

Разработка мобильного прототипа системы мониторинга параметров безопасности для производственных помещений на базе микроконтроллера Atmega328P

А. Н. Ильюшина

*Санкт-Петербургский
технический колледж управления
и коммерции*

bdbyu@mail.ru

И. М. Новожилов

*Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

novozhilovim@list.ru

М. А. Прокопович

*Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

им. В.И. Ульянова (Ленина)

milanaprokopovic@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается разработка прототипа мобильной системы мониторинга параметров безопасности для производственных помещений. Устройство построено на базе микроконтроллера Atmega328P и включает датчики температуры, влажности, газа и протечки жидкости. Система обеспечивает визуализацию данных на TFT-дисплее, звуковую и световую индикацию при отклонении параметров от нормы. В работе представлены этапы проектирования аппаратной части, сборки и программирования устройства, а также результаты тестирования прототипа в условиях, имитирующих производственную среду. Разработанное решение может быть использовано для повышения безопасности на рабочих местах, в том числе в лабораториях и цехах.

Ключевые слова: система мониторинга безопасности, производственные помещения, микроконтроллер Atmega328P, датчики температуры и влажности, датчик газа MQ-2, визуализация данных, звуковая индикация, прототип устройства

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки систем мониторинга параметров безопасности в производственных помещениях обусловлена необходимостью предотвращения аварийных ситуаций, обеспечения безопасных условий труда и минимизации рисков для здоровья персонала. Особое значение такие системы имеют на объектах с повышенной опасностью, например, в цехах электролиза алюминия, где присутствуют риски утечек газов, повышенных температур и других вредных факторов. Существующие решения часто не обладают достаточной мобильностью, комплексностью и оперативностью индикации, что ограничивает их эффективность.

Целью данного исследования является разработка прототипа мобильной системы мониторинга параметров безопасности на базе микроконтроллера Atmega328P, способной в реальном времени отслеживать температуру, влажность, концентрацию газов и наличие протечек, а также визуализировать данные и сигнализировать об отклонениях.

Задачи исследования:

1. Разработать архитектуру устройства, включая выбор компонентов для измерения параметров безопасности.
2. Спроектировать и собрать прототип устройства с системой индикации и визуализации данных.
3. Провести тестирование прототипа для оценки его работоспособности и надежности в условиях, приближенных к производственным.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА

Отображение информации, собранной с датчиков устройства будет осуществляться при помощи цветного 1.8 TFT LCD дисплея с разрешающей способностью 128x160 модели ST7735S. TFT LCD-дисплей (Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display) — это жидкокристаллический дисплей с активной матрицей, управляемой тонкопленочными транзисторами (TFT). Его можно использовать для вывода необходимой информации или изображений.

Для данного прототипа была выбрана модель ST7735S ввиду небольшого размера и умеренного энергопотребления, в совокупности с достаточным для качественного отображения информации разрешением. Жидкокристаллический дисплей с диагональю 1.8 дюйма, собран на контроллере ST7735. Обладает разрешением 128x160 и позволяет выводить до 262.144 оттенков. Имеет SPI интерфейс и встроенный стабилизатор на 3.3В, поэтому может работать как с 3.3, так и с 5В.

Дисплей может отображать качественную картинку, позволяя выводить 18 бит цвета, то есть до 262.144 оттенков. За обработку данных отвечает контроллер ST7735R. Поддерживает 3 режима цветового пространства: RGB444, RGB565, RGB888. Подсветка осуществляется при помощи двух LED диодов с поддержкой ШИМ, имеется возможность программного управления мощностью.

Для обмена данными дисплей использует SPI протокол, который позволяет подключить дисплей практически к любому микроконтроллеру. Для подключения задействуются 4 или 5 контактов.

Напряжение питания составляет 3.3В, для работы с контроллерами Arduino предусмотрен стабилизатор напряжения. Шина передачи данных толерантна к 5В логике.

Дополнительно на модуле дисплея установлен разъем для SD-карты, используемой для хранения и загрузки изображений на дисплей. Выводы для подключения SD карты напрямую к микроконтроллеру выведены отдельно, на противоположную от основных контактов сторону.

