

На правах рукописи



САЛАХОВ РИШАТ РИЗОВИЧ

**ТЕПЛООБМЕН В ЗАРУБАШЕЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ И РАЗРАБОТКА
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ
ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК НА РЕЖИМЕ ПРОГРЕВА**

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ) на кафедре «Теплотехники и энергетического машиностроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гуреев Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Шайкин Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет» (г. Тольятти), заведующий кафедрой «Энергетические машины и системы управления»;
Вачагина Екатерина Константиновна, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Казанский научный центр Российской академии наук (г. Казань), заведующая лабораторией теплофизических исследований;

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", г. Самара

Защита состоится 16 сентября 2015 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.02., на базе ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» и на сайте <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан «__» июня 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н, доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время в малой и беспилотной авиации, наряду с зарубежными звездообразными двигателями, начали появляться современные рядные дизельные моторы, производство которых планируется развернуть в нашей стране. Данные моторы имеют, как правило, жидкостную систему охлаждения.

Известно, что эффективность поршневого двигателя существенно зависит от температуры, при которой реализуются рабочие процессы в его цилиндрах. Однако рост температуры сгорания топлива приводит к увеличению термических напряжений в деталях цилиндро-поршневой группы (ЦПГ). Соответственно возрастает роль системы охлаждения, которая не должна допустить превышения заданных тепловых нагрузок в двигателе.

Оптимально спроектированная система охлаждения обеспечивает заданные тепловые режимы термически напряженных деталей двигателя в различных условиях его эксплуатации.

Наименее изученным режимом работы системы охлаждения поршневого авиадвигателя является режим его прогрева, на котором двигатель работает с повышенным расходом топлива и с высокими выбросами вредных веществ в атмосферу. Поэтому важно снизить время прогрева двигателя и повысить эффективность его работы на данном режиме.

Цель работы – разработка адаптивной системы охлаждения авиационного поршневого двигателя, с целью улучшения его характеристик на режиме прогрева, с использованием результатов численного и физического моделирования процессов теплообмена в зарубашечном пространстве системы охлаждения авиадвигателя.

Задачи исследований:

- разработка математической и функциональной модели системы охлаждения двигателя, учитывающей процессы, происходящие в зарубашечном пространстве двигателя;
- исследование особенностей теплообмена в зарубашечном пространстве на режиме прогрева и при малых расходах охлаждающей жидкости;
- модернизация моторного стенда и системы измерений теплофизических параметров двигателя, обеспечивающей исследование температурного состояния межклапанных перемычек головок блока цилиндров (ГБЦ) и тепловых процессов в зарубашечном пространстве;
- численные и экспериментальные исследования влияния тепловых процессов в зарубашечном пространстве двигателя на его энергетические и экологические характеристики на режиме прогрева;
- верификация результатов численных исследований теплового состояния двигателя на режиме прогрева по данным экспериментальных исследований;
- разработка адаптивной системы охлаждения авиационного поршневого двигателя и модифицированного водяного насоса для достижения оптимального коэффициента полезного действия (КПД) двигателя на режиме прогрева;

- разработка рекомендаций по использованию адаптивной системы охлаждения на поршневых двигателях для воздушного и наземного применения.

Научная новизна исследований.

- Предложена функциональная модель системы охлаждения поршневого авиадвигателя в программном комплексе LMS AMESim с доработанным программным кодом для реализации возможности расчета режима вынужденной конвекции и поверхностного кипения в зарубашечном пространстве двигателя, со сглаживанием коэффициентов теплоотдачи при фазовых переходах.

- Выявлено существенное влияние роста температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) в системе охлаждения двигателя на его технико-экономические и экологические характеристики, особенно в режиме прогрева.

- Предложен способ повышения эффективности поршневых двигателей воздушного и наземного применения и улучшения их экологических характеристик в режиме прогрева путем сокращения времени достижения оптимальной температуры рабочей камеры за счет регулирования расхода ОЖ.

- Предложена модифицированная методика расчета геометрических характеристик высокоэффективного рабочего колеса (РК) водяной помпы системы охлаждения поршневого авиадвигателя.

Методы исследований. В ходе выполнения работы использовались: математическое моделирование физических процессов в системе охлаждения; численные исследования характеристик двигателя; экспериментальные исследования характеристик двигателя и параметров его теплового состояния; эмпирический анализ результатов исследований.

Достоверность результатов исследований. Достоверность полученных результатов исследований подтверждена использованием опробированных функциональных моделей, значительным объемом экспериментальных данных, полученных на поверенной и аттестованной измерительной аппаратуре, статистической обработкой полученных результатов экспериментальных и численных исследований.

Теоретическая и практическая значимость исследований.

- Создана функциональная модель системы охлаждения поршневого авиадвигателя в программном комплексе LMS AMESim с доработанным программным кодом для реализации возможности расчета режима вынужденной конвекции и поверхностного кипения в зарубашечном пространстве двигателя, со сглаживанием коэффициентов теплоотдачи при фазовых переходах;

- Установлены зависимости, позволяющие определить время прогрева и количество потребленного топлива в зависимости от частоты вращения водяной помпы поршневого двигателя;

- Предложено схемное и конструктивное решение высокоэффективной адаптивной системы охлаждения для рядных V-образных дизельных поршневых авиадвигателей с регулированием оборотов насоса по температуре охлаждающей

жидкости и температуре ГБЦ, что позволяет поддерживать оптимальную температуру в зарубашечном пространстве и системе охлаждения двигателя.

- Разработано и изготовлено высокоэффективное лопастное колесо для системы охлаждения рядных V-образных дизельных поршневых авиадвигателей, обеспечившее повышение напора на 30% по отношению к прототипу при той же производительности.

- Разработаны рекомендации для определения рациональных оборотов водяного насоса, обеспечивающих минимальную продолжительность времени прогрева транспортного поршневого двигателя.

Реализация результатов работы. Результаты экспериментальных и численных исследований использовались в рамках выполнения совместного проекта с Минобрнауки РФ от «12» февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004 «Создание семейства двигателей КАМАЗ на альтернативных видах топлива с диапазоном мощностей 300..400 л.с. и потенциалом выполнения перспективных экологических требований» и используются в учебном процессе на кафедре ТиЭМ КНИТУ-КАИ в курсах «Энергетический комплекс промышленных предприятий» и «Тепловые двигатели».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждены на научно-технических семинарах НИИ ЭТ КНИТУ им. А. Н. Туполева, кафедры ТиЭМ КНИТУ им. А.Н. Туполева и представлены на следующих конференциях: Международная молодёжная конференция "XVII Туполевские чтения" (Казань, 2009); V Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 2010); Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва, 2010); Всероссийская молодёжная конференция на тему: «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования» (Казань, 2011); VIII школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова "Проблемы теплообмена в гидродинамике в энергомашиностроении" (Казань, 2012), Форум «Повышение конкурентоспособности и энергоэффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО» (Казань, 2013), Шестая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2014).

Личный вклад автора в работу. Автором разработана математическая и функциональная модель системы охлаждения, выполнены численные и экспериментальные исследования тепловых режимов узлов двигателя и характеристик системы охлаждения двигателя, разработана адаптивная система охлаждения двигателя, найдены оптимальные режимы работы адаптивной системы охлаждения, разработано новое рабочее колесо водяной помпы с улучшенными характеристиками, разработаны рекомендации на создание адаптивных систем охлаждения для перспективных двигателей.

Публикации. Автор имеет 30 научных трудов. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 6 в изданиях, рекомендуемых ВАК, 3 статьи в зарубежных изданиях, из которых 1 в издании, цитируемом в SCOPUS.

На защиту выносятся следующие положения.

- 1) Математическая и функциональная модель системы охлаждения дизельного авиационного поршневого двигателя, учитывающая поверхностное кипение в зарубашечном пространстве двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
- 2) Результаты численных и экспериментальных исследований теплового состояния узлов и агрегатов двигателя на режиме прогрева двигателя;
- 3) Способ повышения эффективности двигателя и улучшения его экологических характеристик в режиме прогрева с помощью адаптивной системы охлаждения.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения. Основное содержание диссертации изложено на 187 страницах машинописного текста, содержит 29 таблиц и 59 рисунков. Библиография включает 64 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель и определены задачи исследования.

В первой главе диссертации представлен анализ литературных источников, посвященных исследованию влияния теплового состояния узлов и агрегатов двигателя на энергетические, экологические и ресурсные характеристики поршневых авиационных двигателей. Кроме того проанализированы режимы работы двигателей внутреннего сгорания, выполнен обзор современных решений в области совершенствования системы охлаждения двигателей, определены направления их развития и модернизации.

В отечественных публикациях, посвященных влиянию теплового состояния на показатели работы двигателя и определению тепловой напряженности высоконагретых деталей двигателя, основополагающие теоретические и экспериментальные исследования освещены в работах Р.М. Петриченко, А.К. Костина, Н.Х. Дьяченко, Г.Б. Розенблита, В.В. Эфроса, В.И. Пикуса, А.Л. Кригера, М.Е. Дискина, А.Л. Новенникова, и др. Из зарубежных исследователей необходимо отметить работы D. J. Allen, M. P. Lasecki, J. R. Wagner, и др.

