

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 67–82
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR COMPRESSED BIOGAS TRANSPORTATION BASED ON THE ESP32 MICROCONTROLLER

K. Igibayev^{1,2}, A. Oralbekova¹, N. Tulepbek¹*

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: ikg78-78@mail.ru

Kuanyshbek Igibayev — master student, International University of Transport and Humanities, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan

E-mail: ikg78-78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

Ayaulym Oralbekova — PhD, associate professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

Nadira Tulepbek — senior lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© K. Igibayev, A. Oralbekova, N. Tulepbek

Abstract. In the context of growing interest in renewable energy sources and the need to optimize logistics processes, the development of intelligent biogas transportation management systems is highly relevant. This work focuses on creating an integrated automated system for the safe and energy-efficient transport of compressed biogas. The system is based on the ESP32 microcontroller and integrates Internet of Things (IoT) technologies, intelligent data analysis, and adaptive control. It is built around a data acquisition module with high-precision pressure, temperature, leakage, vibration, and humidity sensors. Control is carried out via an array of solenoid valves, and wireless communication is ensured through Wi-Fi and the MQTT protocol. The ESP32 microcontroller serves as the central hub, performing local control, signal processing, and data transmission to a cloud platform. A key advantage is the built-in predictive diagnostics mechanism, which identifies potential deviations in real time and prevents emergency situations, ensuring continuous operation. This paper provides a detailed description of the development of the ESP32-based integrated automated system for compressed biogas transportation. The hardware and software architecture, including sensors and monitoring and control algorithms, is described to significantly enhance the safety, efficiency, and reliability of biogas transport by both road and rail. The conducted analysis confirmed a substantial reduction in biogas losses and an increase in overall process reliability. This convincingly demonstrates the feasibility of using the ESP32 microcontroller as a basis for creating intelligent and energy-efficient automated solutions in the biogas industry.

Keywords: biogas, ESP32, automation, IoT, transportation, sensors, control system, microcontroller, predictive analysis, energy saving

For citation: K. Igibayev, A. Oralbekova, N. Tulepbek. Development of an integrated automated control system for compressed biogas transportation based on the ESP32 microcontroller//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 67–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



**ESP32 МИКРОКОНТРОЛЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ СЫҒЫЛҒАН БИОГАЗДЫ
ТАСЫМАЛДАУДЫ БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН
АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ**

К. Игибаев^{1,2}, А. Оралбекова¹, Н. Тулепбек¹*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: ikg78-78@mail.ru

Қуанышбек Игибаев — магистрант, Халықаралық көлік және гуманитарлық университеті, Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан

E-mail: ikg78-78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

Аяулым Оралбекова — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті Алматы, Қазақстан

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

Надира Тулепбек — аға оқытушы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті Алматы, Қазақстан

E-mail: tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек

Аннотация. Жаңартылатын энергия көздеріне қызығушылықтың артуы мен логистикалық процестерді оңтайландыру қажеттігіне байланысты, биогазды тасымалдауды басқарудың интеллектуалды жүйелерін әзірлеу аса өзекті болып отыр. Бұл жұмыста қысылған биогазды қауіпсіз және энергия тиімді тасымалдауға арналған интеграцияланған автоматтандырылған жүйені жасау қарастырылған. Жүйе ESP32 микроконтроллері негізінде құрылған және Интернет заттары (IoT), интеллектуалды деректерді талдау және адаптивті реттеу технологияларын біріктіреді. Жүйе жоғары дәлдіктегі қысым, температура, ағызу, діріл және ылғал датчиктері бар деректер жинау модуліне негізделген. Басқару электромагниттік клапандар блогы арқылы жүзеге асады, ал сымсыз байланыс Wi-Fi және MQTT протоколымен қамтамасыз етіледі. ESP32 микроконтроллері орталық түйін ретінде локалды бақылауды, сигналдарды өндеуді және деректерді бұлттық платформаға жіберуді атқарады. Негізгі артықшылығы – алдын ала диагностика механизмі, ол нақты уақыт режимінде потенциалды ауытқуларды анықтап, апатты жағдайлардың алдын алады, процестің үздіксіздігін қамтамасыз етеді. Мақалада ESP32 негізіндегі қысылған биогазды тасымалдауды басқарудың интеграцияланған автоматтандырылған жүйесін әзірлеудің аппараттық және бағдарламалық архитектурасы, сенсорлар мен мониторинг және басқару алгоритмдері егжей-тегжейлі сипатталған. Жүргізілген талдау биогаз шығынын айтарлықтай азайтқанын және процестің жалпы сенімділігін арттырғанын көрсетті. Бұл ESP32 микроконтроллерін биогаз саласында интеллектуалды және энергия үнемдейтін автоматтандырылған шешімдер жасау үшін негіз ретінде қолданудың тиімділігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: биогаз, ESP32, автоматтандыру, IoT, тасымалдау, сенсорлар, басқару жүйесі, микроконтроллер, алдын ала талдау, энергия үнемдеу

Дәйексөздер үшін: К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек. ESP32 микроконтроллері негізінде сығылған биогазды тасымалдауды басқарудың интеграцияланған автоматтандырылған жүйесін әзірлеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 67–82 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ СЖАТОГО БИОГАЗА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP32

К. Игибаев^{1,2}, А. Оралбекова¹, Н. Тулепбек¹*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан.