Выбор пал именно на TFT дисплей, так как в проекте требуется большая диагональ и разрешающая способность, чтобы была возможность увидеть показатели датчиков и вовремя среагировать на угрозу, большинство дисплеев OLED имеют диагональ около 1 дюйма, что будет недостаточно для точного определения показателей с расстояния. LCD дисплеи также не подходят, так как большинство из них имеют всего две строки, а для однозначного отображения информации следует отводить по строке под каждый новый параметр.

Далее необходимо устройство для звукового оповещения о превышении одного или нескольких показателей сверх допустимой нормы, что будет сигналом для оставления рабочего места. В данном проекте требуется пассивный звукоизлучатель, так как для оповещения о разных угрозах лучше использовать звуковые сигналы разной тональности, активные звукоизлучатели в свою очередь способны издавать звуки в одной тональности. Для использования в описываемом проекте был выбран электронный звукоизлучатель HCM1205X, его будет достаточно, для подачи различных звуковых сигналов о тревоге.

Для обеспечения лучшей безопасности на рабочем месте был выбран Датчик широкого спектра газов MQ-2. Так же есть различные версии датчиков газа, они представлены в табл. 1. Датчик широкого спектра газов MQ-2 обнаружит утечки пропана, бутана, метана, водорода и углекислого газа. А еще его можно использовать для определения концентрации алкоголя в выдыхаемом воздухе и контроля задымленности производственных помещений.

ТАБЛИЦА 1. ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ГАЗЫ

Наименование	Чувствительность к газам и дыму
MQ3	Пары спиртов, низкая чувствительность к бензолу
MQ4	Природный газ, метан, низкая чувствительность к парам спиртов и дыму.
MQ5	Метан, пропан, изобутан, природный газ, СНГ, низкая чувствительность к парам спиртов и дыму.
MQ6	СНГ, изобутан, пропан, низкая чувствительность к парам спиртов и дыму.
MQ7	Датчик угарного газа.
MQ8	Датчик водорода, низкая чувствительность к СНГ, угарному газу, парам спиртов и дыму.
MQ9	Датчик горючих газов и угарного газа (угарный газ, метан, СНГ).

В результате сравнительного анализа газовых сенсоров для применения в условиях производственных помещений общего назначения, представленный в работах [2, 6, 14–56] был выбран датчик серии MQ-2, как

наиболее соответствующий поставленным задачам по обнаружению широкого спектра газов.

Для мониторинга температурно-влажностных параметров рассматривались цифровые комбинированные датчики DHT-11 и DHT-22. Между указанными моделями существуют различия в метрологических характеристиках, диапазонах измерений и сфере применения. Датчик DHT-11 рекомендуется для применений с ограниченным бюджетом и умеренными требованиями к точности, таких как учебные проекты или базовый мониторинг микроклимата. В свою очередь, датчик DHT-22 обеспечивает более высокую точность, расширенные диапазоны измерения температуры и влажности, а также устойчивость к более экстремальным условиям эксплуатации, что обуславливает его применение в системах метеомониторинга, тепличных комплексах и других ответственных задачах.

На наш взгляд, окончательный выбор был сделан в пользу датчика DHT-22. Конфигурация печатной платы позволила оптимизировать расположение сенсора для минимизации погрешности измерений, вызванной тепловым воздействием работающих компонентов системы.

Для обеспечения устойчивой работы устройства в продолжительном режиме был применен сетевой фильтр, установленный на входе цепи питания 220 В, предназначенный для подавления высокочастотных помех, способных негативно влиять на работу электронных компонентов. Выбран фильтр конденсаторного типа, принцип действия которого основан на сглаживании колебаний напряжения путем накопления и отдачи электрического заряда, выполняя функцию «электрического буфера». В составе сетевых фильтров подобные элементы часто используются совместно с дросселями, формируя LC-фильтрующие звенья.

Управление включением устройства реализовано с помощью четырехконтактного выключателя, предназначенного для использования в сетевых фильтрах, стабилизаторах напряжения и бытовой технике (модель KCD4, 16А, 220В, красного цвета), выбранного благодаря высокой надежности и технологичности монтажа.

В целях повышения электробезопасности в цепь питания интегрирован блок предохранителя с плавкой вставкой на 10А, выполняющий функцию защиты устройства и питающей сети от последствий короткого замыкания и перегрузок.

Электропитание компонентов системы обеспечивается блоком питания марки Xiaomi, мощность которого достаточна для стабильного функционирования всех узлов прототипа. Для улучшения теплоотвода и удобства компоновки корпус блока питания был демонтирован.

