

На правах рукописи



МИКЕРИН Никита Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ЗАГРУЗКОЙ АДСОРБЕРА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ТОПЛИВНОГО
БАКА АВТОМОБИЛЕЙ С ПОДКЛЮЧАЕМОЙ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ
УСТАНОВКОЙ**

Специальность 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации - Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»).

Научный руководитель доктор технических наук
Тер-Мкртчян Георг Георгович
(ФГУП «НАМИ»)

Официальные оппоненты: **Драгомиров Сергей Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Тепловые двигатели и энергетический
установки» ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых»

Слепцов Олег Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Комбинированные двигатели и альтернативные
установки» ФГАОУ ВО «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»**

Защита состоится «14» мая 2025 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: <https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «28» февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные исследования в области системы вентиляции топливного бака и системы хранения топлива направлены на поиск и внедрение технологий, которые позволяют транспортному средству выполнить самые строгие требования экологической безопасности при сохранении эффективных показателей на высоком уровне. Один из путей достижения такой цели является поиск технических решений для закрытой системы вентиляции топливного бака.

Преимущество такой системы над традиционной заключается в том, что автомобильный адсорбер, который служит для улавливания углеводородов, сгенерированных в топливном баке транспортного средства может загружаться дискретно, позволяя значительно снизить его загрузку. Это происходит за счет того, что топливный бак автомобиля работает под определенным избыточным давлением и свободного испарения в адсорбер не происходит. В данной системе, при достижении давления насыщенных паров топлива, часть углеводородов начинает конденсироваться и из парообразного состояния переходить в жидкую фазу. Как следствие, адсорбер в транспортном средстве работает более эффективно, значительно увеличивается время работы автомобиля до полной загрузки адсорбера, отсутствует запах топлива у автомобиля и повышается экологическая безопасность.

Такие технические решения особенно актуальны для городского транспорта с подключаемой гибридной силовой установкой *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV). Двигатели в таких автомобилях работают только когда заряжают аккумулятор, соответственно продувать адсорбер не получается на протяжении всего времени работы автомобиля, а топливо в баке испаряется постоянно.

Степень проработанности темы исследования. Развитые страны с каждым годом снижают допустимый показатель выбросов в результате испарения топлива. Например, в США и Китае этот выброс, составляет 0,35 г/72 ч. Автомобили, которые будут продаваться в этих странах должны быть укомплектованы системой улавливания паров при заправке *Onboard refueling vapor recovery* (ORVR). Эта система не позволяет парам топлива попасть в атмосферу при заправке, она направляет их в адсорбер. В Российской Федерации, разрешенный выброс в результате испарения топлива не должен превышать 2 г/24 ч. Отсутствует обязательная установка системы ORVR и система диагностики.

Методики расчетов, испытаний и проектирования представляют коммерческую тайну компаний-разработчиков, поэтому, в открытом доступе их не найти. Разработка таких систем активно ведется зарубежными инжиниринговыми центрами. В отечественной науке на тему исследования мало статей, методик расчета и испытаний.

Всё вышеизложенное подтверждает, что выбранная тема исследования «Разработка методов расчета и алгоритмов управления загрузкой адсорбера систем вентиляции топливного бака автомобилей с подключаемой гибридной силовой установкой» является актуальной.

Целью диссертационного исследования – является предложение технических решений и рекомендаций по оптимизации методов расчета и алгоритмов управления загрузкой адсорбера системы вентиляции топливного бака автомобилей с подключаемой гибридной установкой с целью снижения выбросов в результате испарения.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Анализ исследований в области существующих методов расчета и оптимизации алгоритмов управления систем вентиляции топливного бака.

2. Разработка энергетической модели топливного бака и описание процессов нестационарного теплообмена для установившихся режимов работы при постоянной массе топлива.

3. Проведение теоретических и расчетных исследований по определению оптимальных методов и алгоритмов управления системами вентиляции топливного бака с целью обеспечения требований перспективных экологических стандартов уровня 2025...2030 г..

4. Разработка математических моделей систем вентиляции топливного бака.

5. Анализ процессов, протекающих в закрытой системе вентиляции топливного бака автомобиля, и существующих подходов их численного моделирования.

6. Проведение экспериментальных исследований для подтверждения на практике теоретических результатов по определению оптимальных методов и алгоритмов управления системами вентиляции топливного бака.

7. Проведение экспериментов в лабораторных условиях с последующей верификацией разработанных математических моделей.

8. Разработка технических решений и рекомендаций по оптимизации систем вентиляции топливного бака для семейства отечественных автомобилей.

9. Формирование рекомендаций к конструктивным параметрам и оптимальным техническим решениям компонентов закрытой системы вентиляции топливного бака на ранних этапах проектирования.

Объектом исследования является система вентиляции топливного бака автомобиля.

Предметом исследования является влияние нестационарных процессов, протекающих внутри системы хранения и вентиляции топлива на эффективные, потребительские и экологические показатели транспортного средства.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные, основанные на использовании основных положений теории газовой динамики, термодинамики, современных численных методов математического моделирования. Исследование проведено с использованием программного комплекса Simcenter Amesim.

Проведение комплекса экспериментальных исследований в сертифицированной лаборатории на безмоторном стенде НАМИ, для насыщения

автомобильного адсорбера, исследование системы вентиляции автомобиля в климатической камере.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана новая комплексная энергетическая модель термодинамической системы «топливный бак автомобиля», учитывающая процессы нестационарного теплообмена при постоянной массе топлива.

2. Разработаны подходы для моделирования процессов в системе вентиляции топливного бака для автомобилей с подключаемой гибридной силовой установкой и методы расчета генерации испарений для открытой и закрытой системы вентиляции топливного бака, которые отличаются применением расчетно-экспериментальных характеристик узлов/компонентов для повышения точности определения генерации испарений.

3. Разработаны алгоритмы оптимального управления клапаном изоляции топливного бака *Fuel tank isolation valve* (FTIV), в том числе для подключаемой гибридной силовой установки, отличающиеся более эффективным менеджментом топливных испарений в системе вентиляции топливного бака.

Практическая ценность работы: Результаты исследования применены в автомобилях проекта ЕМП, в том числе для разрабатываемого автомобиля с подключаемой гибридной силовой установкой (PHEV).

На защиту выносятся:

1. Энергетическая модель топливного бака автомобиля, описывающая процессы нестационарного теплообмена при постоянной массе топлива для установившихся режимов работы.

2. Методика расчета системы вентиляции топливного бака автомобиля углеводородами для открытой и закрытой системы вентиляции топливного бака.

3. Алгоритм управления загрузкой адсорбера клапаном изоляции топливного бака для закрытой системы вентиляции.

Реализация работы. Основные положения работы применяются в ЗАО «Производственная компания Автокомпонент Нижний Новгород» и ООО ПКК «Ферроплюс» в опытно-конструкторских работах по разработке систем вентиляции топливного бака.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушаны и обсуждены на: международных научных форумах МАНФ-2020 (г. Москва), МАНФ-2022 (г. Москва); всероссийской научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова 2023 (г. Самара); 113-ой международной научно-технической конференции ААИ 2022 (г. Дмитров); 9 Луканинских чтениях 2021 (г. Москва), 10 Луканинских чтениях 2023 (г. Москва); Всероссийской школе молодых ученых «Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики» 2024 (г. Севастополь).

