

*На правах рукописи*



**Левин Максим Юрьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ  
МОТОРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ХРАНЕНИИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Мичуринск-научоград РФ  
2021

Работа выполнена на кафедре «Транспортные средства и техносферная безопасность» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ЛГТУ)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Нагорнов Станислав Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Варнаков Дмитрий Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», кафедра «Техносферная безопасность», профессор  
**Рыков Виктор Борисович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», кафедра «Технологии и оборудование переработки продукции АПК», профессор  
**Хохлов Алексей Леонидович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», кафедра «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования», заведующий

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 30 июня 2021 года в 10 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545)3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета <http://www.mgau.ru>, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: [www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направить ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Михеев Николай Владимирович

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Несмотря на то, что качество моторного топлива, производимого в нашей стране, существенно улучшилось, число отказов мобильной сельскохозяйственной техники из года в год растет из-за использования недоброкачественных автомобильных бензинов и дизельных топлив. Этот своеобразный парадокс является следствием следующих основных совокупных причин: несовершенная технология хранения моторного топлива, отсутствие должного контроля его качества и снижение технического уровня оборудования сельских нефтескладов.

Процессы испарения, окисления и обводнения относятся к основным причинам ухудшения свойств моторного топлива при хранении. Указанные процессы обусловлены «дыханиями» резервуаров: операции приема и отпуска топлива сопровождаются большими «дыханиями», операции хранения – малыми «дыханиями». Вследствие отсутствия научно обоснованных эффективных технических средств для предотвращения качественных и количественных потерь моторного топлива полностью исключить эти потери при хранении пока не удается.

Испарение топлива приводит к экономическому ущербу и к загрязнению углеводородами окружающей среды. Несмотря на то, что снижение потерь моторного топлива является основным направлением экономии энергоресурсов и защиты окружающей среды от загрязнения углеводородами, до настоящего времени наземные горизонтальные резервуары емкостью менее 75 м<sup>3</sup>, применяемые в сельском хозяйстве, не обеспечены ни теоретической базой для расчета потерь топлива при хранении, ни техническими средствами для их предотвращения. Для нефтескладов в сельском хозяйстве отсутствуют простые, но эффективные технические средства для конденсации паров топлива и предотвращения изменения его физико-химических свойств. Отсутствует подход для количественного анализа существующих потерь современными цифровыми технологиями.

Поэтому разработка научно обоснованных путей предотвращения потерь моторного топлива и загрязнения окружающей среды при его хранении является весьма своевременной и актуальной научной проблемой, на решение которой сконцентрировано внимание ведущих отечественных и зарубежных ученых. Важное место в работе занимают вопросы теории и практики моделирования процессов хранения топлива в резервуаре с применением искусственных нейронных сетей и интеллектуализации управления устройствами сохранения качества топлива.

Исследования по теме диссертации выполнены в ФГБОУ ВО ЛГТУ в 2013-2019 гг. в соответствии с Государственной программой РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», а также «Межведомственным координационным планом фундаментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на 2011-2015 годы», по проблеме IX «Научное обеспечение машинно-технологической модернизации

сельского хозяйства Российской Федерации», задание IX.04.07 «Разработать технологии, новые материалы, приборы и оборудование для хранения и эффективного использования моторного топлива и смазочных материалов».

**Степень разработанности темы.** Развитием и исследованием процессов предотвращения потерь моторного топлива от испарения занимались отечественные и зарубежные ученые Ф.Ф. Абузова, И.П. Бударов, В.А. Бунчук, П.В. Валявский, В.Б. Галеев, М.А. Гиззатов, Б.П. Загородских, В.П. Коваленко, Н.Н. Константинов, А.А. Коршак, Р.Е. Левитин, А.Е. Ломовских, С.А. Нагорнов, В.В. Остриков, В.В. Пархоменко, В.Б. Рыков, Н.М. Фатхиев, Л.Р. Хакимьянова, Ф.М. Хафизов, А.Л. Хохлов, А.П. Уханов, В.Г. Цегельский, И.А. Чарный, В.И. Черников, R. Huntington, H. Boardman, J. Wiggins, N. Prater, N. Petru, D. Barns, R. Bielawski, W.J.V. Broadley и другие, а также организации ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБНУ ВНИИТиН, ВУНЦ ВВС ВВА и другие. Результаты проведенных исследований внесли значительный вклад в описание физической сущности испарения и выявили взаимосвязь различных параметров и степень их влияния на процесс тепломассопереноса при испарении топлива. В результате проведенных исследований и полученных практических рекомендаций потери снизились с 2% (что было характерным для XX века) до 1,5% (в начале XXI века) от объемов добычи нефти, что свидетельствует о сложности решаемой проблемы.

Совокупность теоретических и практических исследований, связанных с потерями моторного топлива при хранении в наземном горизонтальном резервуаре малой вместимости с переменной площадью испарения, не коррелируют с существующими знаниями о физическом механизме этого процесса в вертикальных резервуарах с постоянной площадью испарения. Возникают противоречия между расчетами, выполненными по используемым нормам естественной убыли моторного топлива, и фактическими значениями его потерь от испарения при хранении в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах, так как в этих нормах не учтены особенности данного класса резервуаров. Это подтверждает практическую потребность в новых знаниях о механизме испарения.

**Научная гипотеза исследования** предполагает, что снижение качественных и количественных потерь топлива от процесса испарения может быть достигнуто за счет разработки новых методов, технологических процессов, устройств, использования цифровых технологий для контроля его качества.

**Целью исследований** является повышение эффективности хранения моторного топлива за счет снижения его количественных и качественных потерь путем разработки и внедрения научно обоснованных методов и технических средств, обеспечивающих мониторинг и сохранение его эксплуатационных свойств.

#### **Задачи исследований:**

1. Провести анализ способов и средств в области предупреждения потерь моторного топлива при его хранении и определить возможность их применения для сельскохозяйственных резервуаров.

2. Теоретически обосновать физико-химические процессы, протекающие при хранении моторного топлива с учетом его испарения.

3. Обосновать теоретически и разработать метод расчёта массы топлива в фазовом переходе первого рода при получении им энергии от его окисления.

4. Разработать математическую модель потерь моторного топлива от испарения с изменяемой поверхности в стальных наземных горизонтальных резервуарах вместимостью до 75 м<sup>3</sup>.

5. Провести теоретические исследования и лабораторные испытания конденсатора блочно-модульного построения на базе вихревого эффекта для генерации холодного воздушного потока с температурой, достаточной для конденсации топлива и атмосферной влаги. Провести технико-экономическую оценку эффективности его использования.

6. Обосновать методологию формирования интеллектуальной системы автоматизации резервуарного парка сельскохозяйственных нефтескладов, обуславливающих снижение потерь моторного топлива.

7. Разработать метод оценки параметров качества хранимого топлива в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах с применением нейронных сетей.

**Объект исследований:** процесс хранения и изменения эксплуатационных свойств моторного топлива в наземных горизонтальных резервуарах малой вместимости.

**Предмет исследований:** закономерности изменения физико-химических и эксплуатационных показателей моторных топлив при хранении в наземных горизонтальных резервуарах с переменной площадью поверхности испарения.

**Научную новизну** результатов исследований представляют:

1. Математическая модель процесса испарения топлива из стальных наземных горизонтальных резервуаров в зависимости от переменной площади испарения.

2. Обоснование параметров технических средств для предотвращения потерь моторного топлива. Установлена зависимость температуры холодного потока от количества ступеней и входного давления в вихревой модуль.

3. Результаты исследований динамики изменения эксплуатационных показателей топлива в зависимости от его испарения и обводнения.

4. Теоретические основы виртуально-облачной системы автоматизации стальных наземных горизонтальных резервуаров для обеспечения мониторинга эксплуатационных свойств и количественных параметров топлива.

5. Метод оценки эксплуатационных показателей топлива в процессе его хранения с применением нейронных сетей.

6. Метод построения каскада нейронных сетей для оценки объема испарившегося топлива из горизонтального цилиндрического резервуара.

**Теоретическую значимость имеют:**

1. Совершенствование механизма процесса испарения для повышения эффективности хранения моторного топлива в горизонтальных наземных резервуарах малой вместимости.

2. Математическая модель физико-химических процессов, происходящих при хранении моторных топлив.

3. Теория интеллектуальных систем для автоматизации резервуаров сельскохозяйственных нефтескладов с целью снижения потерь топлива.

4. Научное описание влияния экзотермической реакции окисления углеводородов как одного из факторов интенсификации процесса испарения моторного топлива.

***Практическую значимость имеют:***

1. Метод расчета потерь моторного топлива от процесса испарения из резервуаров в зависимости от переменной площади поверхности испарения с учетом изменения характеристик окружающей среды.

2. Способ достижения отрицательных температур в вихревых трубках, который реализован за счет ступенчатого блока их соединения, что позволяет генерировать температуру для конденсации углеводородов.

3. Способ интеллектуального управления разработанными устройствами сохранения качества топлива и нефтескладом сельского хозяйства с применением виртуально-облачной системы автоматизации, реализуемый с помощью программного продукта «Система автоматизированного управления горизонтальными резервуарами на нефтескладе» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660610).

4. Метод оценки эксплуатационных параметров топлива при его хранении с применением нейронных сетей, обеспечивающий высокую точность расчета.

5. Разработанный вихревой модуль, обуславливающий снижение потерь топлива при хранении до 97%.

***Методология и методы исследования***

Теоретические аспекты проведенных исследований базируются на фундаментальных законах и положениях классической механики жидкости и газа, термодинамики, тепло- и массообмена, теоретической физики, молекулярно-кинетической теории, теории искусственных нейронных сетей, технического анализа, методов объектно-ориентированного проектирования, программирования, математического моделирования. В работе применялись ГОСТы на бензин автомобильный и дизельное топливо (ГОСТ 32513-2013, ГОСТ 32511-2013, ГОСТ 32339-2013, ГОСТ 8226-2015, ГОСТ ISO 3405-2013, ГОСТ 32404-2013, ГОСТ 32508-2013, ГОСТ ISO 3405-2013, ГОСТ 33-2016).

Программная реализация разработанных алгоритмов и программных имитационных моделей выполнена на языках Pascal в среде разработки Borland Delphi 5.0 и C# для платформы Microsoft .NET Framework. Экспериментальные исследования проводились на созданном опытно-промышленном резервуаре в ФГБОУ ВО ЛГТУ для обоснования выбранных направлений исследований, подтверждения теоретических разработок расчета потерь топлива, построения архитектуры нейронной сети с минимальной ошибкой при прогнозировании.

***Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:***

1. Метод снижения потерь моторного топлива при его хранении с применением вихревого модуля, отвечающий экономическим и современным экологическим требованиям.

2. Математическая модель процесса испарения топлива, учитывающая переменную площадь испарения и физико-химические процессы, протекающие при хранении топлива в наземных горизонтальных резервуарах.

3. Метод моделирования процесса хранения топлива в наземных горизонтальных резервуарах с применением нейронной сети.

4. Метод оценки эксплуатационных параметров хранимого топлива в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах с применением нейронных сетей.

#### ***Степень достоверности результатов.***

Достоверность научных положений и полученных результатов исследования подтверждена достаточным количеством проведенных экспериментов, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований автора и других исследователей, занимающихся по данной тематике, обсуждением и одобрением результатов исследований на конференциях и их публикация в открытой печати, внедрением результатов исследований в производство, корректностью созданных математических моделей, использованием современной аппаратуры проведения исследований в соответствии с ГОСТами, воспроизводимостью полученных результатов. Получено решение проблемы, поставленной в актуальности темы исследования.

***Реализация результатов исследований.*** В Липецкой области: Добринский муниципальный район, ОАО «Добринское АТП», ООО «Раненбургъ», ИП КФХ Докучаев К.С., в Смоленской области: КФХ «Дроново», ИП КФХ Вьюнов С.В.; в Ростовской области: ИП КФХ Кудашкин Б.М., ИП Кудашкина Е.Б.

***Апробация результатов исследований.*** Результаты работы были доложены, обсуждены и получили положительную оценку на: «Транспорт, экология, устойчиво развитие:» XXIII научн.-техн. конф. с международно участие (15-17 июня 2017 г., Varna, 2017); VI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании» (5-9 сентября 2018 г., с. Дивноморское, Ростов-на Дону); Международной научно-технической конференции «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства», 5-6 декабря 2018 г. Россия, г. Москва; Национальной научно-практической конференции «Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России», (22 ноября, 2018 г., г. Рязань); I Международной научно-практической конференции «Цифровизация агропромышленного комплекса», (10-12 октября 2018 г., г. Тамбов); «Транспорт, экология, устойчиво развитие:» XXV научн.-техн. конф. с международно участие (16-18 мая 2019 г., Varna, 2019); 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020); на научных конференциях ФГБОУ ВО ЛГТУ (2013-2020 гг.).

***Личный вклад автора.*** Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследования, включая: постановку проблемы; разработку программы исследований; сбор и обработку данных; проведение лабораторных исследований и промышленных испытаний; обработку полученных экспериментальных данных; разработку программного обеспечения; составление заявок на патент и свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ; апробацию результатов исследования на международных, всероссийских, межрегиональных и вузовских научно-практических конференциях в 2013-2020 годах; подготовке публикаций.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано 46 печатных работ, в том числе 2 в журналах Scopus, 1 в журнале Web of Science, 17 статей в изданиях из Перечня ВАК, 1 монография, техническая новизна подтверждена 1 свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патентом. Общий объем опубликованных работ составляет 20,92 п.л. из них автору принадлежит 11,09 п.л.

Автор выражает благодарность научному консультанту: доктору технических наук, профессору Нагорнову С.А. и к.т.н. Левиной Е.Ю. за оказанную помощь в проведении исследований и подготовке диссертации.