Конструктивное исполнение устройства базируется на корпусе для радиоэлектронной аппаратуры типа 15–12 (габариты 195×175×70 мм), внутренний объем которого позволяет организовать эффективную конвекцию воздуха для охлаждения компонентов и обеспечения репрезентативности показаний датчиков.

После завершения этапа выбора элементной базы был осуществлен переход к разработке монтажной схемы прототипа.

III. СОЗДАНИЕ МОНТАЖНОЙ СХЕМЫ ПРОТОТИПА

Настоящий этап работы посвящен практической реализации проекта и предполагает разработку принципиальной и монтажной схем прототипа. Данные схемы формируют конструктивную основу устройства, регламентируя процедуры его сборки, настройки и последующей эксплуатации. Особое внимание уделяется детальному проектированию схемотехнических решений, направленному на обеспечение высокой надежности, функциональной эффективности и эргономичности конечного изделия.

В разделе представлена полная принципиальная схема устройства, отражающая состав всех функциональных элементов и топологию их взаимосвязей. Схема разработана с учетом требований безопасной эксплуатации в реальных условиях. Также приводится детальное пошаговое описание процесса подключения компонентов.

На рис. 1 изображена монтажная схема устройства, которая обеспечивает визуализацию пространственного расположения компонентов и физической организации соединений между ними. Эта схема является ключевым документом, обеспечивающим корректность сборки и последующей настройки разрабатываемого устройства.

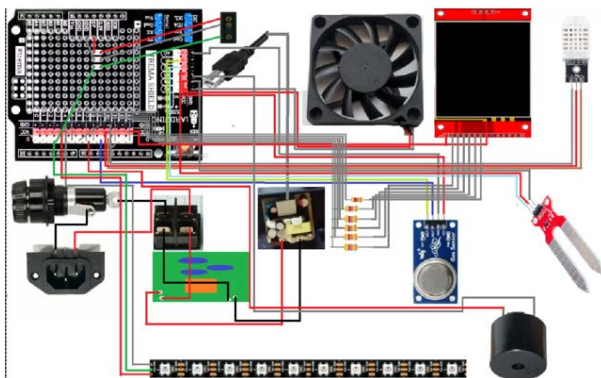


Рис. 1. Монтажная схема устройства

Первый этап сборки прототипа — это пайка элементов питания, сначала были припаяны провода к разьему 220 V, после чего к выключателю и предохранителю. Далее были припаяны сетевой фильтр и блок питания.

После чего была собрана тестовая сборка прототипа, вид указан на рис. 2.

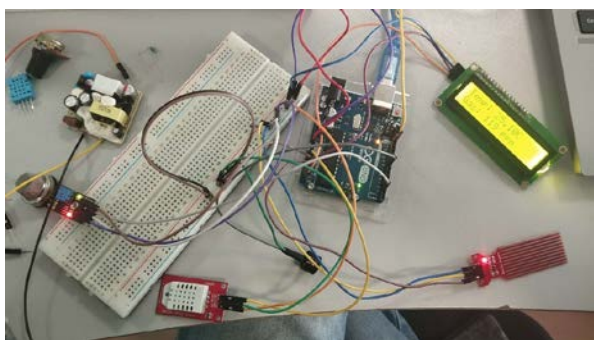


Рис. 2. Проверка функций прототипа

Третьим этапом сборки был полноценный сбор прототипа вне корпуса, в результате сборки была выяснена необходимость макетной платы для

подключения дисплея, также припаян argb разъем для подключения внешней индикации к прототипу, после этого появилась возможность подключения argb устройств с количеством светодиодов не превышающем 25. Итог сборки представлен на рис. 3.



Рис. 3. Проверка работоспособности всей системы в сборе

Последующим шагом было создание в корпусе необходимых отверстий под экран и вход вентиляции, также было установлены пылевые сеточки для предотвращения попадания большого количества пыли в устройство, итоги данных действий представлены на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Отверстие для экрана

Установленные пылевые сетки представлены на рис. 5.

