градиент давления (Н/м²),
  + — коэффициент динамической вязкости (Па·с),
  + — лапласиан скорости, учитывающий вязкость потока,
  + — внешние силы, приложенные к потоку, например, сила тяжести.

Уравнение Навье-Стокса является основой для моделирования аэродинамических и гидродинамических процессов, позволяя точно описывать движение воздушного потока вокруг электродов и в пределах системы.

1. **Скорость потока и число Рейнольдса**

Для описания параметров воздушного потока используются формулы для расчета средней скорости потока и числа Рейнольдса .

1. **Средняя скорость потока** :

(6)

где:

* + — объёмный расход (м³/ч),
  + — диаметр трубы (м),
  + ≈ 3.14159.

1. **Число Рейнольдса :**

(7)

где:

* + — средняя скорость потока (м/с),
  + — характерный размер, обычно диаметр трубы (м),
  + — плотность воздуха или газа (кг/м³),
  + η — динамическая вязкость (Па·с).

Число Рейнольдса является важным параметром, определяющим режим потока: ламинарный или турбулентный. Значение указывает на ламинарный поток, тогда как - на турбулентный.

**3.** Создание схем

На этапе создания цифрового двойника в Unity, разработка схем является важной частью, так как она позволяет нам структурировать и визуализировать весь процесс работы очистных систем. Схемы упрощают понимание сложных технологических процессов и помогают отобразить ключевые элементы системы. Мы разработали две основные схемы, каждая из которых выполняет свою роль в демонстрации работы системы:

**3.1** Основная схема очистного комплекса

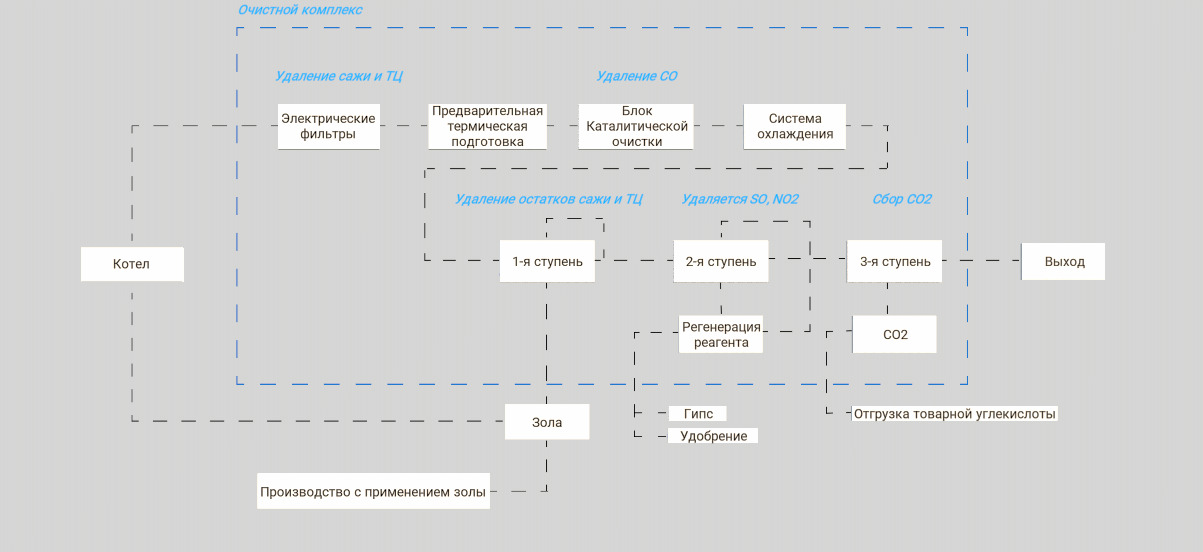
****

Рис. 1 Основная схема

Эта схема (рис.1) отражает общую структуру очистного комплекса, начиная от подачи газа из котла и заканчивая его выходом после очистки. На схеме мы выделили все ключевые элементы, участвующие в процессе очистки выбросов, такие как:

Электрические фильтры, которые удаляют сажу и твердые частицы из газов, выходящих из котла. Блоки предварительной термической подготовки, которые подготавливают газ к дальнейшему очищению, снижая его температуру и обеспечивая оптимальные условия для следующих этапов.