**Соответствие паспорту специальности.** Тема диссертации соответствует пунктам 2 (разработка теории и методов технологического воздействия на среду и объекты сельскохозяйственного производства) и 11 (разработка инженерных методов и технических средств обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве) паспорта специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованных источников, включающего 358 наименований. Работа изложена на 281 странице, содержит 78 таблиц, 102 рисунка, 10 приложений.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится краткий анализ рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность направления исследований. Сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние научной проблемы, цель и задачи исследований»** выполнен анализ текущего и прогнозируемого потребления моторного топлива в сельском хозяйстве, динамика его стоимости, выявлена проблема снижения качества моторного топлива от испарения и обводнения при его хранении в резервуарах. Выделены классы вертикальных резервуаров вместимостью более 1000 м<sup>3</sup>, которые используются на нефтеперерабатывающих заводах и крупных нефтебазах; классы горизонтальных резервуаров, размещение которых выполняется наземным или подземным вариантами. Наибольшие потери топлива происходят при его хранении в вертикальных резервуарах крупных нефтебаз, поэтому наибольшее внимание уделено проблемам снижения потерь для этих резервуаров. Данные устройства по принципу действия можно разделить на группы: 1) уменьшение объема паровоздушной среды резервуара; 2) хранение моторного топлива с избыточным давлением; 3) уменьшение амплитуды температурных колебаний в газовом пространстве резервуара; 4) улавливание паров испарившегося топлива, выходящих из резервуара; 5) абсорбционно-конденсационный метод. Известные конструкции из вышеперечисленных групп невозможно применить для наземных горизонтальных резервуаров или нецелесообразно использовать по экономическим причинам. Поэтому в настоящее время наземные горизонтальные цилиндрические резервуа-



ры не обеспечены средствами снижения потерь моторного топлива. Проанализированы причины невозможности применения известных способов и конструкций для предотвращения потерь топлива от испарения и существующих методик для расчета потерь из резервуаров сельскохозяйственного нефтесклада.

По данным профессора кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета А.А. Коршака при имеющемся уровне развития технологий хранения нефтепродуктов и соответствующих технических средств потери составляют более 1,5 % от добычи, среди которых свыше 75 % происходит от испарения. На пути следования нефти и нефтепродуктов от скважин до конечных потребителей потери углеводородов составляют около 23,5 млн. т. в год.

Исходя из прогнозируемого увеличения объема потребления нефтепродуктов АПК России к 2050 г., потери моторного топлива от испарения, даже по существующим (заниженным) нормам естественной убыли в объемах страны, будут достигать около 80 000 т. бензина и 320 000 т. дизельного топлива в год. В настоящее время доля некондиционного возросла до 35% дизельного топлива и 17,5% бензина. В то же время затраты на моторное топливо при неуклонном росте цен на нефтепродукты являются основной статьёй эксплуатационных расходов сельскохозяйственного производства. По данным Минсельхоза России на проведение весенних полевых работ в 2018 году эти затраты превысили 23,0%.

Недостаточное внимание, уделяемое техническому состоянию оборудования нефтескладов сельхозтоваропроизводителей, приводит к главной проблеме в АПК – использование некондиционного топлива, применение которого считается одной из основных причин выхода из строя сельскохозяйственной техники. В таблице 1 приведено сравнение фактических потерь бензина АИ-92 от испарения за год при его хранении в резервуарах объемом 25 м<sup>3</sup> различного технического состояния с нормами естественной убыли.

Таблица 1 – Сравнение фактических потерь бензина АИ-92 от испарения с нормами естественной убыли в резервуаре 25 м<sup>3</sup>

Состояние резервуара и его оборудования	Малые «дыхания», кг	Большие «дыхания», кг	Обратный «выдох», кг	Газовый сифон, кг	Общие потери, кг	Норма естественной убыли, кг
Неокрашенный, без арматуры, прокладок и т.д.	529	131	28	2750	3565	не более 72
Окрашенный, с дыхательным клапаном типа ДК, газовое пространство негерметично	372	88	19	530	1094	не более 72
Герметичный, окрашенный, с дыхательным клапаном типа ДК-М, $P_{кд} = 0,25 \text{ кг/см}^2$	53	36	15	-	104	не более 72

Одной из основных причин снижения показателей качества светлых нефтепродуктов при хранении на нефтескладах АПК является потеря моторного топлива от испарения. Результаты анализов многочисленных проб, взятых в нефтескладах АПК различных регионов страны, свидетельствуют о крайне низ-

кой культуре приема, хранения и отпуска моторного топлива. Физико-химические показатели качества светлых нефтепродуктов не соответствуют требованиям нормативно-технической документации, в основном, по фракционному составу, содержанию воды и механических примесей (в таблице 2 приведены наиболее характерные отклонения показателей качества моторных топлив от нормативных требований).

Таблица 2 – Соответствие показателей качества топлива требованиям нормативно-технической документации

Показатель, имеющий отклонение от требований ГОСТ	Норма по ГОСТ	Фактические данные Анализа
<i>Бензин автомобильный АИ-92</i> ГОСТ 32513-2013		
1 Фракционный состав (ГОСТ 2177-99)		
1.1 Остаток в колбе	не более 1,5%	от 1,6 до 12%
1.2 Остаток и потери	не более 4,0%	от 4,5 до 14%
1.3 Температура н.к.	35°C	до 48°C
1.4 Перегонка 10% объема при темп-ре	не выше 70°C	до 90°C
Перегонка 50% объема при темп-ре	не выше 115°C	до 118°C
Перегонка 90% объема при темп-ре	не выше 180°C	до 190°C
2 Содержание воды (ГОСТ 2477-2014)	Отсутствие	Присутствует
3 Концентрация фактических смол мг/100 см <sup>3</sup>	не более 10	от 17,3 до 80
4 Содержание механических примесей	Отсутствие	Присутствуют
<i>Дизельное топливо (летнее)</i> ГОСТ 32511-2013		
1 Коэффициент фильтруемости ГОСТ 19006-73	не более 3	от 4 до 15,6
2 Фракционный состав по ГОСТ 2177-99		
65% перегоняется при температуре	не выше 250°C	до 300°C
3 Вязкость кинематическая, сСт ГОСТ 33-2016	3,40	3,56
4 Содержание механических примесей	Отсутствие	Присутствуют
5 Содержание воды (ГОСТ 2477-2014)	Отсутствие	Присутствует

Существенным фактором, влияющим на потери нефтепродуктов в процессе их хранения, является степень заполнения резервуара, которую можно выразить соотношением объемов топлива к объему газового пространства резервуара.

В таблице 3 приведены значения потерь бензина от испарения при его хранении в резервуаре 25 м<sup>3</sup> за год в зависимости от уровня его заполнения. Выявлено, что со снижением уровня заполнения резервуара естественные потери бензина возрастают в 7...8 раз.

В процессе хранения топлива испаряются его легколетучие компоненты, протекают реакции окисления, полимеризация и конденсация. Это приводит к увеличению температур перегонки 10, 50 и 90% топлива (рисунок 1), т.е. к утяжелению его фракционного состава. По данным И.П. Бударова потери бензина при хранении не превышающие 1,5% от его массы приводят к повышению температуры начала кипения до 3-4°C. При испарении от 5-10% его массы возрастает температура начала кипения до 15-25°C. Это приводит к образованию некондиционного бензина. Потери легких фракций в том числе снижают показатель октанового числа.

Таблица 3 – Потери бензина от «малого дыхания» за год из резервуара емкостью 25 м<sup>3</sup> при различном уровне его заполнения в Центральном и Южном федеральном округах

Степень заполнения Резервуара		Годовые потери бензина, кг	
		Федеральный округ	
%	м <sup>3</sup>	Центральный	Южный
90	22,453	50	67
80	19,958	89	134
70	17,464	131	196
60	14,969	179	258
40	9,979	269	389
20	4,990	359	521

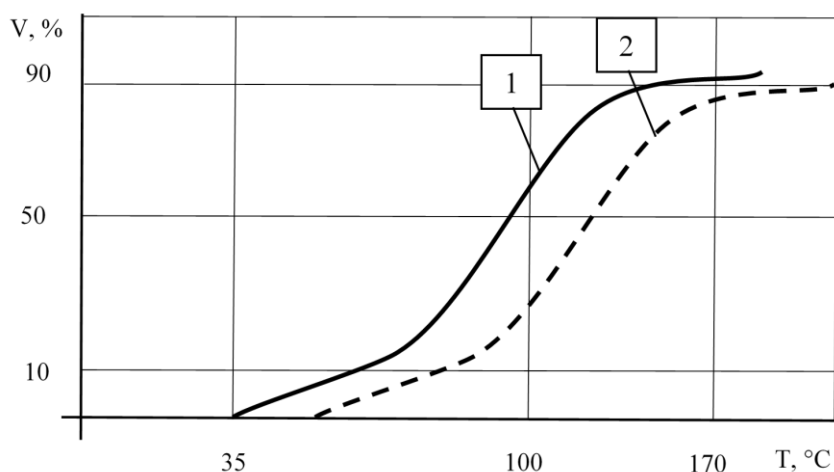


Рисунок 1 – Изменение кривой разгонки бензина:

- 1 – кривая разгонки бензина с фракционным составом, соответствующим ГОСТу;
- 2 – кривая разгонки бензина после снижения легких фракций от испарения

В работах А.С. Ирисова выявлено, что при повышении температуры кипения 10 % отгонки бензина от 50 до 65 °С повышается температура легкого запуска двигателя от минус 20 до минус 10 °С. Работа двигателя внутреннего сгорания на бензине тяжелого фракционного состава увеличивает его износ на 50-70 %. Экономические показатели работы двигателя, такие как расход топлива, износ, в этом случае снижаются на 25-40 % (таблица 4).

Таблица 4 – Отклонение от паспортных значений параметров двигателя при применении бензинов тяжёлого фракционного состава

Конец кипения, °С	Образование нагара, мг/г	Износ, %	Расход топлива, %
170	22	50	93
175	23	50	94
200	45	100	106
225	60	200	107
250	82	500	140

Оценить значение изменения качественных показателей и количественных потерь моторного топлива при его хранении в наземных горизонтальных резервуарах в настоящее время невозможно. Известные методики расчета и нормы естественной убыли показывают достаточную точность при расчете

потерь из резервуаров вертикального типа емкостью более 1000 м<sup>3</sup>. В известных математических моделях учтены в основном средние температуры окружающей среды и не учтены такие параметры, характерные только для класса резервуаров сельских нефтескладов: переменная площадь поверхности испарения моторного топлива, атмосферное давление, влажность воздуха, скорость ветра.

Таким образом, в настоящее время известные методики не позволяют описать процессы испарения топлива в горизонтальных наземных цилиндрических резервуарах. Сельскохозяйственные нефтесклады не обеспечены методической базой для расчёта потерь топлива от испарения, следовательно, невозможно принять обоснованные меры для предотвращения его качественных и количественных потерь.

Наиболее эффективным направлением снижения потерь топлива является его конденсация и возврат в резервуар. Долговечность, отказоустойчивость и экологичность оборудования являются главными критериями применения технических устройств, обеспечивающих снижение потерь моторного топлива при хранении в условиях сельского хозяйства. Перечисленными свойствами обладают вихревые трубки, которые можно использовать в качестве генератора холода для конденсации углеводородов.

В результате проведённого анализа хранения светлых нефтепродуктов в АПК сформулированы выводы:

1. Современное состояние резервуарного парка в сельском хозяйстве обуславливает количественные потери и снижение качества топлива. Так основная доля потерь (от 40 до 80%) и ухудшение качества моторного топлива происходят при его хранении в стальных резервуарах. Существенная доля снижения показателей качества моторного топлива обусловлена испарением из резервуаров.

2. Установлен высокий процент некондиционных проб в общем объеме используемого в АПК моторного топлива (доля некондиционных проб возросла по автомобильному бензину от 14% в 2015 г. до 17,3% в 2019 г., по дизельному топливу от 19% в 2015 г. до 35,6% в 2019 г.).

3. Снижение качества топлива приводит к повышенному износу авто-тракторной техники. Так увеличение температуры кипения бензина до 250°C увеличивает износ двигателя на 500%, а расход горючего на 140%.

4. Поиск механизмов тепломассопереноса и технических средств предупреждения потерь топлива от испарения на протяжении почти 100 лет осуществлялся исключительно для РВС большой вместимости. Поэтому существующие нормы естественной убыли топлива и расчеты по известным методикам в настоящее время приводятся для резервуаров вместимостью более 100 м<sup>3</sup> в основном вертикального типа. И как следствие, потери топлива от испарений крупного класса сельских нефтескладов в 1,7–2 раза превышают нормированные значения. Главной особенностью горизонтального расположения резервуаров следует считать переменную площадь поверхности контакта топлива с газовым пространством.

5. Фактор окисления топлива рассматривается как негативный эффект снижения его качества, однако не делается оценка влияния данного процесса на интенсификацию испарения.

6. Способы защиты топлива от потерь при хранении либо не применимы к резервуарам горизонтального типа, либо не эффективны в условиях сельского нефтесклада.

Поскольку качество моторного топлива непосредственно влияет на экономическую, экологическую и энергетическую сферы деятельности сельского хозяйства, то снижение потерь моторного топлива является не только важнейшей фундаментальной научной проблемой, но и краеугольной в обеспечении энергетической, продовольственной и экологической безопасности страны.

**Во второй главе «Теоретические исследования физико-химических процессов, протекающих при хранении моторных топлив»** проведены теоретические исследования процесса испарения топлива. Выполнена проверка гипотезы интенсификации испарения за счет реакций окисления, создана математическая модель испарения топлива в зависимости от переменной площади поверхности испарения.

Совершенствование методов снижения потерь моторного топлива при хранении требует проведения исследований закономерностей процессов, происходящих в резервуаре при хранении в нем топлива.