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 печатных работ в научных журналах, сборниках и изданиях, из которых 5 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на

соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и 2 работы в изданиях, индексируемых Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, общих выводов, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы с приложением составляет 166 страниц машинописного текста, включая 127 рисунков, 16 таблиц, 81 формул, список использованных источников включает 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта проблематика и обоснована актуальность темы диссертационной работы, а также отражены положения научной новизны, выносимые на защиту, и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе дан обзор архитектур систем улавливания паров топлива, рассмотрен и проанализирован мировой и отечественный опыт в области исследований улавливания топливных испарений, расчетных методик определения поглощающей способности адсорбера, технических решений ведущих автопроизводителей, экспериментальных исследований загрузки адсорбера топливными испарениями, которые определяют цель и основные задачи исследования. Большой вклад в развитие экологической безопасности транспортных средств внесли отечественные и зарубежные исследователи, ученые, в том числе: С.Н. Девянин, А.Ю. Дунин, А.В. Козлов, В.Ф. Кутенев, В.А. Лиханов, В.А. Марков, Г.Г. Надарейшвили, А.М. Сайкин, Г.Г. Тер-Мкртчян, А.С. Теренченко, В.М. Фомин, М.Г. Шатров, А.Л. Яковенко, В.И. Панчишный, С.Г. Драгомиров, О.Н. Слепцов, L. Romagnuolo, S. Reddy и многие другие.

Обозначена проблема исследования – необходимость в совершенствовании и обновлении отечественных методик расчета и испытаний системы вентиляции топливного бака. В рамках данной проблемы были проанализированы следующие методики:

- генерации углеводородов в топливном баке при росте температуры топлива;
- истечение топливо-воздушной смеси (ТВС) из резервуара с разными площадями поперечного сечения компонентов системы вентиляции;
- загрузки автомобильного адсорбера парами топлива, критические скорости истечения ТВС из системы для полного улавливания углеводородов.

Расчеты по загрузке адсорбера проводятся ведущими инжиниринговыми центрами и автопроизводителями по методикам, которые они разработали на основании собственного опыта. Такие методики помогают рассчитать систему вентиляции на этапе эскизного проекта, тем самым избежать грубых ошибок при проектировании системы, и, соответственно, избежать излишних затрат.

Исследования проводятся, учитывая внешние факторы, воздействующие на систему вентиляции автомобиля, например, температура окружающей среды, температура подаваемой смеси, и прочее. Все описанные модели не учитывают, что ТВС генерируемая в топливном баке имеет разную концентрацию паров топлива при разных температурах топлива.

На основании проведённого анализа определена цель диссертационного исследования, на ее основании сформирован перечень основных задач исследования. Методология разрабатывается для автомобилей, оснащенных двигателем с искровым зажиганием. Объектом исследования являются системы вентиляции топливного бака, автомобилей оснащенными бензиновыми двигателями, в том числе для PHEV.

Вторая глава посвящена моделированию процессов, протекающих в системе вентиляции топливного бака и автомобильном адсорбере при его загрузке парами топлива. Пары возникают в результате испарения, в следствии увеличения температуры топлива внутри топливного бака.

Для того, чтобы представить общую картину распределения энергии в системе низкого давления топлива и выявления путей ее улучшения составим уравнение энергетического баланса. К топливу в баке энергия подводится от бензонасоса и от системы выпуска отработавших газов (СВОГ), а также частично отводится с потоком топлива, поступающего в двигатель (рис. 1)

Мощность, идущая на нагрев топлива в баке, определится из выражения:

$$N_T = N_э + N_B - N_D - N_{п}, \quad (1)$$

где: N_T – энергия, подведенная в топливный бак;

$N_э$ – энергия, переданная от бензонасоса;

N_B – энергия, переданная от системы выпуска отработавших газов;

N_D – энергия, переданная потоку топлива, поступающему в двигатель;

$N_{п}$ – энергия, затраченная на парообразование.

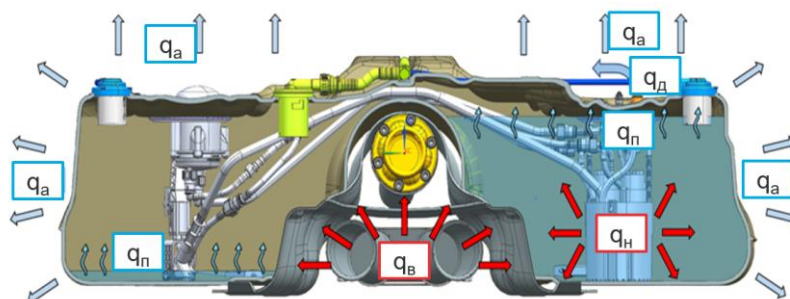


Рисунок 1 – Энергетический баланс системы топливный бак автомобиля

Уравнение энергетического баланса за время неустановившегося теплового процесса можно записать в следующем виде:

$$qd\tau = M_T c_T d(\Delta t) + K_a F_a \Delta t d\tau, \quad (2)$$

где: τ – время работы двигателя;

c_T – теплоемкость топлива (для бензина $c_m=2090$ Дж/кг $^{\circ}$ С);

K_a – коэффициент теплопередачи стенки бака вне зоны горячих частей;

F_a – площадь теплопередающей поверхности бака вне зоны горячих частей.

Дифференциальное уравнение нагрева топлива имеет вид:

$$\frac{d(\Delta t)}{d\tau} + \frac{K_a F_a}{M_T c_T} \Delta t - \frac{q}{M_T c_T} = 0. \quad (3)$$

По мере увеличения температурного напора Δt при нагреве топлива в баке энергия, рассеиваемая в окружающем пространстве, увеличивается. При определенной температуре стабилизации t_p обеспечивается такое состояние, при котором суммарный тепловой поток, подведенный к топливу, равен тепловому потоку, отводимому от бака в окружающую среду. Рост температуры топлива прекращается и наступает установившийся режим, характерный для равновесного процесса, и температурный напор становится равновесным.

Бензин в топливном баке испаряется только при условии, если компенсационный объем не насыщен парами топлива. То есть, парциальное давление паров в этом пространстве меньше давления насыщенных паров. После насыщения паров в компенсационном объеме испарение в закрытой системе завершается.

В топливном баке нет высоких скоростей воздушных потоков, которые могут повлиять на скорость испарения, поэтому, скорость испарения определяется исключительно скоростью диффузии паров в компенсационный объем.

Испарение имеет две составляющие – статическую и динамическую. Статическая составляющая испарений определяется исключительно процессом нагрева топлива, зависящим от изменения его температуры, и может с достаточной точностью быть определена аналитически. Динамическая составляющая – это испарения топлива за счет интенсивного перемешивания и разбрызгивания струйными насосами, регулятором давления, маневрами автомобиля и т.д.

Проведен сравнительный анализ двух принципиально разных подходов управления системы вентиляции топливного бака. Первый подход подразумевает топливный бак автомобиля, который сообщен с атмосферой. Режим загрузка адсорбера протекает в стандартном режиме. Выход сгенерированных испарений в атмосферу, представляется в виде пространства переменного объема, которое увеличивается по мере испарения топлива с поддержанием постоянного давления смеси, которое равно атмосферному давлению. Во-втором рассмотренном подходе, бак изолирован от атмосферы и работает под давлением. Загрузка адсорбера протекает дискретно, снижая давление внутри топливного бака до безопасного значения. Объем парового пространства бака и масса воздуха внутри, остаются постоянными. Давление смеси и определяется ростом давления насыщенных паров и увеличением давления воздуха в следствии нагрева.

В двух вариантах системы топливного бака, получаются различные уравнения генерации паров в топливном баке. Для открытой системы уравнение примет вид:

$$\frac{dM_{\Pi}}{M_{\Pi}} = \frac{dp_s}{p_s} + \frac{dV}{V} - \frac{dT}{T}. \quad (4)$$

Для изолированного бака уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{dM_{\Pi}}{M_{\Pi}} = \frac{dp_s}{p_s} - \frac{dT}{T}. \quad (5)$$

На рисунке 2 изображен график парообразования топлива в зависимости от его нагрева.

