ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт

ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

На правах рукописи

Богданов Виктор Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность 05. 04. 02 - Тепловые двигатели

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московский государственный индустриальный университет (ФБГОУ ВПО «МГИУ»)

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор Шейпак Анатолий Александрович

Официальные оппоненты -

Парамонов Николай Васильевич доктор технических наук, профессор Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), кафедра "Авиационно-космическая теплотехника"

Марюшин Леонид Александрович кандидат технических наук, доцент ФБГОУ ВПО «МГИУ» заведующий кафедрой "Промышленная энергетика"

Ведущая организация -

ОАО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", г. Подольск

Защита диссертации состоится «18» декабря 2013 г. в 14 № на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 ВАК РФ при Государственном научном центре Российской Федерации - Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно- исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (ГНЦ ФГУП «НАМИ») по адресу: 125438, Москва, Автомоторная ул., 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГНЦ ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, Москва, Автомоторная ул., 2.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан «13» ноября 2013 г. Телефон для справок (495) 456-40-40.

Учёный секретарь диссертационного совета, к.т.н. ст. научный сотрудник

А.Г. Зубакин

e-mail: A.Zubakin@nami.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экономия энергетических ресурсов была и остаётся одной из важнейших задач промышленного развития любого общества.

Основная доля добываемого ископаемого топлива требуется для обеспечения работы тепловых двигателей, значительная часть которых представлена поршневыми ДВС. Высокая стоимость и ограниченность запасов углеводородного топлива ставит потребителей перед необходимостью постоянного поиска вариантов его более рационального использования. Направления деятельности в этой области связаны как с совершенствованием непосредственно первичных преобразователей энергии (тепловых двигателей), так и с более эффективным использованием вторичной теплоты, активный сброс которой в окружающую среду является неизбежным следствием их работы.

Утилизацию вторичной теплоты можно считать наиболее действенным и перспективным мероприятием, направленным на повышение эффективности тепловых силовых установок всех типов, в том числе и на базе поршневых ДВС. Возможности использования вторичного тепла остаются на сегодня одними из основных резервов повышения рентабельности их эксплуатации.

Активно развиваются как простейшие варианты утилизации — совместное производство механической (электрической) и тепловой энергии (теплофикация), так и более сложные - обеспечивающие дополнительное преобразование вторичной теплоты в механическую энергию, связанные с реализацией комбинированных термодинамических циклов.

Организация эффективной утилизации теплоты на силовых установках, где в качестве базового двигателя используется ДВС, сталкивается с рядом сложностей. Основная часть вторичной теплоты ДВС теряется как с отработанными газами, так и через систему охлаждения. Поэтому на ДВС необходимо выполнение ряда мероприятий по утилизации, как доли тепла отходящей с отработанными газами, так и доли тепла, отводимой в систему охлаждения. Системы утилизации теплоты ДВС, получили широкое распространение в судостроении. Успешно применяются как системы утилизации теплоты отработанных газов главных и вспомогательных двигателей, так и системы комплексной утилизации, с дополнительным использованием тепла системы охлаждения.

На крупных судовых и теплоэнергетических установках удаётся сохранять эффективность капиталовложений в системы утилизации теплоты за счёт высокого внешнего потребления вырабатываемых ими тепла и электроэнергии. На наземной мобильной технике с тепловыми приводами возможности такого потребления ограничены, и системы утилизации теплоты должны в основном обеспечивать выработку механической энергии с её передачей на вал главного двигателя. На сегодня уровень рентабельности существующих в этой области разработок не удовлетворяет необходимым требованиям. Многочисленные попытки создания систем утилизации теплоты, например, для автомобильных двигателей, не вывели работы в этой области из стадии НИОКР, и в широкой эксплуатации такие системы не встречаются. Тем не менее, текущее состояние с ценами на энергоно-

сители делает неизбежным продолжение работ как, по совершенствованию действующих, так и по разработке новых вариантов систем утилизации теплоты для всех областей применения, а актуальность исследований в этой области только нарастает.