Проведенный анализ литературных источников установил, что в настоящее время математические модели для расчета потерь моторного топлива учитывают лишь ограниченный перечень технологических операций. Часть зависимостей получены экспериментальным путем и действуют в определенном диапазоне переменных.

Для точного описания процессов, протекающих при испарении топлива, необходимо использовать совокупность законов термодинамики применительно к реальным жидкостям и газам, учитывающими химические потенциалы фаз, межмолекулярное взаимодействие. На базе теоретического обоснования физико-химических процессов, протекающих при хранении моторного топлива, выявлены факторы влияющие на интенсификацию испарения, а также проведено обоснование новых эффективных методов предупреждения потерь топлива при хранении.

Согласно законам термодинамики, движущей силой фазового перехода 1 рода является стремление системы перейти в состояние с минимальной свободной энергией. Процесс испарения сопровождается поглощением теплоты и ростом энтальпии. Энтропия системы в результате такого перехода возрастает,  $dS > 0$ . Направление фазового перехода определяется соотношением термодинамических потенциалов фаз. Переход совершается в направлении уменьшения термодинамического потенциала (энергии Гиббса),  $dG < 0$ . Однако из-за того, что при хранении в топливе непрерывно происходят взаимосвязанные химические и электрохимические реакции, изменение энергии Гиббса определяется выражением:

$$dG = -SdT + VdP + \mu dN, \quad (1)$$

где  $G$  – энергия Гиббса, Дж/моль;  $S$  – энтропия, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $V$  – объём, м<sup>3</sup>;  $P$  – давление, Па;  $\mu$  – химический потенциал, Дж/моль;  $N$  – число частиц.

Химический потенциал является одной из важнейших характеристик системы. Значение давления паров над топливом в условиях хранения далеко от критического, поэтому газовую фазу системы топливо-пар можно рассматривать как смесь идеальных газов и химический потенциал  $i$ -го компонента в газовой фазе  $\mu_{ig}$  можно выразить уравнением:

$$\mu_{ig} = \mu_{0ig} + R \cdot T \cdot \ln p_i, \quad (2)$$

где  $\mu_{0ig}$  – химический потенциал компонента  $i$  при стандартных условиях, Дж/моль;  $p_i$  – парциальное давление компонента  $i$ , Па,  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

Так как разность химических потенциалов способствует интенсификации перехода вещества в различные физические состояния, то окисление топлива приведет к увеличению скорости испарения.

К основным факторам, влияющим на интенсивность испарения моторного топлива, также относятся: физико-химические свойства топлива; значение границы раздела соприкасающихся жидкой и газовой фаз; температура моторного топлива; давление внутри резервуара; наличие движущегося потока паровоздушной фазы вблизи свободной поверхности жидкой фазы, соотношение объемов газа и жидкости.

Проведен эксперимент в АО «Добринское АТП», который подтверждает изменение температуры в течение суток по высоте резервуара объемом  $10 \text{ м}^3$  (от 0 до 2 м). Измерения выполнены в летний месяц июль и зимний месяц декабрь (рисунок 2,3).

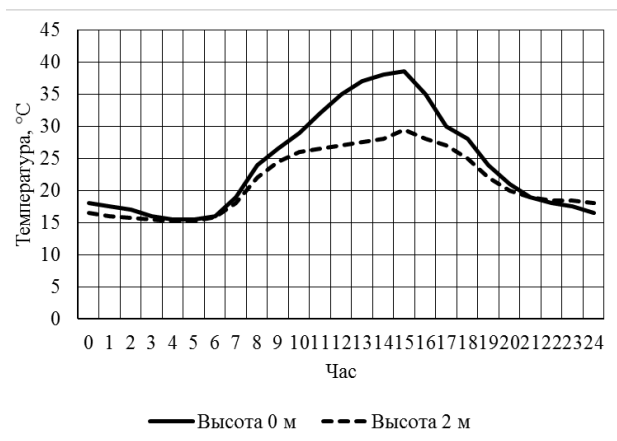


Рисунок 2 – Изменение температуры по высоте резервуара в течение суток в летний месяц

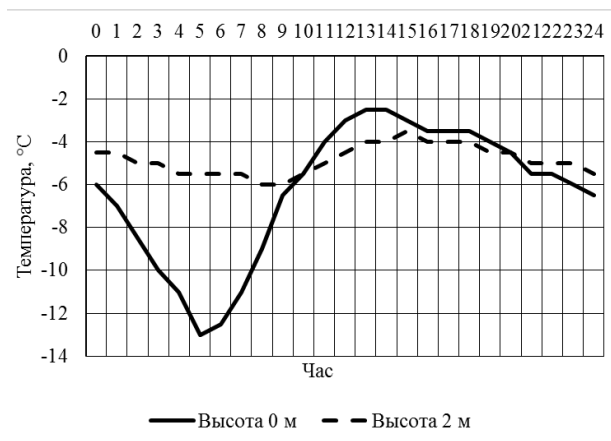


Рисунок 3 – Изменение температуры по высоте резервуара в течение суток в зимний месяц

Тем самым резервуар будет прогреваться неравномерно, что приведет к возникновению конвективной диффузии в хранимом топливе. Конвективные токи будут способствовать вытеснению более легких фракций углеводородов вверх, увеличивая парциальное давление в газовом пространстве резервуара, а более тяжелые будут осаждаться вниз. Поэтому во всех методических расчетах необходимо принимать среднюю температуру по высоте резервуара.

В гипотезе, которая обосновывает увеличение скорости испарения светлых нефтепродуктов при хранении, принято предположение о протекании ре-

акции окисления топлива под воздействием кислорода воздушного пространства над ним. Зная, что реакция является экзотермической и, предположительно, выделяемой энергии достаточно для достижения молекулой (молекулами) такой кинетической энергии, которая способна преодолеть силу поверхностного натяжения и силу земного притяжения молекулы, чтобы перейти в газовую фазу. Тем самым общему объему хранимого топлива будет передаваться энергия на испарение не только из внешней среды, но и за счет внутренних процессов. Рассмотрим данную гипотезу с точки зрения действия сил и стремления системы к минимуму свободной энергии на примере горизонтального цилиндрического резервуара 25 м<sup>3</sup> при хранении в нем бензина.

Для резервуара 25 м<sup>3</sup>, заполненном на 50%, при габаритах 2,76 x 4,99 м сила поверхностного натяжения будет равна  $F_n = 0,33$  Н. Сила тяжести, действующая на молекулу бензина  $F_t = 0,02 \cdot 10^{-22}$  Н. Сумма двух сил является показателем работы, которую необходимо совершить молекуле после окисления для преодоления расстояния от поверхности жидкости много большим размера самой молекулы. Исходя из суммы реакций, выделяемая энергия при окислении 1 моль бензина составит порядка 1000 кДж при нормальных условиях. Этого достаточно, чтобы совершить работу по преодолению сил в 0,33 Н, действующих на молекулу бензина, и перейти в газовую фазу.

Исходя из пропорции энергии при окислении 1 моль топлива и зная его молярную массу, равную 114 г/моль получаем, что окисление 1 моль бензина может обеспечить энергией для его испарения в количестве 37,6 грамм.

Таким образом, предположение об интенсификации испарения при окислении бензина за счет преодоления сил притяжения находит свое гипотетическое подтверждение. Это согласуется с работами ряда авторов, в которых обосновывается использование инертных газов в газовом пространстве горизонтальных резервуаров, что способствует повышению взрывобезопасности хранения нефтепродуктов за счет снижения удельного энерговыделения реакции окисления.

Наземное размещение резервуара характеризуется воздействием на него внешних факторов. Для учета данного воздействия разработан метод расчета количества солнечного тепла, переданного стенкам цилиндрического резервуара. Суточное значение солнечного излучения  $R_c$  для безоблачного неба состоит из прямого излучения, рассеянного излучения и отраженного излучения

$$R_c = R_b + R_d + R_r, \quad (3)$$

где  $R_b$  – суточное значение прямого солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>;  $R_d$  – суточное значение рассеянного солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>;  $R_r$  – суточное значение отраженного солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>.

Суммарное количество тепла  $Q$  (Дж/м<sup>2</sup>), попадающего на поверхность цилиндра, равно суточному значению солнечного излучения, уменьшенному на коэффициент рассеивания энергии за счет атмосферной массы  $\varepsilon$  и конвективному теплообмену с окружающим воздухом  $R_{возд}$ :

$$Q = \frac{1}{\varepsilon} R_c + R_{возд}. \quad (4)$$

Конвективный теплообмен резервуара с окружающим его воздухом рассчитывается по формуле с учетом ламинарного либо турбулентного режимов обтекания поверхности резервуара площадью  $S_{пов}$ :

$$\begin{cases} R_{\text{возд}} = \alpha \cdot \frac{S_{\text{пов}}}{2} \cdot (T_{\text{ос}} - T_{\text{ж}}), \text{ при } Re < 10^3; \\ R_{\text{возд}} = \alpha \cdot S_{\text{пов}} \cdot (T_{\text{ос}} - T_{\text{ж}}), \text{ при } Re > 10^3, \end{cases} \quad (5)$$

где  $R_{\text{возд}}$  – тепло, переданное воздушной средой Дж/м<sup>2</sup>,  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, К;  $T_{\text{ж}}$  – температура топлива в резервуаре, К;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К). В зависимости от скорости ветра  $\omega$  (м/с), диаметра резервуара  $D$  (м) и кинематической вязкости воздуха  $\nu$  (Па·с) запишем уравнение для числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot D}{\nu} \quad (6)$$

С учетом вышесказанного определим интенсивность теплоотдачи:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{0,49 \cdot Re^{0,5} \cdot \lambda_{\text{в}}}{D}, \text{ при } Re < 10^3; \\ \alpha = \frac{0,245 \cdot Re^{0,6} \cdot \lambda_{\text{в}}}{D}, \text{ при } Re > 10^3. \end{cases} \quad (7)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К) для воздуха при температуре окружающей среды  $T_{\text{ос}}$  (К).

В наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах при операциях с хранимым моторным топливом площадь поверхности его испарения будет варьироваться в широком диапазоне. Расход топлива или скорость его закачки в резервуар, а также конструкция резервуара оказывают влияние на скорость изменения площади поверхности испарения моторного топлива. Другими словами, площадь поверхности испарения будет выражаться функцией в зависимости от времени. Показатели, характеризующие состояние окружающей среды, а также характеристика физико-химических свойств моторного топлива будут определять направление движущей силы процесса испарения. Переменным показателем, который будет характеризовать интенсивность процесса, в итоге выступает площадь поверхности испарения моторного топлива. Разработан метод расчета потерь моторного топлива от процесса испарения из резервуара с различным вариантом исполнения геометрии или формы дна с учетом переменной площади поверхности испарения.

Примем обозначения геометрических характеристик резервуара:  $D$  – диаметр, м;  $L$  – длина цилиндрической части, м;  $f$  – выпуклость днища.

Объем цилиндрической части:  $V_{\text{I}} = 0,7854 \cdot D^2 \cdot L$ ; объем конического днища:  $V_{\text{к}} = 0,2618 \cdot D^2 \cdot f$ ; объем сферического днища:  $V_{\text{с}} = 0,523 \cdot f \cdot (0,75 \cdot D^2 + f^2)$ ; общий объем: резервуара с плоским днищем  $V = V_{\text{I}}$ ; с коническим днищем  $V_{\text{II}} = V_{\text{I}} + 2 \cdot V_{\text{к}}$ ; со сферическим днищем  $V_{\text{III}} = V_{\text{I}} + 2V_{\text{с}}$ .

Пусть  $v$  – текущий объем жидкости в резервуаре, коэффициентом объема называется отношение  $v_{\text{i}} / V = K_{\text{i}}$ . В нормативных документах приведены в виде таблиц зависимости  $K_{\text{i}}$  от  $H_{\text{i}} / D$  (где  $H_{\text{i}}$  – текущая высота слоя жидкости в резервуаре). Производительность насоса  $Q$ , а также время его работы  $t$  – известные величины. Текущий объем топлива в резервуаре на момент времени  $t$  составит:

$$v = v_0 + Q \cdot t, \quad (8)$$

где  $v_0$  – начальный объем топлива (в момент времени  $t = 0$ ), м<sup>3</sup>.

При наливе топлива  $Q$  – положительная величина ( $v > v_0$ ), при сливе отрицательная ( $v < v_0$ ).



По геометрическим размерам горизонтальных резервуаров для хранения нефтепродуктов можно рассчитать объемы  $V_I$ ;  $V_K$  и  $V_C$ , а затем определить значения  $V_{II}$  и  $V_{III}$ .

Находим зависимости площади поверхности испарения от приведенной высоты  $H/D$ .

I. Резервуар с плоским дном

$$F_I = 2D \cdot L \cdot [H/D \cdot (1 - H/D)]^{0,5} = 2R \cdot L \cdot [H/R \cdot (2 - H/R)]^{0,5} = 2R \cdot L \cdot [1 - (1 - H/R)^2]^{0,5} = 2R \cdot L \cdot [1 - h^2]^{0,5}, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической части резервуара, м;  $h = (1 - H/R)$  – безразмерная переменная.

II. Резервуар с коническим дном

Площадь поверхности испарения представляет сечение кругового конуса плоскостью на высоте  $H$ . Поместим начало трехмерной системы координат в точку вершины конуса и ось  $Z$  направим по оси симметрии резервуара.

