

## Управление температурным режимом при хранении сырья в процессе производства биодизельного топлива

А.М. ЕРЕМЕЕВА<sup>1</sup> ✉, Ю.В. ИЛЮШИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Экономический факультет, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия; ilyushin\_yuv@pers.spmi.ru

✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** 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>.

**Аннотация.** Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.3390/inventions10010007. В современных условиях растущего потребительского рынка экологически чистых производств остро стоит вопрос оптимизации ресурсоемких и энергоемких технологических цепочек. Одним из самых затратных этапов является хранение зерна — сырья для производства биодизеля. Это связано с отсутствием единой системы температурного контроля. В данной работе авторы разработали математическую модель и программно-аппаратный комплекс, позволяющий измерять температурное поле в зернохранилищах. Для решения поставленной задачи авторы использовали методологии, заимствованные из пространственных распределенных систем, для построения математической модели. Затем была проведена разработка технического устройства и реализация программного модуля для обработки измеренных данных на языке C++ Builder.

**Ключевые слова:** биодизель; камера хранения; зерно; температурное поле; моделирование

## Temperature Control During Storage of Raw Materials in the Process of Biodiesel Fuel Production

Anzhelika M. EREMEEVA<sup>1</sup> ✉ and Yury V. ILYUSHIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geoecology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Faculty of Economics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia; ilyushin\_yuv@pers.spmi.ru

✉ eremeevaanzhelika@yandex.ru

**Abstract.** In the modern conditions of the growing consumer market for environmentally friendly industries, the issue of optimizing resource-intensive and energy-intensive technological chains is acute. One of the most expensive stages is the storage of grain—raw materials for the production of biodiesel. This is due to there being no unified temperature control system. In this paper, the authors have developed a mathematical model and a hardware–software complex that allows for the measurement of the temperature field in grain storage areas. To address this challenge, the authors employed methodologies derived from spatial distributed systems to construct a mathematical model. The development of a technical device and the implementation of a software module for processing the measured data in C++ Builder were then undertaken.

**Keywords:** biodiesel; storage chamber; grain; temperature field; modeling

### 1. Введение

Во всем мире одной из актуальных проблем является повышение экологической чистоты воздуха и снижение концентрации вредных выбросов в атмосфере до минимальных значений. Наибольшее влияние на здоровье человека и природу оказывают угарный газ, оксиды азота и пары углеводородов, входящие в состав выхлопных газов [1, 2]. Также не стоит забывать о проблеме парниковых газов [3, 4]; во всем мире разрабатываются программы по декарбонизации и сокращению CO<sub>2</sub> до минимума [5–7].

Еще одной общей проблемой для многих стран является нехватка нефтяных ресурсов для производства топлива. В связи с нехваткой запасов нефти и средним уровнем ее переработки на

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

уровне 85 % [8, 9], возникает необходимость создания технологий для производства альтернативных источников энергии [10–12].

К наиболее распространенным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относятся водородная энергетика [13–15], ветровая энергетика [16], солнечная энергия [17], гидроэнергетика и другие. Несмотря на то, что частичное использование возобновляемых источников энергии эффективно влияет на энергетический баланс страны, все больше автомобилей оснащаются двигателями внутреннего сгорания, которые производят загрязняющие вещества. Полный отказ от автомобилей с двигателями внутреннего сгорания приведет к остановке многих производств, поэтому такой вариант невозможен.

За последние 15 лет производство биотоплива в мире увеличилось более чем в 20 раз, и его текущий объем превысил 70 млн тонн в год, что составляет около 1 % от общего потребления нефти. Рост производства биотоплива, такого как этанол и биодизель, обусловлен растущим спросом на экологически чистое топливо, стремлением снизить зависимость от ископаемых видов топлива, а также государственной поддержкой в виде субсидий и налоговых льгот. По прогнозам Международной энергетической организации (МЭА), к 2035 году потребление биотоплива в мире достигнет 150 млн тонн в год [18].

В структуре жидкого биотоплива 74 % приходится на биоэтанол, 22 % — на биодизель и 4 % — на «зеленое» дизельное топливо. Лидером по потреблению этих видов топлива являются США (46 %), за ними следует Бразилия (24 %); Европа и остальной мир потребляют по 15 % [19]. Географическое распределение стран-лидеров в исследованиях биодизеля представлено на рисунке 1. Чем насыщеннее синий цвет на рисунке 1, тем больше издано публикаций по данной теме в стране.

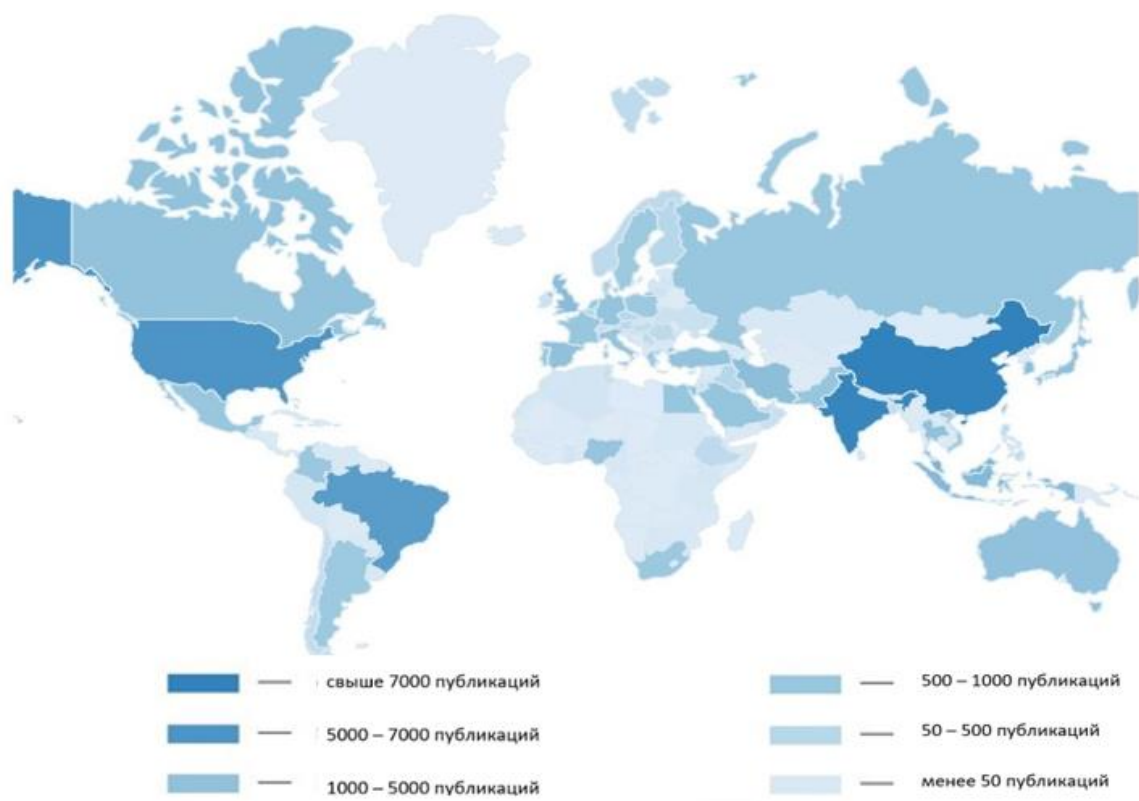


Рис. 1. Географическое распределение стран-лидеров в исследованиях по биодизелю (данные актуальны на 24 декабря 2024 года)

Большая часть транспортного сектора в этих странах состоит из техники, оснащенной дизельными двигателями [20]. Биодизель не наносит вреда растениям и животным при попадании в воду. Кроме того, он подвергается практически полному биологическому разложению: в почве или в воде микроорганизмы перерабатывают 99 % биодизеля за 28 дней, сводя к минимуму загрязнение рек и озер [21].