Цель работы - повышение эффективности существующих и разработка перспективных систем утилизации теплоты ДВС, предназначенных, прежде всего, для наземной мобильной техники различного назначения.

Достижение указанных целей предполагается осуществить за счёт выполнения следующих мероприятий:

- теоретическое обоснование, методологическое обеспечение, практическая реализация и экспериментальные исследования системы высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными температурой и давлением охлаждающего тела;
- разработка, теоретическое обоснование, математическое моделирование, практическое осуществление и экспериментальные исследования нового варианта комбинированного (парогазового, газогазового) цикла, или цикла с подачей дополнительного рабочего тела, предназначенного для реализации на ДВС;
- разработка конструкции, практическое создание и экспериментальные исследования действующей модели ДВС, оборудованной комплексной системой утилизации теплоты на базе высокотемпературного испарительного охлаждения с повышенными параметрами и реализацией различных вариантов цикла с подачей дополнительного рабочего тела.

Методы исследования - в основном носят экспериментальный характер. Теоретические исследования и расчёты проводились на основе классических методов термодинамики, теплопередачи и теории рабочих процессов ДВС.

Для экспериментальных исследований автором была разработана и изготовлена действующая модель поршневого ДВС оборудованного комплексной системой утилизации теплоты на основе высокотемпературного испарительного охлаждения с технической возможностью реализации цикла с подачей дополнительного рабочего тела.

Испытания модели проводились на моторном исследовательском стенде, оснащённом аттестованной измерительной аппаратурой. Стенд также разработан и изготовлен автором.

Вычислительная техника широко использовалась на стадии обработки результатов экспериментов.

Объект исследования - действующая модель ДВС, созданная на базе двухтактного карбюраторного двигателя Д-8, рабочим объёмом 50 см³, оборудованная комплексной системой утилизации теплоты на основе высокотемпературного испарительного охлаждения с повышенными параметрами и с имеющейся технической возможностью осуществления цикла с подачей дополнительного рабочего тела.

Научная новизна результатов работы:

- предложен способ высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными параметрами (температура, давление);
 - дано теоретическое обоснование возможностей достижения повышенных

температур теплоносителя в системах охлаждения ДВС;

- приведён пример расчёта системы высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными температурами;
- разработан ряд практических мероприятий и методических приёмов по организации охлаждения ДВС при повышенных параметрах;
- разработана и создана действующая модель ДВС с системой высокотемпературного испарительного охлаждения с повышенными параметрами;
- проведены экспериментальные исследования влияния повышенной температуры в системе охлаждения на основные эффективные показатели двигателя и на работу комплексной системы утилизации теплоты ДВС;
- предложен вариант комбинированного (парогазового, газогазового) цикла, или цикла с подачей дополнительного рабочего тела, предназначенный для реализации на ДВС;
- предложена методика расчёта цикла с подачей дополнительного рабочего тела;
- проведён сравнительный расчёт, по классической методике, стандартного дизельного двигателя и аналогичного двигателя с реализацией цикла с подачей дополнительного рабочего тела;
- разработана конструкция и создана действующая модель ДВС с возможностью реализации различных вариантов цикла с подачей дополнительного рабочего тела;
- проведены экспериментальные исследования действующей модели ДВС с реализацией дополнительной подачи в рабочий цикл сжатого воздуха различной температуры;
- на основе результатов индицирования рабочего процесса двухтактного ДВС и испытаний установленной на нём комплексной системы утилизации теплоты, проведено математическое моделирование процесса подачи водяного пара в цилиндр двигателя на рабочем ходу;
- разработаны и испытаны отдельные, оригинальные детали и элементы конструкции ДВС необходимые для реализации цикла с подачей дополнительного рабочего тела, предложены рекомендации по их совершенствованию.