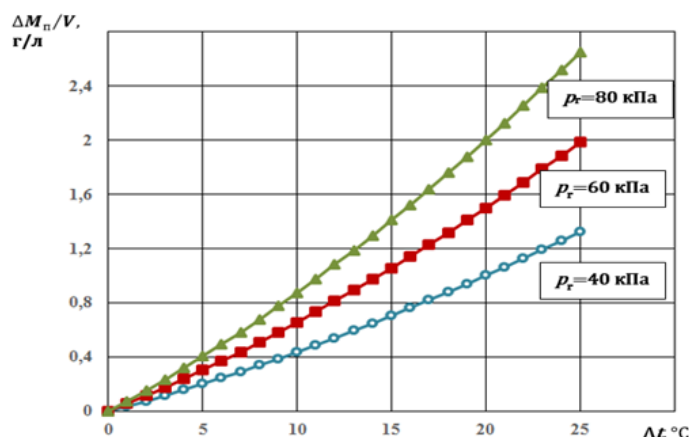


Рисунок 2 – Генерация испарений в зависимости от нагрева для топлив, с различным давлением насыщенных паров по Рейду

В случае открытой системы, что соответствует традиционному способу загрузки адсорбера, паровое пространство условно имеет переменный объем, увеличивающийся при генерации углеводородов (рис. 3а). Углеводороды свободно вытесняются из парового пространства бака в свободный объем, но в паровом пространстве, по-прежнему остается некоторое количество углеводородов.

Для снижения избыточного давления в баке, загрузку адсорбера можно производить дискретно. В таком случае, состояние смеси можно представить в следующих состояниях:

Состояние 0

Паровое пространство бака изолировано от атмосферы. Давление ТВС равно атмосферному давлению. Начинается нагрев топлива и ТВС. Масса паров увеличивается из-за испарения. Масса воздуха неизменна.

Состояние 1

Нагрев завершен. Вся смесь под избыточным давлением сосредоточена в паровом пространстве бака (рис. 3б). Открывается соединительный канал между баком и адсорбером, сообщенным с атмосферой.

Состояние 2

При переходе из состояния 1 в состояние 2 смесь распределяется между паровым пространством бака и условным объемом адсорбера. Происходит процесс изотермического расширения до атмосферного давления, при котором плотность насыщенных паров уменьшится в начальный момент времени и пары станут не насыщенными.

Состояние 3

Соединительный канал между баком и адсорбером закрывается. После этого, скорость испарения превысит скорость конденсации, и бензин с высокой скоростью будет испаряться до тех пор, пока опять не установится динамическое

равновесие. Пары снова становятся насыщенными с прежним значением плотности, соответствующей температуре топлива. При дальнейшем нагреве топлива ТВС переходит на новый уровень состояния 0 и процесс испарения возобновляется.

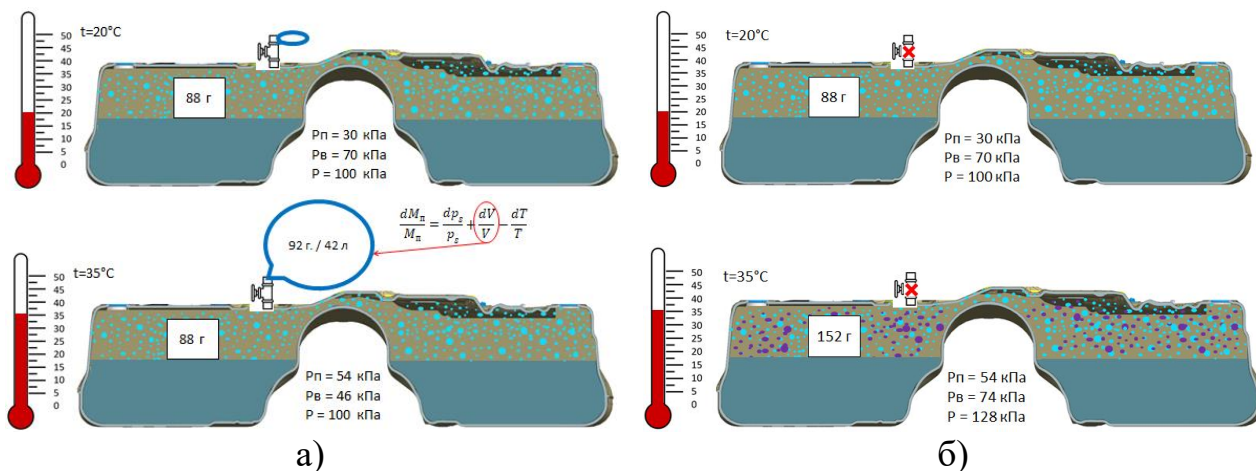


Рисунок 3 – Парообразование в топливном баке:

а) - пространстве изменяемого объема; б) - пространстве постоянного объема

На рисунке 4 показано изменение давления в топливном баке от нагрева топлива и давления насыщенных паров по Рейду.

Таким образом, переход от организации загрузки адсорбера с открытым паровым пространством к парообразованию в пространстве постоянного объема позволяет значительно уменьшить количество углеводородов, поступающих в адсорбер. Однако, при этом топливный бак находится под определенным избыточным давлением, что не всегда допустимо, особенно для пластиковых баков. Проблема может быть решена при дискретной, циклической загрузке адсорбера.

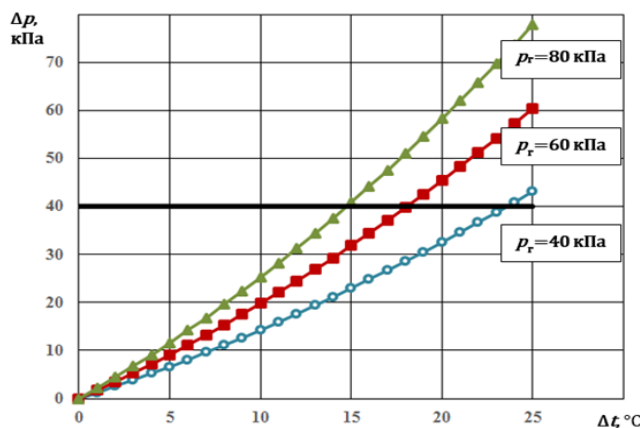


Рисунок 4 – Зависимость избыточного давления от нагрева и давления насыщенных паров по Рейду

С использованием программного комплекса Simcenter Amesim был выполнен комплекс расчетных исследований загрузки адсорбера (рис. 5).

При испарении топлива от нагрева бензонасосами и горячими элементами окружения состав ТВС в топливном баке меняется, этот показатель в модели задается переменной величиной. Был проведен цикл расчетных исследований процесса подвода углеводородов в двухкамерный адсорбер при испарении топлива вследствие суточных перепадов температур.

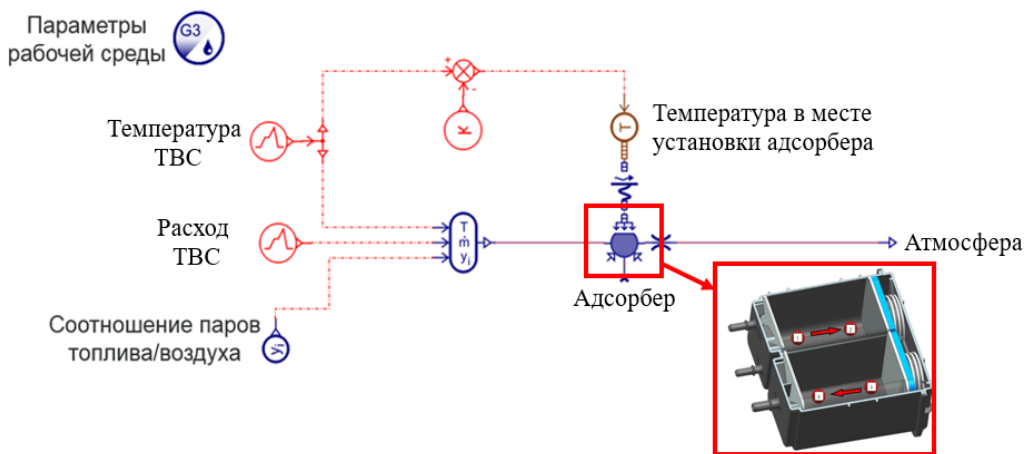


Рисунок 5 – Расчетная схема загрузки адсорбера в Simcenter Amesim

Количество паров, которые попадают в адсорбер, при нагреве топлива в баке зависит от размеров бака, объема, который занимают пары топлива и давления в топливном баке. Давление в топливном баке зависит от перепада температуры и характеристик топлива.

