

*На правах рукописи*



**МИХАЙЛОВ Александр Дмитриевич**

**МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНТЕРКУЛЛЕРОВ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Оренбург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет».

Научный руководитель –

доктор технических наук, доцент  
Дрючин Дмитрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Карагодин Виктор Иванович,  
профессор кафедры «Производство и ремонт  
автомобилей и дорожно-строительных машин»  
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-  
дорожный государственный технический уни-  
верситет (МАДИ)», г. Москва

доктор технических наук, профессор  
Лазарев Евгений Анатольевич,  
профессор, эксперт Передовой инженерной  
школы двигателестроения и специальной тех-  
ники «Сердце Урала» ФГАОУ ВО «Южно-  
Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский универси-  
тет)», г. Челябинск

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государствен-  
ный аграрный университет», Челябинская об-  
ласть, г. Троицк

Защита диссертации состоится 18 марта 2026 г. в 15:00 на заседании диссер-  
тационного совета 24.2.352.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Оренбургский  
государственный университет», по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13,  
ауд. 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» ([www.osu.ru](http://www.osu.ru)).

Автореферат разослан «\_\_» 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

 Хасанов Ильгиз Халилович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Очевидными направлениями развития эксплуатационных характеристик автотранспортных средств, наиболее ярко проявившимися в последние десятилетия, является повышение показателей производительности и экологичности. Увеличение массы воздуха, поступающего в цилиндр двигателя за цикл, при неизменном рабочем объеме может быть обеспечено за счет повышения его плотности в результате предварительного сжатия и последующего охлаждения.

Типовым техническим устройством, обеспечивающим решение задачи охлаждения наддувочного воздуха, является воздухо-воздушный теплообменник - интеркулер, отводящий тепло от воздуха, сжатого турбокомпрессором, непосредственно в атмосферу. Условием эффективного функционирования интеркулера является отсутствие или минимальное количество загрязнений как на внутренних, так и на наружных поверхностях.

В процессе эксплуатации автомобильного двигателя эффективность работы теплообменника снижается вследствие образования загрязнений на его рабочих поверхностях. Очевидно, что формируемые слои отложений создают дополнительное термическое сопротивление, отрицательно влияющие на эффективность процесса теплопередачи. Это, в свою очередь, оказывает влияние на работоспособность, надежность, мощность и экономичность двигателя. Для снижения отрицательных последствий, связанных со снижением эффективности теплообменных процессов, необходима разработка и реализация мероприятий, обеспечивающих поддержание на заданном уровне его эксплуатационных характеристик. Анализ научной литературы и технологической документации позволил сделать заключение о недостаточной проработанности данного вопроса, что ведёт к очевидным негативным последствиям в плане обеспечения необходимой эффективности технической эксплуатации автотранспортных средств.

Обозначенная проблема и предлагаемые пути её решения во многом определили направленность проводимого исследования и его актуальность.

**Цель исследования** – повышение эффективности эксплуатации автотранспортных средств на основе совершенствования технического обслуживания охладителей наддувочного воздуха.

**Объект исследования** - процесс отвода тепла от наддувочного воздуха воздухо-воздушным охладителем в турбированных автомобильных двигателях.

**Предмет исследования** - закономерности изменения теплообменных характеристик охладителей наддувочного воздуха автомобильных двигателей в эксплуатации.

Содержание рассматриваемых в работе вопросов соответствует паспорту научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта по пунктам: 12. Закономерности изменения технического состояния автомобилей, их агрегатов и систем, технологического оборудования предприятий, совершенствование на их основе систем технического обслуживания и ремонта, определение нормативов технической эксплуатации; 15. Технологические процессы и организация технического обслуживания, ремонта; методы диагностирования технического состояния автомобилей, агрегатов и материалов.

### **Задачи исследования:**

- разработка теоретических положений, описывающих теплообменные процессы автомобильных воздухо-воздушных охладителей наддувочного воздуха с учётом изменения их технического состояния в эксплуатации;
- разработка математической модели теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированного двигателя внутреннего сгорания в окружающую среду;
- разработка методики определения величины теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированных автомобильных двигателей в атмосферу, с учётом толщины и теплопроводности слоёв загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях;
- разработка рекомендаций по дополнению комплексов работ технического обслуживания автотранспортных средств операциями, обеспечивающими, заданную тепловую эффективность воздухо-воздушных охладителей наддувочного воздуха.

**Научную новизну** исследования составляют следующие положения, выносимые на защиту:

- математическая модель теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированного двигателя внутреннего сгорания в окружающую среду, отличающаяся учётом влияния эксплуатационных загрязнений, формируемых на поверхностях теплообмена;
- методика экспериментального определения теплового потока, отводимого воздухо-воздушным охладителем наддувочного воздуха в атмосферу, отличающаяся возможностью оценки влияния толщины и теплопроводности загрязнений, сформированных на его наружных и внутренних поверхностях, на величину отводимого теплового потока;
- методика определения плановой периодичности замены воздухо-воздушного охладителя наддувочного воздуха, отличающаяся учётом изменения его теплотехнических характеристик в эксплуатации.

**Практическая значимость** результатов исследования заключается в разработке:

- методики определения теплотехнических характеристик охладителя наддувочного воздуха турбированных автомобильных двигателей с учётом толщины и теплопроводности загрязнений, сформированных на его наружных и внутренних поверхностях в эксплуатации;
- организационно-технологических решений, направленных на формирование заданного уровня теплотехнических характеристик воздухо-воздушных охладителей наддувочного воздуха, определяемого на основе технико-экономических показателей эксплуатации автотранспортных средств;
- перспективных направлений повышения эффективности эксплуатации автотранспортных средств на основе разработки мероприятий по поддержанию в исправном состоянии всей номенклатуры теплообменных устройств.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы используются: в ООО «Орентранс-КАМАЗ» (г. Оренбург) при выполнении регламентных работ по поддержанию в исправном состоянии ОНВ турбированных двигателей; в учебном процессе, реализуемом на транспортном факультете ФГБОУ ВО «Оренбургский

государственный университет» при подготовке обучающихся по направлениям 23.03.03, 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

**Апробация работы.** Результаты проведённых исследований обсуждались и получили одобрение на международных и всероссийских научно-практических конференциях: «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (Оренбург, 2017, 2019, 2024 и 2025 гг.); VI-ой Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса» (Горловка, 2020 г.); Международной научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург, 2019 г.).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 10-и печатных работах, в числе которых 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из рекомендательного Перечня ВАК, 1 – в издании, индексируемом в базе Scopus. В прочих изданиях опубликовано 7 работ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, рекомендаций, списка использованных источников (133 наименований) и приложения, изложенных на 129 страницах машинописного текста, включая 36 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведены описание проблемы обеспечения функциональной эффективности охладителей наддувочного воздуха при эксплуатации турбированных двигателей и обоснование актуальности темы исследования. Определён методический инструментарий, использованный для решения поставленных задач.