Блоки каталитической очистки, которые служат для удаления оксида углерода (CO) и других токсичных компонентов с использованием катализаторов.

Системы охлаждения, которые обеспечивают снижение температуры газа перед поступлением в дальнейшие стадии очистки.

Этапы удаления серы (SO) и диоксида азота (NO₂), которые выполняются в несколько ступеней, обеспечивая высокую степень очистки от загрязняющих веществ.

Сбор CO₂, который осуществляется на финальной стадии, где углекислый газ выделяется из газового потока для последующей обработки и использования в производственных процессах.

Мы создавали эту схему с учетом всех технологических процессов и потоков, чтобы максимально точно отразить работу реального объекта. Схема помогает нам и нашим партнерам визуализировать взаимодействие всех компонентов системы и понимать, как изменение условий на одном этапе влияет на весь процесс.

* 1. Схема процесса сбора углекислого газа (CO₂)

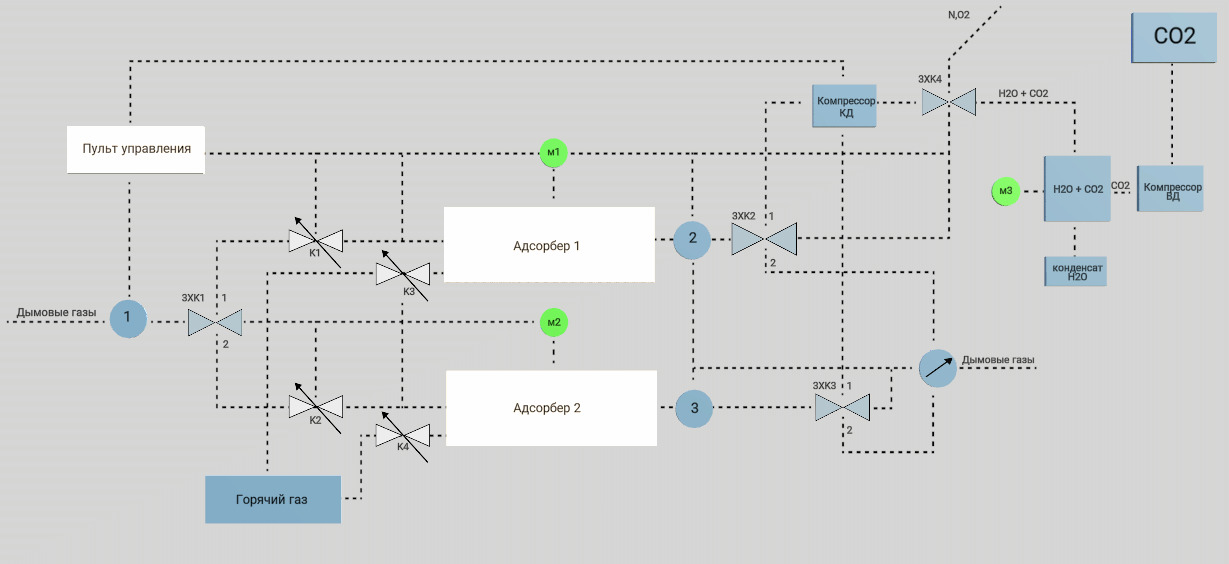


Рис 2. Схема сбора углекислого газа

Схема изображенная на (рис.2) детализирует процесс извлечения углекислого газа из потока дымовых газов. Эта схема помогает увидеть, как происходит сбор CO₂ на более тонком уровне и какие элементы оборудования участвуют в этом процессе. На схеме отражены:

Два адсорбера, которые последовательно очищают газовый поток, поглощая углекислый газ. Каждый адсорбер работает по принципу адсорбции: горячие дымовые газы пропускаются через специальный сорбент, который связывает CO₂.

Система управления клапанами, которые регулируют поток газа между адсорберами. Эти клапаны помогают направлять поток в зависимости от того, какой адсорбер в данный момент активен.

Компрессоры, которые сжимают очищенный газ, обеспечивая оптимальные условия для последующего отделения и транспортировки CO₂. Компрессоры работают в нескольких стадиях, чтобы постепенно повышать давление газа.