На рисунке 6 видно, что камеры адсорбера заполняются не поочередно. При заполнении камеры 1 на 50%, пары бензина уже начинают постепенно заполнять камеру 2. Максимальные значения температуры внутри угольного слоя сдвинуты по времени и соответствуют 80% заполнения каждой камеры.

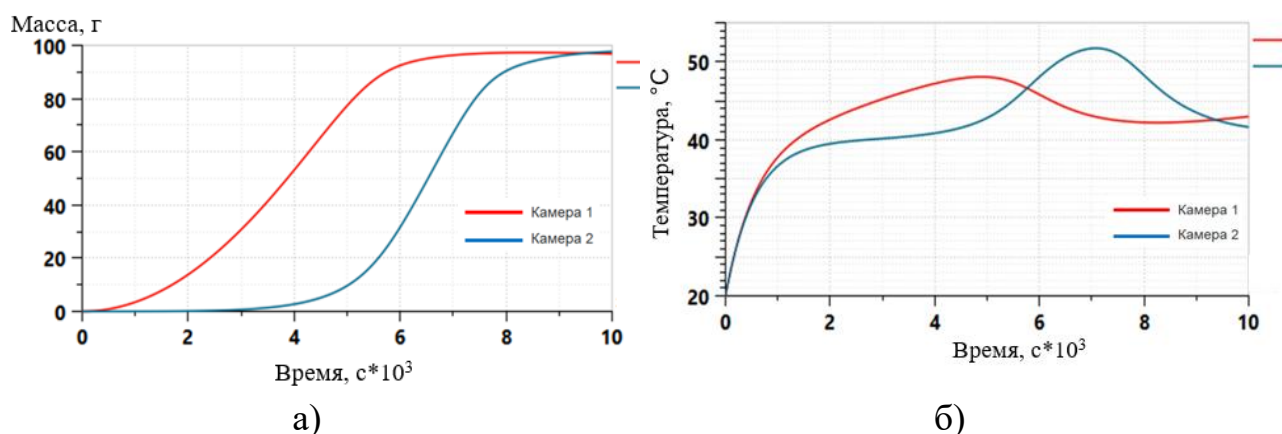


Рисунок 6 – Изменение в камерах адсорбера:
 а) – массы углеводородов б) - температуры

Проведен расчет влияния температуры окружающей среды на поглощающую способность адсорбера. Температура окружающей среды была задана в диапазоне от 0 до +80°C.

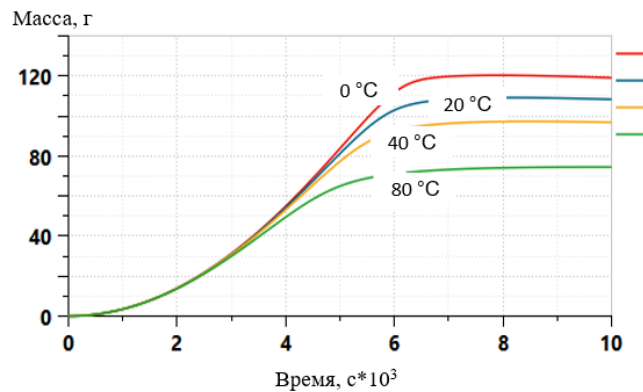


Рисунок 7 – Изменение поглощающей способности адсорбера в зависимости от температуры в месте установки

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований нагрева топливного бака и генерации испарения, истечения ТВС из резервуара для различных начальных давлений, насыщения автомобильного адсорбера углеводородами.

Для проведения комплекса исследований была изготовлена лабораторная установка для испытания системы вентиляции. Принципиальная схема стенда показана на рисунке 8.

Топливо в баке нагревалось автомобильным бензонасосом большой мощности. При нагреве, происходило испарение топлива, пары которого с переменной концентрацией по системе вентиляции попадали в адсорбер. При этом процессе фиксировались температуры в угольном слое и изменение массы адсорбера при его насыщении. Термопары в адсорбере расположены в центре объема угля, чтобы получить точное измерение температуры слоя.

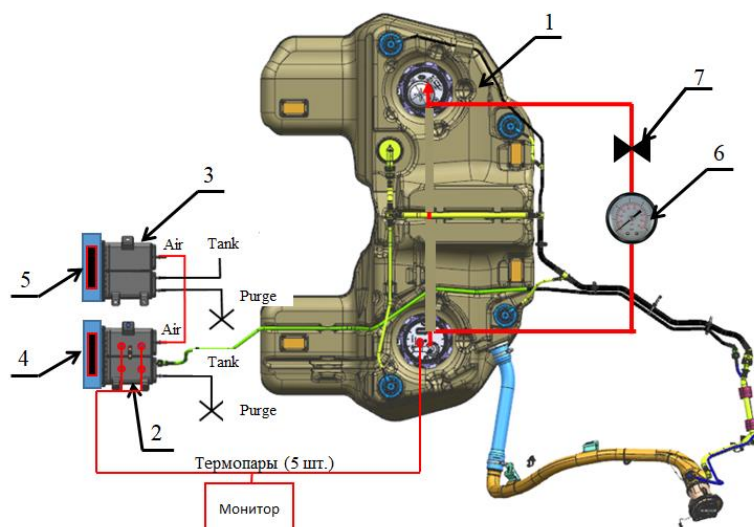


Рисунок 8 – Принципиальная схема стенда для насыщения адсорберов: 1– топливный бак; 2 – основной адсорбер; 3 – контрольный адсорбер; 4 – основные весы; 5 – контрольные весы; 6 - манометр; 7 – регулировочный вентиль; термопары 5 шт.

Фотография испытательного стенда и его отдельных элементов показана на рисунке 9. Нагрев топлива производился в стандартном автомобильном топливном баке.



Рисунок 9 – Испытательный стенд

Динамика изменения количества испарений определялась основным адсорбером, полное заполнение которого фиксировалось контрольным адсорбером, о чем свидетельствовало увеличение массы последнего на 2 грамма в соответствии с экологическим стандартом. В ходе экспериментов определялась форма выходной кривой – изменения концентрации углеводородов на выходе из основного адсорбера. Бак был заполнен на 1/3 бензином, который менялся после каждого цикла испытаний.

На рисунке 10 показано изменение статической и динамической составляющих испарений в зависимости от нагрева топлива в баке, и от времени процесса.