Автор выражает глубокую признательность первому научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Пославскому Александру Павловичу, за значительный вклад в область научных исследований, направленных на повышение эффективности производства и эксплуатации автомобильных теплообменных устройств. Идеи Александра Павловича послужили основой для разработки и модернизации диагностического оборудования, использованного при проведении экспериментальной части исследования.

**В первом разделе** приведено описание функционирования и технико-эксплуатационные параметры охладителей наддувочного воздуха автомобильных турбированных двигателей. Отмечено, что применение наддува с последующим охлаждением подаваемого воздуха является выраженной тенденцией мирового автомобилестроения, поскольку обеспечивает выполнение экологических норм и способствует повышению энергетической эффективности двигателей. Указано, что основным параметром, определяющим эффективность и техническое совершенство охладителя, является количество теплоты, отводимое от наддувочного воздуха. Данный параметр являются нестабильным и его изменение в эксплуатации обусловлено, в том числе, образованием отложений на наружных и внутренних поверхностях охладителя.

Проведён обзор и анализ методов и средств диагностирования автомобильных теплообменных устройств, рассмотрены их классификационные признаки, описаны преимущества и недостатки методов каждой классификационной группы. В качестве основы для разработки диагностического оборудования принят метод диагностирования радиаторов системы охлаждения автомобильных двигателей, представленный в работах А.П. Пославского, В.В. Сорокина, А.В. Хлуденёва, А.А. Фадеева, приведено обоснование выбора данного метода, показана принципиальная схема оборудования, обеспечивающего его практическую реализацию.

Для разработки математической модели теплообменных процессов воздухо-воздушных теплообменных устройств выполнен обзор трудов учёных - основоположников отечественных и зарубежных теплотехнических школ: М.В. Банкета, И.А. Вышеградского, С.А. Гебенникова, А.В. Гриценко, В.П. Исаченко, С.С. Кутателадзе, В.А. Лисина, А.В. Лыкова, М.А. Михеева, Э.Р. Эккерта, Р.М. Дрейка, а также современных исследователей: Р.Ю. Исупова, И.Е. Лобанова, И.А. Попова, Е.И. Третьяк, Ф.Ф. Цветкова, В.Ф. Юдина и других авторов. Изучены труды в научных областях, затрагивающих вопросы разработки новых и совершенствования существующих методов диагностирования и оценки технического состояния теплообменных устройств, в частности, труды В.М. Алексеенко, О.А. Геращенко, В.А. Григорьева, В.М. Зорина, И.Т. Коврикова, Г.А. Лепеша, В.А. Перминова, А.П. Пославского, М.А. Русаковского, В.И. Соколова, В.В. Сорокина, Г.А. Спроге, А.В. Хлуденёва.

Выполненный обзор позволил конкретизировать теоретические положения, послужившие основой для моделирования тепловых процессов и решения поставленных задач в плане оценки теплотехнических характеристик воздухо-воздушных теплообменных устройств и разработки мероприятий по обеспечению работоспособности данного узла на протяжении полного эксплуатационного цикла.

**Во втором разделе** содержится теоретическое описание теплообменных процессов, происходящих при динамическом взаимодействии двух сред, разделённых тонкой теплопроводной стенкой. В качестве основы выдвинутых теоретических положений принято уравнение (1) теплового потока, существующего на границе теплового взаимодействия двух сред:

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}_{\text{лог}}, \quad (1)$$

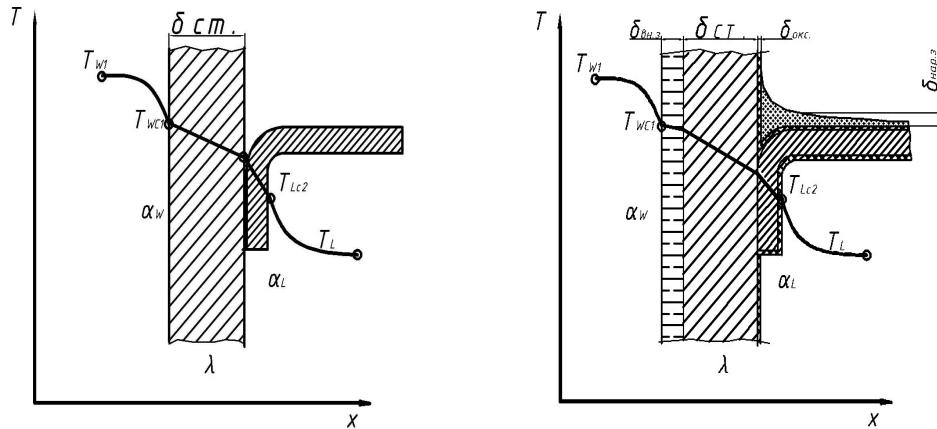
где:  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C})$ ;  $F$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ;  $\overline{\Delta t}_{\text{лог}}$  – среднелогарифмический температурный напор,  ${}^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопередачи является постоянной величиной, определяемой теплофизическими свойствами взаимно контактирующих сред и материала разделяющей их поверхности. Преобразованием формул теплового потока получено выражение (2) для расчёта термического сопротивления стенки теплообменника (обратно пропорционально значению коэффициента теплопередачи ( $k$ )):

$$R_{\tau} = \frac{1}{\alpha_W} + \left( \frac{\delta_{cm.\tau}}{\lambda_{cm.\tau}} + \frac{1}{\alpha_L} \right) \cdot \psi = \frac{1}{\alpha_W} + \left[ \left( \frac{\xi \cdot \psi \cdot \delta_{nap.3}}{\lambda_{nap.3}} + \frac{\delta_{bh.3}}{\lambda_{bh.3}} + \frac{\delta_{cm.}}{\lambda_{cm.}} \right) + \frac{1}{\alpha_L} \right] \cdot \psi, \quad (2)$$

где:  $\alpha_W$ ,  $\alpha_L$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны теплоносителя «W» (внутренняя среда) и теплоносителя «L» (внешняя среда), соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\psi$  – коэффициент оребрения;  $\delta_{nap.3}$  - толщина слоя наружных загрязнений, м;  $\delta_{bh.3}$  - толщина слоя внутренних загрязнений, м;  $\delta_{cm.}$  - толщина материала стенки, м;  $\lambda_{nap.3}$  - коэффициент теплопроводности слоя наружных загрязнений,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_{bh.3}$  - коэффициент теплопроводности слоя внутренних загрязнений,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_{cm.}$  - коэффициент теплопроводности материала стенки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\xi$  - коэффициент загрязнения оребрения.