Площадь данной гиперболы определяем по соотношению:

$$F_K = R^2 \cdot f / R \cdot \{(1 - h^2)^{0,5} - h^2 \cdot \ln[1/h + (1/h^2 - 1)^{0,5}]\} = R^2 \cdot f / R \cdot [(1 - h^2)^{0,5} - h^2 \cdot \operatorname{arch}_+(1/h)]. \quad (10)$$

Общая площадь испарения резервуара с коническим дном составит:

$$F_{II} = F_I + 2F_K$$

III. Резервуар со сферическим дном

Помещаем начало трехмерной системы координат в центр сферы, которая образует дно резервуара. При наливе в резервуар топлива до высоты  $H$  поверхность испарения будет находиться в пересечении сферы с плоскостью  $Y = (R - H)$ . Уравнение линии пересечения в этой плоскости будет иметь вид:

$$X^2 + Z^2 = [(R^2 + f^2)^2 / (4 \cdot f^2)] - (R - H)^2 \quad (11)$$

Площадь испарения в сферической части резервуара будет представлять собой сегмент, границами которого в плоскости  $Y = R - H$  будут: уравнение окружности и линия пересечения плоскостей  $Z = (Z - f)$  и  $Y = (R - H)$ . После преобразований получим:

$$F_C = R^2 \left\{ \left[ \left( \frac{1 - f^2/R^2}{2 \cdot f/R} \right) + 1 - h^2 \right] \cdot \frac{2 \cdot f/R}{1 - f^2/R^2} \cdot \operatorname{arctg}[\sqrt{1 - h^2}] - \frac{1 - f^2/R^2}{2 \cdot f/R} \sqrt{1 - h^2} \right\} \quad (12)$$

С учетом того, что у резервуаров со сферическими днищами отношение  $f/R = 0,26$  получаем соотношение для практических расчетов:

$$F_C = R^2 \{(4,05 - h^2)^{0,57} \cdot \operatorname{arctg}[\sqrt{1 - h^2}] - 1,75 \sqrt{1 - h^2}\} \quad (13)$$

Общая величина поверхности испарения составит:

$$F_{III} = F_I + 2F_C.$$

Разработана математическая модель расчета потерь топлива от испарения при заполнении резервуара, в которой учтены факторы, ранее упрощенные в известных математических моделях: явление силового взаимодействия молекул (ассоциация, диссоциация), изменение температуры под действием внешней среды и в связи с окислением углеводородов. В общем виде состояние ПВС в газовом пространстве резервуара описывается уравнением состояния реального газа:

$$\left(P_y + \frac{a}{V_y^2}\right) \cdot (V_y - b) = MRT \quad (14)$$

где  $a$  – константа, характеризующая молекулярное давление жидкости, Н·м/моль;  $b$  – константа, характеризующая собственный объем молекул, м<sup>3</sup>;  $V_y$  – объем газового пространства резервуара, м<sup>3</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж/моль·К;  $P_y$  – давление газового пространства резервуара, Па;  $T$  – температура, зависящая от воздействия окружающей среды и окисления, К;  $M$  – масса углеводородов, кг.

При решении задачи расчёта потерь топлива от испарения при заполнении резервуара введены обозначения:  $P = \left(P_y + \frac{a}{V_y^2}\right)$  и  $V = (V_y - b)$

Выразим изменение массы ПВС от времени  $\dot{M}$  как функцию скорости испарения при заполнении резервуара и вытеснении углеводородов в атмосферу:

$$\dot{M} = \beta \cdot \dot{F}(C_s - C) - \rho JS_{\text{отв}}, \quad (15)$$

где  $\dot{F}$  – изменение площади поверхности испарения резервуара, м<sup>2</sup>,  $\rho$  – плотность углеводородов, кг/м<sup>3</sup>,  $\beta$  – коэффициент массоотдачи кг·м<sup>2</sup>/с,  $J$  – скорость выхода ПВС м/с через отверстие люка площадью  $S_{\text{отв}}$ , м<sup>2</sup>,  $C_s, C$  – концентрация насыщенных паров углеводородов и средняя концентрация паров в газовом пространстве резервуара соответственно. Приравняем потери от испарения  $G$ , м<sup>3</sup>/с, произведению  $J \cdot S_{\text{отв}}$ .

Потери ПВС от испарения  $G$  при этом выразим:

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot \left[ \beta \dot{F}(C_s - C) - M \cdot \left( \frac{1}{V_y - b} \cdot \dot{V} - \frac{2a}{P_y + \frac{a}{V_y^2}} \cdot \dot{V} - \frac{\dot{T}}{T} \right) \right] \quad (16)$$

По полученному уравнению (19) проведено моделирование процесса испарения бензина при заполнении резервуара, рассчитано мгновенное значение испарившегося топлива (рисунок 4). Выполнено сравнение с ранее известным универсальным методом расчета суммарных потерь от «дыханий» резервуаров, разработанный Коршаком А.А. и Коршаком С.А. (рисунок 5):

$$G = \int_0^{\tau} \rho_y \cdot c \cdot Q \cdot dt, \quad (17)$$

где,  $\rho_y$  – плотность вытесняемой ПВС из резервуара кг/м<sup>3</sup>,  $Q$  – объемный расход вытесняемой ПВС, м<sup>3</sup>/с;  $c$  – средняя концентрация паров углеводородов;  $\tau$  – время в течение которого открыт клапан.

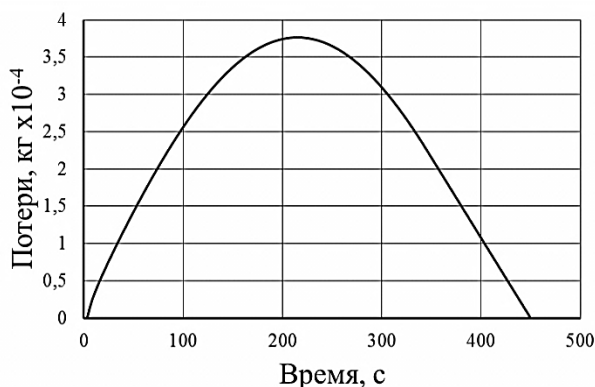


Рисунок 4 – Расчет потерь бензина от большого дыхания из резервуара объемом 3 м<sup>3</sup> по разработанному методу

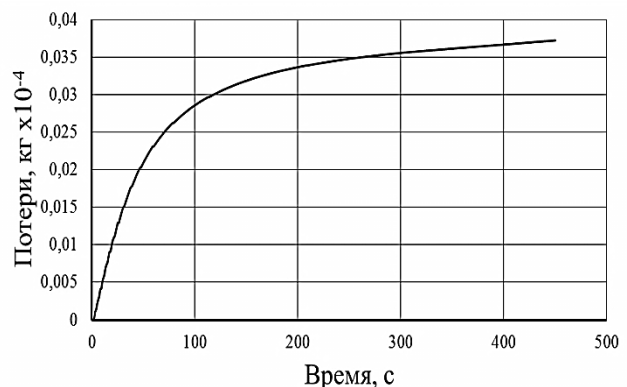


Рисунок 5 – Расчет потерь бензина от большого дыхания из резервуара объемом 3 м<sup>3</sup> по универсальному методу

Результат анализа полученных данных установил влияние переменной площади испарения на потери топлива. Выявлено, что известные формулы работают только для вертикальных резервуаров больших объемов, а в случае горизонтальных резервуаров малого объема они не применимы, что подтверждается в том числе работами их авторов. Полученные зависимости позволяют добиться высокой точности расчетов, за счет учета ранее упрощенных факторов межмолекулярного взаимодействия углеводородов.

Построены зависимости потерь топлива от испарения при различном наполнении резервуаров емкостью от 3 до 75 м<sup>3</sup> для различных Федеральных округов.

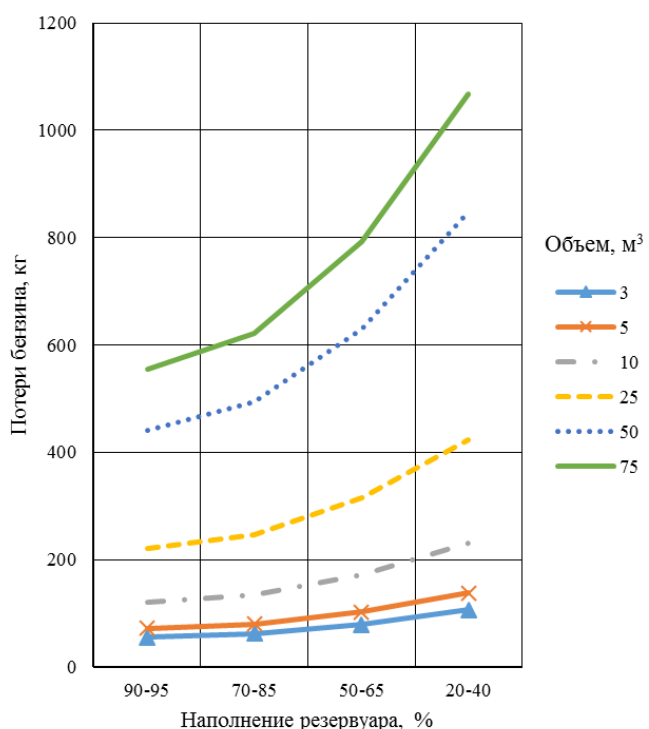


Рисунок 6 – Потери топлива от испарения при различном наполнении резервуаров емкостью от 3 до 75 м<sup>3</sup> для Центрального федерального округа

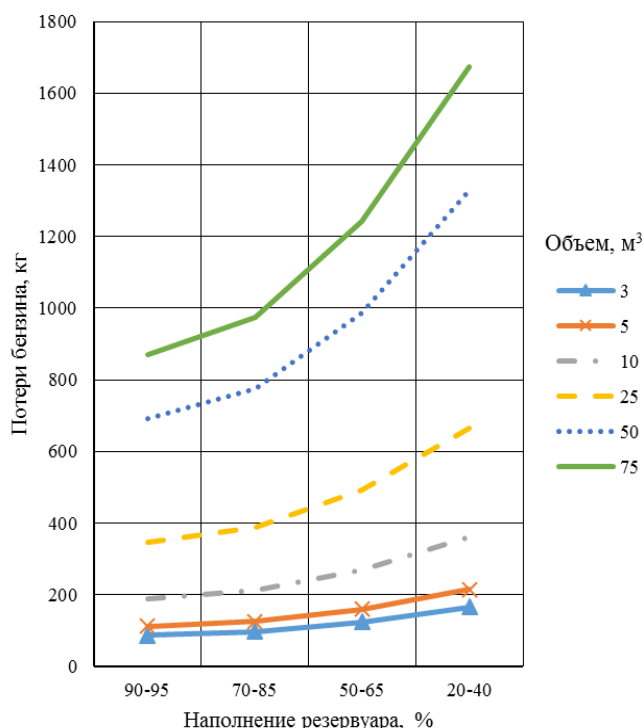


Рисунок 7 – Потери топлива от испарения при различном наполнении резервуаров емкостью от 3 до 75 м<sup>3</sup> для Южного федерального округа

**В третьей главе «Теоретические аспекты предотвращения количественных и качественных потерь моторного топлива при хранении»** отражены теоретические аспекты обоснования параметров и режимов устройств, использованных для снижения потерь моторного топлива. Генерация холода для конденсации углеводородов и атмосферной влаги осуществлялась за счет вихревого эффекта, который обнаруживается в вихревой трубке. В сравнении с известными холодильными агрегатами вихревая труба отличается отказоустойчивостью, простотой и надежностью конструкции и экологичностью.

Для адекватного описания термодинамических характеристик воздуха во всех диапазонах работы вихревых труб с учетом многокомпонентности воздуха целесообразно применять уравнение состояния в форме Редлиха-Квонга:

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{R \cdot T}{(v-b)} - \frac{a}{(v-b) \cdot v \cdot \sqrt{T}} \\
 a &= \frac{0,42748 \cdot R^2 \cdot T_{кр}^{2,5}}{p_{кр}} \\
 b &= \frac{0,08662 \cdot T_{кр}}{p_{кр}},
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где  $p$  – давление, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $v$  – мольный объем, м<sup>3</sup>;  $a$  и  $b$  – константы реальных газов в уравнениях состояния, являющиеся характеристиками молекулярного давления и собственного объема молекул.

Исходя из уравнений Редлиха-Квонга:  $\frac{p}{p_{кр}} < \frac{T}{2 \cdot T_{кр}}$ , определено, что данное уравнение справедливо для всего диапазона рассматриваемых параметров потока  $p \leq 5,0$  МПа;  $T$  принадлежит  $(-70 \dots +100)^\circ\text{C}$ .

При всех достоинствах вихревой трубки низкий КПД процесса температурного разделения, происходящего в камере трубки, является главным ее недостатком. Поэтому в работе рассмотрены пути увеличения охлаждения входного потока в вихревых трубах. Для разработки технических устройств снижения потерь топлива при хранении выбрано ступенчатое соединение вихревых труб, при котором выход холодного потока первой трубки соединен со входом второй. Для достижения максимального эффекта охлаждения необходимо увеличивать величину входного давления с увеличением числа ступеней.

Снижение потерь моторного топлива при хранении входит в задачи управления резервуарным парком нефтехозяйств, которые носят многоплановый характер, начиная от управления отдельными дыхательными клапанами и регулировкой процессов испарения топлива, сливом подтоварной воды, заправкой и выдачей нефтепродуктов и заканчивая задачами по принятию решений при неординарных случаях работы резервуарного парка. Требуемую высокую точность выполнения вышеуказанных процессов невозможно осуществить при «ручном» управлении резервуарным парком и нефтехозяйством в целом вследствие невысокого быстродействия и реакций человека-оператора. Язык описания алгоритмов технологических операций, применяемых при хранении топлива, на традиционных бумажных носителях не может отразить высокой динамичности и точности процессов, подвластных цифровым ресурсам.