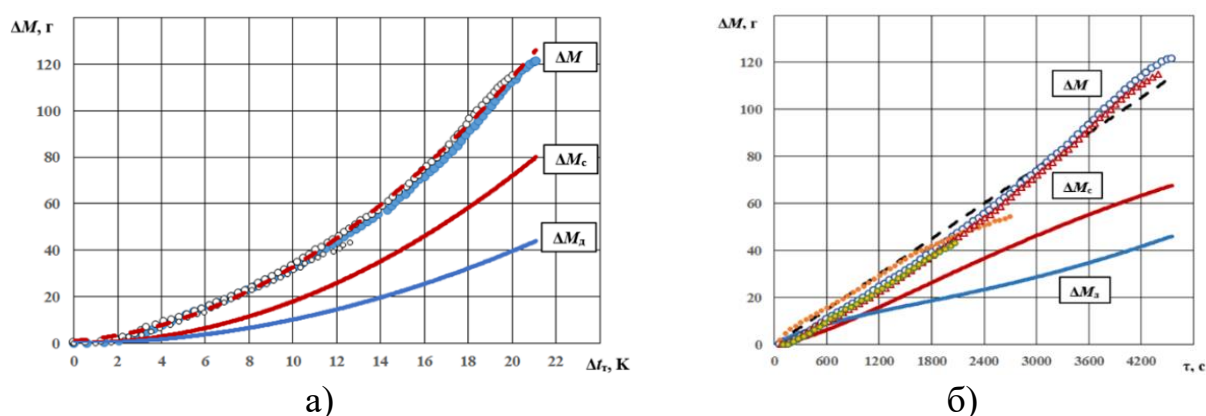


Рисунок 10 – Зависимость испарений:
а) – нагрев топлива; б) – время процесса

В начальный момент времени после включения бензонасосов статическая составляющая отсутствует, и общее количество испарений определяется динамической составляющей. С течением времени доля динамической

составляющей возрастает, а доля динамической составляющей, соответственно, уменьшается. Начиная с момента времени $\tau > 0,25T$ составляющие сравниваются, а при $\tau > 0,45T$ их относительные величины стабилизируются и в дальнейшем остаются неизменными.

Динамическая составляющая пропорциональна расходу топлива на перелив $\Delta M_d = kQ_{\text{п}}$.

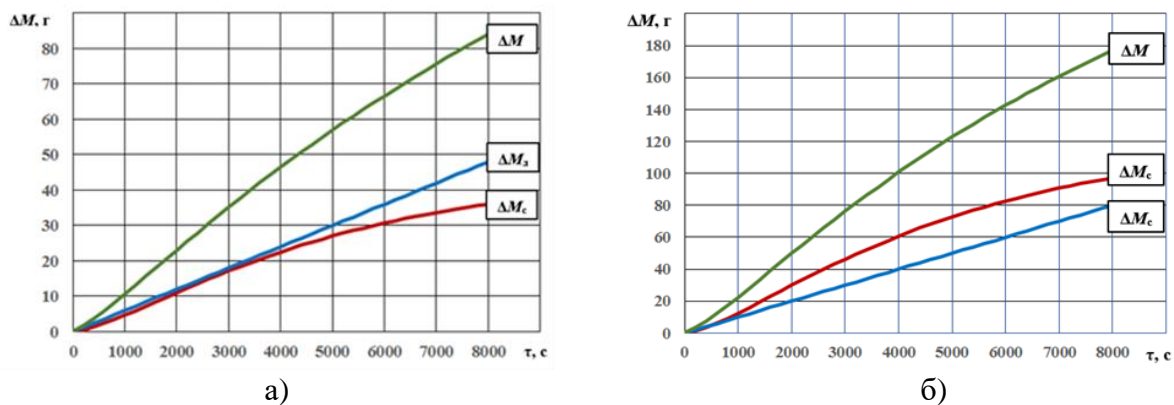


Рисунок 11 – Изменение во времени составляющих испарений:
а) – один бензонасос; б) – два бензонасоса

Задачи экспериментов с открытой системой вентиляции заключались в определении:

- величины статической активности адсорбента;
- длины зоны массопереноса.

При этом массовая скорость генерации испарений обеспечивалась постоянной $G_{\text{п}} = 0,025 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Об этом свидетельствует постоянство массовой скорости загрузки адсорбера.

Концентрация углеводородов в адсорбенте до начала контакта равна нулю, а концентрация углеводородов во входящем потоке ТВС постоянна. При прохождении потока ТВС через слой адсорбента сначала участвует в работе лишь лобовой слой, который быстро насыщается молекулами углеводородов до равновесного состояния. Первый этап завершается формированием стационарного фронта сорбции (рис. 12). Время работы слоя до насыщения его лобового участка является периодом формирования фронта сорбции.

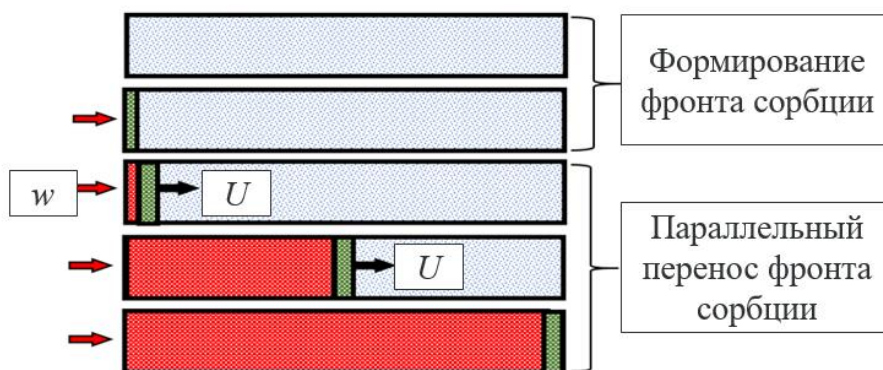


Рисунок 12 – Механизм процесса адсорбции

После завершения формирования этого фронта, зона сорбции высотой l_0 , называемая также зоной массопереноса (Mass Transfer Zone – MTZ), начинает перемещаться по слою адсорбента со скоростью U . За этой зоной остаётся отработанный адсорбент, перед ней – свежий. На втором этапе осуществляется параллельный перенос фронта сорбции.

Начальная концентрация углеводородов, извлекаемых из ТВС, снижается до нуля. Углеводороды в вошедшей порции ТВС вступают в контакт со следующим по ходу элементарным объемом (слоем). Последовательно вступая в контакт с третьим, четвертым и так далее элементарными объемами адсорбента, ТВС проходит весь его объем. При этом адсорбент можно разделить на три участка: полностью отработавший слой, работающий слой, еще не вступивший в работу слой.

Второй период процесса адсорбции завершается, когда вся активная поверхность адсорбента оказывается заполненной молекулами углеводородов. Исчерпание адсорбционной способности – проскок определяет время защитного действия адсорбента.

В результате комплекса экспериментальных исследований загрузки адсорбера было установлено, что фронт сорбции последовательно перемещается по участкам, причем скорость перемещения увеличивается ($\tau_{1-2} > \tau_{2-3} > \tau_{3-4}$). Второй период процесса адсорбции завершается, когда вся активная поверхность адсорбента оказывается заполненной молекулами углеводородов. Это можно проследить на рисунке 13.

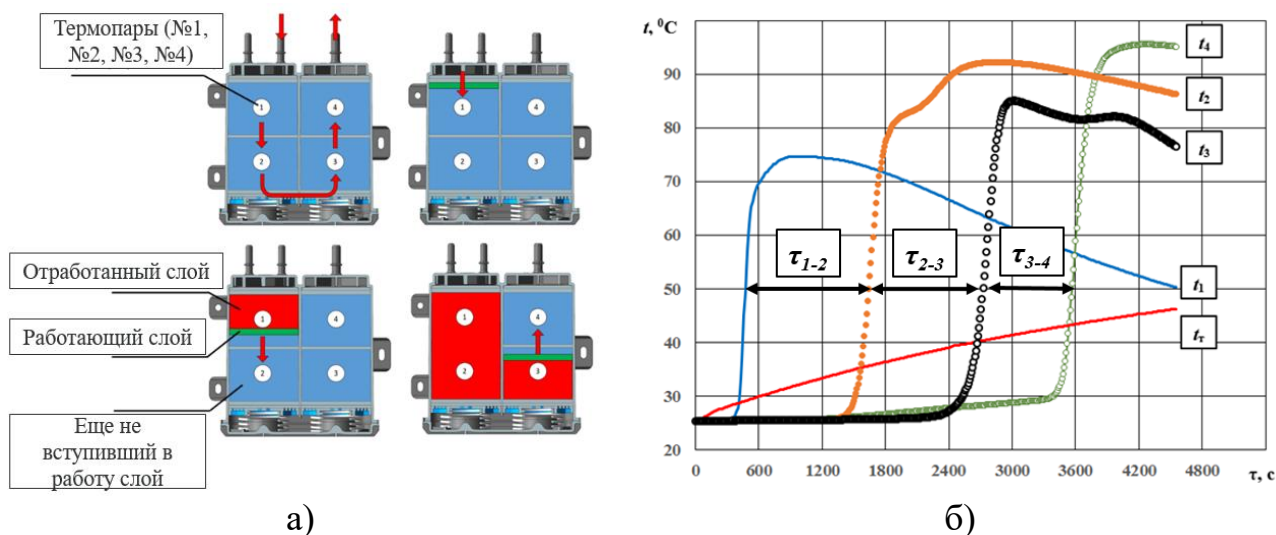


Рисунок 13 – Фронт сорбции:

а) - распространение фронта сорбции; б) – температура в локальных точках адсорбента

Следующий комплекс испытаний проведен для автомобиля, с подключаемой гибридной силовой установкой. Особенность его работы в том, что при движении на электрической тяге, топливный бак не вентилируется и находится под избыточным давлением.

Стендовые испытания системы были проведены в климатической камере. Схема стенда представлена на рисунке 14.

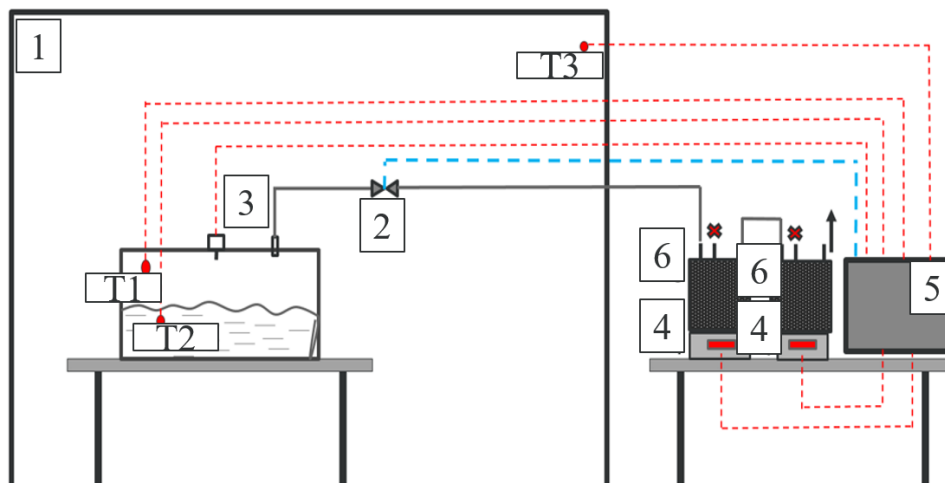


Рисунок 14 – Схема испытательного стенда

1 – камера тепла-холода, 2 – FTIV, 3 – датчик давления, 4 – весы, 5 – система сбора первичных измерений, 6 – адсорбер, T1 – температура ТВС, T2 – температура топлива, T3 – температура в рабочем объеме климатической камеры

Испытательный стенд имитирует движение на электротяге, во время движения топливо в баке испаряется, тем самым в паровом объеме появляется избыточное давление. При достижении максимально допустимого давления внутри топливного бака, открывается запирающий клапан для сброса избыточного давления. Топливные испарения попадают в адсорбере. После сброса давления из топливного бака до допустимых значений, клапан закрывается. Фотографии испытательного стенда представлены на рисунке 15.



Рисунок 15 – Внешний вид топливного бака в климатической камере

На рисунке 16 показано изменение давления ТВС в паровом пространстве бака в единичном цикле загрузки адсорбера. После заправки бака топливом

давление ТВС, определяемое суммой парциальных давлений топлива и воздуха, равно атмосферному давлению.

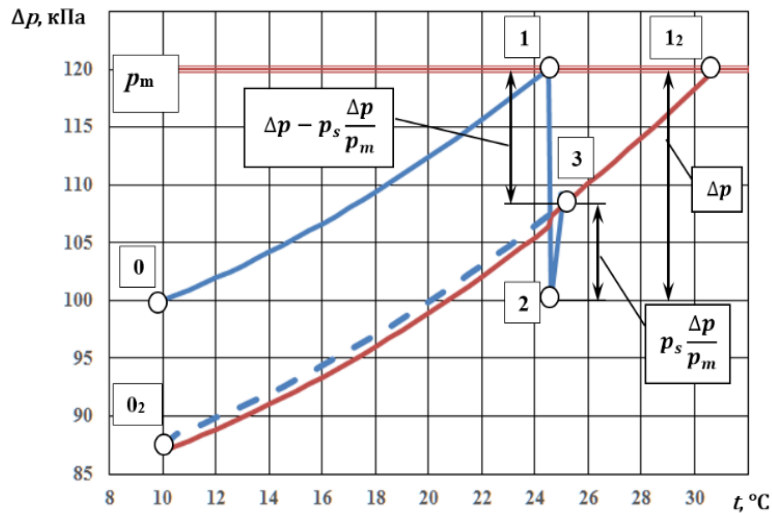


Рисунок 16 – Изменение давления в паровом пространстве в единичном цикле загрузки адсорбера

При нагреве давление смеси возрастает в первую очередь за счет роста давления насыщенных паров при испарении бензина. При достижении максимального значения давления смеси (120 кПа) клапан открывается и происходит загрузка адсорбера. Сброс давления сопровождается потерей массы воздуха в баке.

Испытания показали, что при работе бака под избыточным давлением в 20 кПа, количество адсорбированных испарений, снизилось на 75%, по сравнению с системой традиционного типа (рис.17).

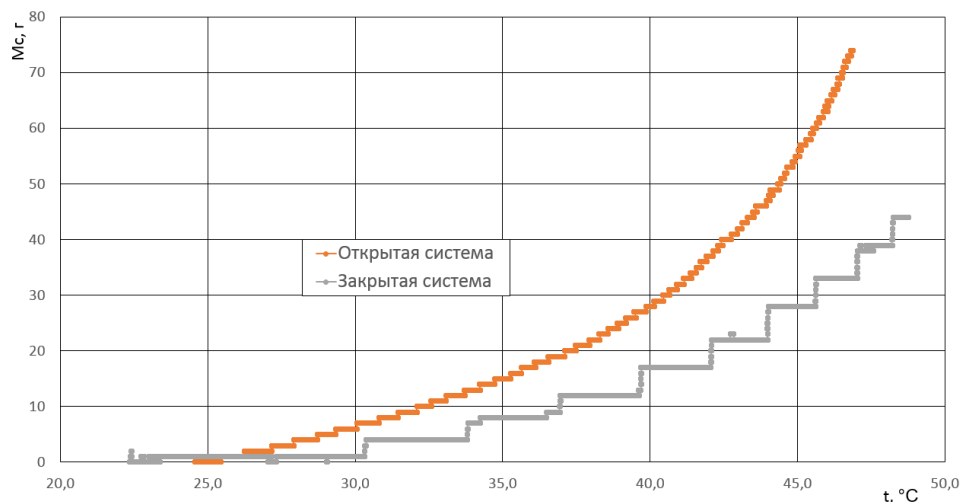


Рисунок 17 – Зависимость массы углеводородов от температуры топлива для открытой и закрытой системы вентиляции топливного бака

В четвертой главе проведено подтверждение расчетных моделей экспериментальными исследованиями.

Показано, что расчетные модели генерации топливных испарения открытой и закрытой системы вентиляции топливного бака, нагрева топлива от источника тепла, истечения смеси из резервуара под давлением для разных проходных сечений сходятся с результатами испытаний проведенными на лабораторных установках. Расхождение расчетов и экспериментов составляет менее 5%, это можно объяснить тем, что при экспериментальном исследовании, при подготовке эксперимента топливо деградировало, и давление паров по Рейду уменьшилось, что привело к снижению генерации углеводородов.