Эпюры, иллюстрирующие распределение тепловых полей в стенке теплообменного устройства как при отсутствии, так и при наличии эксплуатационных загрязнений представлены на рисунке 1.



Чистая стенка теплообменника; Загрязнённая стенка теплообменника

Рисунок 1 – Эпюры распределения тепловых полей в стенке теплообменного устройства

Преобразованием выражения (1) получена формула, позволяющая произвести расчёт теплового потока, отводимого теплообменным устройством с учётом толщины и теплопроводности слоёв загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях в эксплуатации:

$$Q_{\tau} = \frac{F \cdot \overline{\Delta t}_{\text{ЛОГ.}\tau}}{(R_W + \psi \cdot \xi \cdot R_{HAP.3.\tau} + R_{BH.3.\tau} + \psi \cdot R_{cm} + \psi \cdot R_{L\tau})}, \quad (3)$$

где:  $R_W$  - термическое сопротивление внутренней среды «W»,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{HAP.3.\tau}$  - термическое сопротивление наружных загрязнений,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{BH.3.\tau}$  - термическое сопротивление внутренних загрязнений,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_{cm}$  - термическое сопротивление материала стенки теплообменника,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;  $R_L$  - термическое сопротивление наружной среды «L»,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Практический опыт эксплуатации теплообменных устройств и содержание известных научных работ позволяют сделать заключение о том, что для любого

заданного типа загрязняющих веществ существует предельная толщина формируемого слоя ( $\delta_{MAX}$ ). Исходя из данного условия составлены системы уравнений, описывающих характер изменения термического сопротивления теплообменного устройства в эксплуатации. Далее, в качестве примера, представлена система уравнений (4), используемая для случая, когда продолжительность формирования предельного слоя наружных загрязнений меньше продолжительности формирования предельного слоя внутренних загрязнений:

$$R_{\Sigma} = \begin{cases} (R_W + \psi \cdot R_L) + \left( \frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{\text{нап.з.} MAX}}{\lambda_{\text{нап.з.}}} + \frac{\delta_{\text{бн.з.} MAX}}{\lambda_{\text{бн.з.}}} \right) - \left( \frac{\psi \cdot \xi \cdot V_{\text{нап.з.}}}{\lambda_{\text{нап.з.}}} + \frac{V_{\text{бн.з.}}}{\lambda_{\text{бн.з.}}} \right) \cdot \left( \frac{\delta_{\text{нап.з.} MAX}}{V_{\text{нап.з.}}} - \tau \right), & \text{при } \tau \leq \frac{\delta_{\text{нап.з.} MAX}}{V_{\text{нап.з.}}} \\ (R_W + \psi \cdot R_L) + \left( \frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{\text{нап.з.} MAX}}{\lambda_{\text{нап.з.}}} + \frac{\delta_{\text{бн.з.} MAX}}{\lambda_{\text{бн.з.}}} \right) - \left( \frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{\text{нап.з.} MAX}}{\lambda_{\text{нап.з.}} \cdot \tau_{\text{нап.з.} MAX}} + \frac{V_{\text{бн.з.}}}{\lambda_{\text{бн.з.}}} \right) \cdot \left( \frac{\delta_{\text{бн.з.} MAX}}{V_{\text{бн.з.}}} - \tau \right), & \text{при } \frac{\delta_{\text{нап.з.} MAX}}{V_{\text{нап.з.}}} \leq \tau \leq \frac{\delta_{\text{бн.з.} MAX}}{V_{\text{бн.з.}}} \\ (R_W + \psi \cdot R_L) + \left( \frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{\text{нап.з.} MAX}}{\lambda_{\text{нап.з.}}} + \frac{\delta_{\text{бн.з.} MAX}}{\lambda_{\text{бн.з.}}} \right), & \text{при } \tau \geq \tau_{MAX} \end{cases}. \quad (4)$$

С учётом полученных зависимостей, описывающих влияние толщины и теплопроводности загрязнений, формируемых на стенках теплообменного устройства, на величину коэффициента термического сопротивления, получено выражение (5), позволяющее произвести расчёт величины теплового потока, отводимого исследуемым теплообменным устройством:

$$Q_{\tau} = \left( \alpha_{L1} + \frac{\lambda_{\text{нап.з.}} \cdot \lambda_{\text{бн.з.}}}{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{\text{нап.з.} \cdot \tau} \cdot \lambda_{\text{бн.з.}} + \delta_{\text{бн.з.} \cdot \tau} \cdot \lambda_{\text{нап.з.}}} + \alpha_{L2} \right) \cdot \overline{\Delta t} \cdot F. \quad (5)$$