Вопросами изучения процессов производства и модернизации биодизеля активно занимаются с 2006 года [22, 23], но количество исследований и публикаций с их результатами постоянно растет; в 2022 году было опубликовано наибольшее количество научных статей по технологии производства биодизеля (Рисунок 2).

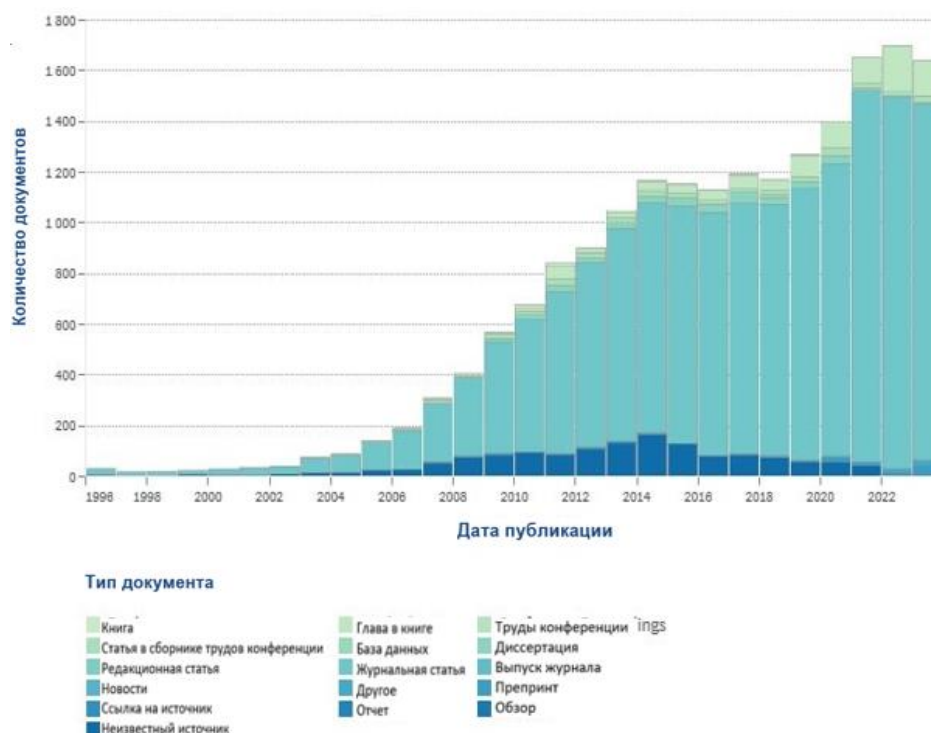


Рис. 2. Динамика изменения количества научных публикаций, связанных с производством биодизеля

За последние 5 лет наибольший интерес мирового научного сообщества в области альтернативных видов топлива представляло изучение биомассы и топлива [24–26], а также изучение масел [27], зерна и процессов хранения зерна. Анализ ключевых слов и названий публикаций показал, что использование слов «биомасса», «топливо», «биотехнология», «масло», «зерно», «растения», «процесс хранения» в большинстве случаев происходит в сочетании со словом «будущее», что позволяет оценить перспективы рассматриваемых процессов и технологий применительно к отраслям промышленности всего мира (Рисунок 3).

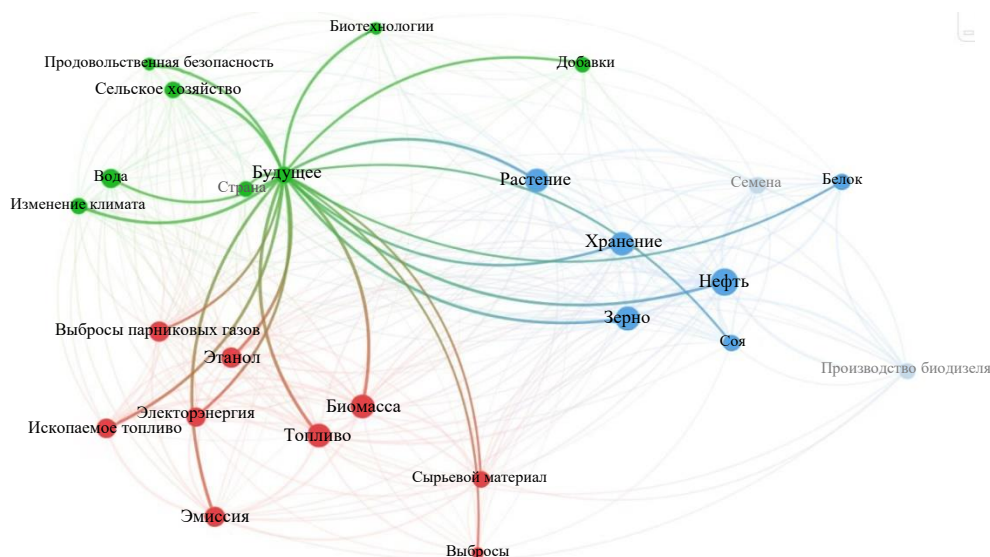


Рис. 3. Графическое представление связей ключевых слов, созданное с помощью программы WOSviewer версии 1.6.20

Для производства биодизеля в больших количествах необходим дополнительный ряд процессов [28]. Технологическая цепочка производства биодизеля состоит из следующих этапов: сбор, хранение и подготовка сырья, переработка сырья в растительное масло, переработка масла в биотопливо и очистка товарного биотоплива. Чаще всего в качестве сырья используются семена различных масличных культур (вид культуры зависит от страны и климатических условий) [29–31].

На самом первом этапе производства биодизеля, а именно при получении и хранении сырья, существует высокая вероятность порчи партии сырья при несоблюдении необходимых условий хранения. При нагревании хранящейся продукции есть риск вытекания масла из семян, что приводит к образованию корки и препятствует дальнейшему использованию партии [32]. Оптимальный допустимый интервал температуры хранения семян составляет 10–15 °С.

## 2. Существующее техническое решение

Большинство исследований, связанных с хранением зерновых культур в силосах, направлено на решение проблемы регулирования температуры на основе данных, полученных от центра и стен металлической конструкции силоса.

Чтобы компенсировать сезонные колебания и колебаний цен рекомендуется использовать как можно большее количество бункеров для хранения семян, чтобы масличные культуры можно было хранить месяцами и использовать в процессе, не завися от поставок. В большинстве существующих работ описывается использование плоских или высоких складских ячеек, а также крытых и открытых силосов. Семена охлаждают более холодным ночным воздухом или охладительным агрегатом.

Семенной бункер — это контейнер, который должен быть сконструирован таким образом, чтобы он мог хранить сырье в течение всего производственного дня и непрерывно снабжать прессы — следующий шаг в процессе переработки зерна в биодизельное топливо. В этом контейнере возможен умеренный предварительный нагрев до температуры окружающей среды, который может быть осуществлен с использованием низкотемпературного сбросного тепла [33–35]. Предварительный нагрев также имеет преимущество, поскольку водяной пар, образующийся в прессах, не конденсируется на холодных семенах, а может быть отведен [36].