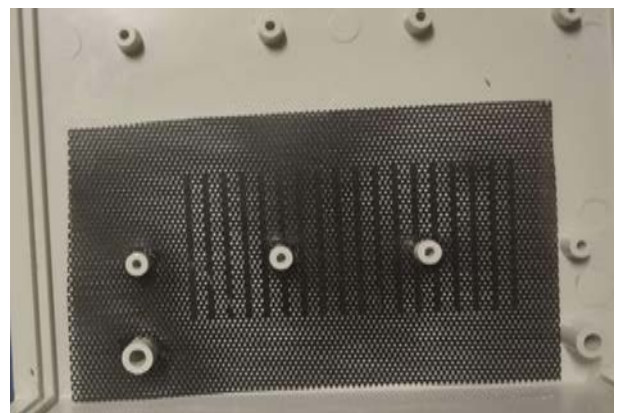


Рис. 5. Пылевые сетки

После проверки работы в закрытом корпусе была выявлена проблема перегрева компонентов питания и датчиков, решением этого стало направление потоков воздуха на компоненты питания и датчики, имеющие проблемы перегрева, сделано это было при помощи транспортировочного пенопласта, в итоге перегрев был

устранен и показания датчиков теперь колеблются в пределах погрешности, итог виден на рис. 6.



Рис. 6. Перенаправление воздушных потоков

После этого все физические проблемы были устранены, итоговый вид устройства представлен на рис. 7.



Рис. 7. Итоговый вид устройства

Далее необходимо приступить к программированию микроконтроллера.

IV. ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Программирование Arduino Uno было выполнено в Arduino IDE — это интегрированная среда разработки (Integrated Development Environment), предназначенная для создания программ на языке C++ для плат Arduino. Arduino IDE позволяет писать программы в удобном текстовом редакторе, компилировать их в машинный код и загружать на платы Arduino. Это приложение доступно бесплатно и его можно скачать с официального сайта Arduino.

На рисунке 8 изображен интерфейс Arduino IDE. Интерфейс этой среды разработки относительно прост в освоении. Основу его составляет язык программирования, похожий на C++, с рядом predefined функций. Как и в других языках, основанных на C, в Arduino используется ряд правил написания кода.

Библиотеки в Arduino IDE добавляют дополнительную функциональность программам (скетчам), например, при взаимодействии с аппаратной частью или при обработке данных. Для использования

библиотек достаточно добавить директиву #include в начале кода, после чего библиотека будет скомпилирована вместе со скетчем. Однако использование библиотек требует дополнительного места в памяти Arduino.

На сайте Arduino.cc можно найти обширный список библиотек. Некоторые из них уже включены в Arduino IDE, а другие можно загрузить с внешних ресурсов. В Arduino IDE также предусмотрен менеджер библиотек, который позволяет легко управлять ими.

Arduino IDE поддерживает множество плат, включая Arduino Uno, Arduino Nano, ESP32, ESP8266, микроконтроллеры Attiny и многие другие. Поддержку новых плат можно добавить через встроенный менеджер плат Arduino IDE.

Программный код загружается на плату через встроенный загрузчик (Bootloader). Этот загрузчик позволяет загружать код без дополнительных аппаратных средств через интерфейсы RS-232, USB и Ethernet. При загрузке скетча загрузчик активируется на несколько секунд, и его работу можно наблюдать по встроенному светодиоду на плате.

V. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА

Готовое устройство работает от сети 220V, имеет кнопку включения, предохранитель, вентилятор, выносной датчик протечки, датчик газа, совмещенный датчик температуры и влажности, также разъем 3 pin ARGB, при проведении тестирования проверялась работа каждого из этих компонентов.

При включении устройства проигрывается заставка с морем, солнцем и дельфинами, после чего на экран выводятся показания датчиков.

При срабатывании датчиков меняется цвет лед подсветки и зумер начинает издавать звук, предупреждающий об опасности, при возвращении показателей к норме, звук прекращается, и цвет ленты возвращается к зеленому, сигнализирующему о безопасности обстановки.

Тестирование проводилось в течении нескольких дней, за это время не было выявлено проблем или случайных отключений прототипа, что показывает возможность длительной работы без необходимости выключения устройства.

Далее рассмотрим режимы устройства. На рис. 8 представлен режим нормального состояния. Все показатели в норме, зеленая подсветка.



Рис. 8. Нормальная работа устройства

На рис. 9 представлено состояние устройства при превышении температуры. Показатели температуры превышены, подсветка сигнализирует оранжевым цветом, сопровождающий звуковой сигнал – для реагирования на превышенные показатели.