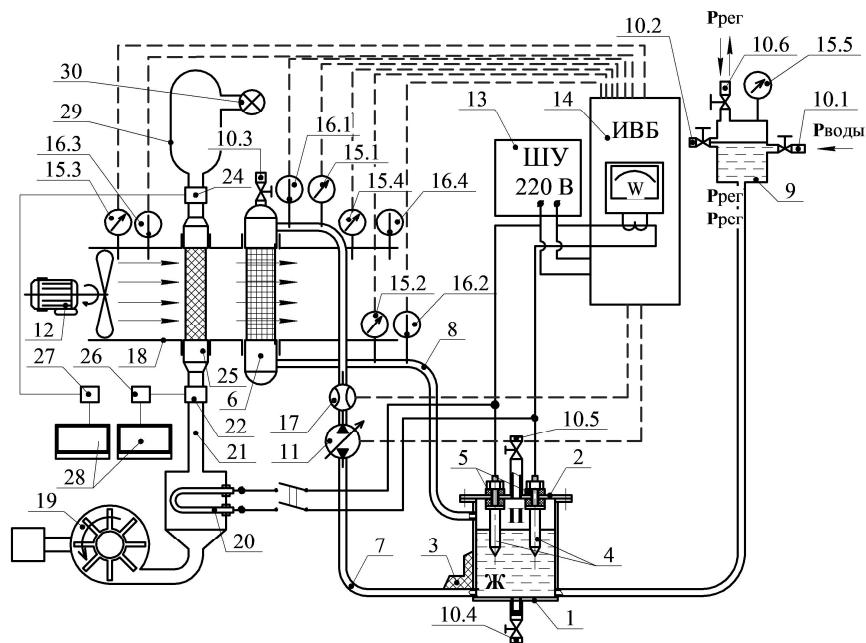
Полученная система уравнений (4) и выражение (5) являются основой разработанной математической модели теплового потока, отводимого теплообменным устройством, и позволяют выявить степень снижения теплоотдачи охладителя наддувочного воздуха в эксплуатации.

Практическое применение математической модели, разработанной на основе описанных теоретических положений, затруднено вследствие отсутствия численных значений коэффициентов, входящих в расчётные формулы. К числу таких коэффициентов относятся: коэффициент теплопроводности наружных загрязнений ( $\lambda_{\text{нап.з.}}$ ) и коэффициент теплопроводности внутренних загрязнений ( $\lambda_{\text{бн.з.}}$ ). Исходя из этого, одной из задач, решаемых в ходе проведения экспериментальных исследований, является определение числовых значений данных коэффициентов.

Дополнительно в теоретической части работы содержится раздел, включающий в себя выражения, позволяющие произвести расчёт коэффициентов теплопроводности слоёв загрязнений, формируемых на стенках теплообменного устройства на основе данных, полученных в результате экспериментальных исследований. Выражения получены преобразованием известных формул таким образом, чтобы обеспечить вычисление искомых коэффициентов на основе данных, полученных методами прямого замера с использованием специализированного диагностического оборудования.

В третьем разделе приведено описание экспериментальных исследований. Проведённый эксперимент включает в себя два этапа: определение количественных характеристик теплообменных процессов при динамическом взаимодействии теплоносителей в теплообменных устройствах; определение средней толщины слоёв наружных и внутренних загрязнений методом разрушающего контроля.

На рисунке 2 представлена общая схема модернизированной установки, позволяющей проводить прямые измерения теплофизических параметров функционирования воздухо-воздушных теплообменных устройств.



1 – корпус, 2 - крышка, 3 - теплоизоляция, 4 - электроды, 5 - изоляторы, 6 – водо-воздушный теплообменник, 7, 8 – трубопроводы, 9 - расширительная емкость, 10.1 - 10.5 – вентили, 11 - водяной насос, 12 – вентилятор, 13 - шкаф управления, 14 - измерительно-вычислительный блок, 15.1 – 15.5 - датчики давления, 16.1 – 16.4 - датчики температуры, 17 – расходомер, 18 – воздуховод, 19 – компрессор, 20 – нагреватель, 21 – воздушная магистраль, 22 - 23 – расходомеры воздуха, 24 – клапан выпускной, 25 – воздухо-воздушный охладитель наддувочного воздуха, 26 - 27 – термодатчики; 28 – компьютер; 29 – ресивер; 30 – шкаф управления нагревателем воздуха

Рисунок 2 - Схема модернизированного стенда измерения тепловых характеристик охладителя наддувочного воздуха

В модернизированном стенде штатный радиатор системы охлаждения использован в качестве измерительного модуля, позволяющего определить тепловой поток, отводимый испытываемым воздухо-воздушным охладителем наддувочного воздуха. Численное значение теплового потока, отводимого водо-воздушным радиатором 6, определяется показаниями ваттметра, входящего в состав измерительно-вычислительного блока 14, при установленвшемся режиме работы установки. Мощность тока, измеряемая ваттметром, отражает энергозатраты, необходимые для поддержания заданной постоянной температуры в водяном контуре стенда. Поддержание температуры обеспечивается путём нагрева охлаждающей жидкости электродами 14 нагревателя. При подключении моделирующего устройства с установленным испытываемым воздухо-воздушным теплообменником 25 воздух, подаваемый компрессором 19 и нагреваемый воздушным нагревателем 20, проходит по внутреннему контуру исследуемого теплообменного устройства. Тепловой поток, отводимый через стенки испытываемого теплообменника, при помощи вентилятора 12 передаётся воздуху наружного контура, который далее

поступает к водо-воздушному радиатору стенда 6. Изменение теплофизических параметров воздушного потока влияет на количество тепла, отводимого от охлаждающей жидкости и на показания ваттметра измерительного блока 14. На основе показаний измерительных устройств, считываемых регистрационно-аналитическим модулем стенда, производится определение теплового потока, отводимого испытываемым теплообменным устройством.

Разработанный стенд может быть использован в качестве оборудования для сравнительной оценки теплоотдачи нового (эталонного) теплообменного устройства и теплообменного устройства той же модели с наработкой  $\tau$ .

Измерение толщины слоёв загрязнений, образующихся на стенках теплообменных устройств, может быть выполнено методом разрушающего контроля на основе микрометрических замеров, производимых с использованием отсчётного микроскопа модели Vert.A1 фирмы Zeizz. Исследованию подвергаются образцы шлифов, полученных путём вырезания фрагментов с различных участков воздухо-воздушного теплообменного устройства. Для сохранения целостности исследуемых слоёв фрагменты теплообменника необходимо залить эпоксидной смолой с последующим формированием шлифов. Количество исследуемых теплообменных устройств, количество образцов и точек замера определены на основе результатов расчёта вариации измеряемой величины и допустимой точности измерения.