Многие ученые занимались исследованиями в области температурного контроля и систем охлаждения [37, 38].

В современном сельском хозяйстве обеспечение оптимальных условий хранения зерна имеет решающее значение для поддержания качества и минимизации потерь, что привело к широкому внедрению сложных систем контроля температуры в крупных зернохранилищах. Эти системы предназначены для постоянного мониторинга колебаний температуры в различных местах зерновой массы. Такие исследователи, как Каландаров и Абдуллаев, провели комплексные исследования, изучающие взаимодействие между температурой и влажностью в зернохранилищах. Их исследование подчеркивает необходимость комплексного подхода, который анализирует как температуру, так и уровень влажности в нескольких точках хранилища [39]. Эти знания имеют решающее значение для оптимизации методов хранения. Основываясь на этих исследованиях, операторы и диспетчеры используют системы вентиляции и циркуляции воздуха для поддержания стабильной температуры внутри хранящегося зерна. Это гарантирует, что зерно остается при безопасной температуре и предотвращает порчу или деградацию.

В статье [40] представлен анализ результатов мониторинга температурного режима хранения зерна с использованием измерительной системы термогигрометров (логгеров). Измерительные системы представлены в виде подвесок, расположенных вертикально и горизонтально, но в ограниченном количестве. Представлено распределение температуры в силосах на трех уровнях по вертикали (верхнем, среднем и нижнем), распределение температур по горизонтали (на разных расстояниях от стенки силоса до 75 см). Термогигрометры были размещены неравномерно внутри силоса, поэтому моделирование проводилось на основе выборочных значений. В статье тех же авторов [41, 42], рассматривается влияние тепло- и влагопроводности на изменение влажностного режима в силосе. Необходимо, чтобы параметры хранения зерна в зернохранилищах соответствовали стандартным системам классификации, разработанным Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ПСО). Результаты, полученные для годового цикла, свидетельствуют о циклическом изменении относительной влажности межзернового

пространства и увеличении относительной влажности в летне-осенний период (с мая по ноябрь) выше оптимального значения, рекомендуемого для длительного хранения. Решением проблемы высокого риска увлажнения зерна является периодическое перемещение зерна из одного силоса в другой, однако при перемещении условия хранения зерна меняются, и физико-химические свойства могут измениться.

В работе авторов Латышенок Н., Шемякин А.В., Слободскова А., Гаспарян С., Цымбал А.А., Мусаев Ф. [43] предлагается использовать для хранения зерна дополнительные герметичные контейнеры, в каждом из которых предварительно устанавливаются регистраторы влажности и температуры модели DT-171, закрепленные на специальных опорах. Во время сезонного хранения зерна из-за разной температуры воздуха в слоях зерновой массы, находящейся в закрытом контейнере без тепловой защиты, происходит процесс отпотевания зерна, что негативно сказывается на сохранности зернового продукта. Как показано в литературе, определение температурных показателей при хранении зерновых культур проводится по различным методикам (работы И. Кечкина, В. Ермолаева и др. [44]). Тем не менее, независимо от используемого метода исследования, точность полученных результатов остается предметом постоянных споров.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что с точки зрения технологии и анализа тепловых полей использование технологических процессов для получения биодизельного топлива отработано достаточно хорошо. Однако в ходе анализа выяснилось, что на разных этапах технологического процесса основной проблемой является механическое перемещение зерна. Это приводит к колебаниям температуры. Эти изменения, как было показано выше, оказывают значительное влияние на концентрацию смол в зерне. Не существует систем, способных отслеживать и контролировать температурное поле в помещениях во время движения. В некоторых работах указывается, что из-за отсутствия решения этой проблемы используется технология «выравнивания температуры». Но это не может быть осуществлено для производств, расположенных в местах, где годовой перепад температур составляет более 20 градусов. Таким образом, авторы ставят перед собой задачу повышения содержания масла в зерне путем создания единой системы мониторинга, обеспечивающей фиксацию температуры с учетом пространственного распределения объекта исследования.

### 3. Материалы и методы

Функциональными требованиями к программному продукту, который может отображать температурные данные, являются точность значения температуры (программа должна отображать точное значение температуры для каждого датчика в режиме реального времени), а также создание 3D-модели (программа должна предоставлять 3D-модель объекта, на котором установлены датчики, с цветовым кодированием температуры для визуализации температурного поля). Материал представлен в Дополнительных материалах)

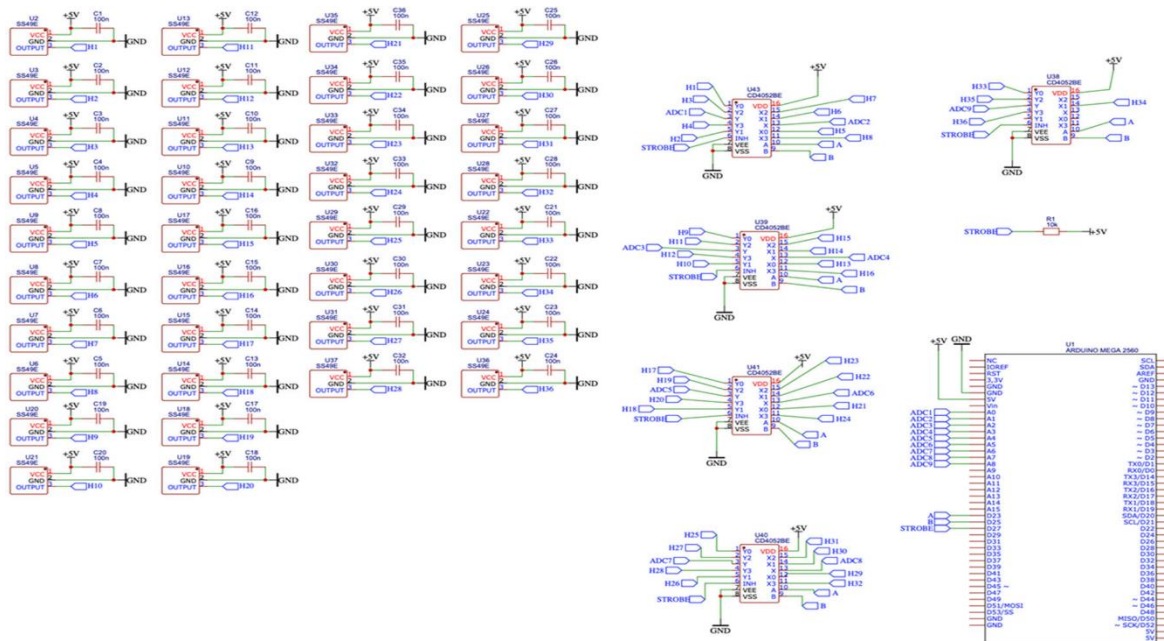
При обосновании выбора способов достижения поставленной цели необходимо учитывать следующие параметры:

1. Текстолитовая плита обладает низкой теплопроводностью, что делает ее идеальным материалом для моделирования температурного поля силоса. В отличие от металла, который быстро передает тепло, текстолит сохраняет его, имитируя реальные условия в хранилище. Кроме того, текстолит легко обрабатывается, что позволяет создать модель нужной формы и размера. На текстолитовой плите также можно разместить датчики температуры и сформировать схемы чтобы более точно моделировать системы вентиляции силоса. Благодаря этим преимуществам текстолитовая плита является оптимальным решением для моделирования температурного поля силоса. Размеры текстолитовой плиты составляют 20 на 30 см.