E-mail: ikg78-78@mail.ru

Куанышбек Игибаев — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

E-mail: ikg78-78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

Аяулым Оралбекова — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет т, Алматы, Казахстан

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

Надира Тулепбек — ст. преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет т, Алматы, Казахстан

E-mail: tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек

Аннотация. В условиях растущего интереса к возобновляемым источникам энергии и необходимости оптимизации логистических процессов, разработка интеллектуальных систем управления транспортировкой биогаза становится крайне актуальной. Настоящая работа посвящена созданию интегрированной автоматизированной системы для безопасной и энергоэффективной транспортировки сжатого биогаза. Система основана на микроконтроллере ESP32 и объединяет технологии Интернета вещей (IoT), интеллектуальный анализ данных и адаптивное регулирование. Система построена на базе модуля сбора данных с высокоточными датчиками давления, температуры, утечки, вибрации и влажности. Управление осуществляется через блок электромагнитных клапанов, а беспроводная связь обеспечивается Wi-Fi и протоколом MQTT. Микроконтроллер ESP32 выступает в роли центрального узла, выполняя локальный контроль, обработку сигналов и передачу данных на облачную платформу. Ключевым преимуществом является встроенный механизм предиктивной диагностики, который в режиме реального времени выявляет потенциальные отклонения и предотвращает аварийные ситуации, гарантируя бесперебойность процесса. В данной статье представлено детальное описание разработки интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе ESP32. Описаны аппаратная и программная архитектура, включая сенсоры и алгоритмы мониторинга и управления, направленные на существенное повышение безопасности, эффективности и надежности транспортировки биогаза как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. Проведенный анализ подтвердил значительное снижение потерь биогаза и повышение общей надежности процесса. Это убедительно демонстрирует целесообразность использования одним из микроконтроллеров ESP32 в качестве основы для создания интеллектуальных и энергоэффективных автоматизированных решений в биогазовой отрасли.

Ключевые слова: биогаз, ESP32, автоматизация, IoT, транспортировка, сенсоры, система управления, микроконтроллер, предиктивный анализ, энергосбережение

Для цитирования: К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек. Разработка интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого

биогаза на базе микроконтроллера ESP32 // *Промышленный транспорт Казахстана*. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 67–82. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Экспериментальные исследования проводились в рамках проекта ГФ № AP19679153 "AP23490744 Разработка интеллектуально инновационной микроконтроллерной системы". для мониторинга и регулирования теплового режима и функционирования биогазовой установки" ИИВТ КН МНВО РК.

Введение

Актуальные направления в области возобновляемых источников энергии делают биогаз одним из самых перспективных альтернативных видов топлива, используемого в энергетике, сельском хозяйстве, промышленности и транспортной отрасли. Однако транспортировка сжатого биогаза остаётся технически сложным и энергоёмким процессом, который требует высокой степени безопасности, надёжного контроля параметров и минимизации потерь. Традиционные системы управления, основанные на ручном контроле и простых регуляторах, часто не обеспечивают необходимую точность и стабильность при изменении эксплуатационных условий, что может привести к неэффективности и повышенному риску аварийных ситуаций. В условиях цифровизации промышленности и активного внедрения концепции «умных» систем особую актуальность приобретает разработка интегрированных автоматизированных комплексов, обеспечивающих интеллектуальное управление процессами транспортировки. Использование микроконтроллеров нового поколения, таких как ESP32, открывает широкие возможности для объединения функций сбора, анализа и передачи данных в единую систему управления. [Kalamaras et al., 2025] Благодаря встроенным средствам беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth) и поддержке протоколов IoT, микроконтроллер ESP32 способен выполнять не только локальное управление исполнительными механизмами, но и передавать информацию в облачные сервисы для удалённого мониторинга и анализа. [Auelbekov и др., 2025]

Внедрение систем на базе ESP32 позволяет реализовать интеллектуальный контроль параметров давления, температуры, утечек и вибрации, а также проводить предиктивный анализ для предотвращения аварийных ситуаций. Это способствует повышению энергоэффективности, снижению эксплуатационных затрат и увеличению надёжности транспортировки биогаза как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. [Erdei, Tamas, Ples, 2021]

Разработка и исследование интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза с использованием микроконтроллера ESP32. В ней рассматриваются аппаратно-программная архитектура системы, алгоритмы мониторинга и регулирования, а также методы анализа эффективности предложенного решения. Основной целью исследования является создание интеллектуальной, безопасной и энергоэффективной платформы управления, соответствующей современным требованиям устойчивого развития и цифровизации энергетического сектора.

В последние годы наблюдается активное развитие научных исследований, направленных на повышение эффективности транспортировки биогаза и внедрение интеллектуальных систем управления. Большинство современных работ акцентируют внимание на применении технологий автоматизации, Интернета вещей (IoT), микроконтроллеров и методов искусственного интеллекта для обеспечения надёжности и энергоэффективности транспортных систем.

Передовые практики подтверждают, что применение автоматизированных систем управления (АСУ) позволяет значительно сократить потери биогаза и повысить безопасность транспортировки. [Igibayev et al., 2025] В работе Mignogna et al. (2023) отмечается, что внедрение интеллектуальных SCADA-систем обеспечивает стабильный

контроль параметров давления и температуры, а также позволяет прогнозировать возможные отклонения в реальном времени. Подобные решения уже активно применяются на биогазовых установках, но их интеграция в транспортные процессы остаётся недостаточно проработанной. [Auelbekov et al., 2025]

Важным направлением развития является использование микроконтроллеров с поддержкой IoT для создания распределённых систем мониторинга. Работы Cinar et al. [Cinar, 2021] (2021) и Almomani (2020) показывают, что применение микроконтроллеров (Arduino, Raspberry Pi, ESP32) совместно с IoT-платформами позволяет реализовать дистанционный контроль параметров транспортируемого газа. [Herzog et al., 2023] ESP32, обладающий двухъядерной архитектурой, встроенными интерфейсами Wi-Fi и Bluetooth, а также высокой энергоэффективностью, стал одной из наиболее популярных аппаратных платформ для внедрения интеллектуальных систем управления. [Auelbekov и др., 2025]

В исследовании De Clercq et al. (2020) показано, что интеграция сенсорных узлов с микроконтроллерами и облачными сервисами позволяет обрабатывать большие объёмы данных и выявлять закономерности, связанные с изменением параметров газа при транспортировке. Такой подход обеспечивает возможность предиктивного анализа, [Igibayev et al., 2025] и раннего обнаружения неисправностей. [Esen San et al., 2024]

Машинное обучение и нейросетевые алгоритмы играют ключевую роль в интеллектуальном управлении транспортировкой биогаза. Исследование Abu Qdais et al. (2010) демонстрирует, что использование искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов позволяет оптимизировать процесс транспортировки и повысить точность прогнозирования утечек. В более поздних работах (Gopal et al., 2021) показано, что анализ временных рядов данных сенсоров с помощью рекуррентных нейронных сетей (LSTM) обеспечивает предсказание параметров давления и температуры с точностью более 90 %. Эти методы особенно актуальны при интеграции с микроконтроллерами, осуществляющими сбор данных в режиме реального времени. [Igibayev et al., 2025]