Влияние теплового состояния на экономичность двигателя зависит от режима его работы. Наилучшее значение топливной экономичности при увеличении температуры ОЖ достигается при низких нагрузках на валу ДВС. При высокой температуре деталей ЦПГ возрастает максимальная температура рабочего цикла двигателя, которая приводит к увеличению образования оксидов азота NO_x при сгорании топливно-воздушной смеси. При этом снижается дымность отработавших газов, уменьшаются выбросы оксида углерода CO и углеводородов CH .

Анализ возможных режимов работы двигателя показал, что наименее эффективными являются режимы прогрева и холостого хода. Однако в рассмотренных в работе исследованиях недостаточно освещены вопросы повышения эффективности работы двигателя в режиме прогрева и влияния теплообмена в зарубашечном пространстве на его эффективность, что и

определило основное направление исследований, выполненных в представленной работе.

Критический обзор состояния вопроса позволил определить методы, применяемые в исследовании, а также поставить основные задачи, решение которых приводит к достижению цели поставленной в работе.

Вторая глава диссертации посвящена разработке функциональной и математической модели системы охлаждения авиационного поршневого двигателя с использованием программного комплекса LMS AMESim. Проанализирована математическая модель системы охлаждения, осуществлен выбор необходимых для настройки параметров элементов функциональной модели и проведены тестовые расчеты характеристик СО на режиме прогрева двигателя, которые выявили невозможность моделирования реальных процессов стандартными средствами программного комплекса. Доработан программный код модели для учета режима поверхностного кипения жидкости.

Режим работы системы охлаждения поршневого двигателя определяется многими факторами, к которым, прежде всего, следует отнести особенности гидродинамического режима движения жидкости, тепловые нагрузки на единицу площади теплоотдающей поверхности, давление в контуре охлаждения, температуру охлаждающей жидкости и пр.

Коэффициент теплоотдачи от рабочего газа к стенке цилиндра определяется по формуле Вошни:

$$\alpha_1 = 819.5 \cdot p_{\text{пр}}^{0.8} \cdot w^{0.8} \cdot D^{-0.2} \cdot T^{-0.53}, \quad (1)$$

где D – диаметр цилиндра, м; $p_{\text{пр}}$ – текущее давление в цилиндре при провертывании вала, МПа; w – скорость рабочего тела в различные периоды цикла: в период газообмена $w = 6,18 \cdot c_m$, во время сжатия $w = 2,28 \cdot c_m$, а в период сгорания – расширения: $w = 2.28c_m + 3.24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{V_h \cdot T_a}{p_a \cdot V_a} \cdot (p - p_{\text{пр}})$.

Тепловая энергия, отводимая из зарубашечного пространства охлаждающей жидкостью (рис.1,2), вычисляется по формуле:

$$q_{\text{ож}} = \alpha_2 (t''_{w2} - t_{f2}) - \alpha_3 (t_{f2} - t'_{w4}); \quad (2)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны горячей стенки, а α_3 – со стороны холодной.

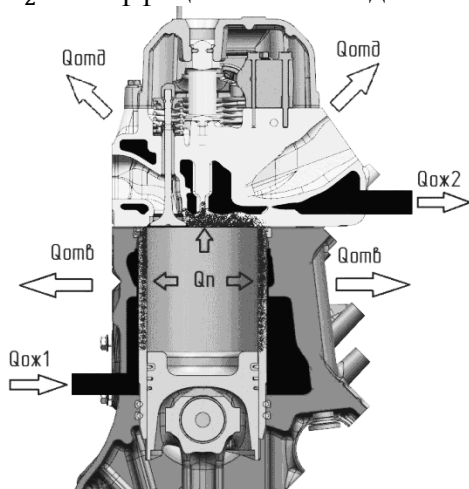


Рис.1 – Тепловые потоки в зарубашечном пространстве цилиндра

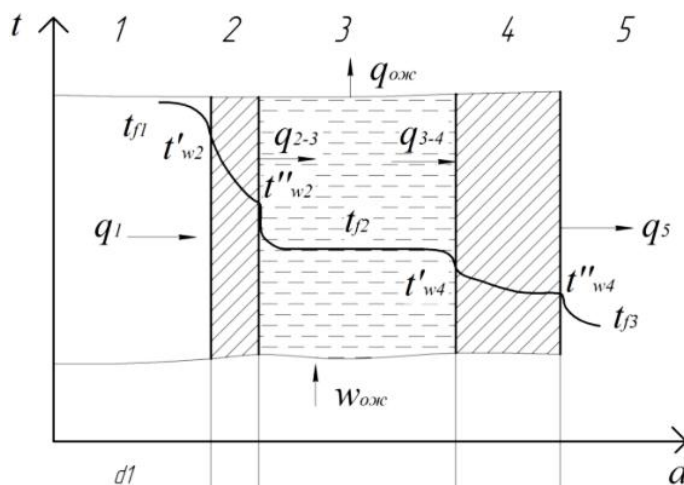


Рис.2 – Теплопередача в зарубашечном пространстве поршневого двигателя

Для изучения процессов, происходящих в зарубашечном пространстве поршневого двигателя, использовались специализированные программные средства. Оптимальным решением стало использование программного комплекса LMS AMESim, который предназначен для функционального моделирования различных технических устройств, широко применяется ведущими двигателестроительными предприятиями.

На рис. 3 представлена разработанная функциональная модель малого круга системы охлаждения двигателя, которая позволяет оценивать влияние различных факторов на его тепловое состояние.

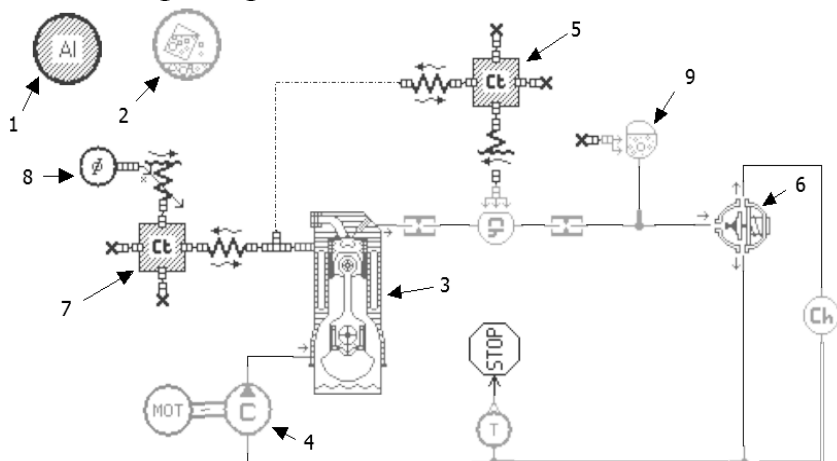


Рис. 3 - Модель малого круга СО двигателя в LMS AMESim
 1 – свойства металла, 2 – свойства ОЖ, 3 – рубашка охлаждения двигателя, 4 – помпа, 5 – масса, характеризующая холодные детали ДВС, 6 – термостат, 7 – масса, характеризующая гильзу, 8 – тепловой поток, подводимый в СО, 9 – расширительный бачок

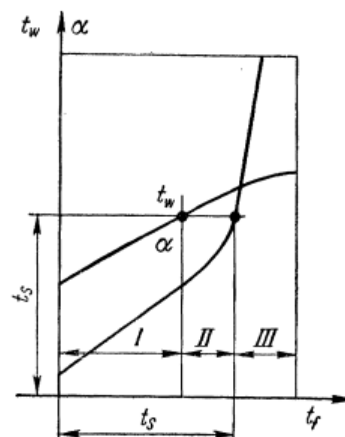


Рис. 4 – Режимы охлаждения в зарубашечном пространстве ДВС

Модель работает следующим образом. Водяная помпа 4 нагнетает воду в рубашку охлаждения двигателя 3, где охлаждающая жидкость отбирает тепло отводимое от камеры сгорания. В элементе 3 задаются гидравлическое сопротивление малого круга, нагреваемый объем и масса горячей части головки блока цилиндров (ГБЦ) и гильз. Гильза 7 блока цилиндров нагревается конвекцией. Часть теплового потока от гильзы теплопроводностью передается в рубашку охлаждения 3, а часть в холодные детали ГБЦ и блока цилиндров (БЦ) 5. По достижении температуры 80°C (открытие термостата) расчет останавливается элементом «STOP».

Апробация модели производилась с использованием характеристик тестового V-образного дизельного двигателя КАМАЗ 750.10-500. Однако имеющиеся в библиотеке LMS AMESim компоненты, в частности элемент 3 (CSEN033 – подмодель рубашки охлаждения), изображенный на рис.5, не позволяют учитывать влияние режимов работы двигателя на теплоотдачу в его зарубашечном пространстве. Так как при определенном расходе охлаждающей жидкости режим теплоотдачи от горячей стенки в ОЖ переходит от вынужденной конвекции I в режим поверхностного кипения II (рис.4), сопровождающегося резким ростом коэффициента теплоотдачи до 4000-5000 Вт/м²*К.