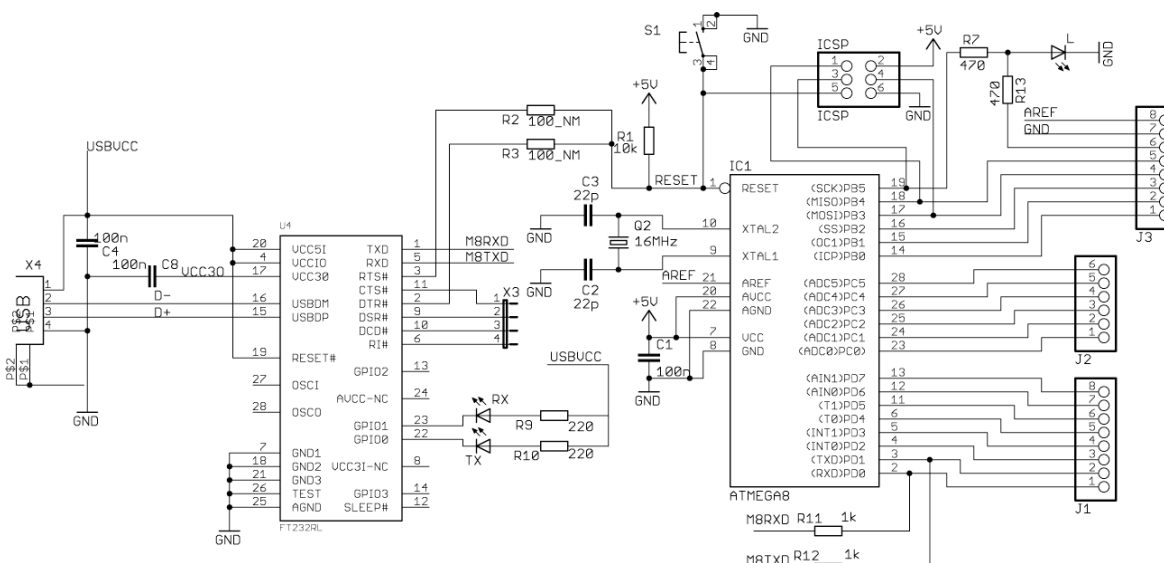
2. Arduino Uno — популярная платформа для разработки микроконтроллерных устройств, основанная на микроконтроллере ATmega328. Она предоставляет простой и доступный способ создания собственных электронных проектов как для начинающих, так и для опытных разработчиков. Платформа имеет 14 цифровых входов/выходов (6 из которых могут быть использованы как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, разъем питания, разъем ICSP, и кнопка сброса. Для работы достаточно подключить платформу к компьютеру через USB-кабель или подать питание с помощью адаптера AC/DC или батареи.

Питание Arduino Uno может осуществляться через USB-разъем или от внешнего источника питания. На рисунке 4а,б представлена **принципиальная** схема подключения, где показано, как

Arduino Uno автоматически выбирает источник питания с более высоким напряжением. На плате также есть предохранитель, **который защищает** от перегрузки по току. Регулятор напряжения понижает напряжение внешнего источника питания до 5 В, что необходимо для работы микроконтроллера.



(a)



(б)

Рис. 4. (а) Электронная схема измерительного устройства; (б) электронная схема разработанного устройства

Для питания Arduino Uno от внешнего источника необходимо напряжение 7–12 В и ток не менее 50 мА. При выборе внешнего источника питания важно убедиться, что он обеспечивает достаточный ток для стабильной работы устройства, особенно при использовании энергоёмких компонентов.

Важно помнить, что неправильное подключение внешнего источника питания может повредить Arduino Uno. При подключении следует соблюдать полярность и избегать короткого замыкания.

3. Embarcadero RAD Studio A7 — это полноценная система разработки кроссплатформенных приложений для iOS, Android, Mac и Windows, а также мобильных гаджетов, таких как смартфоны и планшеты.

RAD Studio XE7 позволяет создавать различные типы приложений, включая мобильные, настольные, веб-приложения и приложения баз данных, на основе единого исходного кода. Это обеспечивает высокую скорость разработки, высокую производительность и широкий спектр языков программирования, включая Delphi и C++.

Основные преимущества RAD Studio XE7 включают в себя визуальный редактор, широкую библиотеку компонентов, поддержку drag-and-drop, интеграцию с различными технологиями, такими как базы данных, веб-сервисы и облачные платформы.

Благодаря своим возможностям Embarcadero RAD Studio XE7 является мощным инструментом для разработки современных приложений, которые могут работать на различных платформах.

Embarcadero RAD Studio дает возможность разработать производительное компилированное нативное программное обеспечение, способное функционировать на любых устройствах, имеющих высокий уровень взаимодействия с пользователями. Embarcadero RAD Studio XE7 позволяет программистам расширить свои проекты, ориентированные на Windows, до мобильных приложений, функционирующих с сервисами BaaS и данными предприятия.

Благодаря использованию языка программирования Delphi / C++ Builder программные продукты имеют возможность получить высокий уровень отладки, поскольку интегрированный отладчик Delphi / C++ Builder включает в себя большое количество полезных для разработчика и его программного продукта свойств.

Также язык программирования Delphi / C++ Builder оснащен самым скоростным в мире компилятором, который дает возможность за небольшой отрезок времени перевести программный продукт в машинный код, который сможет функционировать на любом техническом средстве.

Delphi / C++ Builder имеет большое преимущество, благодаря возможности визуального создания интерфейса программных продуктов. Это значительным образом упрощает процесс разработки приложений. Также разработчики имеют возможность самостоятельно формировать объекты для программ, что является большим плюсом в разработке уникальных приложений.

4. Для моделирования камеры хранения была использована текстолитовая плата, на которую был нанесен рисунок (рисунок 5). Рисунок 5 представляет собой схему модели камеры хранения, выполненную на текстолитовой плате. На ней изображен план камеры с размещением тепловых датчиков. Далее был осуществлен процесс пайки клеммников, к которым подключались тепловые датчики. Расположение датчиков, снимающих показания температуры, изображено на схеме установки на рисунке 5.

Сформированный макет был подключен к микроконтроллеру Arduino UNO. Передача данных с Arduino на компьютер осуществлялась при помощи COM-порта (последовательного порта), который работает по стандарту RS-232C. COM-порт получил свое название «последовательный», так как данные передаются по нему последовательно, бит за битом, в отличие от параллельного порта, который передает все биты байта одновременно. RS-232C — это стандарт последовательной связи, который устанавливает скорость передачи данных, а также минимальное время, необходимое для передачи одного байта. Это отличие от других «последовательных» технологий, которые могут не иметь таких строгих временных требований.