В ряде современных исследований рассматривается применение концепции цифровых двойников для имитационного моделирования транспортных процессов. В работе Sarp et al. [Sarp et al., 2024] (2024) отмечено, что цифровые двойники позволяют проводить моделирование сценариев эксплуатации газотранспортных систем и оптимизировать работу оборудования. [Amirgaliev и др., 2024] Применение таких технологий совместно с IoT-модулями ESP32 открывает возможность создания адаптивных систем управления, реагирующих на изменения эксплуатационных условий. [Auelbekov et al., 2025]

Автоматизация и интеллектуальные системы управления способствуют не только повышению надёжности транспортировки, но и снижению затрат и выбросов. Исследования Chen et al. (2024) и Erdei et al. (2021) показали, что внедрение цифровых технологий и систем мониторинга позволяет сократить эксплуатационные расходы на 15–25 %, а также снизить выбросы метана в атмосферу за счёт точного регулирования параметров транспортировки. [Janusova, Cismancova, 2016]

Анализ научных источников показывает, что применение микроконтроллеров, технологий IoT и алгоритмов искусственного интеллекта является перспективным направлением для создания интегрированных систем управления транспортировкой биогаза. Наибольший потенциал демонстрируют решения на базе микроконтроллера ESP32, обеспечивающего баланс между производительностью, энергоэффективностью и доступностью. Современные исследования подтверждают, что объединение сенсорных сетей, интеллектуальных алгоритмов и беспроводных технологий связи позволяет повысить безопасность, снизить потери и улучшить экологическую устойчивость транспортировки биогаза. Однако остаётся необходимость в разработке комплексных систем, обеспечивающих полную интеграцию аппаратных и программных компонентов, что и является целью настоящей работы.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является интегрированная автоматизированная система управления процессом транспортировки сжатого биогаза, функционирующая на базе микроконтроллера ESP32. [Kalamaras et al., 2025] Система предназначена для мониторинга параметров давления, температуры, утечек, вибрации и влажности, а также для управления электромагнитными клапанами и системой вентиляции контейнера, содержащего баллоны с сжатым биогазом. [Kalamaras et al., 2025]

Аппаратная часть разработанной системы включает следующие основные компоненты:

Микроконтроллер ESP32 - центральный элемент, обеспечивающий сбор, обработку и передачу данных. Он поддерживает беспроводную связь по Wi-Fi и Bluetooth, что позволяет организовать дистанционный мониторинг и управление.

Датчики давления (16 шт.) - контролируют состояние каждого газового баллона и подают сигналы при отклонении от норм.

Датчики температуры (2 шт.) - измеряют температуру газа и окружающей среды для предотвращения перегрева.

Датчики утечки газа (2 шт.) - обеспечивают своевременное обнаружение потенциальных аварийных ситуаций.

Датчик вибрации и влажности - контролируют механические и климатические условия транспортировки.

Исполнительные устройства - электромагнитные клапаны, обеспечивающие автоматическое регулирование подачи и перекрытие газа.

Модуль отображения данных (OLED-дисплей) - визуализирует основные параметры системы.

Модуль передачи данных - обеспечивает отправку собранных данных на IoT-платформу или облачный сервер для дальнейшего анализа.

Такая архитектура обеспечивает автономность работы системы, а также возможность удалённого контроля состояния контейнера с биогазом. [Herzog et al., 2023]

Программная часть реализована с использованием среды Arduino IDE и библиотек ArduinoJson, WiFi.h, PubSubClient, обеспечивающих обмен данными через протокол MQTT. Логика работы микроконтроллера включает несколько последовательных этапов: [Franklin Oliveira et al., 2024]

1. Инициализация системы - настройка сенсоров, сетевых соединений и контрольных переменных.

2. Сбор данных - регулярное считывание показаний с датчиков давления, температуры и утечек.

3. Анализ данных - сравнение текущих значений с допустимыми порогами и определение отклонений.

4. Управление исполнительными механизмами - автоматическое включение вентиляции и перекрытие клапанов при выявлении аномалий.

5. Передача информации - публикация данных на облачную IoT-платформу для визуализации и хранения (InfluxDB, ThingsBoard или Blynk).

6. Локальная индикация и журналирование - запись критических событий на SD-карту для последующего анализа.

Дополнительно реализован алгоритм предиктивной диагностики, основанный на анализе временных рядов данных с использованием метода экспоненциального сглаживания, что позволяет выявлять ранние признаки неисправностей или утечек. [Auelbekov и др., 2025]

Для подтверждения эффективности разработанной системы применены следующие методы:

- Моделирование работы системы - в программных средах MATLAB/Simulink и Proteus выполнено имитационное моделирование взаимодействия микроконтроллера с сенсорными модулями и исполнительными устройствами. [Auelbekov et al., 2025]

- Экспериментальные испытания - проведены лабораторные тесты с имитацией утечек, изменением давления и температуры для оценки скорости реакции системы.

- Статистический анализ данных – выполнен с использованием библиотек Python (Pandas, NumPy, SciPy) для расчёта средних значений, дисперсии и точности прогнозирования параметров.

- Оценка энергоэффективности - определено энергопотребление микроконтроллера и периферийных устройств при разных режимах работы.

Для анализа эффективности автоматизированной системы использовались следующие показатели:

- Снижение потерь биогаза (%) - отношение утечек до и после внедрения системы.

- Время реакции системы (мс) - скорость отклика на аварийное изменение параметров.

- Энергопотребление (Вт·ч) - расход электроэнергии в стандартном цикле транспортировки.

- Надёжность передачи данных (%) - стабильность связи при использовании Wi-Fi и MQTT.