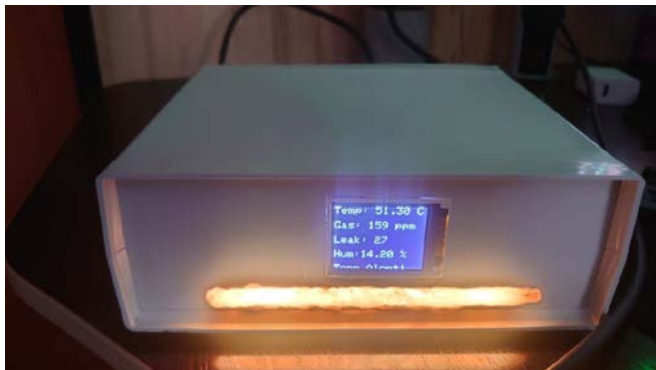


Рис. 9. Повышенная температура

На рис. 10 представлен вид устройства при срабатывании датчика протечки. Показатели датчика протечки повышены, подсветка горит синим, сопровождается звуковым сигналом.



Рис. 10. Протечка

На рис. 11 представлен вид устройства при обнаружении превышения допустимого порога содержания газов в воздухе.



Рис. 11. Газ

Подсветка красная и сопровождается характерным звуковым сигналом.

VI. ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный прототип мобильной системы мониторинга демонстрирует практическую реализацию комплексного подхода к обеспечению безопасности в производственных помещениях. Его архитектура,

основанная на микроконтроллере ATmega328P и наборе специализированных датчиков (MQ-2, DHT-22), обеспечивает мониторинг критических параметров среды в реальном времени. Данное решение продолжает линию исследований, направленных на создание распределенных и встраиваемых систем контроля для промышленных объектов, что отражено в ряде цитируемых работ.

Принцип многопараметрического контроля, заложенный в устройство, созвучен идеям, представленным в исследованиях по мониторингу сложных технологических процессов. В частности, разработка систем для контроля температурного поля электролизера [5] или сепарационной колонны [6] также требует интеграции данных с нескольких сенсоров для формирования целостной картины состояния объекта. Подобно тому, как в работе [6] осуществляется мониторинг температурного поля для оптимизации процесса, в данном прототипе отслеживание температуры, влажности и загазованности позволяет оперативно идентифицировать отклонения от безопасных режимов эксплуатации помещения.

Выбор датчика газа MQ-2 для детектирования широкого спектра газов обусловлен задачей создания универсального решения для помещений общего назначения. Этот подход перекликается с исследованиями в области газового мониторинга для специфических сред, таких как угольные шахты [8], где также решалась задача надежного обнаружения токсичных и горючих веществ. В то время как система для шахт [8] ориентирована на экстремальные условия и, вероятно, использует более специализированные сенсоры, настоящий прототип предлагает более доступное и адаптируемое решение для широкого круга промышленных и лабораторных помещений.

Реализованная система индикации, включающая TFT-дисплей и многоцветную световую сигнализацию с звуковым сопровождением, обеспечивает интуитивно понятное представление информации для оператора. Важность эффективной визуализации и индикации для систем контроля подчеркивается в работе по созданию системы мониторинга электромагнитного поля электролизера Содерберга [5], где также решалась задача наглядного представления сложных данных.

Аспект надежности и устойчивости к помехам, обеспеченный применением сетевого фильтра и продуманной компоновкой, является критическим для промышленных систем. Проблема обеспечения стабильной работы в условиях воздействия внешних факторов исследуется в контексте управления гидродинамическими процессами с учетом стохастических возмущений [10] и разработки систем автоматического регулирования для распределенных объектов [11, 12]. Хотя масштаб задач различен, общим принципом является необходимость проектирования систем, устойчивых к внешним дестабилизирующим воздействиям.

Перспективы развития данной системы видятся в интеграции беспроводных интерфейсов связи для передачи данных на центральный пульт или в облачную систему мониторинга. Это позволит перейти от автономного устройства к элементу распределенной сети контроля, аналогичной системам, описанным для

магистральных газопроводов [7] или управления ресурсами подземных вод [10, 19]. Такой шаг соответствует современным трендам цифровизации и создания «умных» производств, что обсуждается в контексте интеллектуального завершения скважин [13] и применения системного анализа для моделирования сложных процессов [1].