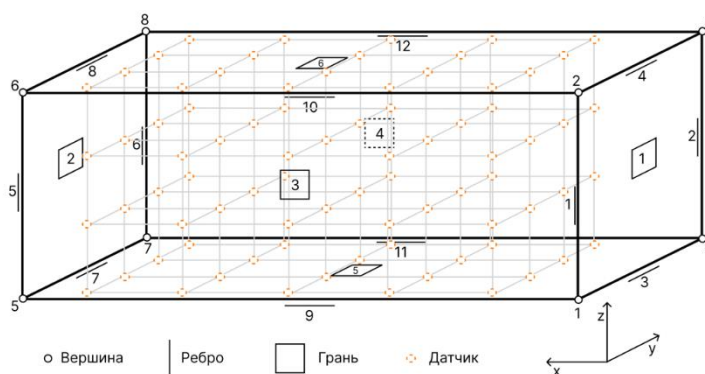


Рис. 5. Схема установки датчика

5. Модуль Plot 3D — это часть набора компонентов SDL, предоставляет мощное решение для 3D-графики для визуализации данных с тепловых датчиков. Компонент Delphi/C++Builder позволяет создавать полностью настраиваемые 3D-графики, обеспечивая сложную визуализацию данных в приложении. Каждая строка в таблице данных представлена маркером, положение которого зависит от его значений в столбцах, установленных на осях X, Y и Z.

Модуль Plot 3D является ценным инструментом для эффективной визуализации данных о температуре, позволяя проводить динамическое исследование и анализ распределения и характеристик данных в модели камеры хранения.

#### 4. Результаты и обсуждение

Чтобы определить, была ли превышена температура в камере хранения, необходимо смоделировать камеру, определить местоположение датчиков, выбрать тип датчиков, снять показания и создать интерфейс для вывода данных, полученных от датчиков.

##### 4.1. Моделирование температурного поля

Программный продукт был разработан в среде Embarcadero Rad Studio A7 на языке программирования Delphi/C++ Builder. Интерфейс был разработан в программной среде с использованием компонента Plots 3D. На рисунке 6 изображен интерфейс программы в режиме работы.

При корректном подключении программа запускает 3D модель и начинает работу с Arduino, который, опрашивает тепловые датчики «ds18b20», обрабатывает полученную информацию и отправляет ее через COM-порт в программу для дальнейшей работы с ней.

Также в функционале предусмотрен модуль, на котором расположен «линейный регулятор», который предназначен для задания необходимого масштаба отображения 3D-модели в программе. На рисунке 7 изображена функционирующая программа.

Разработанная 3D модель температурного поля дает возможность наглядно увидеть повышение или понижение температуры в камере хранения зерна.

Модуль «Датчики» показывает все датчики и температуру каждого из них. Также в форме есть панель с настройками, где пользователь может установить вручную верхний предел нормы температуры. Программой предусмотрено установление верхнего предела температурного поля и три выпадающих окна, где пользователь может установить цвет для нормального и верхнего пределов температуры датчиков.

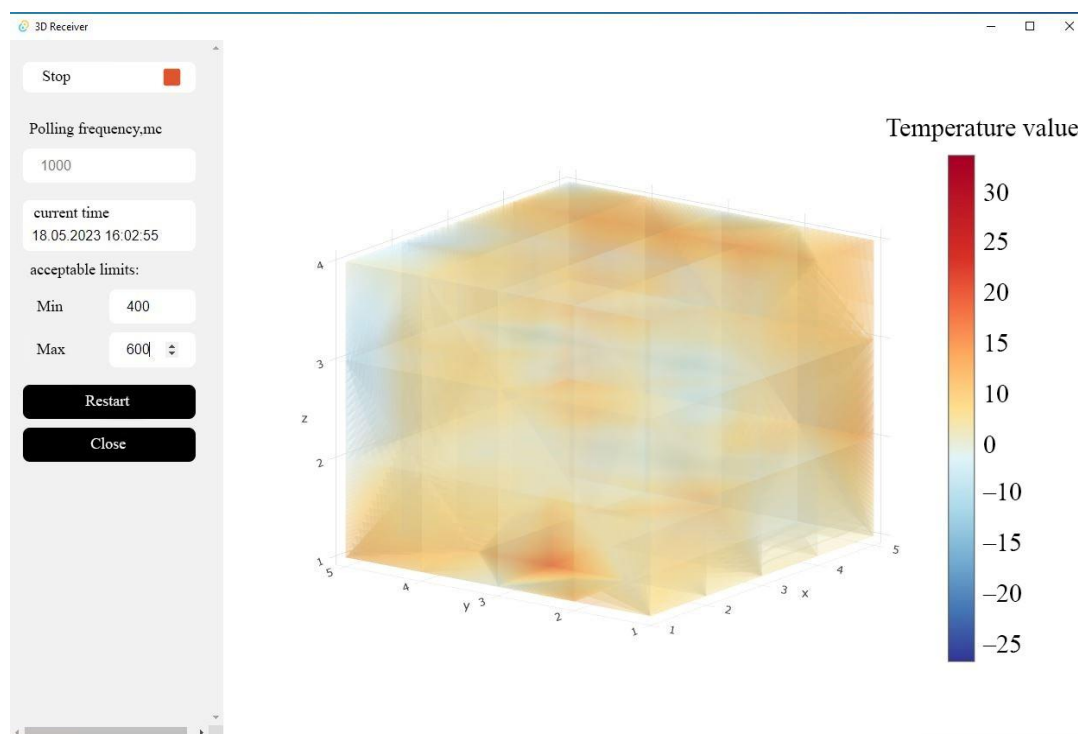


Рис. 6. Программа в процессе разработки

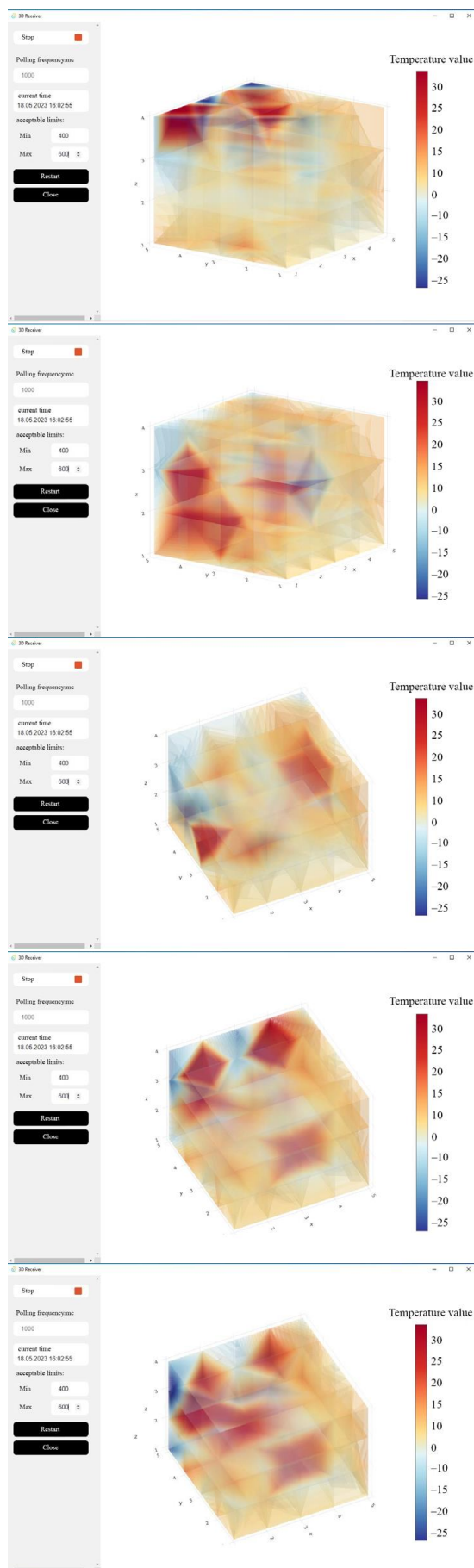


Рис. 7. Выполнение программы в различных режимах

На рисунке 8 изображено выделение превышающих норму показателей температуры на датчиках № 1–4 из первых 15 датчиков.