Блок конденсации, в котором происходит охлаждение сжатого газового потока и конденсация водяного пара, отделяя воду от CO₂. Это важный этап, позволяющий получить более чистый газовый поток.

Система отвода очищенного CO₂, который затем направляется на дальнейшую обработку или транспортировку в производственные процессы, например, для использования в сельском хозяйстве или химической промышленности.

Мы разработали эту схему, чтобы подробно показать, как происходит извлечение углекислого газа на каждой стадии, какие параметры регулируются в процессе (давление, температура) и как взаимодействуют между собой компоненты системы. Эта схема помогает более точно анализировать эффективность работы системы и вносить необходимые изменения в виртуальной модели, прежде чем внедрять их на реальном объекте.

1. **Интеграция с данными реального времени**

После создания моделей мы подключаем их к данным, поступающим от датчиков, установленных на реальном объекте. Датчики предоставляют нам информацию о концентрации загрязняющих веществ, температуре, давлении и других параметрах, которые важны для анализа работы оборудования. Благодаря поддержке Unity интеграции с облачными сервисами и базами данных, мы можем обновлять параметры в реальном времени, что позволяет нам всегда иметь актуальную информацию о состоянии системы.

1. **Симуляция процессов и анализ данных**

На основе этих данных мы создаем сценарии, которые позволяют моделировать работу различных систем, таких как системы очистки выбросов. С помощью инструментов Unity для визуализации, анимации и создания интерактивных сценариев мы исследуем, как различные изменения влияют на эффективность работы системы. Например, мы моделируем изменения в работе электрофильтра при изменении скорости потока газа или других параметров. Это позволяет нам заранее оценить возможные последствия и оптимизировать работу системы без необходимости проводить дорогостоящие эксперименты на реальных объектах.

**Заключение**

В заключение можно отметить, что создание цифровых двойников для систем очистки и улавливания углекислого газа (CO₂) в Unity открывает широкие перспективы для повышения эффективности промышленных процессов и улучшения экологической ситуации. С помощью цифровых моделей, подкрепленных физическими и химическими расчетами, мы можем более точно симулировать сложные процессы, происходящие в установках для очистки газов, оценивать их производительность и определять возможности для оптимизации.

В статье мы подробно рассмотрели процесс построения схемы системы, создания и использования математических моделей, а также настройки взаимодействий и визуальных эффектов для наглядного отображения всех этапов очистки. Использование Unity для разработки таких моделей позволяет не только улучшить визуальное представление работы системы, но и создать удобные инструменты для мониторинга и анализа данных в реальном времени. Это, в свою очередь, помогает операторам и инженерам быстрее принимать обоснованные решения по улучшению системы, прогнозировать её поведение в различных сценариях и предотвращать потенциальные сбои.

Применение цифровых двойников в области экологического инжиниринга и промышленных технологий имеет значительный потенциал для дальнейшего развития. Они позволяют исследовать и тестировать новые подходы к улавливанию CO₂ и другим процессам очистки, что способствует сокращению выбросов и поддержанию экологического баланса. В условиях глобальных усилий по снижению воздействия на окружающую среду, такие технологии становятся неотъемлемой частью устойчивого развития промышленности и общества в целом.

**Перспективы дальнейших исследований**

В дальнейших исследованиях цифровых двойников для систем улавливания CO₂ включают улучшение точности моделирования с добавлением детализированных процессов и лабораторных данных, интеграцию ИИ и машинного обучения для адаптации к изменяющимся условиям и прогнозирования неисправностей, создание интерфейсов реального времени для удобного управления и мониторинга. Дополнительные исследования могут сосредоточиться на оценке энергозатрат и экономической эффективности, применении VR/AR для обучения и анализа, а также на интеграции с IoT для мониторинга состояния системы в реальном времени. Эти направления позволят повысить точность и полезность цифровых двойников для промышленного применения.

**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
7. Moldagazyeva J.Y., Zhakan A., Argynbai A., International Scientific Journal ‘symbol of science’// Environmental impact of thermal power plants/ P. 190 - 194.
8. B.Kh. Khussain, A.R. Brodskiy, A.S. Sass, I.I. Torlopov, K.R. Rakhmetova Preliminary treatment of thermal devices' emissions in decarbonization technology// Reports of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan// Volume 1. Number 349 (2024), 271–282// https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.272