В результате комплекса расчетных исследований процесса истечения ТВС из парового пространства топливного бака, проведенного в среде программного комплекса Simcenter Amesim, получены уравнения, позволяющие определять время и скорость истечения в зависимости от объема парового пространства, начального давления ТВС и площади проходного сечения жиклера (клапана FTIV) (рис. 18):

$$\tau_a = k_\tau \Delta p \frac{V_{\text{п}}}{f}, \quad (6)$$

где k_τ – коэффициент местного сопротивления = 0,15, Δp – изменение давления в резервуаре, $V_{\text{п}}$ – объем парового пространства, f – площадь проходного сечения жиклера (рис. 19).

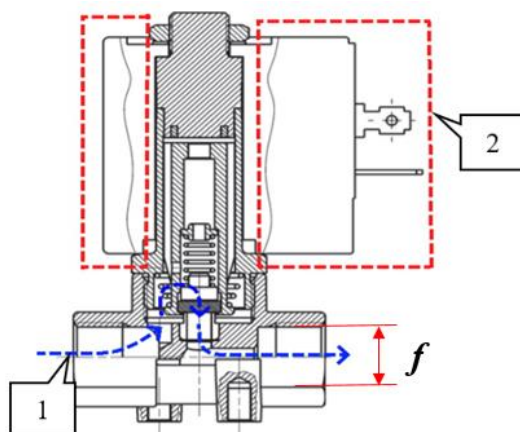


Рисунок 18 – Клапан FTIV:

1 – направление потока, 2 – электромагнитная катушка

В результате анализа экспериментальных данных удалось вывести уравнение формирования начального периода фронта сорбции (времени насыщения лобового слоя):

$$\tau_0 = \frac{a_p V_{MTZ}}{g_m} = \frac{a_p l_0 f a}{g_m}, \quad (7)$$

где a_p – статическая активность адсорбента, V_{MTZ} – условный объем зоны массопереноса, g_m – предельная величина скорости адсорбции, l_0 – длина зоны массопереноса, f_a – площадь сечения фронта сорбции.

В момент завершения заполнения объема адсорбера ТВС появляется на выходе из него. К этому моменту времени фронт сорбции уже должен быть

сформирован, и лобовой слой должен начать движение. Время формирования фронта сорбции τ_0 должно быть меньше или равно времени заполнения ТВС объема адсорбера τ_3 .

Время заполнения объема адсорбера (время появления ТВС на выходе из адсорбера):

$$\tau_3 = \frac{V_a}{Q_{\text{ср}}} = \frac{V_a}{\Delta V} \tau_a. \quad (8)$$

В ходе экспериментов установлено, что истечение ТВС из парового пространства стального топливного бака в атмосферу происходит в результате процесса, близкого к изотермическому процессу с показателем политропы $n = 1,05$.

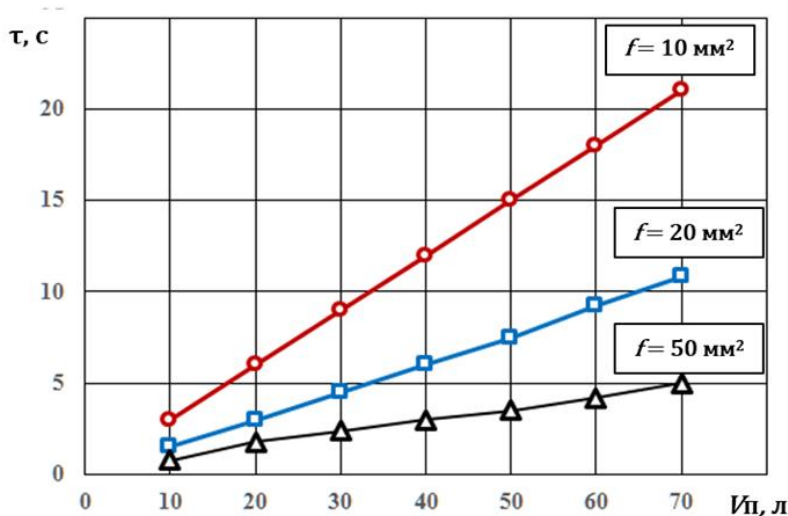


Рисунок 19 – Зависимость времени истечения от объема парового пространства ($p_m = 120 \text{ кПа}$)

Даны рекомендации к конструктивным параметрам системы вентиляции топливного бака для автомобилей с подключаемой гибридной силовой установкой. Описаны преимущества открытой и закрытой системы топливного бака.

Алгоритм управления системой вентиляции должен учитывать, что при заправке топливом, необходимо сбросить давление с системы вентиляции топливного бака. В этом случае логика управления следующая:

- после того, как автомобиль приехал на заправку водитель нажимает на кнопку заправки из салона автомобиля и система начинает подготовку к заправке. Информация об этом событии выводится на приборную панель (рис. 20 а);
- блок управления отслеживает давление в топливном баке и открывает клапан изоляции топливного бака, начинается сброс давления;
- затем, как давление опустилось до безопасного значения, автомобиль должен уведомить водителя, что заправка разрешена (рис. 20 б);
- по окончании полного сброса давления, алгоритм управления системой вентиляции позволяет отщелкнуть заправочный лючок наливной трубы и открыть пробку топливного бака.

Давление в баке должно снизиться до безопасного в течении 10...15 сек, для этого нужно максимально снизить гидравлическое сопротивление системы подобрав компоненты паропроводов с большим внутренним проходным сечением. Лючок отщелкивается после снижения давления до безопасного, для того чтобы исключить выплеск топлива с наливной трубы.

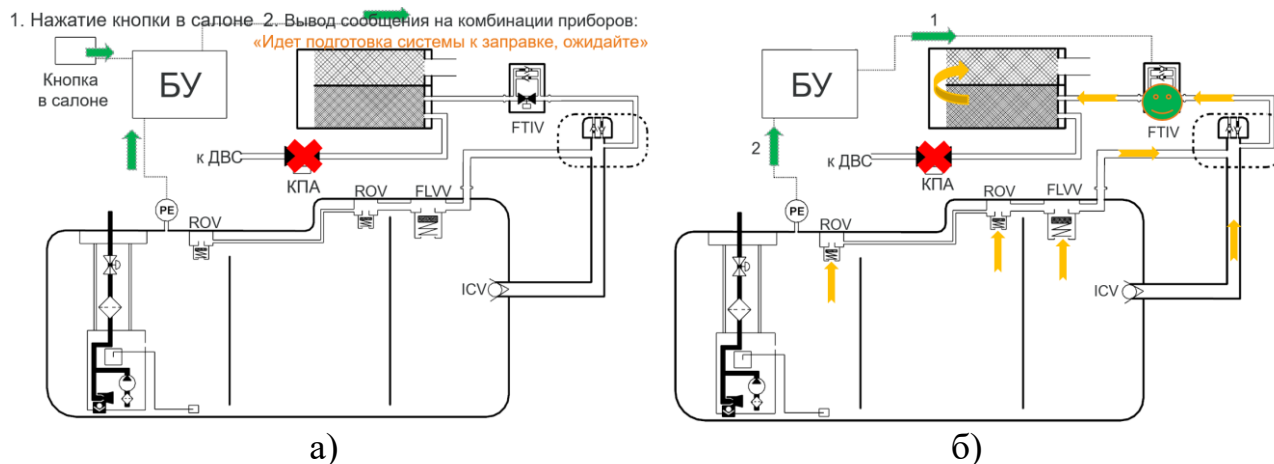


Рисунок 20 – Подготовка системы к заправке:

а) – вывод уведомления на приборную панель; б) – сброс давления с системы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных расчётно-теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и выводы:

1. Проведен анализ исследований в области существующих методов расчета и оптимизации алгоритмов управления систем вентиляции топливного бака, в результате чего выявлена проблема – недостаточный отечественный опыт в данной области. В рамках проведённого анализа определены объекты и цели исследования, в соответствии с которыми сформулирован перечень основных задач исследования.