Таким образом, представленный прототип является логичным прикладным развитием научных идей, изложенных в цитируемых работах, адаптируя принципы мониторинга и контроля, отработанные на крупных промышленных объектах, к задаче обеспечения безопасности локальных рабочих мест. Его разработка подтверждает актуальность создания модульных, надежных и наглядных систем контроля, способствующих повышению уровня промышленной безопасности.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был разработан и собран прототип мобильной системы мониторинга параметров безопасности для производственных помещений на базе микроконтроллера Atmega328P. Устройство включает датчики температуры, влажности, газа и протечки, обеспечивает визуализацию данных на TFT-дисплее и звуковую/световую индикацию при отклонении параметров от нормы. Тестирование прототипа подтвердило его работоспособность и надежность в условиях длительной эксплуатации. Разработанное решение может быть использовано для повышения уровня безопасности на рабочих местах, в том числе в лабораториях, цехах и других производственных помещениях с повышенными требованиями к контролю среды. В перспективе возможна доработка системы с добавлением беспроводных интерфейсов связи и интеграцией в централизованные системы мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

[1] Ilyushin Y.V., Boronko E.A. Development of a Mathematical Model of the Electromagnetic Field Formation Process Based on System Analysis Methods. *Mathematics* 2026, 14, 399. <https://doi.org/10.3390/math14030399>

[2] Marinina O.A., Ilyushin Y.V. and Kildiushov E.V. (2025). Comprehensive Analysis and Forecasting of Indicators of Sustainable Development of Nuclear Industry Enterprises. *International Journal of Engineering*, 38(11), 2527-2536. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.11b.05>

[3] Eremeeva A.M., Ilyushin Y.V. Temperature Control During Storage of Raw Materials in the Process of Biodiesel Fuel Production. *Inventions* 2025, 10, 7. <https://doi.org/10.3390/inventions10010007>

[4] Martirosyan A., Ilyushin Y., Afanaseva O., Kukharova T., Asadulagi M., & Khloponina V. (2025). Development of an Oil Field's Conceptual Model. *International Journal of Engineering*, 38(2), 381-388. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.02b.12>

[5] Yury I., Martirosyan A. The development of the soderberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. *Sci Rep* 14, 3501 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52002-w>

[6] Kukharova T., Martirosyan A., Asadulagi M.-A., Ilyushin Y. Development of the Separation Column's Temperature Field Monitoring System. *Energies* 2024, 17, 5175. <https://doi.org/10.3390/en17205175>

[7] Fetisov V., Ilyushin Y.V., Vasiliev G.G. et al. Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline. *Scientific Reports*. 13, 3092 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29570-4>

[8] Martirosyan A.V., Ilyushin Y.V. The Development of the Toxic and Flammable Gases Concentration Monitoring System for Coalmines. *Energies* 2022, 15, 8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>

[9] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production. *Energies* 2022, 15, 9001. <https://doi.org/10.3390/en15239001>

[10] Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Development of a Distributed Control System for the Hydrodynamic Processes of Aquifers, Taking into Account Stochastic Disturbing Factors. *Water* 2023, 15, 770. <https://doi.org/10.3390/w15040770>

[11] Ilyushin Y.V., Pervukhin D.A., Afanasieva O.V., Afanasyev M.P., Kolesnichenko, S.V. The methods of the synthesis of the nonlinear regulators for the distributed one-dimension control objects (2015) *Modern Applied Science*, 9 (2), pp. 42-61. DOI: 10.5539/mas.v9n2p42

[12] Ilyushin Y.V., Pervukhin D.A., Afanasieva O.V., Afanasyev M.P., Kolesnichenko, S.V. Solution of problem of heating elements' location of distributed control objects (2016). *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 12 (1), pp. 585-602.