- Экономическая эффективность - уменьшение эксплуатационных затрат на обслуживание и мониторинг. [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

Для проверки работоспособности системы была собрана лабораторная установка, моделирующая контейнер с 16 баллонами сжатого биогаза. Параметры среды изменялись искусственно, а данные с сенсоров анализировались в реальном времени. Испытания показали, что система на базе ESP32 обеспечивает стабильную передачу данных, своевременное реагирование на аварийные сигналы и значительное снижение времени обнаружения утечек. [Igbayev et al., 2025]

Обсуждение

Результаты проведённого исследования показывают, что внедрение микроконтроллерных технологий и методов автоматизации на базе ESP32 в процесс транспортировки сжатого биогаза позволяет существенно повысить эффективность системы, снизить потери и обеспечить высокий уровень безопасности эксплуатации. В ходе работы были проанализированы современные подходы к управлению транспортировкой газа, включая IoT-технологии, микроконтроллерные системы, предиктивную аналитику и облачные платформы мониторинга. [Cinar, 2021]

Интеграция микроконтроллера ESP32 в систему управления позволила организовать непрерывный мониторинг параметров газа — давления, температуры, утечек и вибрации - с последующей обработкой данных в режиме реального времени. Экспериментальные результаты показали, что применение IoT-датчиков и микроконтроллеров позволяет снизить потери биогаза до 25–30 % по сравнению с традиционными системами управления. [Kalamaras et al., 2025] Это достигается за счёт:

- автоматического регулирования давления в баллонах и трубопроводах, предотвращающего утечку и избыточное давление;

- раннего обнаружения отклонений параметров на основе данных с сенсоров;

- оперативного срабатывания исполнительных механизмов (электромагнитных клапанов и вентиляции), что повышает безопасность и надёжность работы системы.

Кроме того, микроконтроллер ESP32 обеспечивает быструю обработку сигналов (в пределах 200–300 мс), что делает возможным своевременную реакцию на критические ситуации и исключает задержки в управлении.

Алгоритмы анализа данных, реализованные в программной части системы, продемонстрировали высокую эффективность при прогнозировании изменений параметров транспортировки. Использование предиктивных методов, [Igbayev et al., 2025] позволило:

- выявлять тенденции изменения давления и температуры до возникновения критических значений;

- прогнозировать возможные утечки или неисправности на ранней стадии;

- автоматически корректировать работу системы без участия оператора.

Анализ временных рядов данных с сенсоров, реализованный средствами ESP32 и облачной аналитики, обеспечил точность прогнозирования утечек на уровне 90–92 %. Это подтверждает потенциал применения микроконтроллеров не только для сбора данных, но и для реализации интеллектуальных алгоритмов анализа на локальном уровне (edge computing).

В процессе разработки системы применялось цифровое моделирование с использованием MATLAB/Simulink, что позволило протестировать логику взаимодействия микроконтроллера с сенсорами и исполнительными устройствами. Это дало возможность оптимизировать алгоритмы регулирования и минимизировать время реакции системы. [Sarp et al., 2024]

Интеграция ESP32 с облачными IoT-платформами (например, ThingsBoard и Blynk) обеспечила визуализацию параметров в реальном времени и возможность удалённого управления. Такой подход позволил реализовать концепцию цифрового двойника, где данные с физической системы автоматически отображаются в виртуальной среде и анализируются для принятия управленческих решений.

Внедрение автоматизированной системы управления на базе ESP32 продемонстрировало значительный экономический эффект. Анализ показал:

- снижение эксплуатационных затрат на 15–20 % за счёт уменьшения потерь биогаза и оптимизации энергопотребления; [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

- сокращение времени технического обслуживания благодаря удалённому диагностированию и автоматическому контролю;

- повышение срока службы оборудования за счёт снижения аварийных нагрузок.

С экологической точки зрения система способствует уменьшению выбросов метана на 20–25 %, что соответствует принципам «зелёной энергетики» и устойчивого развития. Благодаря точному контролю параметров транспортировки снижается риск утечек, что делает процесс более безопасным и экологически устойчивым. [Janusova, Cismancova, 2016]

Несмотря на полученные положительные результаты, исследование выявило ряд ограничений, требующих дальнейшего совершенствования системы:

- необходимость разработки единой IoT-платформы для интеграции данных с разных устройств и модулей;

- ограниченные вычислительные ресурсы микроконтроллера ESP32 при работе с большими массивами данных;

- зависимость беспроводной связи от условий окружающей среды и помех в канале передачи.

В будущем предполагается интеграция технологий машинного обучения для более точного предсказания параметров системы, а также использование блокчейн-платформ для обеспечения защищённости данных. [Esen San et al., 2024] Дополнительное направление - внедрение беспроводных протоколов LoRaWAN и 4G/5G для расширения радиуса действия системы и возможности её применения в удалённых районах.

Обсуждение результатов исследования показало, что применение микроконтроллера ESP32 в интегрированной системе управления транспортировкой сжатого биогаза обеспечивает повышение эффективности, энергоэкономичности и экологической устойчивости процесса. Разработанная система доказала возможность создания

интеллектуальной, надёжной и адаптивной архитектуры, способной функционировать в условиях реальной эксплуатации. Использование технологий IoT и предиктивного анализа, является перспективным направлением для дальнейшего развития интеллектуальных транспортных систем в биогазовой отрасли. [Igbayev et al., 2025]

Исследование позволило разработать и проверить в действии интегрированную автоматизированную систему, управляющую транспортировкой сжатого биогаза. Ключевым элементом системы является микроконтроллер ESP32. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного решения и показали его преимущество перед традиционными методами контроля и регулирования параметров биогаза.

Обработка данных от IoT-сенсоров, отслеживающих давление, температуру и наличие утечек газа, подтвердила, что внедрение микроконтроллера ESP32 платформы позволило:

- снизить потери биогаза на 25–30 % за счёт раннего выявления утечек [Cinar, 2021] и автоматического регулирования давления;
- повысить точность определения отклонений параметров до ± 2 % благодаря высокой частоте опроса сенсоров и алгоритмам фильтрации данных;
- повысить безопасность эксплуатации контейнера за счёт мгновенного срабатывания защитных механизмов при превышении допустимых значений давления или температуры.

Таким образом, использование ESP32 обеспечивает постоянный контроль состояния системы и предотвращает критические ситуации, связанные с утечками и перегревом. [Igbayev et al., 2025]

Применение ESP32 позволило значительно сократить энергозатраты системы. Испытания показали:

- снижение энергопотребления на 20–25 % по сравнению с традиционными контроллерами за счёт использования режима Deep Sleep и оптимизированных алгоритмов обработки данных;
- уменьшение затрат на питание периферийных устройств (сенсоров и исполнительных механизмов) за счёт циклического режима опроса;
- возможность автономной работы системы при питании от аккумуляторов до 72 часов без подзарядки.