Практическая ценность. Выполненные в работе исследования имеют большую практическую ценность. В диссертации в полном объёме рассмотрены два основных технических предложения, направленные на повышение эффективности, как уже существующих энергетических силовых установок с системами утилизации теплоты на базе ДВС, так и на разработку новых, перспективных типов таких установок. Это способ высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными параметрами теплоносителя и вариант цикла с подачей дополнительного рабочего тела. Указанные технические предложения имеют самостоятельную практическую ценность, однако наибольший эффект они дают при совместном использовании.

Полный цикл расчётных и экспериментальных работ, проведённый по этим предложениям, включающий в себя: - формулировку технических идей; разработку принципов их практической реализации; теоретические расчёты и матема-

тическое моделирование; конструирование и изготовление действующей модели; проведение экспериментальных исследований; обработку и анализ экспериментальных данных; подготовку предложений по дальнейшему техническому совершенствованию - обеспечивает возможность, уже на текущем этапе, организацию работ по практической реализации данных технических предложений на полномасштабной установке, с целью подготовки мелкосерийного и/или серийного производства.

Созданный экспериментальный моторный стенд, оснащённый комплексом приборов и оборудования, позволяет продолжать практические исследования, как уже разработанных, так и перспективных моделей силовых установок.

Основные положения, выносимые на защиту:

- способ высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенной температурой и давлением охлаждающего тела;
- порядок расчёта площади поверхностей охлаждения деталей ЦПГ ДВС необходимой для обеспечения его надёжной работы в условиях высокотемпературного охлаждения с повышенной температурой охлаждающего тела;
- рекомендации по проектированию и конструкторской доработке систем охлаждения ДВС для обеспечения их работы в условиях испарительного охлаждения с повышенными параметрами (температура, давление);
- результаты исследований влияния повышенной температуры и давления охлаждающего тела в системе высокотемпературного испарительного охлаждения на основные эффективные показатели двигателя и на параметры работы комплексной системы утилизации теплоты ДВС, созданной на её основе;
- комбинированный (парогазовый, газогазовый) цикл, или цикл с подачей дополнительного рабочего тела, предназначенный для реализации на ДВС и способ его осуществления;
- примеры расчёта основных показателей ДВС при работе с реализацией различных вариантов цикла с подачей дополнительного рабочего тела;
- рекомендации по проектированию и доработке как конструкций ДВС в целом, так и отдельных оригинальных элементов, необходимых для обеспечения возможностей реализации цикла с подачей дополнительного рабочего тела;
- результаты исследований влияния подачи дополнительного рабочего тела (холодного и горячего сжатого воздуха) в рабочий цикл двухтактного карбюраторного двигателя на его основные эффективные показатели.

Реализация результатов работы. Разработанная действующая модель ДВС вместе с комплексом приборов и дополнительного оборудования установлена на экспериментальном испытательном стенде, находящемся в лаборатории "Двигатели" кафедры "Автомобили и двигатели" МГИУ. Стенд используется для проведения лабораторных работ в учебных курсах "Тепловые двигатели" и "Термодинамика и рабочие процессы двигателей", а также при подготовке бакалаврских, дипломных и магистерских работ студентами кафедр "Автомобили и двигатели" и "Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины" МГИУ. Также оборудование используется для проведения НИОКР.

Апробация работы и публикации. На технические предложения, изложенные в работе, получено два авторских свидетельства.

В 1993 г. для проведения научно-исследовательских работ по теме диссертации был получен "Российский грант в области транспортных наук".

Основные результаты работы докладывались на VI Международном научно-практическом семинаре "Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС" г. Владимир 1997 г.

По результатам исследований опубликовано 8 статей, три тезиса докладов.

Объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 116 наименований, приложений. Работа содержит 147 страниц основного текста, 110 страниц приложений, 24 рисунка и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены общие вопросы, связанные с современной ситуацией в использовании энергетических установок с реализацией различных утилизационных циклов, как в области промышленной энергетики, так и мобильных тепловых приводов. Особое внимание уделено проблемам, сдерживающим широкое появление такого типа установок на наземной технике, и в первую очередь на автомобильном транспорте.