[13] Materova E.S., Aksenova Zh.A., Marinina O.A., Sharafullina R.R., Baykova, E.R., Zhironkin, S.A., Safiullin, L.N. (2025). Factors affecting contemporary pricing in the Russian coal market. *Ugol*, 10, 44-49. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-10-44-49>

[14] Sleptsov A., Medvedeva L., Marinina O., Savenok O. (2024). Feasibility Study on the Applicability of Intelligent Well Completion. *Processes*, 12(8), Article 1565. <https://doi.org/10.3390/pr12081565>

[15] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A. (2026). A Comprehensive Strategy for Safe and Efficient Mining of Thick, Spontaneous Combustion-prone Coal Seams under Geodynamic Hazard Conditions. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 39(4), 818-827. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.01>

[16] Sidorenko A., Ivanov V.V., Sidorenko S.A. (2020). Computer modeling of rock mass stress condition for mining planning on overworked seam. *Journal of Physics: Conference Series*, 1661(1), Article 012082. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012082>

[17] Savelyev D.S., Sidorenko S.A. (2017). Effects of competitive martial arts on first-year students' psychophysiological potential. *Teoriya i Praktika Fizicheskoy Kultury*, 2017-January(5), 43-45.

[18] Sidorenko S.A., Ivanov V.V. (2017). Improving the efficiency underground mining of coal beds in difficult mining and geological conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(3), 882-888.

[19] Golovina E.I., Karennik K. (2021). Modern trends in the field of solving transboundary problems in groundwater extraction. *Resources*, 10(10), Article 107. <https://doi.org/10.3390/resources10100107>

[20] Golovina E.I., Pasternak S., Tsiglianu P., Tselishev N. (2021). Sustainable management of transboundary groundwater resources: Past and future. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21), Article 12102. <https://doi.org/10.3390/su132112102>

[21] Shao M., Xia Y., Xu H., Huiying Xu 许., Tian Y., Fetisov V., Yang Z., Yang Z. Q. Understanding the phase behavior during CO2 flooding by dissipative particle dynamics // *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 409. p. 125514. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125514>

[22] Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of Red-Mud Particle-Solid Distribution in the Feeder Cup of a Thickener Using the Combined CFD-DPM Approach. *Symmetry* 2022, 14, 2314. <https://doi.org/10.3390/sym14112314>

[23] Fedorova E.R., Pupysheva E.A., Morgunov V.V. Settling Parameters Determined During Thickening and Washing of Red Muds. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 4. pp. 77-85.

[24] Semenova T., Martínez Santoyo, J.Y. Economic Strategy for Developing the Oil Industry in Mexico by Incorporating Environmental Factors. *Sustainability* 2024, 16, 36. <https://doi.org/10.3390/su16010036>

[25] Semenova T., Al-Dirawi A., Al-Saadi T. Environmental Challenges for Fragile Economies: Adaptation Opportunities on the Examples of the Arctic and Iraq. *Agronomy* 2022, 12, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092021>

[26] Semenova T. Value Improving Practices in Production of Hydrocarbon Resources in the Arctic Regions. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 187. <https://doi.org/10.3390/jmse10020187>

[27] Rastvorova I.I., Filatov V.M., Vilkov S.A. Reduction of Optical Density in Highly Viscous Oils through Ultrasonic Treatment within The Infrared Wavelength Range. *International Journal of Engineering*,

- Transactions B: Applications. 2026;39(8):1865-1877. doi: 10.5829/ije.2026.39.08b.08
- [28] Filatov V.M., Rastvorova I.I., Zhurba E.D. Review of radio-electronic wave techniques and devices for oil diagnostics and monitoring. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2025;336(12):164–181. (In Russ.) doi: 10.18799/24131830/2025/12/4945
- [29] Rastvorova I., & Trufanov S. Data transmission technologies for the development of a drilling rig control and diagnostic system. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2025, 15(6): 5506-5514. doi:http://doi.org/10.11591/ijece.v15i6.pp5506-5514
- [30] Rastvorova I.I., Dvoynikov V.M. Analysis of Mathematical Models for Developing a Methodology to Measure Energy and Spatial Characteristics of Axial Impact During Well Drilling. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2025, 20:130-137. DOI: 10.37394/232011.2025.20.15
- [31] Shchirova E., Tsvetkova A., Komendantova N. Analysis of the possibility of implementing carbon dioxide sequestration projects in Russia based on foreign experience. 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021. Albena. 2021. Vol. 21, Issue 7.2. pp. 203-210. DOI: 10.5593/sgem2021/5.1/s20.004
- [32] Marinina O., Parfenova A., Tsvetkova A., Komendantova N. Assortment strategy as a driver of fuel and energy complex competitiveness. 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021. Albena. 2021. Vol. 21, Issue 7.2. pp. 503-510. DOI: 10.5593/sgem2021/5.1/s21.080