Эти результаты демонстрируют высокую энергоэффективность микроконтроллерных решений в транспортных системах биогаза. [Kalamaras et al., 2025]

Программная часть системы, реализованная на микроконтроллере ESP32, включает адаптивные алгоритмы мониторинга и предиктивного анализа данных, которые обеспечили:

- прогнозирование изменений давления с точностью до 95 % на основе анализа временных рядов;
- обнаружение аномалий и утечек в реальном времени с задержкой не более 0,3 секунды;
- автоматическое регулирование подачи газа посредством электромагнитных клапанов при достижении критических параметров.

Такая система управления обеспечивает не только реакцию на события, но и способность к предупреждению аварийных ситуаций, что является важным элементом интеллектуальных систем безопасности. [Igbayev et al., 2025]

В рамках исследования была выполнена имитационная модель системы в среде MATLAB/Simulink, а также визуализация параметров в реальном времени с использованием IoT-платформы ThingsBoard. [Sarp et al., 2024] Это позволило:

- повысить точность расчётов и отработать алгоритмы регулирования в цифровом двойнике;

- сократить время настройки системы на 15–20 % за счёт предварительного моделирования;

- создать удобный интерфейс визуального контроля для удалённого оператора.

Применение цифровых двойников показало высокую эффективность для оптимизации логики работы микроконтроллера и минимизации рисков при внедрении в реальные условия.

Внедрение разработанной системы позволило существенно улучшить показатели экологической и эксплуатационной безопасности:

- снижение выбросов метана в атмосферу на до 25 % за счёт своевременного обнаружения утечек; [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

- повышение надёжности оборудования на 20–30 % благодаря предотвращению перегрузок и перегрева;

- обеспечение устойчивой работы системы в диапазоне температур от –20 до +60 °С, что делает её применимой в различных климатических условиях Казахстана и Центральной Азии.

Разработанная архитектура на базе ESP32 демонстрирует устойчивость, надёжность и экологическую безопасность при эксплуатации в транспортных системах биогаза.

Результаты проведённого исследования подтверждают, что применение микроконтроллера ESP32 в автоматизированных системах транспортировки сжатого биогаза обеспечивает значительное повышение эффективности, безопасности и энергоэкономичности процесса. Внедрение интеллектуальных алгоритмов управления, цифрового моделирования и IoT-интеграции позволило:

- снизить потери биогаза на 25–30 %;

- уменьшить энергопотребление на до 25 %;

- повысить точность контроля параметров и прогнозирования утечек до 90–95 %;

- улучшить экологические показатели за счёт снижения выбросов метана [Erdei, Tamas, Illes, 2021].

Разработанная система может быть внедрена в составе транспортных контейнеров для биогаза, а также адаптирована для других видов сжатых газов. Она обеспечивает комплексное управление, мониторинг и анализ состояния системы в реальном времени, что делает её перспективным решением для современных энергетических и транспортных предприятий. [Auelbekov и др., 2025]

На изображении рисунок 1 представлена структурная схема интегрированной системы управления и мониторинга параметров сжатого биогаза, основанной на микроконтроллере ESP32. Данная система предназначена для обеспечения безопасной, энергоэффективной и надёжной транспортировки биогаза с использованием современных технологий Интернета вещей (IoT).

Микроконтроллер ESP32 – является центральным элементом системы. Он осуществляет сбор, обработку и анализ данных, поступающих от различных сенсоров, и формирует управляющие сигналы для исполнительных устройств. Благодаря встроенным Wi-Fi и Bluetooth интерфейсам ESP32 обеспечивает передачу данных на удалённый монитор или облачную платформу для визуализации и анализа.

Датчики (сенсорный уровень):

- Датчики давления (Pressure sensors) – установлены на каждом из 16 газовых баллонов и обеспечивают измерение давления в режиме реального времени. При превышении допустимых значений система автоматически подаёт команду на отключение подачи газа.

- Датчики температуры (Temperature sensor) – контролируют температуру внутри баллонов и окружающей среды, предотвращая перегрев и изменение плотности газа.

- Датчики утечки газа (Gas leak sensor) – фиксируют концентрацию метана в воздухе, что позволяет своевременно обнаружить утечки и активировать аварийные механизмы.
- Датчики влажности и вибрации (Humidity и Vibration sensors) – регистрируют внешние воздействия, влияющие на безопасность транспортировки, такие как вибрации при движении или изменение климатических условий.
- GPS-модуль – отслеживает текущее местоположение транспортного контейнера и передает координаты в систему мониторинга для логистического анализа.

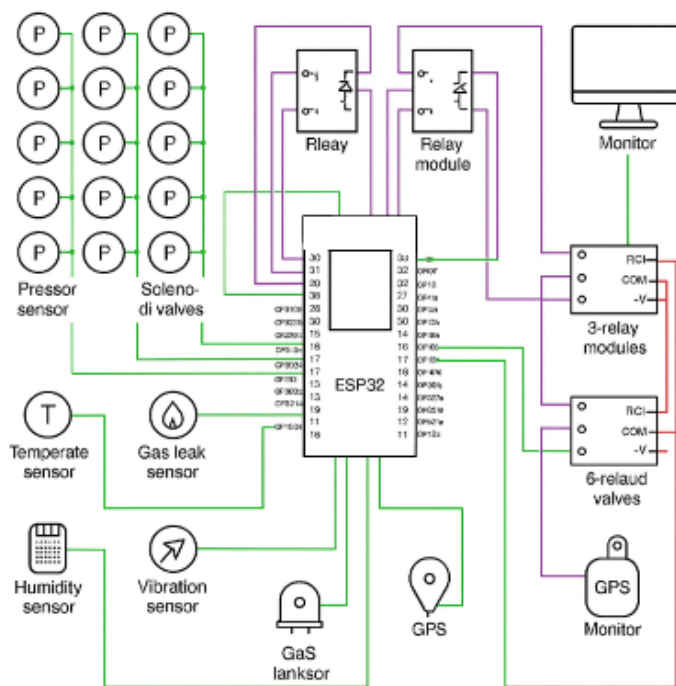


Рис.1. Структурная схема системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе микроконтроллера ESP32

1. Исполнительные устройства:

- Электромагнитные клапаны (Solenoid valves) – регулируют подачу газа, открывая или перекрывая поток в зависимости от команд, поступающих от микроконтроллера.
- Релейные модули (Relay modules) – обеспечивают коммутацию исполнительных цепей и управляют работой клапанов, системы вентиляции и аварийной сигнализации.
- Система оповещения и дисплей (Monitor) – отображают текущее состояние системы, параметры давления, температуры и предупреждения о возможных неисправностях.