В связи с вышеизложенным, цифровая трансформация нефтесклада АПК в «умный» нефтесклад является актуальной научной и практически значимой проблемой, имеющей важное хозяйственное значение. Известно, что признаки и атрибуты «умной» среды – это наличие сенсорного и информационного инструментария, позволяющего мгновенно собирать, аккумулировать и передавать информацию об окружающей действительности, а «интеллектуальной» среды заключаются в анализе данных и принятых на его основе решениях для изменения объекта или процесса. Другими словами, кибер-физические системы должны управлять «умным» нефтескладом.

В основе управления заложены такие ресурсы, как интернет вещей; искусственные нейронные сети глубокого обучения; технологии анализа BigData; универсальный инструмент для построения различных баз данных (Блокчейн).

Наиболее характерной для них является тенденция изменения качества управления как технологическими процессами, так и процессами принятия решений на всех уровнях иерархии, базирующаяся на современных способах производства и применения информации о состоянии управляемых элементов и подсистем. Необходимые условия функционирования «умного» нефтесклада складываются из:

- информатизации всех процессов, осуществляемых на нефтескладе с использованием элементов BigData;

- минимизации неопределенностей, в том числе влияние «человеческого» фактора;

- максимального учета природно-климатических особенностей региона.

Применение интеллектуальных систем позволит обеспечить сельскохозяйственных товаропроизводителей предиктивным анализом по предупреждению аварий резервуарного парка и выбросов нефтепродуктов, управлением рисками работы нефтесклада в целом, эффективной работой средств сохранения качества моторного топлива, тем самым полностью предотвращая снижение его качества.

Для обеспечения сбора информации с технических устройств нефтехозяйств с приданным им интеллектом введено новое ключевое понятие «виртуально-облачная система автоматизации». «Виртуально-облачная система автоматизации – это интеллектуальное роботизированное управление объектом автоматизации, при котором физическое состояние объекта описывается виртуальными датчиками и искусственным интеллектом». Данная концепция способна обеспечить освобождение объекта автоматизации от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования информации о нем, то есть не требуется установка различных датчиков на резервуар. Концепция «виртуально-облачной системы автоматизации» служит для развития сельского хозяйства, АПК и направлений научно-технического прогресса, использующие саморегулирующие технические средства, а также предоставляет новые инструменты для управления и контроля за процессами.

Базисным элементом виртуально-облачной системы является виртуальный датчик, который представляет собой математическую модель на базе обучаемой нейронной сети или искусственного интеллекта, вычисляющая выбранный критерий физического состояния объекта автоматизации с высокой точностью, используя косвенные параметры из облачных данных. «Облачные данные – переменные среды, объекта, которые доступны для использования виртуальным датчиком напрямую из хранилища или через обработку системами BigData».

Для записи математического уравнения виртуально-облачной системы автоматизации  $Y$  определим систему виртуальных датчиков как  $\Sigma F(\text{net}(D))$ , где  $D$  – входные параметры в нейронную сеть датчика из облачных данных, и нейросетевую модель объекта автоматизации как  $F(\text{net}(\Psi))$ . Получим уравнение в общем виде:

$$Y = \Sigma F(\text{net}(D)) + F(\text{net}(\Psi)). \quad (19)$$

В работе приведен пример перехода от классической системы автоматизации резервуара на сельскохозяйственном нефтескладе к виртуально-облачной.

В классическом варианте автоматизации на резервуар устанавливают измерительные датчики: датчик фиксации температуры моторного топлива, датчик фиксации температуры паровоздушной среды, манометры, уровнемеры. Для описания параметров окружающей среды необходимы датчики для фиксации температуры окружающего воздуха, барометр, датчик влажности воздуха, датчик скорости ветра и т.д. Показатели от каждого датчика передаются на контроллер, который после обработки сигналов отдает их на вход программного обеспечения, управляющего системами сохранения качества топлива (рисунок 8).

При переходе к «умному» нефтескладу используем виртуально-облачную систему автоматизации (см. рисунок 9): для резервуаров настраиваются виртуальные датчики для вычисления требуемых параметров. С помощью виртуального датчика может быть выполнено моделирование сценариев, прогнозирование, обучение и т.д. Выход виртуального датчика запишем в виде нейронной сети, которая состоит из  $M$  слоёв, в  $\mu$ -ом слое которого находится  $N_\mu$  нейронов ( $\mu=1, \dots, M$ ):  $y(\mu, i) = F(\text{net}(\mu, i))$ . Если на резервуаре четыре классических датчика, то при виртуально-облачной системе автоматизации на вход итоговой нейронной сети  $\Psi$  будут поданы 4 нейросети, моделирующие виртуальные датчики:

$$\Psi(\mu_\Psi, i_\Psi) = F_\Psi(w_0^{\mu_\Psi, i_\Psi} + F_1(\text{net}(\mu_1, i_1)) + F_2(\text{net}(\mu_2, i_2)) + F_3(\text{net}(\mu_3, i_3)) + F_4(\text{net}(\mu_4, i_4))). \quad (20)$$

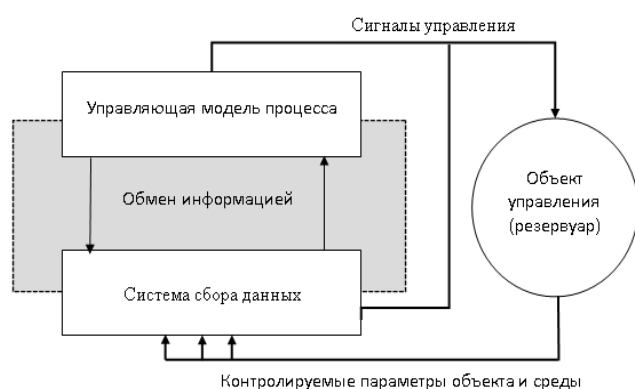


Рисунок 8 – Классическая схема автоматизации объекта управления с применением нейронных сетей



Рисунок 9 – Виртуально-облачная схема автоматизации объекта управления (резервуара) с применением нейронных сетей

На примере расчёта потерь топлива от испарения из резервуара объемом  $50 \text{ м}^3$  точность работы виртуальных датчиков достигает 95-98%.

Используя данную концепцию, можно автоматизировать устаревшие резервуары, к которым нет возможности подключить датчики для сбора требуемой информации. В тоже время, виртуально облачная система автоматизации резервуара может реализовать различные сценарии по прогнозированию потерь качества и объема топлива, что позволит найти эффективные средства борьбы с ними. Цифровая трансформация сельскохозяйственного нефтесклада в «Умный нефтесклад» позволит безошибочно управлять сохранением качества топлива с вероятностью до 98%.

**В четвертой главе «Методические аспекты исследований и разработанные установки для снижения потерь моторного топлива»** приведены: общая программа и структура исследований процесса испарения и снижения качества топлива при хранении; частные методики исследований и характеристики контрольно-измерительной аппаратуры. Приведен метод оценки качества топлива с применением нейронной сети.

Концепция создания технических средств снижения потерь моторного топлива при хранении подразумевает использование недорогих, долговечных, ремонтпригодных и экологически безопасных устройств, способных обеспечить конденсацию углеводородов. В данном направлении открываются перспективы использования вихревых генераторов холода (вихревые трубки), в которых поданный под давлением воздушный поток разделяется на холодный и горячий. На изготовленном образце лабораторно-стендовой вихревой трубе проведены эксперименты с целью выявления особенностей ее работы, факторов, оказывающих влияние на температуру холодного потока.

Разработаны технические устройства для снижения потерь топлива при хранении в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах. Созданные устройства предотвращают качественные и количественные потери топлива при дыхании резервуара путем конденсации углеводородов с их последующим возвратом в резервуар.

Конденсацию паров бензина и дизельного топлива способен обеспечить вихревой модуль при ступенчатом соединении вихревых трубок. На рисунке 10 схематично изображено расположение вихревого модуля на резервуаре, а фото вихревого модуля на рисунке 11.

В разработанной установке в распределительный блок 4 поступает сжатый воздух от компрессора 2. Из распределительного блока воздух под давлением подается в блок соединенных ступенчато вихревых труб 5,1; 5,2; 5,3.

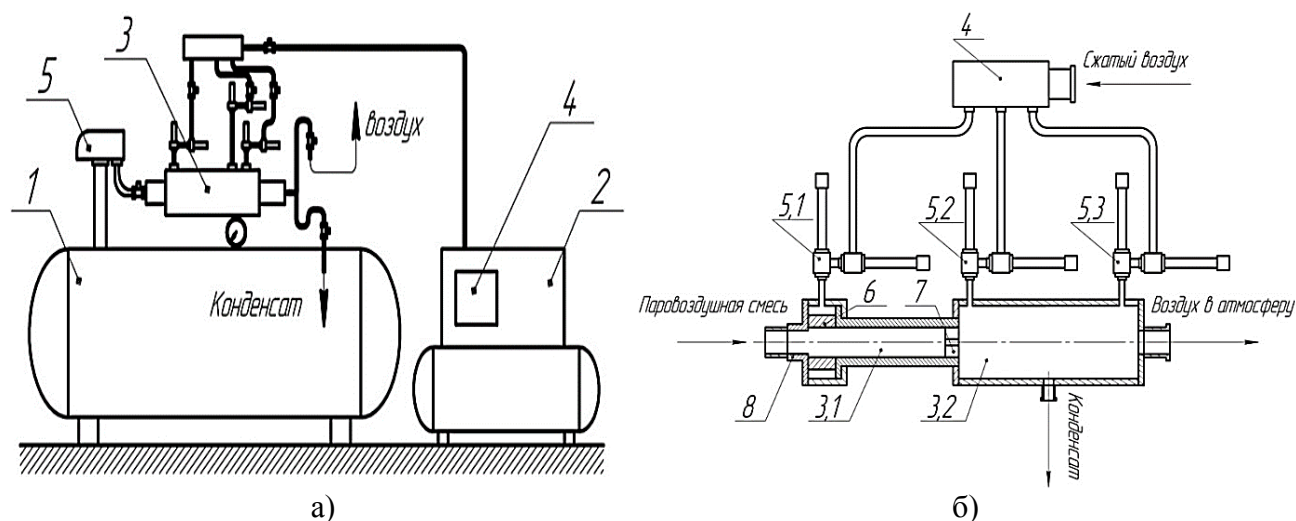


Рисунок 10 – Расположение вихревого модуля на резервуаре (а) и его схема (б):

- 1 – Резервуар, 2 – компрессор, 3 – вихревой модуль, 4 – блок управления задвижками,
- 5 – дыхательный клапан. 3,1 – Первая секция вихревого модуля, 3,2 – Вторая секция вихревого модуля, 4 – распределительный блок, 5,1 – ступенчатый блок ВТ – 1; 5,2 – ступенчатый блок ВТ – 2; 5,3 – ступенчатый блок ВТ – 3; 6 – Улитка; 7 – Завихритель; 8 – Диафрагма



а)



б)

Рисунок 11 – Фото стендового образца вихревого модуля:  
а) ступенчатый блок вихревых трубок; б) вихревой модуль

При «выдохе» воздушная смесь с парами углеводородного топлива поступает из дыхательного клапана 5 резервуара 1 через диафрагму 8 в вихревой модуль. Холодный поток воздуха из ступенчатого блока вихревых трубок – 5.1 подается в улитку 6 первой секции вихревого модуля 3.1. В первой секции модуля происходит интенсивное перемешивание и теплообмен холодного потока воздуха и ПВС из резервуара до завихрителя 7. После охлажденный поток газов попадает во вторую секцию вихревого модуля 3.2 в которую поступает холодный воздух из ступенчатых блоков ВТ 2 и 3. В этой секции углеводороды охлаждаются до точки росы и полностью конденсируются. Полученный конденсат топлива направляется в резервуар, а очищенный воздух выходит в атмосферу.

Экспериментальные и опытно промышленные исследования проводились на резервуарах в Липецкой области: ООО «Раненбургъ», ИП КФХ Докучаев К.С., в Смоленской области: КФХ «Дроново», ИП КФХ Вьюнов С.В.; в Ростовской области: ИП КФХ Кудашкин Б.М. на резервуарах объемом от 5 до 50 м<sup>3</sup>.

Собрана экспериментальная установка (рисунок 12) для исследования процессов испарения и изменения параметров качества топлива при его хранении, формирования массива данных для обучения искусственных нейронных сетей, выполняющих задачи моделирования состояния системы хранения топлива в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах, проведения лабораторных испытаний технических устройств предотвращения потерь моторного топлива.

Экспериментально исследовано поле температур моторного топлива в резервуаре при его наземном размещении, распределение температур по секциям вихревого модуля, количество сконденсированного топлива за счет охлаждения паровоздушной смеси резервуара в вихревом модуле. Проведена оценка качества автомобильного бензина АИ-92 и дизельного топлива ДТ-Л-К5 при хранении в зависимости от величины его потерь при испарении. В качестве индикативных показателей для бензина были приняты октановое число и его фракционный состав, процентное содержание воды, концентрация фактических смол, наличие механических примесей. За индикативные показатели дизельного топ-



лива приняты фракционный состав, цетановое число, содержание воды, кинематическая вязкость, содержание механических примесей. Измерение параметров проводилось при полностью заполненном резервуаре и после испарения топлива от 1 до 5 % первоначальной массы.