Ввиду того, что функциональная модель рубашки охлаждения в LMS AMESim не позволяет смоделировать процесс одновременного подвода теплоты от рабочей камеры к ОЖ и отвода теплоты от ОЖ во внешнюю стенку рубашки, то вместо элемента CSEN033 подходит элемент с двумя тепловыми портами TFCVINT01 (рис.6), который, в свою очередь, не позволяет учитывать возможные режимы кипения ОЖ.

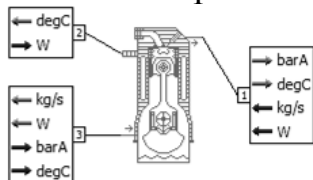


Рис. 5 – Компонент CSEN033

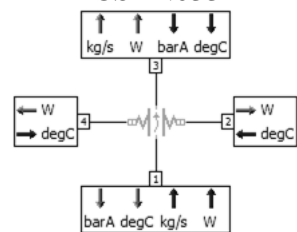


Рис. 6 – Компонент TFCVINT01

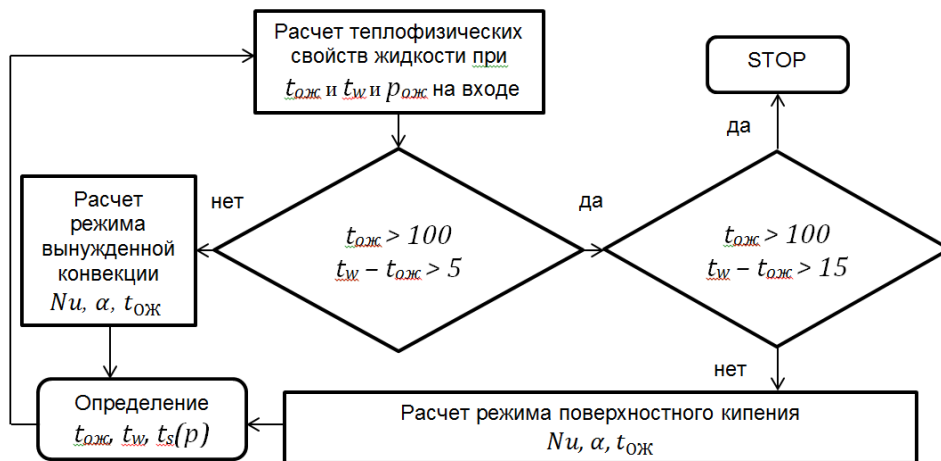


Рис. 7 –Алгоритм работы модифицированной подмодели TFCVINT01-2

Анализ существующих моделей в подмоделях комплекса LMS AMESim показал, что ни одна из подмоделей библиотеки Thermal-Hydraulic не имеет возможности выполнения расчета поверхностного кипения. Такая возможность имеется в моделях библиотеки Two-Phase Flow, но в комплексе не предусмотрена их совместная работа. В связи с этим в специализированной программе AMESet был модифицирован программный код подмодели TFCVINT01, что позволило на критических режимах учитывать на горячей стенке рубашки охлаждения возникающее поверхностное кипение. Для чего была разработана математическая модель, описывающая процессы в зарубашечном пространстве, алгоритм расчета (рис.7) и код программы для комплекса LMS.

Для расчета режима вынужденной конвекции на порте 4 элемента TFCVINT01-2 выбрано следующее уравнение для определения коэффициента теплоотдачи, полученное Петриченко Р.М. и справедливое для диапазона чисел Прандтля $0,6 \leq Pr \leq 15$:

$$Nu_x = 0.332 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re}, \quad (3)$$

где $Nu_x = \frac{\alpha(x)x}{\lambda}$ – локальное значение числа Нуссельта; $Re_x = \frac{u_{\infty}x}{\nu}$ – локальное значение числа Рейнольдса.

Для описания процесса возникающего поверхностного кипения выбрана модифицированная формула Д.Б. Кузнецова, полученная с использованием результатов работ В.И. Толубинского, И.Т. Аладьева и С.С. Кутателадзе (для двигателей 12Ч 15/18, 6Ч 15/18, 6ЧН 18/22):

$$Nu = 0.0146 Pe''^{0.7} (1 + 0.83 K^{0.85} \left(\frac{d_1}{d_{эКВ}}\right)^{-0.35} Pr^{0.3} \left(\frac{p}{p_6}\right)^{0.5}, \quad (4)$$

где $Pe'' = \frac{ql}{r\rho''a}$ – число Пекле для процесса кипения; $K = \frac{r}{c_p\Delta t_s}$ — число фазового перехода; q — удельная тепловая нагрузка поверхности; r — скрытая теплота парообразования; a — коэффициент температуропроводности; c_p — теплоемкость жидкости; p_6 – барометрическое давление; $\Delta t_s = t'_s - t_f$ — температура насыщения; t'_s — температура жидкости; t_f — температура потока; $l = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}$ – характерный размер; σ — коэффициент поверхностного натяжения; ρ'' — плотность пара; $d_{\text{ЭКВ}} = d_1 - d_2$ – эквивалентный диаметр кольцевой щели; d_1, d_2 – наружный и внутренний диаметры кольцевой щели в зарубашечном пространстве соответственно.

Выявлено, что в ходе расчетов с использованием модифицированной подмодели TFCVINT01-2 при достижении температуры стенки t_w линии насыщения происходит резкий скачок в коэффициентах теплоотдачи от 500-600 до 5500 Вт/м²*К, который при вычислении приводит к возникновению медленно затухающих колебаний температуры ОЖ $t_{\text{ОЖ}}$ возле температуры t_s и критическому увеличению времени расчета. Для плавного изменения коэффициента теплоотдачи на «переходном» режиме, который начинается при достижении стенкой температуры насыщения t_s при данном давлении и заканчивается при достижении перегрева 5°С, и приближения процесса к физическому, применяется операция «smooth – сглаживание».

Эффективность водяной помпы при совместной работе с СО существенно зависит от её частоты вращения, которая определяется оборотами коленвала двигателя. Поэтому в функциональную модель системы охлаждения добавлена возможность учета КПД водяной помпы, которая отсутствует в базовой модели. В программном комплексе LMS ImagineLab AMESim проведены расчеты рабочих точек для насоса и системы охлаждения и значений его КПД. Эффективность водяной помпы сохраняется практически постоянной в диапазоне 1100-2400 об/мин, и снижается при частотах меньше 900 об/мин. При частоте вращения водяной помпы менее 500 об/мин происходит резкое падение его эффективности, которое соответствует 10% при 320 об/мин.

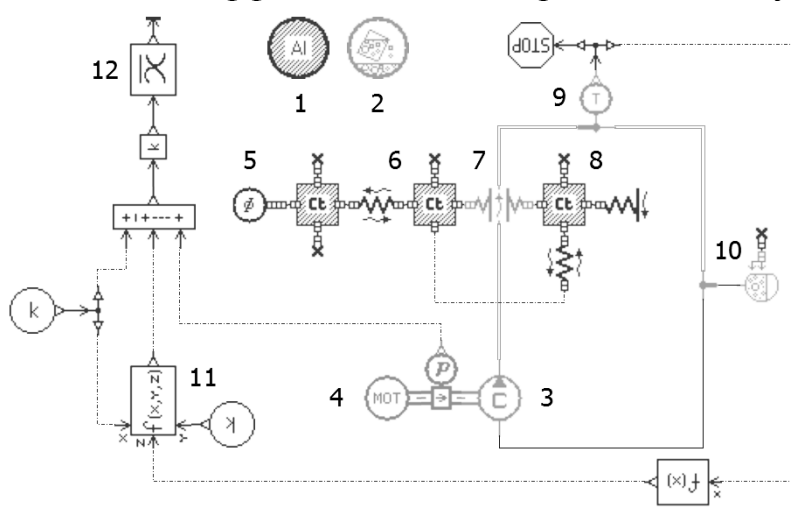


Рис. 8 – Модифицированная модель СО поршневого двигателя в LMS AMESim
 1 - свойства металла, 2 - свойства ОЖ, 3 – помпа, 4 – привод, 5 – подводимый тепловой поток, 6 – теплопроводность в деталях ЦПГ, 7 – TFCVINT01-2, 8 – холодные детали ЦПГ, 9 – температурный сенсор с элементом «СТОП», 10 - расширительный бачок, 11 – расчет теплового баланса; 12 – расчет потребленного топлива

С использованием модифицированной функциональной модели СО (рис.8) выполнены тестовые расчеты параметров системы охлаждения на режиме прогрева двигателя при 900, 1300 и 1900 об/мин коленчатого вала (КВ). Результаты численных исследований показали, что время прогрева

охлаждающей жидкости до 80°C существенно зависит от режима работы двигателя, и при 900 об/мин КВ составляет 1404 секунды, при 1300 об/мин – 710 с, а при 1900 об/мин - 460 секунд.