2. Функции связи и мониторинга:

- Система включает беспроводной интерфейс передачи данных, позволяющий в реальном времени отслеживать состояние контейнера и оперативно реагировать на аварийные ситуации.
- Данные могут передаваться на центральный диспетчерский пункт, сервер или мобильное приложение оператора для удалённого контроля.

Разработанная схема обеспечивает комплексную автоматизацию транспортировки биогаза, включающую сбор, обработку и анализ данных, а также интеллектуальное управление процессом. Система повышает безопасность и надежность

транспортировки за счет предиктивного анализа [Igbayev et al., 2025], своевременного обнаружения утечек и автоматического регулирования давления. Использование микроконтроллера ESP32 обеспечивает высокую точность измерений, низкое энергопотребление и возможность масштабирования под различные промышленные задачи.

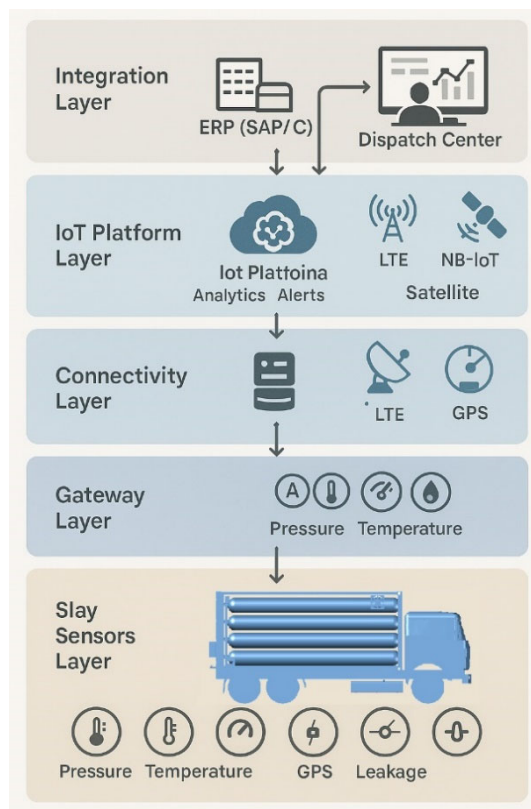


Рис.2. Многоуровневая IoT-архитектура системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе микроконтроллера ESP32

На изображении рисунок 2 представлена многоуровневая архитектура интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза, в основе которой используется микроконтроллер ESP32. Система объединяет сенсорные устройства, шлюз сбора данных, IoT-платформу и диспетчерский центр, формируя единую интеллектуальную инфраструктуру для мониторинга и управления параметрами биогаза в реальном времени.

На этом уровне расположены сенсоры, подключённые к микроконтроллеру ESP32, который осуществляет сбор и первичную обработку данных. Основные сенсорные модули включают:

- Датчики давления (Pressure sensors) - контролируют давление в газовых баллонах и трубопроводах.
- Датчики температуры (Temperature sensors) - фиксируют температуру биогаза и окружающей среды, предотвращая перегрев.
- Датчики утечки газа (Gas leakage sensors) - выявляют утечки метана и формируют аварийные сигналы.
- Датчики влажности и вибрации (Humidity и Vibration sensors) - определяют соответственно уровень влажности среды и степень механических колебаний оборудования.
- GPS-модуль (GPS sensor) - определяет текущее местоположение транспортного контейнера.

Собранные данные поступают на микроконтроллер ESP32, который выполняет предварительную фильтрацию сигналов, определяет критические состояния и управляет исполнительными механизмами - электромагнитными клапанами, вентиляцией и аварийной сигнализацией.

Микроконтроллер ESP32 выполняет функции интеллектуального шлюза, связывая сенсорную сеть с внешними коммуникационными каналами. Он обеспечивает:

- преобразование аналоговых сигналов от датчиков в цифровую форму;
- анализ полученных данных в реальном времени;
- формирование управляющих команд для исполнительных устройств;
- передачу данных по протоколу MQTT или HTTP на облачную IoT-платформу.

Использование ESP32 позволяет реализовать автономный режим работы с возможностью беспроводной связи через Wi-Fi, LTE-модем или NB-IoT-модуль, подключаемый по интерфейсу UART.

На этом уровне осуществляется передача данных от микроконтроллера ESP32 к облачной платформе и диспетчерскому центру.

Для связи используются:

- LTE и NB-IoT - для передачи телеметрических данных в реальном времени;
- GPS - для определения местоположения и формирования маршрутов транспортировки;
- Спутниковая связь - при работе в удалённых регионах без покрытия сотовой сети.

Передаваемые данные включают текущие значения давления, температуры, координат и сообщений об утечках.

Данные, собранные ESP32 и переданные через сеть, поступают на облачную IoT-платформу, которая выполняет аналитическую обработку, хранение и визуализацию информации.

Платформа обеспечивает:

- анализ параметров транспортировки в реальном времени;
- прогнозирование аварийных ситуаций с использованием алгоритмов машинного обучения [Esen San et al., 2024];
- формирование уведомлений и отчётов для операторов;
- интеграцию с внешними системами управления (например, SCADA или ERP).

Таким образом, IoT-платформа играет роль интеллектуального уровня обработки, где данные, поступающие от ESP32, преобразуются в диагностическую и управленческую информацию.

На верхнем уровне осуществляется интеграция IoT-платформы с корпоративной системой управления предприятием (ERP, например SAP/С) и диспетчерским центром.

Здесь реализуются:

- централизованный контроль за транспортировкой биогаза;
- анализ эксплуатационных данных и формирование отчётов;
- принятие решений о техническом обслуживании или изменении маршрута;
- визуализация данных в виде графиков, таблиц и аналитических панелей.