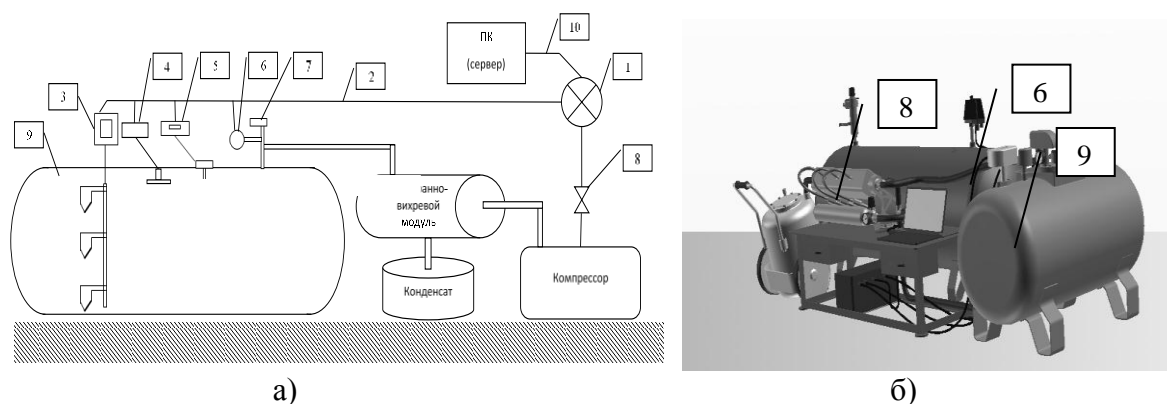


Рисунок 12 – Принципиальная схема экспериментальной установки:  
 а) схема экспериментальной установки; б) общий вид

- 1 – контроллер Siemens Simantic S7-200; 2 – 24 жильная шина; 3 – датчики температуры Siemens QAP 1030; 4 – газоанализатор ULTRAMAT 23; 5 – Уровнемер SITRANS LC300; 6 – датчик давления IFM; 7 – дыхательный клапан с гофрой на вихревой модуль; 8 – электромеханический выключатель; 9 – экспериментальный резервуар объемом 200 л; 10 – USB/PPI кабель

По выбранным индикативам проводились исследования сохранения качества топлива разработанными устройствами снижения потерь углеводородов от испарения. Для снижения погрешности оценка качества проводилась не менее чем на 3 пробах с выводом среднего значения.

Объем лабораторного прототипа резервуара сельскохозяйственного назначения для проведения экспериментов составлял 200 литров; внутренний диаметр 600 мм; длина 850 мм. Показатели с датчиков резервуара записывались в базу данных, из которой был сформирован массив для обучения искусственных нейронных сетей. С помощью нейронной сети построены математические модели процесса испарения топлива при его хранении.

Благодаря обширному практическому опыту работы с нейросетями выполнена формализация выбора архитектуры нейронной сети для решения практических задач.

Для изучения любого технологического процесса и его описания математической моделью необходимо собрать массив экспериментальных данных, содержащий значения входных  $X$  и выходных  $Y$  параметров. Исключение размерности при обучении и прогнозировании с использованием нейронной сети достигается нормированием исходных данных. Экспериментальным путем установлено, что нормировка значений на диапазон  $[-1;1]$  является наиболее приемлемой. Основным и наиболее трудоемким этапом в работе с нейронной сетью является выбор ее архитектуры, которая будет наиболее точно описывать технологический процесс. Данный этап включает в себя выбор топологии сети, расчет количества скрытых слоев в сети, количества нейронов в каждом слое,

функции активации нейронов, выбор алгоритма оптимизации весовых коэффициентов. Так как многослойный персептрон (MLP) способен решать широкий круг математических задач по обработке данных, то для исследований и построения математических моделей производственных процессов рекомендуется использовать данный вид сети.

Из проведенных ранее исследований известно, что результаты прогноза с наименьшей ошибкой, показывают нейронные сети с гиперболической функцией активации нейронов  $y = a \cdot th(bx)$ , где  $a$  и  $b$  – константы ( $a = 1,7159$  и  $b = 0,667$ ). Данная функция активации способна описать нелинейные процессы.

Строго определенной процедуры для выбора количества нейронов и количества слоев в сети нет. Поэтому выбирать количество нейронов и количество слоев в сети необходимо исследуя их влияние на конечную ошибку обучения. Для начального выбора количества нейронов в исследованиях необходимо использовать теорему Колмогорова, согласно которой для реализации нейронной сети с  $N$  входными параметрами достаточно использовать скрытый слой с  $(2N + 1)$  нейронами.

**В пятой главе «Результаты экспериментальных исследований инновационных методов предотвращения количественных и качественных потерь моторного топлива при хранении»** приведена обработка результатов исследований оборачиваемости резервуарного парка среднестатистического нефтесклада в сельском хозяйстве и динамика уменьшения объема топлива в резервуаре (рисунок 13, 14).

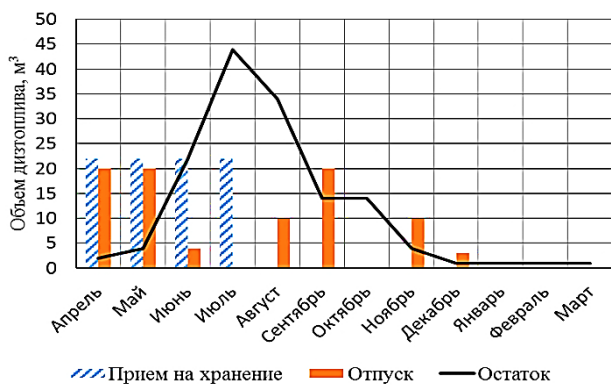


Рисунок 13 – Динамика годового оборота топлива среднестатистическим нефтескладом сельхозтоваропроизводителя

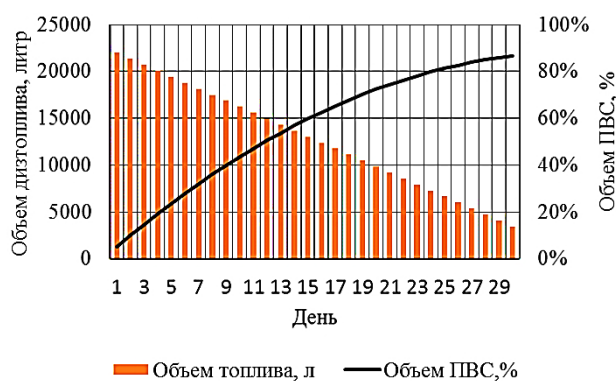


Рисунок 14 – Динамика уменьшения объема топлива в резервуаре за месяц (июль)

Анализ обработанных среднестатистических данных показывает, что наибольшие запасы топлива на нефтескладе образуются в летние месяцы. Из-за высокой температуры в это время года потери от испарения будут более интенсивными.

Применение существующих норм естественной убыли для наземных горизонтальных резервуаров дают отклонения до 40% от реальных потерь топлива (рисунок 15 на примере бензина).

Для конденсации углеводородов достаточно температуры минус 35-40°С. Дальнейший возврат полученного конденсата в резервуар обеспечит сохране-

ние его качественных и количественных показателей. Проведены эксперименты по изучению влияния давления воздуха, подаваемого на вход в вихревую трубу, на температуру генерируемого холодного потока. Полученные результаты следует интерпретировать так, что эффект охлаждения возрастает с увеличением давления входного потока в вихревой трубке. Минимальная температура холодного потока составила минус 9°C. Исследования блока вихревых трубок, в котором выход холодного потока первой трубки является входом для второй, показали значительное увеличение генерируемого холода. Данный блок позволил достичь значения температуры холодного потока на выходе второй вихревой трубки до минус 46°C. Этой температуры вполне достаточно для конденсации паров углеводородов и атмосферной влаги.

Эффективность разработанного устройства блочно-модульного построения с высоким КПД для конденсации паров топлива и атмосферной влаги обусловлена высоким процентом осушки соответствующих потоков. В зависимости от объема резервуара можно будет составлять необходимое число из блоков вихревых труб для эффективного проведения процесса конденсации.

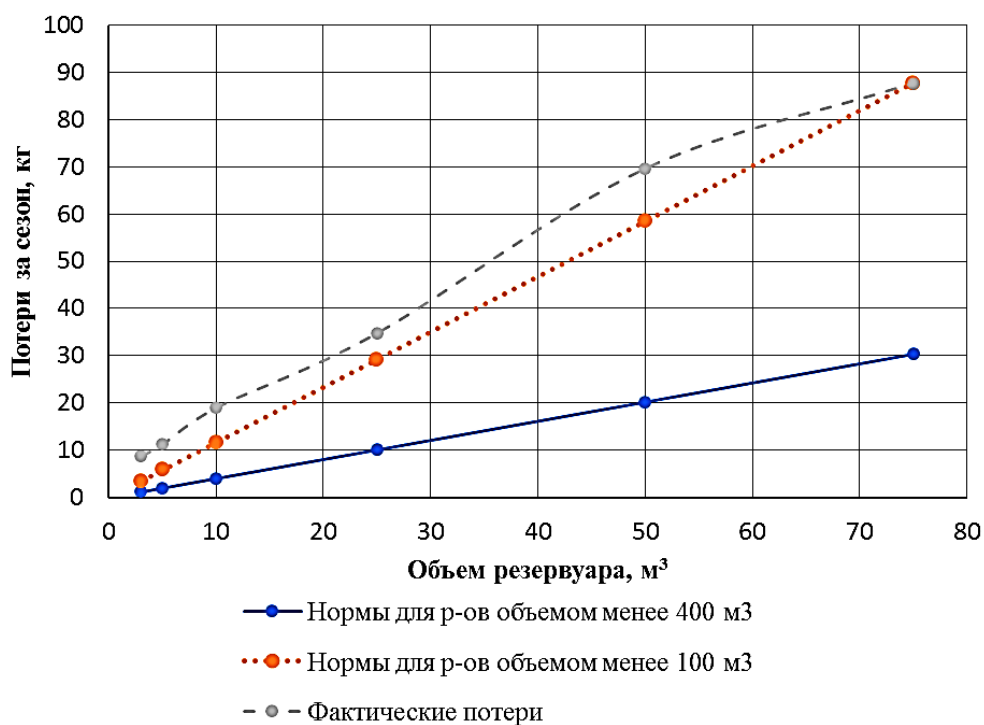


Рисунок 15 – Сравнение фактических потерь за период с нормами естественной убыли в Центральном федеральном округе за весенне-летний период

Проведены исследования влияния входного давления в распределительном блоке на температуру в первой и второй секции вихревого модуля (рисунок 16). Степень конденсации паров бензина в вихревом модуле достигает 97% (рисунок 17).

Исследован характер изменения температурного поля в горизонтальном резервуаре с использованием разработанной сетки с температурными датчиками. Диаметр сетки равен диаметру экспериментального резервуара, а шаг между датчиками составлял 200 мм. При проведении эксперимента исключалось

воздействие солнечного света. Начальная температура бензина составляла 25°C при температуре окружающей среды 28-32°C. Анализ полученных данных выявил наличие разницы температуры по объему бензина в резервуаре. За счет теплообмена от стенок резервуара к топливу происходит прогрев топлива на расстояние 20 мм. Газовое пространство прогревается до температуры окружающей среды и нагревает поверхность топлива на глубину 20 мм. Все это приводит к возникновению конвективных токов, которые способствуют ускоренному испарению легкокипящих фракций топлива.

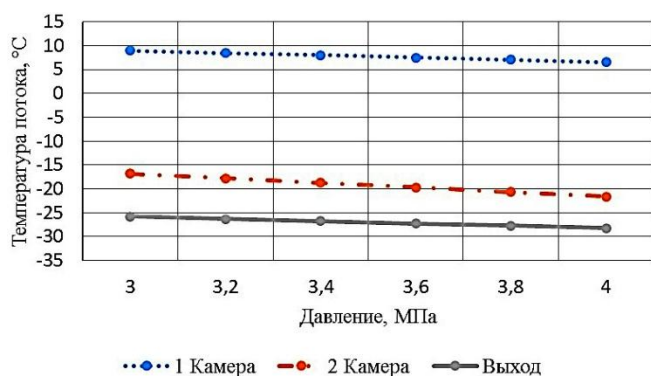


Рисунок 16 – Изменение температуры по секциям вихревого модуля при давлении на входе от 3 до 4 МПа

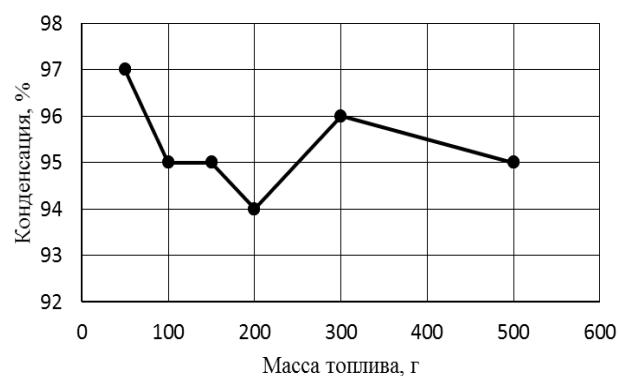


Рисунок 17 – Масса бензина, сконденсированная в вихревом модуле

Оценена эффективность работы вихревого модуля, который обеспечивает конденсацию углеводородов из паровоздушной смеси резервуара. Проведены эксперименты на лабораторной установке по измерению параметров качества дизельного топлива и бензина при хранении в резервуаре, в зависимости от их испарившейся массы, при работающем и выключенном вихревом модуле (таблица 5). Для экспериментального резервуара 1% испарившейся массы бензина равен 1,55 кг. За время его испарения через дыхательный клапан прошел объем парогазовой смеси равный 364 литрам.