С целью верификации модифицированной функциональной модели системы охлаждения доработан экспериментальный стенд, установленный в НТЦ ОАО КАМАЗ и предназначенный для исследований различных характеристик поршневых двигателей.

В третьей главе приведено описание конструкции экспериментального стенда для определения характеристик поршневого авиадвигателя на режиме прогрева, а также методика проведения и обработки результатов экспериментальных исследований и оценки погрешностей измерений. Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик СО двигателя на режиме прогрева. Выполнена верификация функциональной модели системы охлаждения по результатам экспериментальных исследований.

С недавних пор в РФ проводятся активные работы по локализации на территории Республики Татарстан производства авиационного поршневого дизельного двигателя. В данный момент ведутся работы по сертификации данных двигателей и их высотным испытаниям. В наличии имеется всего 2 мотора, которые не представляется возможным использовать для экспериментальных исследований системы охлаждения, поэтому в качестве прототипа был выбран V-образный поршневой дизельный двигатель КАМАЗ 750.10-500, на котором и выполнялись исследовательские работы. Рабочий объем двигателя $V_h=11,76$ л., степень сжатия $\varepsilon=17,8$, номинальная мощность $N_e=500$ кВт при частоте вращения коленчатого вала $n=1900$ мин⁻¹.

Принципиальная схема и внешний вид экспериментального стенда представлены на рисунках 9,10 и 11.

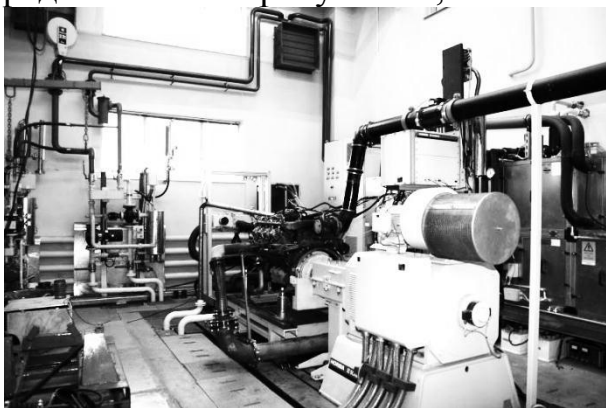


Рис.9 - Внешний вид экспериментального стенда

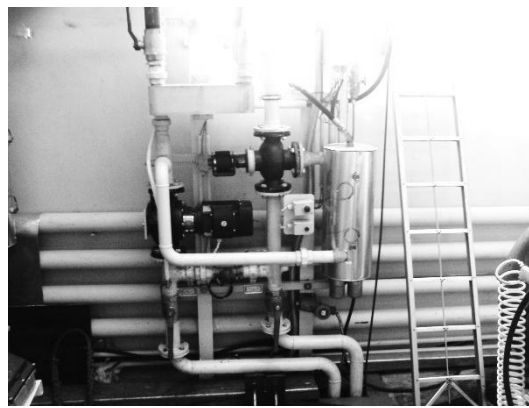


Рис.10 - Стендовая система сброса теплоты, отводимой ОЖ

При модернизации стенд оборудован датчиками температуры (тип ДТС и ДТПК), установленными в ГБЦ (рис. 12), а также датчиками давления (АИР-10) и расхода охлаждающей жидкости (ТПР 17-3-1).

Согласно разработанной методике проведения экспериментальных исследований измерялись параметры двигателя (рис.13) по ГОСТ 14846-81, ГОСТ Р41.24–2003, дополнительно проводились измерения расхода ОЖ,

температуры межклапанных перемычек, давлений на входе и выходе из насоса системы охлаждения и др.

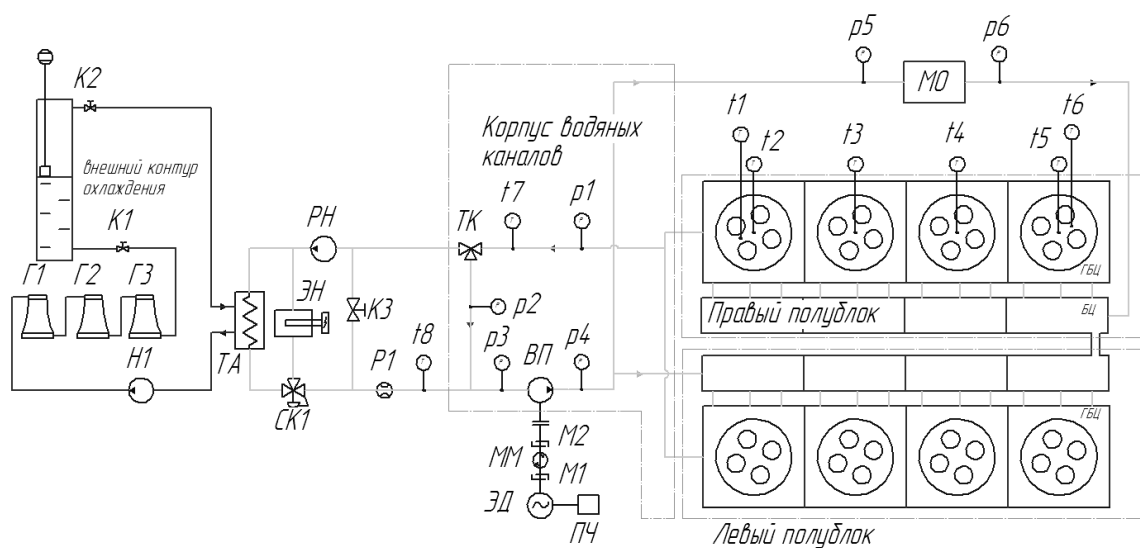


Рис.11 - Принципиальная схема экспериментального стенда: ВП – водяная помпа; ТК – термостатная коробка; МО – маслоохладитель; РН – регулируемый насос; ТА – теплообменный аппарат; Н1 – внешний насос системы сброса тепла; Г1-Г3 – градирни; ЭН – электронагреватель ОЖ; СК1 – соленоидный клапан; p1-p6 – датчики давления; t1-t8 – термопары; ММ – датчик момента; ПЧ – преобразователь частоты

Все датчики и измерительные приборы прошли метрологическую поверку. Достоверность результатов измерений обеспечена многократным повторением экспериментов на характерных режимах работы двигателя, а также статистической обработкой результатов. Оценка погрешностей измерений составила для температуры ОЖ $T_{ож} = \pm 1\%$; для расхода охлаждающей жидкости $G_{ож} = \pm 0,4\%$; для эффективной мощности $N_e = \pm 0,32\%$; для удельного эффективного расхода топлива $g_e = \pm 0,33\%$.

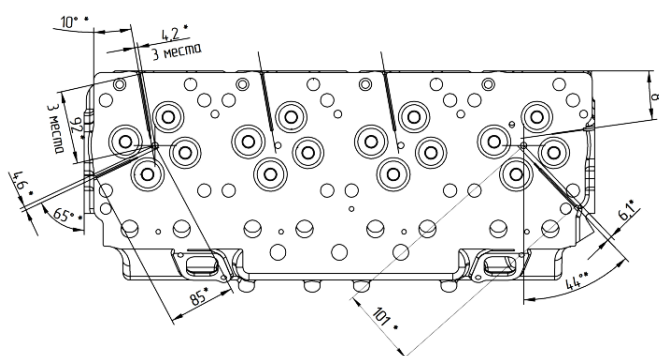


Рис.12 – Схема расположения термопар в моноголовке блока цилиндров

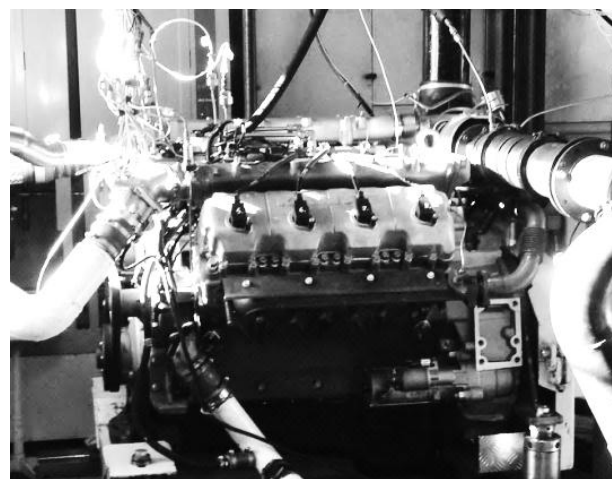


Рис.13 – Внешний вид двигателя со смонтированной системой измерений

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей и наложены на результаты численных исследований с целью верификации последних (рис.14). Верификация показала их высокую сходимость на режиме прогрева двигателя при 900, 1300 и 1900 об/мин КВ. Для

всех приведенных зависимостей на рис.14 величина отклонения результатов экспериментальных исследований от численных не превышает 3%.