С теоретической точки зрения все утилизационные циклы являются сложными составными или комбинированными циклами. Значительное внимание основам термодинамики комбинированных циклов уделено, например, в работах Андрющенко А.И.. Основным преимуществом комбинированных циклов является то, что при оптимальных сочетаниях исходных циклов, достигается суммарный коэффициент преобразования теплоты в работу более высокий, чем у базовых циклов.

Но применение стандартных утилизационных схем, принятых, например, в судостроении, с расширением получаемого в системах утилизации теплоты пара в отдельных малооборотных турбогенераторах, на наземной мобильной технике результата не дало.

Воспроизводство таких схем на базе менее крупных двигателей показало, что объёма генерируемого в аппаратах системы утилизации теплоты пара, даже в случае использования комплексных систем утилизации теплоты, достаточно лишь для обеспечения расхода малоразмерных одноступенчатых турбин. Они эффективно работают при высоких частотах вращения, что затрудняет отбор механической мощности. Приводы с высокой быстроходностью и передаточным отношением, предназначенные для этих целей, дороги и малоэффективны, это почти полностью нивелирует положительный эффект, получаемый от систем утилизации теплоты. Существует и спектр других проблем, связанный с созданием системы утилизации теплоты ДВС небольшой мощности, в частности их неудовлетворительные массогабаритные характеристики.

Соответственно, несмотря на большое количество технических предложений, на сегодня отсутствуют эффективные схемы и конструкции систем утилизации теплоты ДВС предназначенные для эксплуатации на наземной мобильной технике.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой способа высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными параметрами (температура, давление) и с созданием комплексной системы утилизации теплоты на его основе.

Основная цель создания данной системы высокотемпературного испарительного охлаждения - это разработка и выбор режимов эксплуатации способа охлаждения, реализация которого даёт возможность решить, как задачу надёжного охлаждения ДВС, так и задачу перевода доли тепловой энергии топлива, отводимой в систему охлаждения, в энергию рабочего тела, с термодинамическими параметрами, обеспечивающими максимально эффективное преобразование этой энергии в механическую работу.

Вопросы эффективной утилизации тепла отводимого в систему охлаждения ДВС являются достаточно сложными. В классических системах охлаждения фазовое состояние и низкие термодинамические параметры теплоносителя не позволяют его непосредственно использовать в качестве рабочего тела утилизационного цикла. Но относительно низкая температура в системах охлаждения ДВС фактор не случайный. Температура охлаждения выбирается исходя из условий обеспечения оптимального теплового состояния двигателя и поддержания заданного гидродинамического режима течения охлаждающей жидкости в контурах циркуляции.

Существует несколько вариантов решения вопроса об одновременном охлаждении ДВС и утилизации тепла отводимого в систему охлаждения. Например, применение легкокипящих веществ (фреоны, аммиак, эфиры и т.п.).

Второй путь - это использование классических систем жидкостного охлаждения, но закрытого типа, с рабочим давлением в контуре охлаждения более высоким, чем атмосферное. Повышенное давление в контуре обеспечивает возможность перегрева, например воды, без кипения до более высоких температур. Именно такие системы охлаждения ДВС получили название систем высокотемпературного охлаждения. Верхний предел температур в таких системах обычно не превышает 135 °С. При переводе стандартных систем охлаждения на высокотемпературное, фактором, ограничивающим максимальную температуру охлаждающего тела является тепловое состояние деталей двигателя.

Системы высокотемпературного охлаждения со стадией фазового перехода перегретой жидкости в пар получили название систем высокотемпературного испарительного охлаждения. На практике широко используются (крупные судовые и стационарные установки ДВС), как системы чисто высокотемпературные, так и испарительные с различными утилизационными контурами.

Изучению теплонапряжённости и теплообмена в поршневых ДВС посвящено довольно много работ различных авторов. Можно отметить работы Петриченко Р.М., Стефановского Б.С., Костина А.К., Дьяченко Н.Х., Кавтарадзе Р.З.. Исследованиям непосредственно высокотемпературного испарительного охлаждения посвящены работы Ливенцева Ф.Л., Маслова В.В..