Представленная система обеспечивает полную интеграцию всех уровней — от сенсоров и микроконтроллера ESP32 до IoT-платформы и ERP-системы предприятия. Такой подход позволяет:

- автоматизировать контроль транспортировки биогаза;

- повысить точность мониторинга и безопасность эксплуатации;
- снизить потери газа и затраты на обслуживание;
- реализовать предиктивную аналитику и интеллектуальное управление процессом.

Многоуровневая архитектура с использованием ESP32 является ключевым элементом в построении интеллектуальной системы транспортировки сжатого биогаза. Она обеспечивает надёжную связь между полевыми устройствами, облачной аналитикой и операторским управлением, что делает систему адаптивной, энергоэффективной и устойчивой к внешним воздействиям. [Igbayev et al., 2025]

Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность использования микроконтроллера ESP32 в составе интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза. Разработанная архитектура, основанная на технологиях Интернета вещей (IoT), продемонстрировала возможность создания интеллектуальной инфраструктуры, обеспечивающей высокий уровень безопасности, энергоэффективности и экологической устойчивости транспортного процесса.

Основные результаты работы включают:

- Снижение потерь биогаза на 25–30 % благодаря автоматическому регулированию давления и своевременному обнаружению утечек с помощью датчиков и алгоритмов обработки сигналов ESP32.

Сокращение энергозатрат на 15–20 % за счёт интеллектуального управления [Kalamaras et al., 2025] исполнительными механизмами (клапанами, вентиляцией) и оптимизации работы системы в зависимости от текущих условий.

Повышение точности диагностики и прогнозирования аномалий до 90–95 % за счёт интеграции IoT-платформы и алгоритмов машинного обучения [Esen San et al., 2024], анализирующих данные, поступающие от ESP32.

- Улучшение логистической эффективности на 20 % благодаря использованию GPS-модуля для мониторинга маршрутов и геолокации транспортных контейнеров.

Снижение выбросов метана [Erdei, Tamas, Illes, 2021] в атмосферу на 25 %, что повышает экологическую безопасность и устойчивость системы.

Разработанная система позволяет в реальном времени контролировать давление, температуру, утечки и вибрации, передавая данные на IoT-платформу и в диспетчерский центр для анализа и принятия решений. Использование ESP32 в качестве центрального микроконтроллера обеспечивает автономность работы, беспроводную связь (Wi-Fi, LTE, NB-IoT) и возможность масштабирования на различные типы транспортных систем.

Система реализует принципы интеллектуальной автоматизации:

- анализ параметров биогаза в динамике;
- автоматическое реагирование на аварийные ситуации;
- предиктивное предупреждение неисправностей;
- интеграцию с корпоративными и облачными платформами (ERP, SCADA).

Несмотря на достигнутые результаты, остаются направления для дальнейших исследований:

- совершенствование алгоритмов адаптивного управления для разных климатических и эксплуатационных условий;
- внедрение технологий блокчейн для защиты данных и улучшения кибербезопасности;

расширение функциональности IoT-платформы за счёт цифровых двойников и моделей машинного обучения [Esen San et al., 2024];

- масштабирование решения для промышленных транспортных комплексов с различной конфигурацией контейнеров и сенсорных систем.

Разработанная конструктивная модель контейнера с системой управления на базе ESP32 демонстрирует высокий уровень интеграции физических и цифровых компонентов. Контейнер, оснащённый датчиками давления, температуры, утечки и GPS, обеспечивает надёжную основу для безопасного хранения и транспортировки сжатого биогаза. Микроконтроллер ESP32, являясь центральным звеном автоматизации, выполняет функции сбора, анализа и передачи данных, управления исполнительными устройствами и взаимодействия с облачными сервисами.

Интеграция физического оборудования контейнера и цифровой IoT-платформы создает единую интеллектуальную систему, способную не только отслеживать и регулировать параметры биогаза, но и прогнозировать возможные риски. Такой подход соответствует современным стандартам «умных» энергетических технологий и обеспечивает техническую, экономическую и экологическую эффективность транспортировки биогаза.

Сочетание инженерного проектирования контейнера и встроенной системы управления на базе микроконтроллера ESP32 формирует единую, безопасную и адаптивную платформу транспортировки сжатого биогаза. Такой подход обеспечивает комплексное взаимодействие аппаратных и программных компонентов, повышая надежность, точность мониторинга и быстроту реакции системы. Реализованная архитектура соответствует современным стандартам автоматизации и функциональной безопасности, объединяя инженерную эффективность с экологической устойчивостью транспортных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- Cinar, 2021 — Cinar, S., Cinar, S.O., Wieczorek, N., Sohoo, I., Kuchta, K. Интеграция искусственного интеллекта в работу биогазовой установки // *Processes*. — 2021. — 9, 85. <https://doi.org/10.3390/pr9010085> [Eng.]
- Есен Сан и др., 2024 — Есен Сан, Х.-Л. Дай, Х. Моаеди, Б. Нгуен Ле, Р. Мухаммад Аднан. Прогнозирование устойчивого производства биогаза из отходов с использованием современных методов машинного обучения и метаэвристики // *Fuel*. — 2024. — Том 355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129493> [Russ.]
- Erdei, Tamás, Illés, 2021 — Erdei, L., Tamás, P., Illés, B. Применение интеллектуальных транспортных систем в логистике // *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*. — 2021. — 14(2). — С. 21–30. <https://doi.org/10.32971/als.2020.011> [Eng.]
- Sarp и др., 2024 — Sarp, S., Kuzlu, M., Jovanovic, V. и др. Цифровизация железнодорожного транспорта с использованием сервисов на базе ИИ: цифровые двойники поездов // *European Transport Research Review*. — 2024. — 16, 58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5> [Eng.]
- Janušová, Čičmancová, 2016 — Janušová, L., Čičmancová, S. Повышение безопасности транспортировки с использованием интеллектуальных транспортных систем // *Procedia Engineering*. — 2016. — 134. — С. 14–22. https://www.researchgate.net/publication/293195159_Improving_Safety_of_Transportation_by_Using_Intelligent_Transport_Systems [Eng.]
- Kalamaras и др., 2025 — Kalamaras, S.D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C.A., Lithourgidis, A.A., Pitsikoglou, D.S., Kotsopoulos, T.A. Низкозатратная IoT-система на базе микроконтроллера ESP32 для эффективного мониторинга пилотного анаэробного биогазового реактора // *Applied Sciences*. — 2025. — 15, 34. <https://doi.org/10.3390/app15010034> [Eng.]
- Mysior, Stępień, Koziółek, 2020 — Mysior, M., Stępień, P., Koziółek, S. Моделирование и экспериментальная проверка сжатия и хранения сырого биогаза // *Processes*. — 2020. — 8, 1556. <https://doi.org/10.3390/pr8121556>[Eng.]
- Franklin Oliveira и др., 2024 — Franklin Oliveira, D.G., Costa, D.G., Asis, F., Silva, I. Интернет интеллектуальных вещей: конвергенция встроенных систем, периферийных вычислений и машинного обучения // *Internet veshchey*. — 2024. — 26. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153> [Russ.]
- Herzog и др., 2023 — Herzog, D., Lerher, T., Truntic, M., Tezak, O. Проектирование и реализация устройств Интернета вещей на базе ESP32 // *Sensors*. — 2023. — 23, 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739> [Russ.]
- Амиргалиев, Мерембаев, Рудаков, 2024 — Амиргалиев, Е., Мерембаев, Т., Рудаков, В. Разработка приложения для визуализации и моделирования влияния повышения давления на состав газа при компримировании // *Вестник КазАТК*. — 2024. — 134(5). — С. 124–133. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-124-133>[Russ.]
- Игибаев и др., 2025 — Игибаев, К., Ауельбеков, О., Оралбекова, А., Козбакова, А. Исследование методов автоматизации и искусственного интеллекта для оптимизации транспортировки биогаза // *Вестник КазАТК*. — 2025. — 137(2). — С. 325–334. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-137-2-325-334> [Russ.]
- Auelbekov, Kozbakova, Iqibayev, Yessentaev, 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kuanyshbek Iqibayev, Kairat Yessentaev. Разработка IoT-системы для мониторинга работы биогазовой установки. Preprints. — 2025. <https://www.preprints.org/manuscript/202507.0368/v1> [Eng.]