2. Разработана энергетическая модель топливного бака автомобиля, описывающая процессы нестационарного теплообмена для установившихся режимов работы при постоянной массе топлива. Показано, что зависимость температуры топлива в баке от времени подчиняется экспоненциальному закону. Предложены комплексные параметры, характеризующие теплотехнические свойства топливного бака, основными из которых являются: равновесный температурный напор, постоянная времени, и тепловой поток, подводимый к топливу.

3. Показано, что в процессе нагрева топлива при работе двигателя температурный напор (превышение температуры топлива над температурой окружающей среды) возрастает, вызывая увеличение энергии, рассеиваемой в окружающее пространство. При определенной температуре обеспечивается такое состояние, при котором суммарный тепловой поток, подведенный к топливу, равен тепловому потоку, отводимому от бака в окружающую среду. Рост температуры топлива прекращается и наступает установившийся режим, характерный для равновесного процесса, и температурный напор становится

равновесным. Величина равновесного напора не зависит ни от температуры окружающей среды, ни от количества топлива в баке, а определяется только отношением величины суммарного теплового потока к теплоотдаче бака.

4. Масса углеводородов, генерируемых в паровом пространстве, прямо пропорциональна его объёму и не зависит от количества топлива в баке. Аналитическим путём выведены новые формулы для определения количества испарений в зависимости от давления насыщенных паров, барометрического давления, начальной температуры топлива и повышения его температуры во время стоянки. При экспериментальном исследовании при росте температуры от +25 до +46 °С было сгенерировано 72 грамма углеводородов, которые были адсорбированы. В результате расчета, при тех же условиях, генерация углеводородов составила около 78 грамм.

5. Разработаны методики расчета с использованием программного комплекса Simcenter Amesim, в начальных данных которого, были использованы параметры, определенные в ходе экспериментальных исследований.

6. Получены уравнения, описывающие процессы тепло- и массообмена в открытой и закрытой системах вентиляции топливного бака. Теоретически обосновано и практически подтверждено, что переход от организации загрузки адсорбера с открытым паровым пространством к парообразованию в пространстве постоянного объема позволяет значительно уменьшить количество углеводородов, поступающих в адсорбер.

7. Получены зависимости, позволяющие формировать оптимальные алгоритмы управления загрузкой адсорбера, варьируя в зависимости от свойств топлива и объёма парового пространства глубину сброса давления при последовательных шагах загрузки адсорбера и температурных интервалов между ними.

8. В результате комплекса расчетных исследований процесса истечения ТВС из парового пространства топливного бака, проведенного в среде программного комплекса Simcenter Amesim, получены уравнения, позволяющие определять время и скорость истечения в зависимости от объёма парового пространства, начального давления ТВС и параметров клапана изоляции топливного бака. По результатам исследований, были верифицированы математические модели. Установлено, что времени истечения из топливного бака при экспериментальном исследовании и расчетном исследовании с 30 кПа избыточного давления сходятся. Различия составляют не более 5%.

9. Разработаны алгоритмы управления клапаном изоляции топливного бака в закрытой системе вентиляции, в основу которых положен принцип завершения формирования фронта сорбции до момента появления ТВС на выходе из адсорбера. Определены условия, накладываемые на время истечения, ограничений, диктуемых предельной величиной скорости адсорбции.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Управление загрузкой автомобильного адсорбера для автомобилей с комбинированной энергоустановкой. Микерин Н.А. Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики. Всероссийская школа молодых ученых: сборник научных трудов 2024, С. 29-37.
2. Термодинамическая модель и элементы теории процессов загрузки адсорбера в закрытой системе улавливания топливных парений автомобилями с комбинированными энергетическими установками. Тер-Мкртичьян Г.Г., Микерин Н.А., Главизнин В.В., Цейтлин А.А. Труды НАМИ №3 (298), 2024, С. 33-46. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
3. Образование испарений в топливном баке автомобиля. Стратегия загрузки адсорбера. Тер-Мкртичьян Г.Г., Микерин Н.А., Главизнин В.В., Цейтлин А.А., Малышев А.Б., Тер-Мкртичьян Ю.Г. Труды НАМИ №2 (293), 2023, С. 6-17. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
4. Оптимизация конструкции и выбор алгоритмов управления системы вентиляции топливного бака автомобиля с целью снижения выбросов углеводородов. Микерин Н.А., Тер-Мкртичьян Г.Г., Главизнин В.В., статья в сборнике трудов конференции, материалы с всероссийского научно-технического форума по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова, посвященного 110-летию ПАО "ОДК-Кузнецов", 2022, С. 77-79.
5. Обобщённая энергетическая модель открытой термодинамической системы "топливный бак автомобиля". Процессы нестационарного теплообмена при переменной массе топлива. Тер-Мкртичьян Г.Г., Главизнин В.В., Микерин Н.А., Арабян М.Е., Цейтлин А.А. Труды НАМИ №1 (288), 2022, С. 6-16. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
6. Оптимизация параметров газоздушного тракта системы улавливания автомобильных топливных испарений. Тер-Мкртичьян Г.Г., Теренченко А.С., Главизнин В.В., Микерин Н.А., Шабанов С.А. Труды НАМИ. 2022. № 2 (289). С. 21-33. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
7. Пути обеспечения легковыми автомобилями перспективных требований по выбросам в результате испарений. Микерин Н.А., Тер-Мкртичьян Г.Г., Главизнин В.В. В сборнике: 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса. сборник докладов Международной научно-технической конференции. Москва, 2021. С. 337-349
8. Влияние архитектуры и конструкции системы вентиляции топливного бака на эффективность ее функционирования. Главизнин В.В., Тер-Мкртичьян Г.Г., Микерин Н.А. В сборнике: 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса. сборник докладов Международной научно-технической конференции. Москва, 2021. С. 69-82.
9. Efficiency enhancement of the vehicle fuel tank ventilation system by improving its architecture and design. Glaviznin V.V., Ter-Mkrtichyan G.G., Mikerin N.A. Journal of Physics: Conference Series. Serp. "International Conference on Actual

Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021. С. 012096. **Издание входит в перечень Scopus.**

10. Emissions of hydrocarbons from evaporation of fuel. Regulation and test methods. Ways to ensure future requirements. Mikerin N.A., Ter-Mkrtich'Yan G.G., Glaviznin V.V. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd, 2021. С. 012102. **Издание входит в перечень Scopus.**

11. Выбросы углеводородов в результате испарения топлива. Нормирование и методы испытаний. Пути обеспечения перспективных требований. Микерин Н.А., Тер-Мкртичян Г.Г., Главизнин В.В. В сборнике: Форум инновационных транспортных технологий, Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы. Объединённый международный онлайн форум. 2020. С. 1449-1459.

12. Энергетическая модель термодинамической системы "топливный бак автомобиля". процессы нестационарного теплообмена при постоянной массе топлив. Тер-Мкртичян Г.Г., Микерин Н.А., Главизнин В.В., Балашов Д.Ю., Арабян М.Е. Труды НАМИ. 2020. № 4 (283). С. 82-93. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

Патенты и изобретения

13. Клапан обратный для топливного бака транспортного средства. Арабян М.Е., Главизнин В.В., Микерин Н.А., Никитин А.А., Поликарпов В.В., Тер-Мкртичян Г.Г., Цейтлин А.А. Патент на полезную модель RU 216171 U1, 19.01.2023. Заявка № 2022117578 от 29.06.2022.