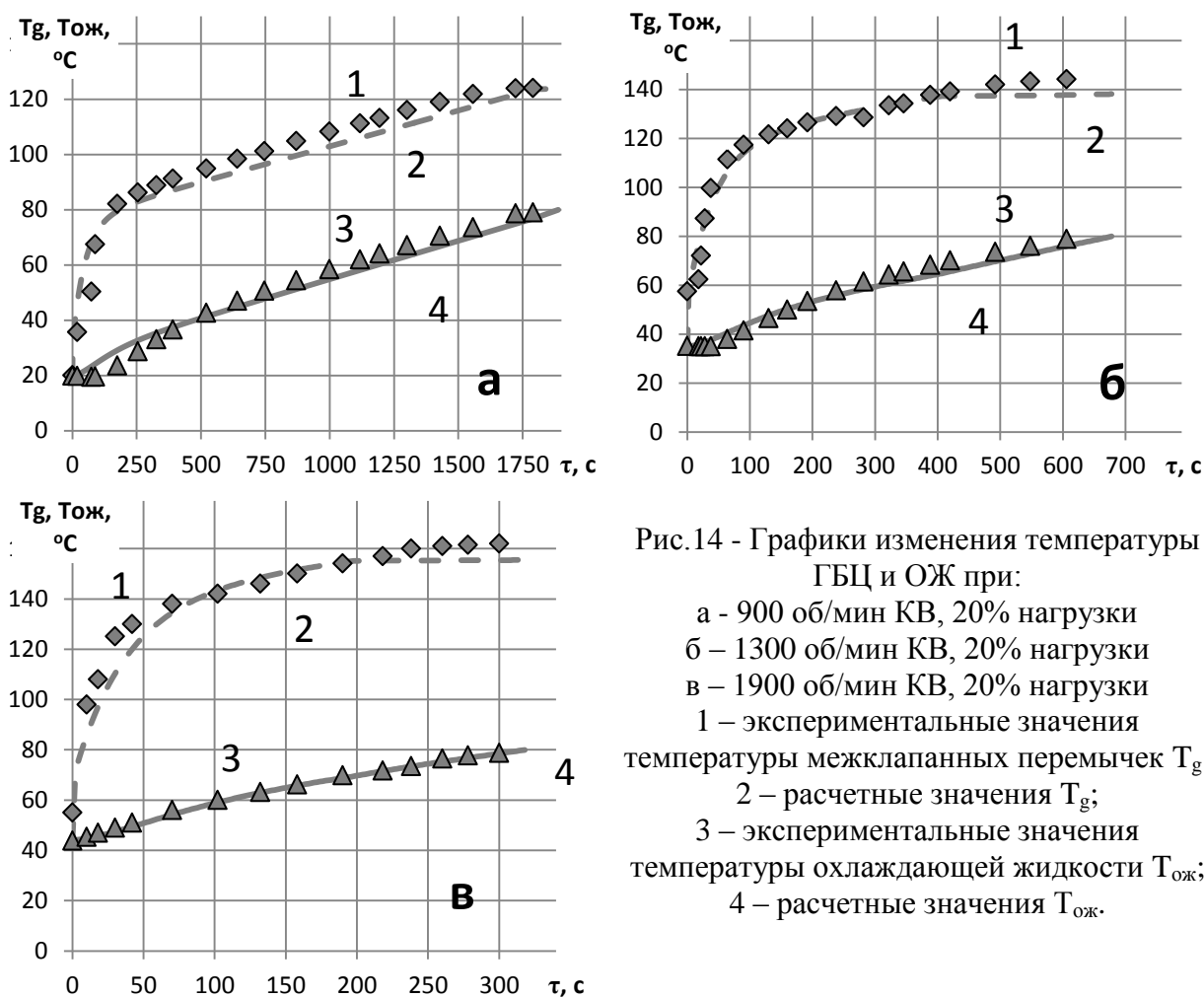


Рис.14 - Графики изменения температуры ГБЦ и ОЖ при:
 а - 900 об/мин КВ, 20% нагрузки
 б - 1300 об/мин КВ, 20% нагрузки
 в - 1900 об/мин КВ, 20% нагрузки
 1 – экспериментальные значения температуры межклапанных перемычек T_g ;
 2 – расчетные значения T_g ;
 3 – экспериментальные значения температуры охлаждающей жидкости $T_{ож}$;
 4 – расчетные значения $T_{ож}$.

По результатам экспериментальных исследований характеристик двигателя дополнительно выявлено существенное влияние параметров системы охлаждения на экологические показатели поршневого двигателя, которые представлены на рис.15. При увеличении температуры ОЖ с 40 до 90⁰С значительно снижается дымность K_X на 41 % (с 0,355 до 0,21 м⁻¹ по шкале Боша) и концентрация оксида углерода CO на 79,5 % (с 830 до 168 ppm). Зависимость концентрации оксидов азота NO_x имеет более сложный характер. При увеличении $t_{ож}$ с 40 до 45⁰С выброс увеличивается с 595 до 640 ppm, т.е. на 7 %, при повышении $t_{ож}$ до 75⁰С приводит к снижению на 27 % (с 640 до 467 ppm), а при дальнейшем повышении до 90⁰С несколько увеличивается на 4,6 % (490 до 467 ppm). При этом выбросы оксидов азота незначительно возрастают от 56 до 61 ppm.

Из полученных результатов экспериментальных исследований видно, что для улучшения интегральных экологических показателей двигателя продолжительность режима прогрева должна быть минимальной.

Кроме того, выявлено, что по мере прогрева поршневого двигателя снижается расход топлива, а, следовательно, повышается общий КПД двигателя (рис.16), что особенно существенно при низкой частоте вращения КВ. Так для режима 900 об/мин КВ повышение КПД составляет 6% при нагреве

ОЖ от 20 до 80⁰С, а для режима 1300 об/мин КВ всего 1,5 %. Для учета влияния температуры охлаждающей жидкости на удельный расход топлива, в функциональную модель системы охлаждения двигателя добавлены дополнительные узлы. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде аппроксимационных зависимостей 3 и 4.

$$\eta = 0,000758934390294386 * t_{ож} + 0,29004922209357 \text{ для } 900 \text{ об/мин КВ} \quad (5)$$

$$\eta = 0,340738427592015 + t_{ож} * 0,000303489851450115 \text{ для } 1300 \text{ об/мин КВ} \quad (6)$$

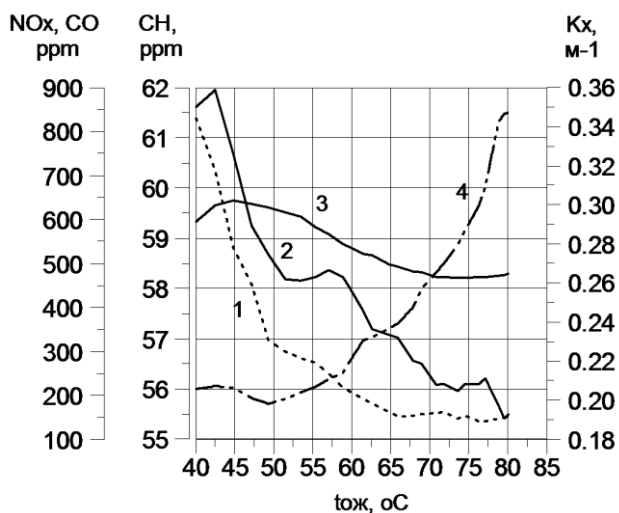


Рис.15 –Влияние температуры ОЖ на выбросы NOx, CH, CO и дымность

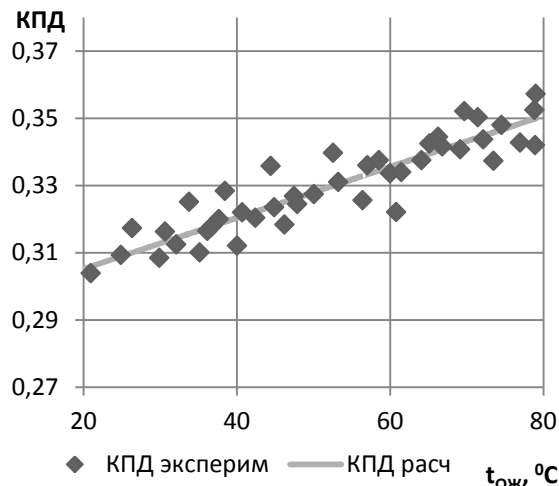


Рис.16 - График зависимости КПД ДВС от температуры ОЖ при 900 об/мин КВ, 20 % нагрузки

Верификация модифицированной функциональной модели поршневого авиационного двигателя показала хорошую качественную и количественную сходимость результатов численных и экспериментальных исследований характеристик двигателя, его системы охлаждения на различных режимах и нагрузках. Кроме того, выявлено, что для повышения топливной эффективности двигателя и его экологических характеристик время прогрева должно быть сокращено.

Поэтому целесообразно на полученной модифицированной функциональной модели исследовать возможность снижения частоты вращения водяного насоса для достижения минимального времени прогрева и выхода на оптимальный с точки зрения экономии топлива и экологических характеристик режим.