Таблица 5 – Изменение параметров бензина АИ-92 при его хранении с выключенным и работающим вихревым модулем

Испарившаяся масса топлива, %	Фракционный состав						Содержание воды, мас. %		Концентрация фактических смол, мг/100 см <sup>3</sup>		Содержание механических примесей, мас. %	
	Вихревой модуль выкл.			Вихревой модуль вкл.			Вихревой модуль выкл.	Вихревой модуль вкл.	Вихревой модуль выкл.	Вихревой модуль вкл.	Вихревой модуль выкл.	Вихревой модуль вкл.
	10	50	90	10	50	90						
0	62	73	183	62	73	183	0	0	4,5	4,5	0	0
1	63	74	184	63	73	184	0	0	5	5	0	0
2	64	75	185	60	74	182	0	0	9	5	0	0
3	67	78	188	61	74	182	0,1	0	12	5	0,01	0
4	70	81	191	60	74	182	0,2	0	15	5	0,01	0
5	77	88	198	61	73	182	0,4	0	21	5	0,02	0

Исследования показали, что при хранении бензина снижаются его показатели качества: утяжеляется фракционный состав, происходит загрязнение топлива за счет его обводнения и попадания механических примесей в результате чего показатели качества топлива не отвечают требованиям нормативно-технической документации, тем самым топливо становится некондиционным при полном заполнении экспериментального резервуара на пятый месяц хранения, а при 50% заполнении – на третий месяц хранения.

Изменение параметров обусловлено контактом с внешней средой за счет дыханий резервуаров и испарением топлива, в первую очередь легких фракций. При возврате в резервуар конденсата топлива из вихревого модуля измеряемые показатели качества дизельного топлива и бензина остались на первоначальном уровне.

Глава содержит результаты экономической оценки применения разработанных технических устройств сокращения потерь топлива от испарения: вихревого конденсатора блочно-модульного построения. Внедрение разработанных технологий позволит достичь экономического эффекта до 22,60 млн. руб. в первый год их эксплуатации на примере выбранного муниципального района.

**В шестой главе «Разработка метода оценки качества моторного топлива при его хранении с применением нейронной сети»** приведено описание внешней среды, в которой находится резервуар с топливом и процессов испарения/конденсации топлива в нем, сформирован перечень критериев для построения и обучения нейросетевой модели.

Разработан метод прогнозирования нейронной сетью количества испарившегося топлива при хранении. В интерпретации зависимости испарения топлива при хранении от параметров окружающей среды, размеров резервуара и количества бензина в нем, запишем базисное уравнение нейронной сети в виде:

$$G = F(w_R R + w_m m + \sum w_\Psi \cdot \Psi), \quad (21)$$

где  $F$  – функция активации нейрона;  $\Psi$  – переменные окружающей среды;  $R$  – параметры резервуара;  $m$  – масса топлива в резервуаре (кг);  $w_R, w_m, w_\Psi$  – весовые коэффициенты резервуара, массы топлива и среды соответственно. Нейронная сеть строилась по формализованному методу проектирования архитектуры.

С учетом гиперболического тангенса в качестве функции активации нейрона уравнение (21) нейронной сети, описывающее испарение бензина при хранении в резервуаре, запишется в виде:

$$G = 1,7159 \cdot \text{th} \left( \frac{2}{3} \cdot \left( w_0^{\mu,j} + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot R + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot m + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot \Psi \right) \right) \quad (22)$$

После обучения построенной нейронной сети результаты ее работы по расчету испарения сравнили с экспериментальными данными. Точность расчета потерь при хранении бензина в горизонтальных наземных резервуарах емкостью менее 100 м<sup>3</sup> с применением нейронной сети составила 98%.

Для наглядности, на рисунке 18 представлено сравнение расчётных и фактических потерь бензина от испарений при его хранении в Центральном федеральном округе с различным уровнем заполнения резервуара объемом 3 м<sup>3</sup>.

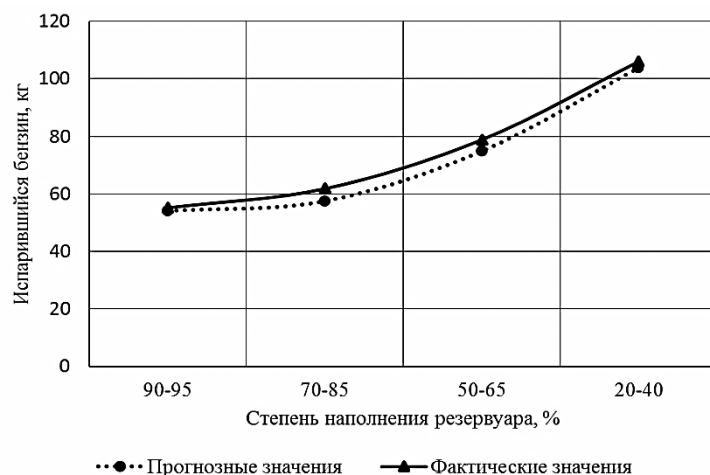


Рисунок 18 – Сравнение расчётных и фактических потерь бензина от испарений при хранении с различным наполнением резервуара объемом три кубометра в Центральном федеральном округе

Для расчета количества испарившегося топлива в терминах «умного» нефтесклада разработан метод построения каскада нейронных сетей, который предполагает взаимодействие с облачным хранилищем и виртуальными датчиками. По данным таблицы 6 построен граф (рисунок 19) взаимозависимости параметров всей системы.

Таблица 6 – Взаимозависимости параметров модели для построения графа

Область получения информации	Номер графа	Показатель	Ребра графа
Внешние данные	1	Атмосферное давление, Па	5
	2	Температура окружающей среды, °С	6,7
	3	Скорость ветра, м/с	6,7
	4	Относительная влажность воздуха, %	6,7
Данные на основе нейросети	5	Давление газового пространства, Па	12
	6	Температура топлива, °С	12
	7	Температура газового пространства, °С	12
	8	Объем топлива в резервуаре, м <sup>3</sup>	5,6,7,12
Исходные параметры	9	Время, мес.	11
	10	Объем резервуара, м <sup>3</sup>	5,6,7,8
	11	Приход топлива, м <sup>3</sup>	8
Выходные параметры	12	Количество испарившегося топлива, кг	

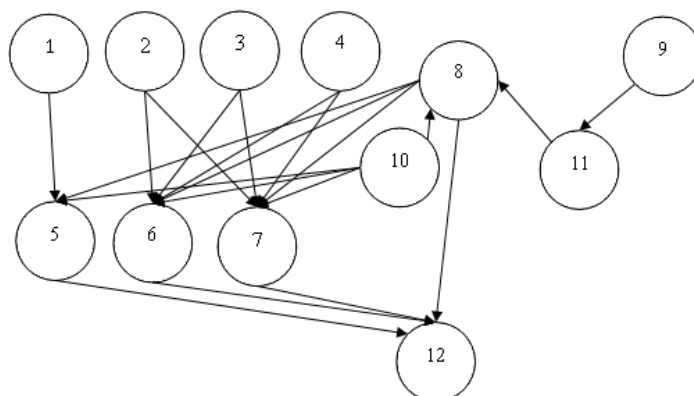


Рисунок 19 – Граф взаимозависимости параметров модели системы

Анализируя полученный граф, приходим к выводу, что для получения искомого количества испарившегося топлива на вход нейронной сети достаточно подать данные с виртуальных датчиков.

На вход виртуальных датчиков на основе нейронной сети подаются переменные окружающей среды из облачного хранилища данных и известные параметры резервуара, начальное количество топлива, временной ряд его расхода.

Получен помесичный расчёт потерь от испарения при помощи разработанной каскадной нейронной сети. Точность расчета по разработанной методике составляет 98%, что подтверждает способность нейронной сети описать процесс испарения бензина из горизонтального цилиндрического резервуара. Предложенный метод позволит проводить мониторинг эксплуатационных свойств топлива на протяжении всего времени его хранения.

Разработан метод оценки параметров качества топлива при хранении с применением нейронной сети. Полученную модель нейронной сети можно записать в виде уравнения (на примере оценки октанового числа и температуры отгонки 10% фракции бензина):

$$G = 1,7159 \cdot \text{th} \left( \frac{2}{3} \cdot \left( w_0^{\mu,j} + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot \bar{R} + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot m + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot \Psi + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot \text{ОЧ} + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot T10 \right) \right), \quad (23)$$

где, ОЧ – октановое число; T10 - температура 10% отгонки бензина;  $w_R, w_m, w_\Psi, w_{\text{ОЧ}}, w_{T10}$  - весовые коэффициенты октанового числа и температуры 10% отгонки бензина соответственно. Аналогично уравнения нейросетевой модели строятся для других параметров.

Запишем базисное уравнение нейронной сети для оценки изменения содержания воды в дизельном топливе:

$$G = F(w_R R + w_m m + \sum w_\Psi \cdot \Psi + w_B B), \quad (24)$$

где  $\Psi$  – переменные окружающей среды;  $R$  – параметры резервуара;  $m$  – масса дизельного топлива в резервуаре;  $B$  – масса воды в топливе;  $w_R, w_m, w_\Psi, w_B$  - весовые коэффициенты параметров резервуара, массы топлива, окружающей среды, воды соответственно;  $F$  – функция активации нейрона.

С учетом функции активации нейрона уравнение (24) нейронной сети, моделирующее накопление влаги дизельным топливом при хранении в резервуаре запишется в виде:

$$G = 1,7159 \cdot \text{th} \left( \frac{2}{3} \cdot \left( w_0^{\mu,j} + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot R + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot m + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot \Psi + \sum_{j=1}^{N_{\mu-1}} w_j^{(\mu,j)} \cdot B \right) \right) \quad (25)$$

Точность данного уравнения зависит от подбора весовых коэффициентов нейронов  $w$ , количества слоев  $M$  и нейронов в сети  $N$ .

После обучения построенной нейронной сети приведем полученные результаты расчета снижения качества топлива в зависимости от его испарения в таблице 7 и сравним с экспериментальными результатами.

Таким образом, точность определения качества хранимого дизельного топлива составляет до 98 %.

Таблица 7 – Накопление воды из атмосферы в экспериментальном резервуаре

Месяц	Объем дизельного топлива, л	Масса воды в резервуаре, г	Масса воды в резервуаре прогноз, г	Отклонение, %
Январь	195	0	0	0
Февраль	195	2	2	0
Март	195	3	4	33
Апрель	195	4	4	0
Май	195	12	11	8,3
Июнь	195	16	15	6,3
Июль	195	38	39	2,6
Август	195	50	47	6
Сентябрь	195	70	69	1,4
Октябрь	195	82	78	4,9
Ноябрь	195	88	89	1,1
Декабрь	195	90	89	1,1

Обучение разработанных нейронных сетей проведено на экспериментальных данных по изменению параметров топлива при его хранении главы 5. В таблице 8 представлены результаты точности расчета показателей качества дизельного топлива и бензина с применением нейросетевых моделей.

С применением нейронных сетей усовершенствован метод расчета теплоотдачи от стенок резервуара топливу.

Результаты сравнения расчетов температуры топлива у стенки резервуара по классическому уравнению Фурье и с применением нейронной сети показаны на рисунке 20.

Таблица 8 – Точность оценки показателей качества топлива с применением нейросетевых моделей при его хранении

Параметр качества	Точность оценки для бензина, %	Параметр качества	Точность оценки для дизельного топлива
Фракционный состав	96,6	Фракционный состав	97,5
Октановое число	97,5	Цетановое число	-
Содержание воды, мас. %	98	Содержание воды, мас. %	97
Концентрация фактических смол, мг/100 см <sup>3</sup>	97	Кинематическая вязкость при 20°C, мм <sup>2</sup> /с (сСт)	96
Содержание механических примесей, мас. %	99	Содержание механических примесей, мас. %	97,6

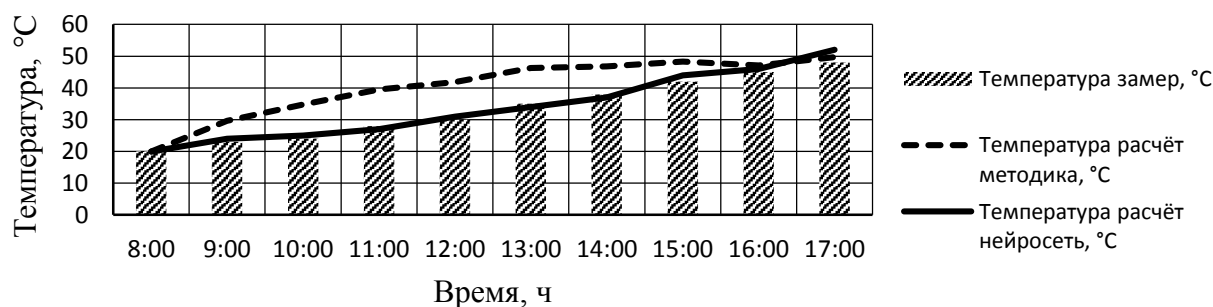


Рисунок 20 – Результаты экспериментальных и расчётных значений температуры бензина в резервуаре



Нейронная сеть показывает более точные результаты расчета за счет добавления в свою модель фактора  $\Psi$  – переменных окружающей среды. Это позволяет учитывать, например, относительную влажность воздуха, скорость ветра, атмосферное давление.

Средняя точность расчетов по методике составляет 93%, средняя точность при расчете нейронной сетью составила 99%.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ научно-технической, патентной и специальной литературы позволил оценить состояние резервуарного парка сельхозтоваропроизводителей. Выявлено, что на сельскохозяйственных нефтескладах применяются преимущественно наземные горизонтальные цилиндрические резервуары. На долю резервуаров вместимостью 3 и 5 м<sup>3</sup> приходится 50%; 10 м<sup>3</sup> – составляют 20%; 25 м<sup>3</sup> и 50 м<sup>3</sup> – соответственно, 16% и 7%, на долю 75 м<sup>3</sup> приходится не более 7%. Для данных типов резервуаров не существует эффективных технических средств для снижения потерь топлива. Расхождение результатов расчета потерь топлива по нормам естественной убыли с фактическими потерями при хранении на сельских нефтескладах составляет 1,7 и более раз.

2. Выявлены факторы, влияющие на величину испарения. К одному из факторов относится наличие разницы температуры по высоте резервуара в течение суток, который достигает 10°C. Наличие градиента температуры приводит к неравномерному нагреву топлива, возникновению конвективных токов, за счет которых происходит вытеснение и испарение в первую очередь наиболее ценных легких фракций углеводородного топлива.