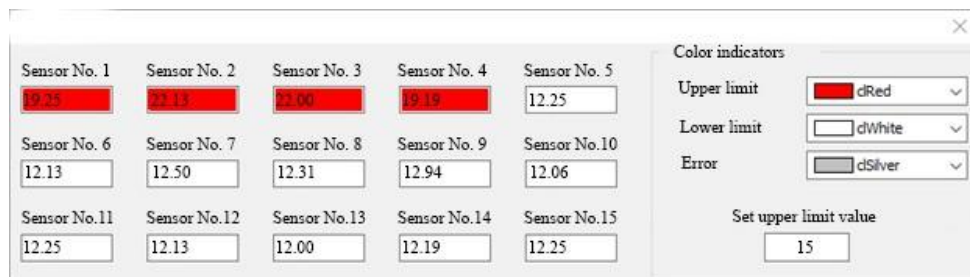


Рис. 8. Превышение температуры на датчиках 1–15

При нормальной температуре датчики отображают данные корректно, показывая реальные числа, не выделяя их каким-либо цветом. На рисунке 9 изображены данные в программе при нормальной температуре.

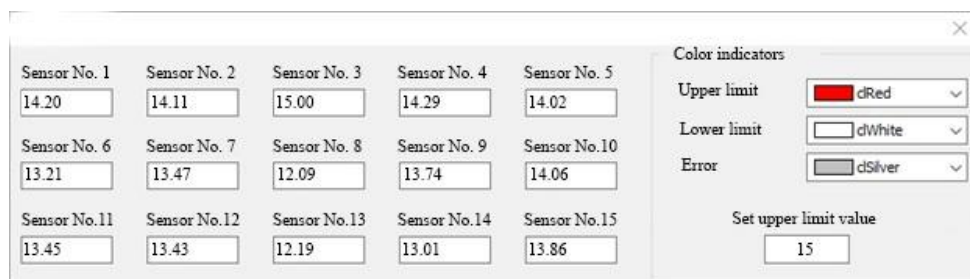


Рис. 9. Работа датчиков при нормальной температуре

Кроме этого, есть возможность включения и выключения отображения сетки на самой модели, а также смены ее цвета при необходимости.

#### 4.1. Разработка программного продукта

В системе мониторинга основными источниками информации являются датчики, которые предоставляют мгновенные показания о текущем состоянии тепловых полей. Для опроса датчиков и интервальной передачи данных в Serial порт была написана следующая программа [45]:

```
void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    char in_data = Serial.read();
    if(in_data == '<'){
      for (int i = 0; i <= 15; i++){
        digitalWrite(S0,bitRead(i, 0));
        digitalWrite(S1,bitRead(i, 1));
        digitalWrite(S2,bitRead(i, 2));
        digitalWrite(S3,bitRead(i, 3));
      }
    }
  }
  delay(50);
  Data = Data
  + analogRead(SIG_A0) + ""
  + analogRead(SIG_A1) + ""
  + analogRead(SIG_A2) + ""
  + analogRead(SIG_A3) + ""
  + analogRead(SIG_A4) + ""
  + analogRead(SIG_A5) + " ";
  Serial.println(Data);
  Data = "";
}
}
```

При выводе информации необходимо предусмотреть предупредительную и аварийную сигнализацию по двум границам нарушений, а также сигнализацию обрыва датчика и сигнализацию выхода за границы достоверности.

Для цифровой обработки информации, датчики предварительно оцифровывают значения температуры и передают данные в цифровом формате по стандартному интерфейсу. Цифровые интегральные датчики можно классифицировать по выходному интерфейсу.

Для решения проблемы превышения значений был написан алгоритм обнаружения показаний, величина которых выходит за пределы допустимости:

```
export const outOfBorders = (
  str: string,
  min: number,
  max: number
): { min: number[]; max: number[] } => {
  const arr = arrTo3DArray(strToArr(str));
  const res: { min: number[]; max: number[] } = { min: [], max: [] };
  for (let x = 0; x < arr.length; x++) {
    for (let y = 0; y < arr[x].length; y++) {
      for (let z = 0; z < arr[x][y].length; z++) {
        if (arr[x][y][z] < min) {
          res.min.push(arr[x][y][z]);
        } else if (arr[x][y][z] > max) {
          res.max.push(arr[x][y][z]);
        }
      }
    }
  }
  return res;
};
```

#### Распознавание ошибок в программе

Распознавание ошибок в приложении важно по многим причинам. Своевременное обнаружение ошибок в первую очередь ведет к обеспечению функциональности приложения. Ошибки могут помешать приложению функционировать так, как задумано. Обнаруживая и устраняя ошибки, можно гарантировать, что приложение работает правильно и обеспечивает ожидаемые результаты.

В разработанной системе можно обнаружить ошибки датчиков. Аномально большие скачки показаний можно расценивать как сбой в работе датчиков. Для достижения поставленной цели был написан алгоритм распознавания таких ошибок:

Для начала необходимо обозначить, что все показания с датчиков приходят строкой. Данная строка состоит из показаний 100 датчиков в момент времени. Для удобной работы с показаниями понадобится привести данную строку в трехмерный массив, отражающий координаты расположения датчиков в пространстве.

Ввиду данной сложности алгоритма, рассмотрим только часть, включающую в себя обработку датчика, имеющего соседей со всех возможных сторон:

```
export const detectErrorCoords = (arr: number[][][], diff: number) => {
  const errorCoordsArr = [];
  for (let x = 0; x < arr.length; x++) {
    for (let y = 0; y < arr[x].length; y++) {
      for (let z = 0; z < arr[x][y].length; z++) {
        if (
          Math.abs(
            arr[x][y][z] - (arr[x + 1] ? arr[x + 1][y][z]: arr[x][y][z])
          ) > diff &&
          Math.abs(
            arr[x][y][z] - (arr[x - 1] ? arr[x - 1][y][z]: arr[x][y][z])
          ) > diff &&
        )
```

```

Math.abs(
  arr[x][y][z] - (arr[x][y + 1] ? arr[x][y + 1][z]: arr[x][y][z])
) > diff &&
Math.abs(
  arr[x][y][z] - (arr[x][y - 1] ? arr[x][y - 1][z]: arr[x][y][z])
) > diff &&
Math.abs(
  arr[x][y][z] - (arr[x][y][z + 1] ? arr[x][y][z + 1]: arr[x][y][z])
) > diff &&
Math.abs(
  arr[x][y][z] - (arr[x][y][z - 1] ? arr[x][y][z - 1]: arr[x][y][z])
) > diff
) {
  errorCoordsArr.push([x, y, z]);
}}}}

```

Для увеличения достоверности можно рассматривать и более чем один соседний датчик с каждой стороны, но данный подход может оказаться избыточным, так как вероятность выхода из строя сразу нескольких соседних датчиков ниже, а также вычислительные расходы на такую задачу выше.