В четвертой главе приведены основные результаты численных исследований влияния оборотов водяной помпы на время прогрева двигателя и его топливную эффективность, выполнен их анализ. На основе проведенных расчетов предложен вариант модернизации системы охлаждения поршневого авиадвигателя, представлено описание адаптивной системы охлаждения (АСО), разработан прототип АСО для поршневого двигателя внутреннего сгорания.

С использованием модифицированной функциональной модели СО (рис.8) проведена серия расчетов параметров СО двигателя при прогреве на режимах, соответствующих полученным ранее экспериментально, с вариативным приводом водяной помпы, результаты которых представлены на рис.17.

№ режима	1	2	3
Обороты КВ, об/мин	900	1300	1900
Мощность двигателя, кВт	21	61	78
Мощность, отводимая в СО ДВС, кВт	18	30	39

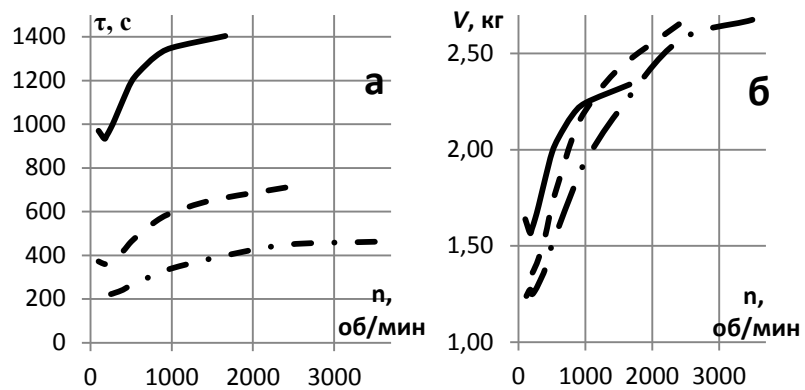


Рис.17 - Влияние частоты вращения водяного насоса на

а - время прогрева и б - на количество потребленного топлива за время прогрева
 – режим №1; – – №2; - · - №3

Графические зависимости времени прогрева ОЖ $\tau=f(n)$ и количества потребленного топлива от частоты вращения помпы $V=f(n)$ описываются следующими уравнениями (7-12):

900 об/мин КВ:	$\tau = 1421 - \frac{533,4}{1 + \frac{n^{2,5}}{457,7}} \quad (7)$	$V = 2,38 - 643,14 \cdot \frac{766,8}{4 \cdot (n - 105)^2 + 587959} \quad (10)$
1300 об/мин КВ:	$\tau = 741 - \frac{403,7}{1 + \frac{n^{2,03}}{759,3}} \quad (8)$	$V = 2,81 - 1,46 \cdot e^{-\frac{n-214,24}{963,7}} \quad (11)$
1900 об/мин КВ:	$\tau = 467,6 - \frac{412}{1 + e^{-\frac{n-489,4}{673,6}}} \quad (9)$	$V = 2,69 - 2,1 \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{n+1087}{2960}\right)^2} \quad (12)$

Из анализа представленных графиков видно, что снижение оборотов помпы приводит к существенному снижению времени прогрева ОЖ. Так, для режима №1 время прогрева уменьшается с 1400 с до 1000 с, для режима №2 с 700 с до 350 с, а для режима №3 более чем в 2 раза – с 470 с до 220 с, а экономия топлива для режима №1 составляет 0,7 кг, для режима №2 1,3 кг, а для режима №3 1,4 кг.

Необходимо отметить, что при определенной частоте вращения помпы (1100-1200 об/мин) количество потребленного топлива одинаково для различных мощностных режимов №1 и №2. При частоте вращения помпы больше 1700 об/мин увеличение мощности, отводимой в СО, приводит, при общем снижении времени прогрева, к росту количества потребленного топлива.

Очевидно, что для достижения минимального времени прогрева и количества затраченного топлива необходимо максимально снижать частоту вращения водяной помпы, но до определенного предела, для каждого режима разного. Так для режима №1 это 150 об/мин, для №2 – 200 об/мин, а для №3 – 300 об/мин. Данное ограничение связано с возникновением пленочного кипения и с возможным перегревом деталей ЦПГ, что приводит к снижению ресурса двигателя.

Результатом проведенных расчетных исследований стало создание адаптивной системы охлаждения поршневого авиадвигателя, отличающейся от штатной регулируемым электрическим приводом водяной помпы с интеллектуальным управлением (рис.18).

Применение АСО снижает тепловую напряженность деталей цилиндро-поршневой группы, мощность потребляемую водяной помпой, время прогрева двигателя.

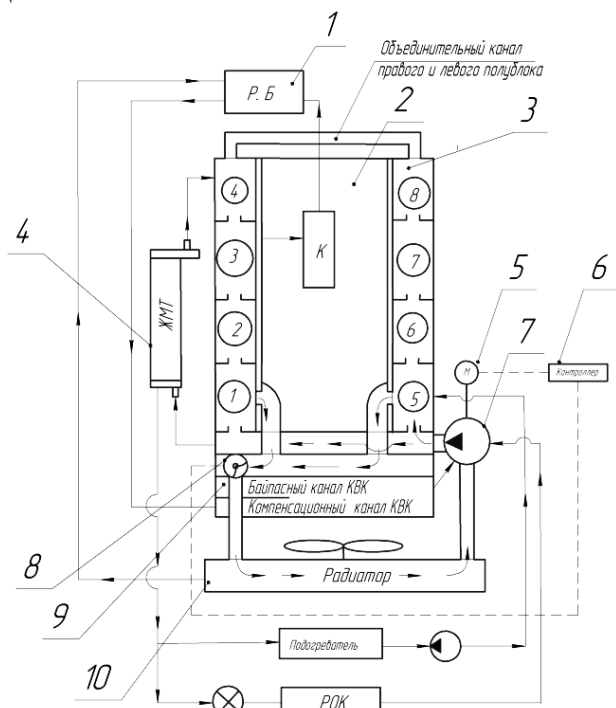


Рис.18 – Адаптивная система охлаждения ДВС: 1- расширительный бачок; 2 – БЦ; 3 – ГБЦ; 4 – маслоохладитель; 5 – электропривод помпы; 6 – контроллер; 7 – помпа; 8 – электронный термостат; 9 – корпус водяных каналов; 10 - радиатор



Рис.19 – Тестовый двигатель с электрическим приводом водяного насоса

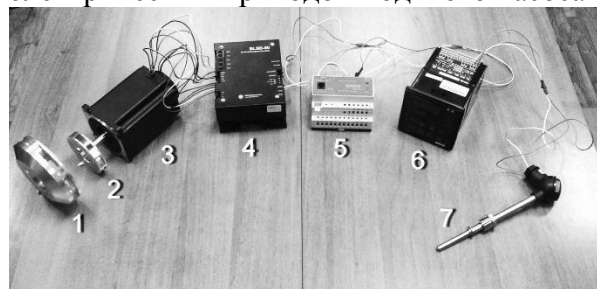


Рис.20 – Внешний вид прототипа АСО:

Проработано схемное и компоновочное решение АСО для двигателя КАМАЗ 750.10-500, построена трехмерная модель двигателя с АСО в программном комплексе UG NX (рис.19), скомплектован и собран первый прототип АСО для безмоторных испытаний (рис.20).

Прототип адаптивной системы охлаждения работает следующим образом. Информация с датчиков температуры, установленных до и после двигателя, поступает на восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ138. Преобразовав эти данные в цифровой код, измеритель-регулятор отправляет их на контроллер, который согласно заданному алгоритму вырабатывает соответствующие сигналы на аналоговых выходах. Управление приводом 3-х ходового клапана и электроприводом водяной помпы происходит стандартным унифицированным сигналом – напряжением 0..10В.

Адаптивная система охлаждения проходит испытания в составе прототипа двигателя КАМАЗ в рамках государственного контракта с Министерством образования и науки РФ №02.G25.31.0004 от 12.02.2013 г.

Необходимость снижения частоты вращения водяной помпы поршневого двигателя при поддержании высокой эффективности работы всей системы охлаждения в целом предъявляет дополнительные требования к геометрии лопастного колеса помпы, обеспечивающей высокий КПД в широком диапазоне оборотов, что особенно актуально для режимов прогрева двигателя.

В работе поставлена задача создания новой крыльчатки для водяной помпы системы охлаждения двигателя.

В пятой главе разработана комбинированная методика создания лопастного колеса для жидкостных насосов, приведены результаты анализа характеристик штатной водяной помпы тестового поршневого дизельного двигателя с использованием данной методики. Разработана геометрия перспективной крыльчатки с высокими характеристиками в широком диапазоне оборотов, представлены результаты расчетов адаптивной системы охлаждения на режиме прогрева с модернизированным рабочим колесом водяной помпы.

Существующие методики проектировочных расчетов водяных центробежных насосов и специализированные методики для расчета водяных помп поршневых двигателей позволяют получить характеристики рабочих колес (РК) достаточно грубо. Для расчета геометрических параметров рабочего колеса водяной помпы уточнена комбинированная методика, основанная на работах Овсянникова Б.В., Ломакина А.А., Михайлова А.К, позволяющая провести расчет геометрических характеристик различных вариантов лопастных колес водяной помпы.