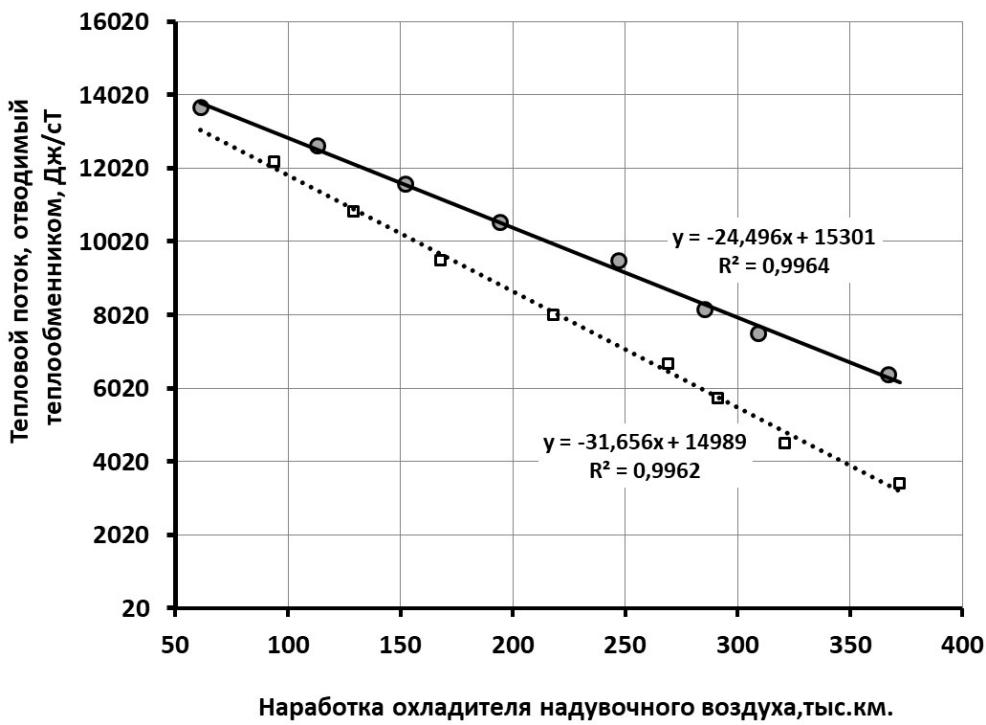
**В четвёртом разделе** приведены результаты оценки базовых тепловых характеристик воздухо-воздушных теплообменных устройств, выполненной в соответствии с разработанной методикой.

При проведении эксперимента использовано воздухо-воздушное теплообменное устройство - интеркуллер модели 43085, применяемый для охлаждения наддувочного воздуха двигателей семейства КамАЗ. В соответствии с планом эксперимента на первом этапе определена эталонная характеристика теплообменного устройства, являющаяся суммой произведений коэффициентов теплоотдачи внешнего и внутреннего воздушного контуров на соответствующие площади наружной и внутренней поверхностей.

Измерения проведены в диапазоне температур воздуха, подаваемого во внутренний воздушный контур теплообменника от 100 °C до 200 °C, что соответствует температуре воздуха в нагнетательной магистрали турбокомпрессора на различных режимах работы двигателя. По результатам эксперимента установлено значение эталонной характеристики испытываемой модели теплообменного устройства, используемое в качестве базовой величины при оценке изменения теплотехнических характеристик устройства в эксплуатации.

В соответствии с планом эксперимента, на следующем этапе произведено измерение значений теплового потока, отводимого охладителями наддувочного воздуха, имеющими различную наработку. Исследуемая выборка теплообменных устройств разделена на две группы. В отношении устройств, включённых в первую группу, произведена очистка наружных поверхностей от загрязнений. Для устройств второй группы такая очистка не производилась.

По результатам серии испытаний построены графики (рисунок 3), иллюстрирующие характер изменения величины теплового потока, отводимого охладителями наддувочного воздуха, от наработки.



Наработка охладителя надувочного воздуха, тыс.км.

- Термический поток, отводимый теплообменником не имеющим наружных загрязнений, Дж/с
- Термический поток, отводимый теплообменником имеющим наружные загрязнения, Дж/с

Рисунок 3 – Зависимости величины теплового потока, отводимого охладителем надувочного воздуха от его наработки (термовой напор 115 °C)

Для непосредственного измерения толщины слоёв загрязнений, образующихся на поверхностях охладителя, были изготовлены исследуемые образцы – фрагменты сердцевины теплообменника, вырезанные из различных частей. Для обеспечения сохранности образованных в эксплуатации слоёв загрязнений, исследуемые образцы заливались эпоксидной композицией и производилась шлифовка их поперечного среза. Фотографии слоёв загрязнений, образованных на внутренних поверхностях теплообменного устройства, представлены на рисунке 4.

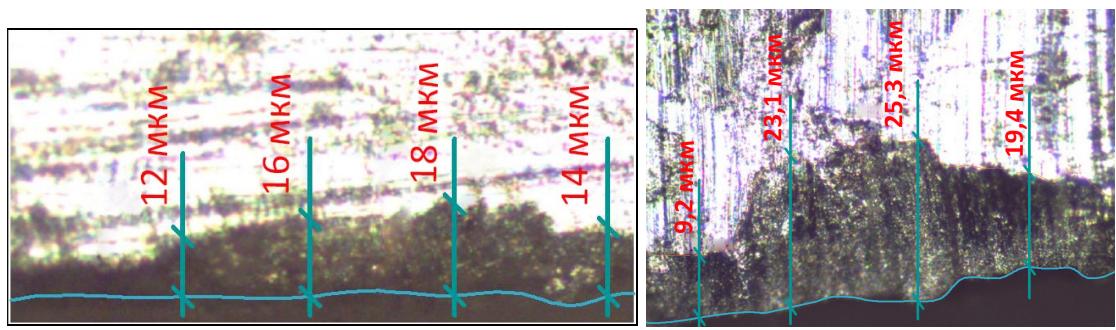


Рисунок 4 – Загрязнения, образующиеся на внутренних поверхностях теплообменного устройства в процессе эксплуатации (увеличение x100)

По результатам серии выполненных замеров установлены зависимости толщины слоёв наружных и внутренних загрязнений от наработки охладителя надувочного воздуха. Данные зависимости представлены на рисунке 5.