Сетевые программные средства, объединяющие подсистемы мониторинга и архивирования данных, обеспечивают загрузку и управление запуском задач, а также обмен между задачами и хранилищами данных. Система мониторинга имеет возможность оперативного конфигурирования прикладного программного обеспечения в процессе работы. Все ошибки диагностируются и сопровождаются сообщениями, не вызывая нарушений в работе.

## 5. Выводы

В результате проведенных исследований были разработаны математические и компьютерные модели этапа предварительного хранения зерна в крупных агрегатах, основной задачей которых является сохранение зерна в надлежащем качестве.

1. Разработана математическая модель химико-технологического процесса хранения зерна в зерновом силосе, причем модель описывает влияние температуры в силосе на качество зерна.

2. Разработана аппаратура для отслеживания температурного поля хранящегося зерна. В рассматриваемом устройстве используется пятнадцать температурных датчиков, которые тщательно размещены на печатной плате (ПП). Данные с этих датчиков собираются микроконтроллером Arduino Uno и передаются в программное приложение. Эта система мониторинга очень ценна для оптимизации условий хранения в зернохранилищах. Раннее обнаружение колебаний температуры поможет предотвратить порчу, сохранить качество и увеличить урожайность. Кроме того, анализ данных, полученных с помощью этого устройства, позволит лучше понять процесс хранения и повысить его эффективность. В устройстве используются интеллектуальные датчики, позволяющие собирать измерительную информацию и передавать ее на сервер. Благодаря использованию облачной среды система позволяет синхронизировать данные измерений, полученные из любой точки мира, что будет полезно для крупных сельскохозяйственных хозяйств.

3. Для разработки распределенной системы использовалось специализированное программное обеспечение, работающее в среде многозадачной операционной системы реального времени. Характеристики программного обеспечения соответствуют требованиям, предъявляемым к функциям. Усовершенствование программного обеспечения возможно за счет внедрения новых модулей, установки дополнительных датчиков и наращивания функциональности. Программный продукт позволит наиболее эффективно использовать камеры хранения зерна с целью экономии ресурсов и повышения производительности.

Таким образом, авторами решен широкий круг задач, связанных с повышением экономической эффективности процесса хранения сырья, предназначенного для производства биотоплива.

## 6. Патенты

Программа для моделирования системы управления температурным полем печи непрерывного действия для нагрева сортового металлопроката. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662608. Дата регистрации: 6 сентября 2023 г., бюллетень № 6.

**Дополнительные материалы:** вспомогательную информацию можно загрузить по адресу: [www.mdpi.com/10.3390/inventions10010007/s1](http://www.mdpi.com/10.3390/inventions10010007/s1).

**Вклад авторов:** концептуализация, Ю.В.И. и А.М.Е.; методология, Ю.В.И.; программное обеспечение, Ю.В.И.; формальный анализ, А.М.Е.; обработка данных, А.М.Е.; написание — подготовка первоначального проекта, А.М.Е.; написание — рецензирование и редактирование, А.М.Е. и Ю.В.И.; визуализация, Ю.В.И. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Заявление о доступности данных:** оригинальные материалы, представленные в данном исследовании, включены в Дополнительные материалы. Дополнительные вопросы могут быть направлены соответствующему автору.

**Конфликты интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hwang, H.; Choi, S.R.; Lee, J.Y. Evaluation of roadside air quality using deep learning models after the application of the diesel vehicle policy (Euro 6). *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 20769. [CrossRef] [PubMed]
- Kim, G.Y.; Jung, I.; Park, M.; Park, K.; Lee, S.H.; Kim, W.H. Diesel exhaust particles induce human umbilical vein endothelial cells apoptosis by accumulation of autophagosomes and caspase-8 activation. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 16492. [CrossRef]
- Двойников М.В., Леушева Е.Л. Современные тенденции освоения углеводородных ресурсов. *ЗГИ.* **2022**, *258*, 879–880. Available online: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16101> (accessed on 24 December 2024).
- Tsvetkov, P.; Samuseva, P. Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions. *J. Clean. Prod.* **2024**, *434*, 139638. [CrossRef]
- Скобелев Д.О., Череповицына А.А., Гусева Т.В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат. *ЗГИ.* **2023**, *259*, 125–140. [CrossRef]
- Ahmad, K.; Younas, Z.I.; Manzoor, W.; Safdar, N. Greenhouse gas emissions and corporate social responsibility in USA: A comprehensive study using dynamic panel model. *Heliyon* **2023**, *9*, e13979. [CrossRef] [PubMed]
- Khorasani, M.; Sarker, S.; Kabir, G.; Ali, S.M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies. *Energy* **2022**, *258*, 124805. [CrossRef]
- Brêda, G.C.; Aguiéiras, E.C.G.; Cipolatti, E.P.; Greco-Duarte, J.; de A Collaço, A.C.; Cavalcanti, E.D.C.; M de Castro, A.; Freire, D.M.G. Current approaches to use oil crops by-products for biodiesel and biolubricant production: Focus on biocatalysis. *Bioresour. Technol. Rep.* **2022**, *18*, 101030. [CrossRef]
- Long, H.; Wang, S.; Wei, W.; Zhang, G. The economic influence of oil shortage and the optimal strategic petroleum reserve in China. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 9858–9870. [CrossRef]
- Yessian, S.; Varthanan, P.A. Optimization of Performance and Emission Characteristics of Catalytic Coated IC Engine with Biodiesel Using Grey-Taguchi Method. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 2129. [CrossRef]
- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *J. Min. Inst.* **2022**, *259*, 95–111. [CrossRef]
- Stančin, H.; Mikulčić, H.; Wang, X.; Duić, N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, *128*, 109927. [CrossRef]
- Alekseenko, A.; Belenov, S.; Mauer, D.; Moguchikh, E.; Falina, I.; Bayan, J.; Pankov, I.; Alekseenko, D.; Guterman, V. Activity of Platinum-Based Cathode Electrocatalysts in Oxygen Redaction for Proton-Exchange Membrane Fuel Cells: Influence of the Ionomer Content. *Inorganics* **2024**, *12*, 23. [CrossRef]
- Belenov, S.; Mauer, D.; Moguchikh, E.; Gavrilova, A.; Nevelskaya, A.; Beskopylny, E.; Pankov, I.; Nikulin, A.; Alekseenko, A. New Approach to Synthesizing Cathode PtCo/C Catalysts for Low-Temperature Fuel Cells. *Nanomaterials* **2024**, *14*, 856. [CrossRef] [PubMed]
- Buslaev, G.; Lavrik, A.; Lavrik, A.; Tsvetkov, P. Hybrid system of hydrogen generation by water electrolysis and methane partial oxidation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2023**, *48*, 24166–24179. [CrossRef]
- Li, C.; Cao, D.-S.; Zhao, Z.-T.; Wang, X.; Xie, X.-Y. Forecast for wind power at ultra-short-term based on a composite model. *Energy Rep.* **2024**, *12*, 4076–4082. [CrossRef]
- Quansah, A.D.; Boakye, P.; Mensah, L.D.; Quansah, D.A. Systematic literature review on the potential of using solar photovoltaic to power sea water desalination on offshore petroleum facilities. *Energy Rep.* **2024**, *12*, 3843–3860. [CrossRef]
- Lee, K.; Cho, H. Comparative Analysis of Performance and Emission Characteristics of Biodiesels from Animal Fats and Vegetable Oils as Fuel for Common Rail Engines. *Energies* **2024**, *17*, 1711. [CrossRef]
- Litvinenko, V.S. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas Resources. *Resources* **2020**, *9*, 59–81. [CrossRef]