В ходе проверочного расчета по уточненной методике РК выявлено, что штатное колесо водяной помпы тестового двигателя переразмерено (диаметр расчетного колеса меньше фактического). Расчетный коэффициент быстроходности у колеса равен 44,5 об/мин, а соотношения входного и внешнего диаметра рабочего колеса $\frac{D_2}{D_0} = 1,85$, из чего можно сделать вывод, что по коэффициенту быстроходности колесо является тихоходным, а по соотношению диаметров быстроходным, что снижает эффективность данного колеса.

По методике, предложенной Д.В. Кирилловым, построен профиль лопаток насосного колеса (рис.21) с высоким гидравлическим КПД, обеспечивающим безотрывные режимы течения жидкости, который значительно отличается от штатного РК.

Для анализа характеристик штатного водяного насоса при различных оборотах, проведены численные исследования гидродинамических процессов в каналах водяного насоса в стационарном режиме с использованием программного комплекса ANSYS. Для чего разработаны конструкторские и конечно-элементные модели лопастного колеса, улитки и подвода штатного КВК, объемом до 2 млн. узлов.

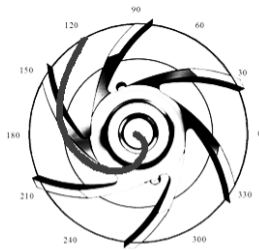


Рис.21 – Сравнение профилей лопаток

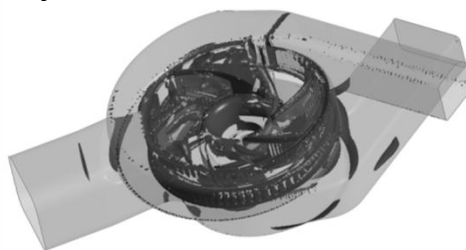


Рис.22 – Расчетные области кавитационных каверн РК



Рис.23 - Эрозия РК КАМАЗ вследствие кавитации.

По результатам моделирования построены поля линий тока в каналах водяной помпы и расчетные области возникновения кавитационных каверн в потоке (рис.22), особенно в зоне выхода из улитки, наличие которых подтверждается следами эрозии на реальных лопастных колесах водяной помпы (рис.23).

Для верификации вычислительной модели водяной помпы разработан гидравлический безмоторный экспериментальный стенд, включающий в свой состав рубашку охлаждения, штатный КВК и помпу поршневого двигателя, с системой измерения и управления (рис.24). Разработана методика испытаний, получены экспериментальные данные, подтвердившие хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов.

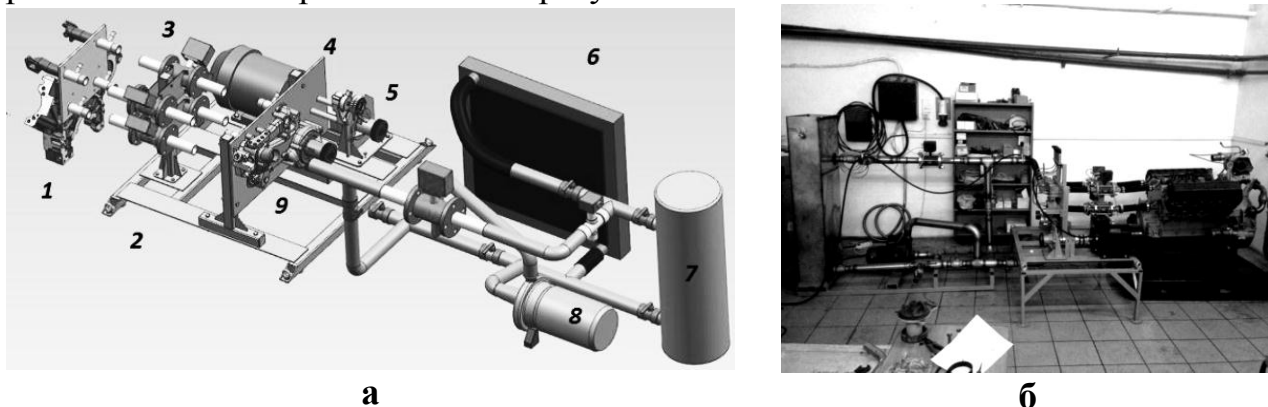


Рис.24 – Экспериментальный гидравлический стенд: а – компоновка; б – внешний вид. 1 – двигатель КАМАЗ; 2 – рама; 3 – блок расходомеров; 4 - электропривод помпы; 5 – помпа с измерителем момента на валу; 6 – радиатор; 7 – расширительный бак; 8 – внешний насос

Анализ теплового баланса ДВС показал, что заданный по паспортным данным расход охлаждающей жидкости через радиатор тестового дизельного двигателя, составляющий 450 л/мин, недостаточен для обеспечения эффективного охлаждения. Имеется необходимость разработки лопастного колеса водяной помпы, рассчитанного на большую производительность с высоким КПД в широком диапазоне оборотов для применения в АСО.

Далее выполнен проектировочный расчет перспективного РК водяной помпы с использованием описанных выше методик, с учетом существующих габаритов корпуса водяных каналов (КВК). С целью проверки расчетных характеристик перспективного РК разработана его конструкторская и конечно-элементная модель и выполнен конечно-элементный анализ полей скоростей и давлений в программном комплексе ANSYS, результаты которого показали отсутствие вихревых и кавитационных зон в каналах РК в заданном диапазоне оборотов (рис.25). Исследовано влияние начального угла наклона лопаток на напорную характеристику и КПД водяной помпы для номинального режима работы 3500 об/мин, выбран рациональный вариант соотношения угла наклона $\beta=25$ и числа лопаток $z=9$ в лопастном колесе (таблица 1).

Для верификации расчетной модели методом прототипирования изготовлено перспективное РК (рис.26) и проведены экспериментальные исследования характеристик водяной помпы. Результаты расчетных и экспериментальных исследований характеристик водяной помпы с различными лопастными колесами представлены на рис. 27.

Таблица 1

Параметры			Напо р, кПа	КПД, %
β_1'	β_2'	z		
30	40	9	189	75
25	40	9	195	74
27	40	9	204	70
23	40	9	187	69
25	40	11	157	60
25	60	9	208	66
25	40	11	157	60

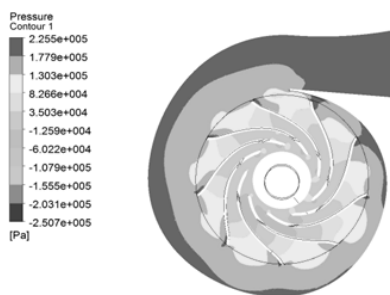


Рис.25 – Расчетные поля давлений перспективного РК



Рис.26 – Изготовленный прототип перспективного РК

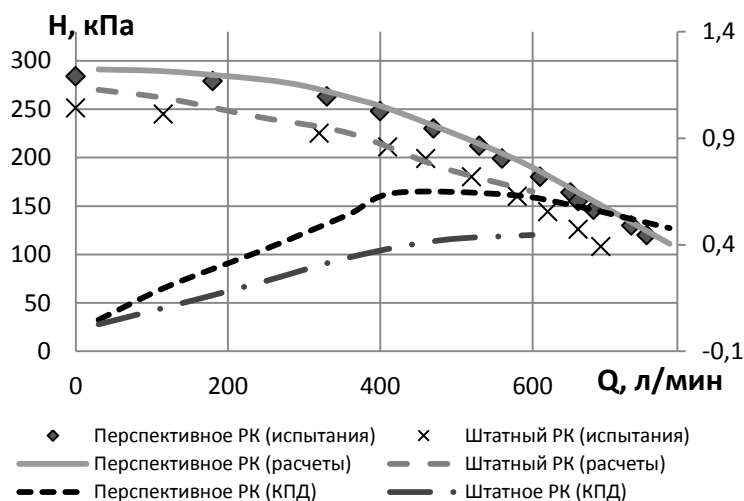


Рис. 27 – Напорные характеристики и КПД штатного и перспективного РК по результатам расчетов и экспериментальных исследований

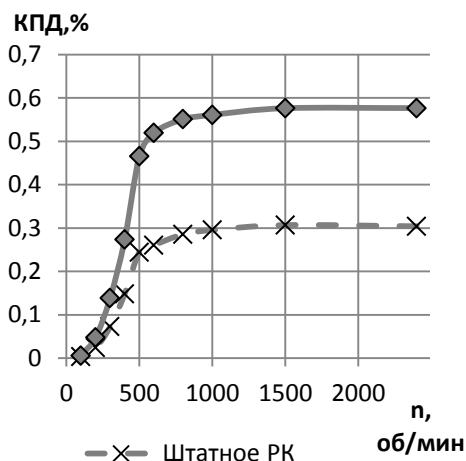


Рис. 28 – Графики КПД для штатного и модернизированного насоса системы охлаждения

Из анализа расчетных и экспериментальных характеристик перспективного и штатного РК водяного насоса системы охлаждения хорошо видно, что новое РК обладает лучшими характеристиками. Напор развиваемый новым РК выше на 10-15 % штатного, как для расчетных, так и экспериментальных данных. КПД перспективного РК достигает максимальной величины при подаче 400 л/мин, и для нового колеса превышает значения штатного на 40 %.