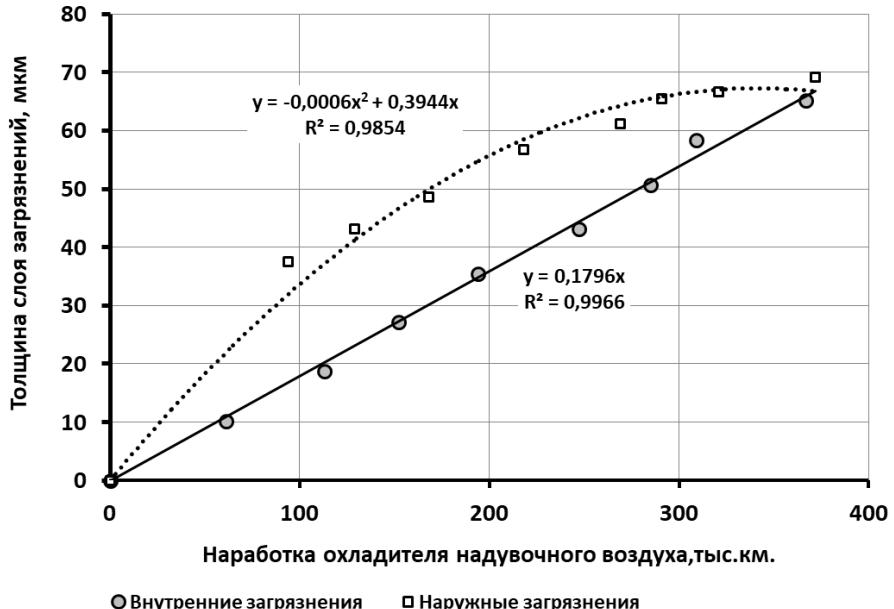


Рисунок 5 – Зависимость толщины слоёв загрязнений, образующихся на поверхностях охладителя наддувочного воздуха модели 43085 в эксплуатации от наработки

На основе комбинирования данных, представленных на рисунках 3 и 5, определены зависимости теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха от толщины слоёв загрязнений, сформированных на наружных и внутренних поверхностях в эксплуатации. Указанные зависимости представлены на рисунке 6.

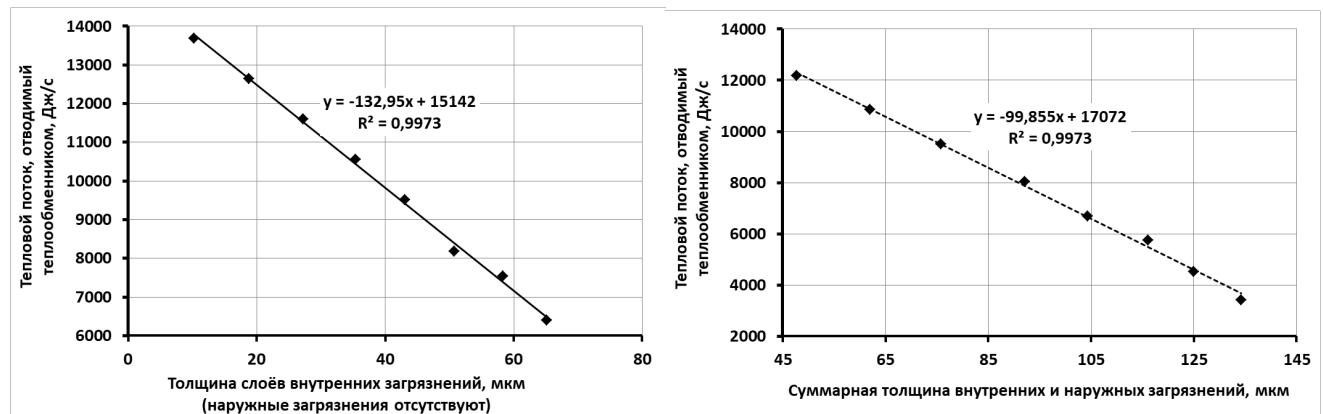


Рисунок 6 – Зависимости теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха, от толщины слоёв загрязнений, сформированных на наружных и внутренних поверхностях в эксплуатации

**В пятом разделе** произведена оценка влияния технического состояния охладителя наддувочного воздуха на показатели технической эксплуатации турбированных дизельных двигателей.

По результатам математического моделирования теплового потока, отводимого интеркулером модели 43085, определены двухпараметрические зависимости перепада температуры воздуха на входе в теплообменное устройство и на вы-

ходе из него от температуры подаваемого воздуха и наработки теплообменного устройства с начала эксплуатации. В качестве примера, на рисунке 7 приведена одна из таких двухпараметрических зависимостей, полученная с учётом формирования загрязнений как на внутренних, так и на наружных поверхностях теплообменного устройства.

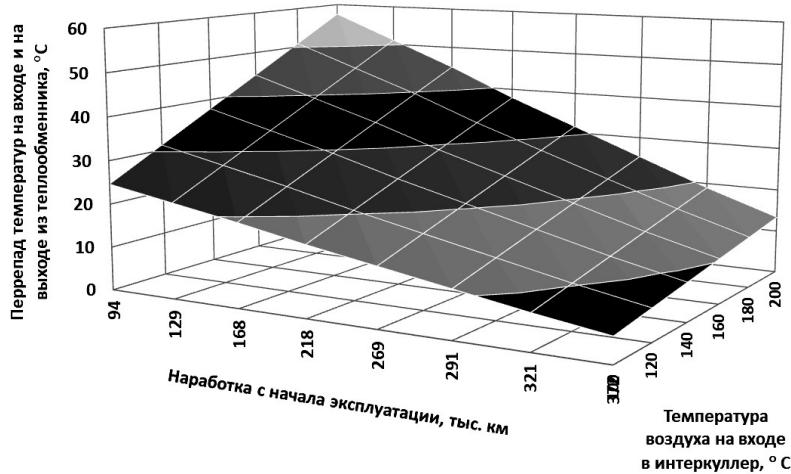


Рисунок 7 - Зависимость перепада температуры воздуха на входе в теплообменное устройство и на выходе из него от температуры подаваемого воздуха и наработки теплообменного устройства с начала эксплуатации при формировании загрязнений как на внутренних, так и на наружных поверхностях

На основе сопоставления полученных данных с результатами научных исследований, представленных в работах Д.В. Шабалина, П.Е. Кобзарёва, И.А. Фомина и других исследователей, построены зависимости, определяющие изменение расхода топлива в зависимости от наработки охладителя наддувочного воздуха. Указанные зависимости приведены на рисунке 8.