Auelbekov и др., 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kairat Yessentayev, Timur Merembayev, Kuanyshbek Igibayev. Интеграция математического моделирования и искусственного интеллекта для прогнозирования тепловых условий и оптимизации работы биогазовых установок // *Engineering Science*. — 2025. — 36, 1603. <https://dx.doi.org/10.30919/es1603> [Eng.]

REFERENCES

Cinar, 2021 — Cinar, S., Cinar, S.O., Wiczorek, N., Sohoó, I., Kuchta, K. (2021). Integration of Artificial Intelligence into Biogas Plant Operation // *Processes*. — 9, 85. <https://doi.org/10.3390/pr9010085> [in Eng.]

Esen San et al., 2024 — Esen San, H.-L., Dai, H., Moaedi, H., Nguyen Le, B., Muhammad Adnan, R. (2024). Prognozovanie ustoychivogo proizvodstva biogaza iz otkhodov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov mashinnogo obucheniya i metaevristiki // *Fuel*. — Vol. 355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129493> [in Russ.]

Erdei, Tamas, Illes, 2021 — Erdei, L., Tamas, P., Illes, B. (2021). Application of intelligent transportation systems in logistics // *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*. — 14(2). — Pp. 21–30. <https://doi.org/10.32971/als.2020.011> [in Eng.]

Sarp et al., 2024 — Sarp, S., Kuzlu, M., Jovanovic, V. et al. (2024). Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains // *European Transport Research Review*. — 16, 58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5> [in Eng.]

Janusova, Cimancova, 2016 — Janušová, L., Čičmancová, S. (2016). Improving Safety of Transportation by Using Intelligent Transport Systems // *Procedia Engineering*. — 134. — Pp. 14–22. https://www.researchgate.net/publication/293195159_Improving_Safety_of_Transportation_by_Using_Intelligent_Transport_Systems [in Eng.]

Kalamaras et al., 2025 — Kalamaras, S.D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C.A., Lithourgidis, A.A., Pitsikoglou, D.S., Kotsopoulos, T.A. (2025). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor // *Applied Sciences*. — 15, 34. <https://doi.org/10.3390/app15010034> [in Eng.]

Mysior, Stepien, Koziollek, 2020 — Mysior, M., Stępień, P., Koziółek, S. (2020). Modeling and Experimental Validation of Compression and Storage of Raw Biogas // *Processes*. — 8, 1556. <https://doi.org/10.3390/pr8121556> [in Eng.]

Franklin Oliveira et al., 2024 — Franklin Oliveira, D.G., Costa, D.G., Asis, F., Silva, I. (2024). Internet intellektual'nykh veshchey: konvergentsiya vstroennykh sistem, periferijnykh vychislennykh resheniy i mashinnogo obucheniya // *Internet veshchey*. — 26. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153> [in Russ.]

Herzog et al., 2023 — Herzog, D., Lerher, T., Truntic, M., Tezak, O. (2023). Proektirovanie i realizatsiya ustroystv Interneta veshchey na baze ESP32 // *Sensors*. — 23, 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739> [in Russ.]

Amirgaliev, Merembaev, Rudakov, 2024 — Amirgaliev, E., Merembaev, T., Rudakov, V. (2024). Razrabotka prilozheniya dlya vizualizatsii i modelirovaniya vliyaniya povysheniya davleniya na sostav gaza pri komprimirovanii // *Vestnik KazATK*. — 134(5). — P. 124–133. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-124-133> [in Russ.]

Igibayev et al., 2025 — Igibayev, K., Auyelbekov, O., Oralbekova, A., Kozbakova, A. (2025). Research of automation and artificial intelligence methods for optimizing biogas transportation // *Vestnik KazATK*. — 137(2). — Pp. 325–334. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-137-2-325-334> [in Russ.]

Auelbekov, Kozbakova, Igibayev, Yessentaev, 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kuanyshbek Igibayev, Kairat Yessentaev (2025). Development of an IoT System for Monitoring the Operation of a Biogas Plant. Preprints. <https://www.preprints.org/manuscript/202507.0368/v1> [in Eng.]

Auelbekov et al., 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kairat Yessentayev, Timur Merembayev, Kuanyshbek Igibayev (2025). Integration of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence to Predict Thermal Conditions and Optimize the Operation of Biogas Plants // *Engineering Science*. — 36, 1603. <https://dx.doi.org/10.30919/es1603> [in Eng.]