Результаты моделирования работы водяной помпы в составе системы охлаждения двигателя с использованием модернизированной функциональной модели СО в программном комплексе LMS AMESim, приведенные на рис.28, показали значительный рост эффективности водяной помпы с перспективным РК более чем на 30% в интервале оборотов привода от 600 до 2500 об/мин. При снижении оборотов ниже 500 об/мин КПД водяной помпы снижается до 0,05 при 200 об/мин, что тем не менее выше эффективности штатной помпы.

Вследствие малой продолжительности режима прогрева применение модифицированной помпы в адаптивной системе охлаждения не дает существенного экономического эффекта, однако на режимах номинальной и максимальной нагрузки снижение затрачиваемой мощности на привод помпы достигает 30% при увеличении напора и расхода ОЖ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании численных исследований, выполненных с использованием функциональных моделей системы охлаждения поршневого авиадвигателя, разработанных в программном комплексе LMS AMESim, и экспериментальных исследований на модифицированном моторном стенде получены следующие результаты:

1. Созданы функциональная и математическая модели для расчета температурных режимов и теплофизических процессов происходящих в элементах системы охлаждения и деталях поршневых авиационных двигателей, на которых выполнены численные исследования в режиме прогрева авиадвигателя.

2. Внесены изменения в программный код элементов библиотеки Thermal Hydraulic программного комплекса LMS AMESim, для реализации возможности расчета режима поверхностного кипения в зарубашечном пространстве поршневого двигателя, со сглаживанием коэффициентов теплоотдачи при фазовых переходах.

3. Модернизирована система измерений испытательного моторного стенда для экспериментальных исследований режима прогрева системы охлаждения поршневого авиационного дизельного двигателя и головки блока цилиндров, позволяющая проводить детальные исследования температурных режимов и теплофизических процессов в элементах двигателя.

4. Выявлено, что рост температуры охлаждающей жидкости тестового двигателя в процессе прогрева от 200С до 800С приводит к снижению удельного эффективного расхода топлива с 222 г/кВт*ч до 220,9 г/кВт*ч, и снижению выбросов NOx с 640 до 470 ppm, выбросов CO с 820 до 150 ppm, при незначительном росте выбросов СН 56 до 62 ppm.

5. Определены рациональные частоты вращения водяной помпы в системе охлаждения двигателя, позволяющие снизить время прогрева двигателя и обеспечить его высокие технико-экономические показатели, так при 900 об/мин коленчатого вала (КВ) – это 150 об/мин (режим №1), 1300 об/мин КВ – 200 об/мин (режим №2), 1900 об/мин КВ – 300 об/мин (режим №3). Соответственно для режима №1 время прогрева уменьшается с 1400 с до 1000 с, для режима №2 с 700 с до 350 с, для режима №3 – с 470 с до 220 с, при этом экономия топлива для режима №1 составляет 0,7 кг, для режима №2 - 1,3 кг, а для режима №3 - 1,4 кг.

6. Предложено схемное и конструктивное решение высокоэффективной адаптивной системы охлаждения поршневого авиационного V-образного дизельного двигателя с регулируемым электрическим приводом водяной помпы, обеспечивающим оптимальное тепловое состояние ДВС, соответствующее наиболее высоким технико-экономическим, экологическим и ресурсным показателям двигателя.

7. Выявлены оптимальные характеристики рабочего колеса водяной помпы, разработано и изготовлено высокоэффективное лопастное колесо,

обеспечившее повышение напора на 30%, подачи на 15 % и рост КПД на 20 % в номинальном режиме работы двигателя при оборотах 3500 об/мин.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рекомендуемых ВАК журналах:

1. *Салахов Р.Р.* Применение адаптивной системы охлаждения на высокофорсированном газовом двигателе КАМАЗ / А.Х. Хайруллин, В.М. Гуреев, Р.Р. Салахов, И.Р. Салахов, В.В. Бурлаков // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2014. – №2. – С. 71-73.

2. *Салахов Р.Р.* Исследование технико-экономических и экологических показателей дизеля, работающего на смесевых биотопливах растительного происхождения / А.Х. Хайруллин, В.М. Гуреев, Р.Р. Салахов, И.Р. Салахов, А.В. Зонов // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2014. – №2. – С. 74-76.

3. *Салахов Р.Р.* Исследование характеристик и моделирование работы системы утилизации теплоты когенерационной установки / Р.Р. Салахов, Д.Р. Ямалов, В.М. Гуреев, И.Р. Салахов, Д.И. Кудусов. // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2014. – №3. – С. 68-74.

4. *Салахов Р.Р.* Дифференциальное уравнение двигателя внутреннего сгорания с адаптивной системой охлаждения как объекта регулирования / А.Х. Хайруллин, В.М. Гуреев, Р.Р. Салахов, И.Р. Салахов, Д.И. Кудусов // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2013. – №2. – С. 38-42.

5. *Салахов Р.Р.* Совершенствование когенерационных энергетических установок путем применения адаптивной системы охлаждения / В.М. Гуреев, Р.Р. Салахов, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов, А.П. Сосновский // Энергетика Татарстана. – 2012. – №4. – С. 13-18.

6. *Салахов Р.Р.* Система управления адаптивной системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Р.Р. Салахов, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов // Труды МАИ. – 2012. – №61. – С. 16.

Работы, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

7. *Салахов Р.Р.* Оценка влияния теплового состояния дизеля на концентрацию токсичных компонентов в отработавших газах на режиме прогрева (Assessing Concentration of the toxic Impact of Components in the Exhaust Gas of a Diesel Engine on the Thermal State of the Warm-Up Mode) / А.Х. Хайруллин, Р.Р. Салахов, В.М. Гуреев, Р.Р. Хасанов, И.Ф. Гумеров // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, ISSN: 0975-8585 (Индия). – 2014. - С. 1778-1782.

8. *Салахов Р.Р.* Исследования технико-экономических и экологических показателей дизеля, работающего на смесевых биотопливах растительного происхождения (Feasibility study and environmental performance of diesel running on biofuels mixed vegetable) / А.Х. Хайруллин, Р.Р. Салахов, В.М.

Гуреев, Р.Р. Хасанов, И.Ф. Гумеров, А.В. Петров // Eastern European Scientific Journal, DOI 10.12851 (Германия). - №6. – 2013. - С. 122-125.

9. *Салахов Р.Р.* Разработка адаптивной системы охлаждения ДВС / И.Ф. Гумеров, В.М. Гуреев, Ю.Ф. Гортышов, Р.Р. Салахов, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов // Двигатели внутреннего сгорания. (Украина). – 2013. – №2. - С. 81-85.

10. *Салахов Р.Р.* Исследование эффективности адаптивной системы охлаждения для транспортного двигателя, работающего на метане / Р.Р. Салахов, В.М. Гуреев, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов, А.Р. Гараев // Материалы Междунар. научно-техн. конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2013» (МНТК «ИМТОМ-2013») и Форума «Повышение конкурентоспособности и энергоэффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО». – Казань, 2013. – Ч. 1.- С. 283-287.

11. *Салахов Р.Р.* Исследование технико-экономических и экологических показателей дизеля КАМАЗ, работающего на смесях соевого масла с дизельным топливом / Р.Р. Салахов, В.М. Гуреев, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов, А.Р. Гараев // Материалы Междунар. научно-техн. конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2013» (МНТК «ИМТОМ-2013») и Форума «Повышение конкурентоспособности и энергоэффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО». – Казань, 2013. – Ч. 1. - С. 287-291.

12. *Салахов Р.Р.* Совершенствование системы охлаждения ДВС путем применения жидкостного насоса с электроприводом / Р.Р. Салахов, А.Х. Хайруллин, И.Р. Салахов // VIII школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова "Проблемы теплообмена в гидродинамике в энергомашиностроении", Казань, 2012 г. - Казань, 2012. – С.94-95.

13. *Салахов Р.Р.* Экспериментальный стенд для физического моделирования процессов в тригенерационной установке на базе газопоршневого двигателя и парокompрессионной теплонасосной установки / Р.Р. Салахов, И.Р. Салахов // Тезисы 23-й Всерос. Межвуз. научно-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», Казанское ВВКУ (военный институт), Казань, 16-18 мая 2011 г. - Казань, 2013. – С.34-37.

14. *Салахов Р.Р.* Разработка экспериментального стенда для физического моделирования процессов в тригенерационной установке на базе газопоршневого двигателя и парокompрессионной теплонасосной установки / Р.Р. Салахов, И.Т. Мисбахитдинов, А.М. Ермаков // Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», Москва, 8 – 10 декабря 2010 г. – М., 2010. – С.57-60.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100. Заказ Д47

Полиграфический участок Издательства КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10