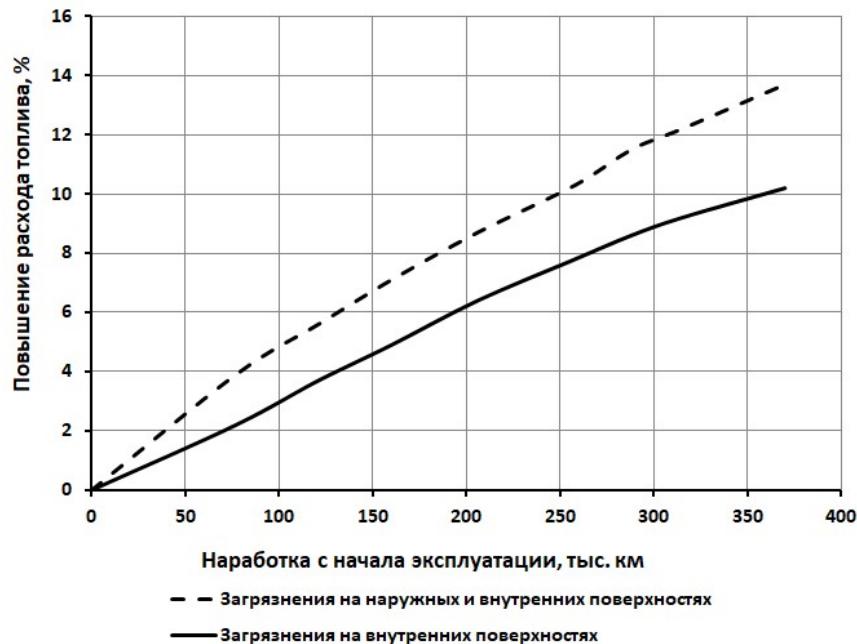


Рисунок 8 – Зависимость изменения расхода топлива от наработки охладителя наддувочного воздуха с начала эксплуатации

На основе приведённых данных разработаны мероприятия, направленные на повышение эффективности эксплуатации автотранспортных средств, оснащённых турбированными дизельными двигателями.

Удаление наружных загрязнений является более доступным мероприятием, реализуемым в процессе технического обслуживания с наименьшими трудозатратами. Оптимальная периодичность наружной мойки охладителя определена технико-экономическим методом на основе расчёта экономического эффекта, определяемого как сумма экономии удельных затрат на топливо и удельных затрат на выполнение моечных операций. Расчёт выполнен с шагом, равным периодичности ТО-1, результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Удельный экономический эффект от мойки наружных поверхностей охладителя наддувочного воздуха

Периодичность мойки, тыс. км.	10	20	30	40
Удельный экономический эффект, руб./км	0,020	0,027	0,031	0,026

Регулярное выполнение наружной мойки в некоторой степени замедляет интенсивность снижения его тепловых характеристик, но, тем не менее, продолжается снижение величины теплового потока, отводимого теплообменником, вследствие увеличения средней толщины слоя загрязнений, формируемых на внутренних поверхностях и несмываемых оксидных плёнок.

В качестве мероприятия, обеспечивающего восстановление тепловых характеристик охладителя наддувочного воздуха, в рамках исследования предложена плановая замена охладителя. Наработка, при которой целесообразна такая замена, соответствует значению, обеспечивающему максимум снижения удельных эксплуатационных затрат.

В качестве примера выполнен пошаговый расчёт величины снижения суммарных эксплуатационных затрат, обусловленных плановой заменой охладителя наддувочного воздуха для автомобиля КАМАЗ-6460. Расчёт выполнен при значениях периодичности плановой замены в диапазоне от 0 до 350 тысяч километров с шагом 50 тысяч километров. Результаты расчёта проиллюстрированы при помощи графиков, представленных на рисунке 9.

Установлено, что при периодичности плановой замены интеркуллера 100 тыс.км. обеспечивается средняя экономия удельных эксплуатационных затрат на уровне 0,61 руб./км. в сравнении с эксплуатацией без плановых замен. В рассматриваемых условиях общая экономия эксплуатационных затрат за период, соответствующий нормативному сроку эксплуатации автотранспортного средства, составит 305 тыс. руб.

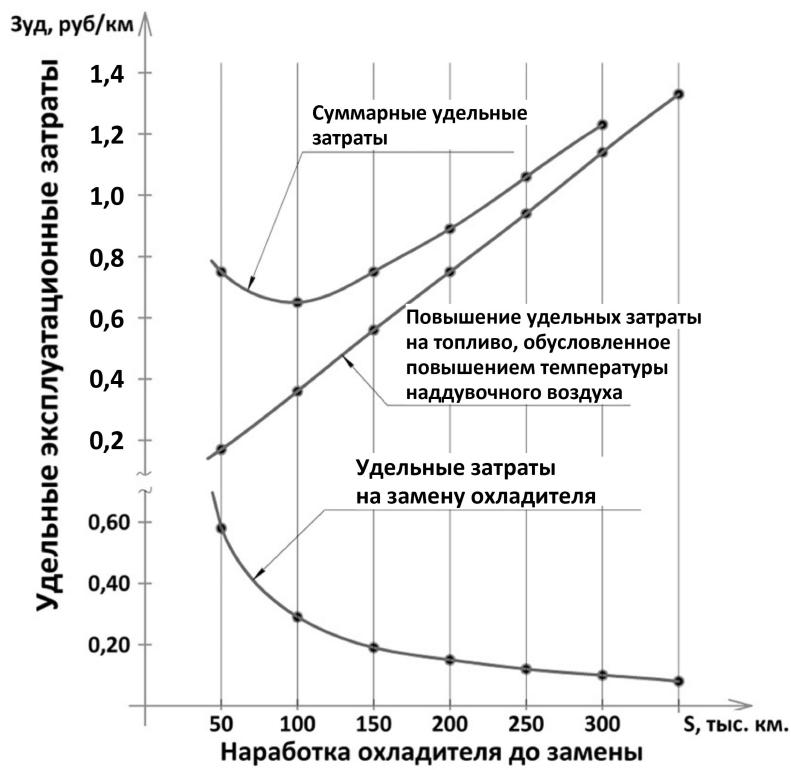


Рисунок 9 - Зависимости удельных эксплуатационных затрат от наработки охладителя наддувочного воздуха до плановой замены

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа известных теоретических положений, описывающих процессы передачи тепла между разнородными средами, разделёнными тонкой многослойной перегородкой, разработана методика расчёта значений коэффициента термического сопротивления и величины теплового потока, передаваемого внешней среде воздухо-воздушным охладителем наддувочного воздуха турбированных автомобильных двигателей с учётом загрязнений, формируемых на поверхностях охладителя в процессе эксплуатации;

2. Разработанная математическая модель теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированного двигателя внутреннего сгорания в окружающую среду, позволяет выполнить прогнозный расчёт значений теплового потока с учётом толщины и теплопроводности слоёв загрязнений, сформированных на наружных и внутренних поверхностях охладителя в эксплуатации.