3. По разработанным математическим моделям физико-химических процессов, происходящих при хранении моторных топлив установлена взаимосвязь процесса испарения и окисления моторного топлива, а также их однородность в цикле фазовых переходов первого рода. Установлено, что для резервуара 25 м<sup>3</sup>, заполненного на 50%, кислород, находящийся в газовом пространстве над бензином, способен окислить 46,88 моль бензина, что приводит к дополнительному испарению 1762,7 г. топлива. Выявлено, что в результате протекания реакций окисления произойдет не только ухудшение качества топлива, но и на 2% увеличатся потери топлива в результате испарения.

4. Разработан метод расчета потерь моторного топлива от испарения с изменяемой площади поверхности в стальных наземных горизонтальных резервуарах. По предложенному методу выполнен расчет при заполнении горизонтальных емкостей вместимостью от 3 до 75 м<sup>3</sup> до уровня 90%. Выявлено, что нормативные потери меньше в 1,7 раза для холодного периода и в 1,9 раза в теплый период. Таким образом, нормативы естественной убыли дают очень усредненные данные о потере нефтепродуктов при хранении. Поэтому для точного определения потерь моторного топлива от испарения при хранении в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах необходимо использовать полученные в работе расчетные зависимости.

5. Изготовлены опытно-промышленные образцы ступенчатого блока вихревых труб, выполнено математическое моделирование и теоретическое обоснование конструкции. Проведены лабораторные исследования конструктивно-режимных параметров работы вихревого модуля: при давлении 5 МПа на входе в модуль при ступенчатом соединении двух вихревых труб генерируется температура холодного потока воздуха на выходе до минус 46°C. На базе полученной конструкции разработан экологически безопасный и энергоэффективный конденсатор блочно-модульного построения. Опыты на экспериментальной установке выявили, что степень конденсации бензина в вихревом модуле достигает 97%.

6. Задачи снижения потерь моторного топлива при хранении носят многоплановый характер, решить которые с высокой точностью невозможно при «ручном» управлении резервуарным парком и нефтехозяйством. Разработана методология автоматизированных интеллектуальных систем на базе нейронных сетей, применение которых позволит обеспечить сельскохозяйственных товаропроизводителей безошибочным управлением средствами предотвращения потерь топлива. Разработана теоретическая база и сформирована концепция «умного» и «интеллектуального» нефтесклада для снижения потерь качества топлива при хранении в стальных горизонтальных резервуарах. Установлено, что нейронная сеть способна с точностью до 98% описать процессы при хранении топлива в горизонтальных наземных резервуарах емкостью менее 100 м<sup>3</sup>.

7. Разработан метод оценки качества хранимого топлива в наземных горизонтальных цилиндрических резервуарах с применением нейронной сети. Точность оценки параметров качества бензина по предложенному методу составляет 99%, дизельного топлива до 97%.

8. Внедрение разработанных технологий и технических средств позволит достичь экономического эффекта до 22,60 млн. руб. в первый год их эксплуатации на примере выбранного муниципального района Липецкой области.

### **Рекомендации производству**

Для снижения количественных и качественных потерь моторного топлива при хранении в наземных горизонтальных резервуарах предлагается устанавливать на них вихревой модуль для конденсации и возврата углеводородов при суточном колебании температуры. Применение указанного технического устройства в совокупности с программными средствами и концепцией «умного» нефтесклада обеспечит устойчивую работу нефтехозяйства.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Основные тенденции и перспективы для дальнейшей разработки темы: разработка рекомендаций по сохранению качества топлива от загрязнений механическими примесями, снижение доли подтоварной воды, предотвращение коррозии стенок резервуара. Проведение цифровой трансформации сельскохозяйственных нефтескладов.

**По результатам выполненных исследований опубликовано 46 работ, в том числе:**

***В изданиях Scopus, Web of Science:***

1. Levin M.Yu. Concept of “smart” oil storage facility for agricultural purposes [Text] / Nagornov S.A., Levin M.Yu., Levina E.Yu. // BIO Web of Conferences Volume 17 (2020) International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019). DOI <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700176>. (WoS)

2. Levin M.Yu. The boundary state method in solving the anisotropic elasticity theory problems for a multi-connected flat region [Text] / Levin M.Yu, Ivanychev D.A., Levina E.Yu. // Test Engineering and Management, USA, Mattingley Publishing Co., Inc.. November-December 2019. p. 4421-4426. (Scopus)

3. Levin M.Yu. The method of constructing a neural network cascade for simulating virtual sensors in the concept of "smart" oil storage facility for agricultural purposes [Text] / Levin M.Yu., Levina E.Yu., Nagornov S.A. 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). p. 658-662 (Scopus)

***В журналах, рецензируемых и рекомендованных ВАК РФ:***

4. Левин М.Ю. Метод расчета потерь топлива при заполнении наземных горизонтальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2019. – № 5 (41). – С. 119-125.

5. Левин М.Ю. Совершенствование технологии хранения светлых нефтепродуктов с использованием интеллектуального нефтесклада [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С. 84-91.

6. Левин М.Ю. Сокращение потерь топлива при заполнении наземных горизонтальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2019. – № 1 (37). – С. 99-103.

7. Левин М.Ю. Исследование температурного поля в наземном горизонтальном цилиндрическом резервуаре [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2019. – № 1 (37). – С. 103-107.

8. Левин М.Ю. Совершенствование методики расчета потерь моторного топлива от испарения [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 125, № 11. – С. 444 – 447.

9. Левин М.Ю. Расчет потерь моторного топлива от испарения с изменяемой поверхности [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Романцова С.В. // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). – С. 77-84.

10. Левин М.Ю. Использование вихревых систем для сохранения качества моторного топлива [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2017. – № 3 (27). – С. 101-112.

11. Левин М.Ю. Особенности процесса испарения топлива из наземных горизонтальных резервуаров [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2017. – № 4 (28). – С. 121-130.

12. Левин М.Ю. Управление рисками при хранении светлых нефтепродуктов с применением нейронных сетей [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2017. – № 1 (25). – С. 79-86.

13. Левин М.Ю. Модель рассеяния неоднородного потока атмосферного воздуха для расчета зоны испарения топлива при его хранении [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2017. – № 1 (25). – С. 86-90.

14. Левин М.Ю. Формализация алгоритма проектирования архитектуры нейронных сетей на практике [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2016. – № 1 (19). – С. 81-87.

15. Левин М.Ю. Новый метод анализа состояния упругого тела от массовых сил, порождаемых нанодисперсными магнитными жидкостями [Текст] / Пеньков В.Б., Левина Л.В., Левин М.Ю., Кузьменко Н.В. // Наука в центральной России. – 2016. – № 2 (20). – С. 12-16.

16. Левин М.Ю. Влияние архитектуры многослойной персептронной нейронной сети на результаты прогноза стабильности водно-биотопливной эмульсии [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Естественные и технические науки. – 2015. – № 4 (82). – С. 137-140.

17. Левин М.Ю. Моделирование течения жидких сред в процессе механоактивации [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 4. – С. 136-138.

18. Левин М.Ю. Прогнозирование показателей качества водно-биотопливной эмульсии с применением нейронных сетей [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1. – С. 156-161.

19. Левин М.Ю. Сохранение качества биодизельного топлива за счет совершенствования технологии его хранения [Текст] / Левин М.Ю., Зазуля А.Н., Нагорнов С.А. // Технология колесных и гусеничных машин. – 2014. – № 5. – С. 48-53.

20. Левин М.Ю. Показатели испаряемости композитного органического топлива [Текст] / Романцова С.В., Пашинин В.А., Левин М.Ю. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17. № 1. – С. 342-344.

***Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:***

21. Патент № 2592801 РФ, МПК ВО1F 13/10. Комбинированный статический смеситель- активатор / Нагорнов С.А., Левина Е.Ю., Левин М.Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. – № 2015144399, заяв. 23.06.2015; опублик. 27.07.2016. Бюл. № 21. – 7 с.: ил.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660610. Система автоматизированного управления горизонтальными резервуарами на нефтескладе / М.Ю. Левин, С.А. Нагорнов; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. опублик. от 22.09.2017.

**Монографии:**

23. Левин М.Ю., Левина Е.Ю. Совершенствование методов и технических средств для снижения потерь моторного топлива при хранении. – Липецк: Колор, 2020. – 272 с.

**В других изданиях и материалах конференций:**

24. Левин М.Ю. Применение цифрового интеллектуального управления нефтескладом для защиты резервуаров от аварий [Текст] / Левин М.Ю., Нагор-

нов С.А., Левина Е.Ю. // Технический сервис машин. – 2019. – № 1 (134). – С. 53-60.

25. Левин М.Ю. Интеллектуализация сельских нефтескладов [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Калинин В.Ф. // В сборнике: Транспорт, экология - устойчивое развитие. Сборник докладов XXIV научно-технической конференции с международным участием. – 2018. – С. 57-64.

26. Левин М.Ю. Концептуальные основы создания интеллектуальных нефтескладов сельскохозяйственного назначения [Текст] / Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Левин М.Ю. // В сборнике: Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТТ'2018 Материалы I международной научно-практической конференции. В 2-х томах. – 2018. – С. 124-128.

27. Левин М.Ю. Прогнозирование испарения бензина при хранении при переходе к виртуально-облачной схеме автоматизации [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2018. – № 6 (36). – С. 78-87.

28. Левин М.Ю. Физико-математическая модель механоактивации вязкой жидкости [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2015. – № 2 (14). – С. 77-80.

29. Левин М.Ю. Оптимизация состава водно-био-топливной эмульсии с применением нейронных сетей [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2015. – № 3 (15). – С. 68-75.

30. Левин М.Ю. Белое топливо для двигателя [Текст] / Воробьев Ю.В., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю., Левин М.Ю. // Наука в центральной России. – 2015. – № 4 (16). – С. 76-86.

31. Левин М.Ю. Математическая модель механоактивации для невязких жидких сред [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Потенциал современной науки. – 2015. – № 3 (11). – С. 34-40.

32. Левин М.Ю. Расчет остаточного ресурса технических устройств в рамках проведения экспертизы промышленной безопасности [Текст] / Вдовенко Е.Е., Тресков А.Н., Колинченко Д.А., Левин М.Ю. // Потенциал современной науки. – 2015. – № 6 (14). – С. 37-40.

33. Левин М.Ю. Синтез компонента дизельного топлива, улучшающего его экологические характеристики [Текст] / Зазуля А.Н., Романцова С.В., Левин М.Ю. // Наука в центральной России. – 2014. – № 4. – С. 27-34.

34. Левин М.Ю. Методы математического моделирования процессов получения биодизельного топлива [Текст] / Зазуля А.Н., Романцова С.В., Левин М.Ю., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2014. – № 4. – С. 64-84.

35. Левин М.Ю. О Возможности применения эффекта коанда в вихревых трубках [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2014. – № 8. – С. 57-61.

36. Левин М.Ю. Критерии выбора архитектуры нейронной сети для прогнозирования показателей качества биодизеля [Текст] / Левин М.Ю. // Наука в центральной России. – 2013. – № 3. – С. 72-76.

37. Левин М.Ю. Выбор компактного пластинчато-ребристого теплообменного аппарата [Текст] / Левин М.Ю. // Наука в центральной России. – 2013. – № 4. – С. 71-75.

38. Левин М.Ю. Влияние архитектуры многослойной персептронной сети на результаты прогноза параметров качества биодизеля [Текст] / Левин М.Ю., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2013. – № 4. – С. 75-77.

39. Левин М.Ю. Анализ влияния архитектуры нейронной сети при прогнозировании показателей качества биодизеля [Текст] / Левина Е.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2013. – № 2. – С. 5-9.

40. Левин М.Ю. Концептуальные принципы создания интеллектуальных нефтескладов сельскохозяйственного назначения [Текст] / Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Левин М.Ю., Калинин В.Ф. // В сборнике: Цифровизация агропромышленного комплекса Сборник научных статей. – 2018. – С. 132-134.

41. Левин М.Ю. Технология получения смесового моторного топлива [Текст] / Нагорнов С.А., Корнев А.Ю., Левин М.Ю., Калинин В.Ф., Романцова С.В., Улюкина Е.А. // В сборнике: Цифровизация агропромышленного комплекса Сборник научных статей. – 2018. – С. 89-91.

42. Левин М.Ю. Концепция виртуально облачной системы автоматизации резервуарного парка [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2018. – № 5 (35). – С. 82-88.

43. Левин М.Ю. Вопросы экологической и промышленной безопасности при хранении светлых нефтепродуктов [Текст] / Левин М.Ю. // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – № 6 (28). – С. 10-13.

44. Левин М.Ю. Обеспечение промышленной безопасности при хранении светлых нефтепродуктов [Текст] / Левин М.Ю. // Потенциал современной науки. – 2016. – № 5 (22). – С. 25-30.

45. Левин М.Ю. Особенности хранения композитного моторного топлива в условиях сельских нефтескладов [Текст] / Романцова С.В., Корнев А.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Сборник трудов VI международная научно-практическая конференция: «Инновационные технологии в науке и образовании» «ИТНО-2018». – С. 56-61.

46. Левин М.Ю. Прогнозирование испарения моторного топлива при хранении с применением нейронных сетей [Текст] / Романцова С.В., Корнев А.Ю., Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Сборник трудов VI международная научно-практическая конференция: «Инновационные технологии в науке и образовании» «ИТНО-2018». – С. 56-61.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
Подписано в печать 29.03.2021 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>,  
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 2,2. Тираж 100 экз. Ризограф  
Заказ № 20591

---

Издательско-полиграфический центр  
Мичуринского государственного аграрного университета  
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,  
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб. 211