20. Soudagar, M.E.M.; Banapurmath, N.R.; Afzal, A.; Hossain, N.; Abbas, M.M.; Haniffa, M.A.C.M.; Naik, B.; Ahmed, W.; Nizamuddin, S.; Mubarak, N. Study of diesel engine characteristics by adding nanosized zinc oxide and diethyl ether additives in Mahua biodiesel–diesel fuel blend. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 15326. [CrossRef] [PubMed]
21. Hawrot-Paw, M.; Koniuszy, A.; Zaja, c, G.; Szyszlak–Bargłowicz, J. Ecotoxicity of soil contaminated with diesel fuel and biodiesel. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 16436. [CrossRef] [PubMed]
22. Degfie, T.A. Optimized Biodiesel Production from Waste Cooking Oil (WCO) using Calcium Oxide (CaO) Nano-catalyst. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 18982. [CrossRef] [PubMed]
23. Islam, S.; Basumatary, B.; Rokhum, S.L.; Mochahari, P.K.; Basumatary, S. Advancement in utilization of nanomaterials as efficient and recyclable solid catalyst for biodiesel synthesis. *Clean. Chem. Eng.* **2022**, *3*, 100043. [CrossRef]
24. Hanif, M.; Bhatti, I.A.; Zahid, M.; Shahid, M. Production of biodiesel from non-edible feedstocks using environment friendly nano-magnetic Fe/SnO catalyst. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 16705. [CrossRef] [PubMed]
25. Rudzish, E.R.; Petrova, T.A. Application prospects for nonconventional improvers for vegetation cover in reclamation areas. *Gornyi Zhurnal* **2023**, *9*, 75–82. [CrossRef]
26. Akkem, Y.; Biswas, S.K.; Varanasi, A. Smart farming using artificial intelligence: A review. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2023**, *120*, 105899. [CrossRef]
27. Szeto, W.; Leung, D.Y.C. Is hydrotreated vegetable oil a superior substitute for fossil diesel? A comprehensive review on physicochemical properties, engine performance and emissions. *Fuel* **2022**, *327*, 125065. [CrossRef]
28. Daniyan, I.; Daniyan, L.; Adeodu, A.; Ale, F. Automation and Control of a Multi-feedstock Biodiesel Production Plant. *IETE J. Res.* **2024**, *70*, 5081–5099. [CrossRef]
29. Mensah, R.Q.; Tantayotai, P.; Rattanaporn, K.; Chuetor, S.; Kirdponpattara, S.; Kchaou, M.; Show, P.-L.; Mussatto, S.I.; Sriariyanun, M. Properties and applications of green-derived products from spent coffee grounds — steps towards sustainability. *Bioresour. Technol. Rep.* **2024**, *26*, 101859. [CrossRef]
30. Кондрашева Н.К., Еремеева А.М., Нелькенбаум К.С. Разработка отечественной технологии получения высококачественного экологически чистого дизельного топлива. *ChemChemTech [Изв. высш. учеб. завед. Хим. Хим. Технол.]* **2018**, *61*, 76–82. [CrossRef]
31. Pashkevich, M.A.; Patokin, D.A. Nitrocellulose containing chemical industry waste for mineral resources complex facilities: Directions of use. *MIAB* **2023**, *9*, 215–230. [CrossRef]
32. Akowuah, J.O.; Addo, A.; Kemausuor, F. Influence of storage duration of *Jatropha curcas* seed on oil yield and free fatty acid content. *J. Agric. Biol. Sci.* **2012**, *7*, 41–45.
33. Yisa, M.G.; Fadeyibi, A.; Adisa, O.I.O.; Alabi, K.P. Finite element simulation of temperature variation in grain metal silo. *Res. Agric. Eng.* **2018**, *64*, 107–114. [CrossRef]
34. Petrova, T.A.; Epishina, A.D. Anti-corrosion protection of pipelines at mining and processing enterprises. *Obogashchenie Rud* **2023**, *6*, 9. [CrossRef]
35. Audu, J.; Alonge, A.F. Smart Grain Storage Silo. In *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*; Zhang, Q., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2023. [CrossRef]
36. Kryvenchuk, Y.; Zakharchuk, M.; Chervinska, O.; Pylypiv, O.; Shayner, H. The system of temperature and conditioning control in industrial grain storages. In Proceedings of the International Workshop of IT-professionals on Artificial Intelligence (ProFIT AI 2021), Kharkiv, Ukraine, 20–21 September 2021; 2021; pp. 106–113. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/358039927> (accessed on 24 December 2024).
37. Halwe, A.D.; Deshmukh, S.J.; Kanu, N.J.; Gupta, E.; Tale, R.B. Optimization of the novel hydrodynamic cavitation based waste cooking oil biodiesel production process parameters using integrated L9 Taguchi and RSM approach. *Mater. Today Proc.* **2021**, *47*, 5934–5941. [CrossRef]
38. Yadav, I.J.; Singh, P.; Chauhan, B.S. Numerical analysis of gas–solid hydrodynamics and heat transfer characteristics in a multi-stage fluidized bed temperature stabilizer. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2023**, *149*, 1617–1627. [CrossRef]
39. Kalandarov, P.I.; Abdullayev, K.K. Features of the technology of anaerobic processing of biotails using humidity control devices. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2022**, *1043*, 012011. [CrossRef]
40. Loose, V.; Gurieva, K.B.; Beletsky, S.L.; Kostromina, T. Temperature change of the wall layers of wheat grain during its storage in silos of elevators. *Khleboproducty* **2022**, *31*, 50–59. [CrossRef]
41. Гурьева К., Лоозе В.В., Белецкий С. Исследование распределения температурных полей зерна пшеницы при хранении в силосе элеватора по вертикальным уровням и горизонтальным слоям. *Товаровед продовольственных товаров.* **2023**, *8*. [CrossRef]
42. Pervuhin, D.A.; Trushnikov, V.E.; Abramkin, S.E.; Hloponina, V.S.; Talanov, N.A. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation. *Int. J. Eng.* **2025**, *38*, 472–487. [CrossRef]
43. Латышенко Н., Шемякин А.В., Слободскова А., Гаспарян С., Цымбал А.А., Мусаев Ф.А. Исследование температурного и влажностного режима хранения семенного зерна в герметичной металлической емкости. *Вестник РГАТУ.* **2021**, *13*, 152–158. [CrossRef]
44. Kechkin, I.; Ermolaev, V.; Belyaeva, M.; Tarakanova, V.; Gurkovskaya, E.; Buzetti, K. Processes of Heat and Mass Transfer During Grain Mass Storage in Metal Silos of Large Capacity. *KnE Life Sci.* **2021**, *6*, 206–214. [CrossRef]
45. Программа для моделирования системы управления температурным полем методической печи нагрева длинномерных металлических изделий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662608. Дата регистрации: 06/09/2023, Бюлл. №6. Доступно онлайн: <https://digital.spmi.ru/patent/frontend/web/filesize/2023662608.pdf> (accessed on 24 December 2024).