3. Разработанная методика экспериментального определения величины теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха в окружающую среду, позволяет произвести оценку влияния толщины и теплопроводности слоёв загрязнений, формируемых на его наружных и внутренних поверхностях, на величину отводимого теплового потока. На основе результатов экспериментальных исследований установлены частные значения коэффициентов теплопроводности загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях охладителя, позволившие произвести моделирование отводимого теплового потока и оценку его влияния на эксплуатационные характеристики автотранспортного средства;

4. В качестве рекомендаций по повышению эффективности эксплуатации автотранспортных средств предложено (для автомобилей семейства КамАЗ, осна-

щённых турбированными двигателями): включить мойку наружных поверхностей охладителя наддувочного воздуха в перечень работ ТО-2; производить плановую замену охладителя наддувочного воздуха с периодичностью 100 тыс. км пробега. Указанные мероприятия обеспечивают снижение эксплуатационных расходов в размере 0,6 руб./км., что обеспечивает экономию эксплуатационных затрат 300 тыс. руб. за период, соответствующий нормативному сроку эксплуатации автотранспортного средства.

Таким образом, обеспечено повышение эффективности эксплуатации турбированных двигателей за счёт реализации мероприятий по совершенствованию технологических процессов технической эксплуатации, разработанных на основе результатов моделирования теплообменных процессов охладителей наддувочного воздуха.

Перспективными направлениями развития тематики диссертационного исследования являются: совершенствование методов диагностирования автомобильных теплообменных устройств, разработка методов их очистки от эксплуатационных загрязнений и мероприятий по повышению тепловой эффективности.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

- в рецензируемых научных изданиях из «Перечня...» ВАК:

1. Михайлов, А.Д. Инструментальный контроль и диагностирование технического состояния теплообменников транспортных средств / Пославский А. П., Фадеев А. А., Михайлов А. Д. // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2017. - № 10. - С. 72-76. – 5 с. (К2).

2. Михайлов, А.Д. Анализ изменения теплообменных свойств охладителей наддувочного воздуха в эксплуатации автотранспортных средств / Д.А. Дрючин, А.Д. Михайлов // Вестник СибАДИ. - 2025. - Том 22. - № 2. - С. 194-209 – 16 с. (К2).

- публикации в научометрических базах Scopus и Web of Science:

3. Assessment of the technical condition of intercoolers for turbocharged internal combustion engines (Оценка технического состояния промежуточных охладителей двигателей внутреннего сгорания с турбонаддувом) Sergienko S.N., Mikhailov A.D., Poslavsky A.P., Kletsova O.A. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. May 2021. Р. 012034.

- в прочих изданиях:

4. Михайлов, А.Д. Диагностирование технического состояния охладителей наддувочного воздуха транспортных средств / Пославский А. П., Михайлов А. Д. // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. ст. Тринадцатой Междунар. науч.-практ. конф., 15-17 нояб. 2017 г., Оренбург / М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]; редкол.: Рассоха В. И. (отв. ред.) и [др.]. - Электрон. дан. - Оренбург, 2017. - С. 213-215. - 3 с.

5. Михайлов, А.Д. Оценка влияния эксплуатационных факторов на техническое состояние охладителей наддувочного воздуха / А. П. Пославский, В. В. Сорокин, А. Д. Михайлов, С. Н. Сергиенко // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., 20-22 нояб. 2019 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. В. И. Рассоха. - Электрон. дан. - Оренбург: ОГУ,2019. - С. 470-475. - 6 с.

6. Михайлов, А.Д. Разработка средств и методов диагностирования технического состояния теплообменников транспортных средств в эксплуатации / А.П. Пославский, В.В. Сорокин, А.Д. Михайлов // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., 20-22 нояб. 2019 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. В. И. Рассоха. - Электрон. дан. - Оренбург: ОГУ,2019. - С. 476-480. - 5 с.

7. Михайлов, А.Д. Методы контроля при диагностировании теплорассеивающей способности теплообменных аппаратов в эксплуатации / С.Н. Сергиенко, А.Д. Михайлов // Международной научно-методическая конференции Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры 23-25 января 2019г. - г. Оренбург. С. 1602-1607. - 6 с.

8. Анализ возможностей повышения приспособленности к диагностированию автомобильных теплообменников / А. П. Пославский, В. В. Сорокин, С. Н. Сергиенко, А. Д. Михайлов, А. А. Фадеев // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Евразийское сотрудничество : сб. материалов XV Междунар. науч.-практ. конф., 9-11 дек. 2020 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. В.И. Рассоха. - Электрон. дан. - Оренбург: ОГУ. - 2020. - С. 481-489. - 9 с.

9. Михайлов, А.Д. Моделирование теплообменных процессов охладителей наддувочного воздуха / Д.А. Дрючин, А.Д. Михайлов // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 20-22 нояб. 2024 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.] ; отв. ред. В.И. Рассоха. - Электрон. дан. - Оренбург : ОГУ. - 2024. - С. 147-159. - 5 с.

10. Михайлов, А.Д. Совершенствование регламента технического обслуживания охладителей наддувочного воздуха / Д.А. Дрючин, А.Д. Михайлов // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 19-21 нояб. 2025 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.] ; отв. ред. В.И. Рассоха. - Электрон. дан. - Оренбург: ОГУ. - 2025. - С. 200-208. - 9 с.

Подписано в печать 15.01.2026 г. Формат 60 x 90 / 16

Тираж 100 экз.

Отпечатано в печатном салоне «Призма»

г. Оренбург, ул. Терешковой, 10/3