Перспективы развития систем высокотемпературного охлаждения связаны с необходимостью дальнейшего повышение температуры охлаждающего тела. Повышение температуры теплоносителя улучшает качество пара – рабочего тела

утилизационного контура, и уменьшает отвод тепла в систему охлаждения, обеспечивая рост термического КПД ДВС.

Из опыта эксплуатации двигателей известны средние и максимально допустимые значения температуры различных деталей, при которых двигатель сохраняет свою работоспособность неограниченно длительное время. Превышение этих температур приводит к изменению структуры материала, ухудшению его физико-механических свойств, и к резкому снижению надёжности деталей. Температура поверхностей деталей, соприкасающихся с маслом, не должна превышать значений, при которых наблюдается интенсивное лако- и нагаро- образование. Предельная температура на внутренней поверхности втулки (на зеркале цилиндра) в области работы поршневых колец, определяется из условий предотвращения нагарообразования, снижения износов и потерь на трение. При проектировании новых систем охлаждения обязательным условием является обеспечение ими рекомендованной температуры деталей ЦПГ в характерных точках. Естественно это условие должно быть основным при создании и оценке работоспособности предлагаемых систем высокотемпературного испарительного охлаждения.

Исходя из требований развития систем утилизации теплоты, анализа условий теплообмена при охлаждении двигателя, можно сделать вывод о возможности создания систем высокотемпературного охлаждения ДВС с температурами теплоносителя достигающими 300-350 °C и с соответствующими давлениями насыщенных паров, что позволит существенно повысить эффективность систем утилизации теплоты ДВС. Но для достижения новых параметров необходима доработка существующих конструкций ДВС и выполнение ряда методических требований, касающихся организации процесса охлаждения. Ключевым моментом является тот факт, что в существующих системах охлаждения присутствует значительная разница между температурами поверхностей охлаждаемых деталей двигателя и охлаждающего тела.

Были сформулированы основные приёмы и действия, которые должны обеспечить работу перспективных систем высокотемпературного охлаждения с более высокими температурами и давлениями:

- 1. Интенсификация теплообмена между теплоносителем и внешними поверхностями гильзы и головки цилиндра за счёт увеличения их площади охлаждения до значений, обеспечивающих отвод необходимого количества тепла в охлаждающую среду с заданной температурой.
- 2. Обеспечение контакта каждого участка поверхности охлаждения цилиндра и головки цилиндра только с тем объёмом охлаждающего тела, температура которого поддерживается меньше или равной допустимой температуре соответствующего охлаждаемого участка.
- 3. Ограничение теплообмена между слоями охлаждающего тела в объёме полостей рубашки охлаждения, достигаемого:
- а) ликвидацией вынужденной конвекции путём перехода от контурных систем охлаждения с насосной циркуляцией жидкости к компенсационным испарительным схемам;
 - б) снижением естественной конвекции;

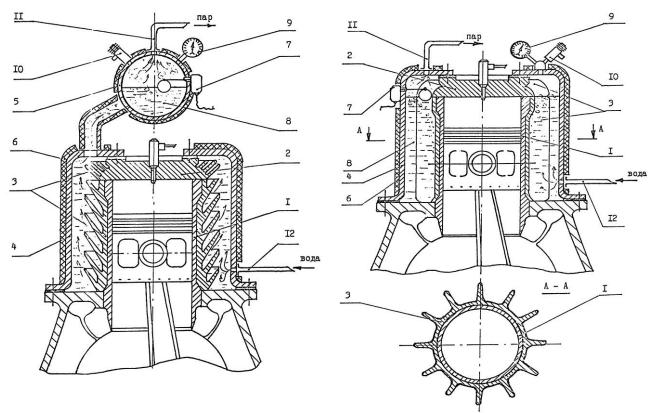


Рис. 1. Принципиальная схема системы высокотемпературного испарительного охлаждения с разделёнными зонами охлаждения и испарения и наклонным оребрением

Рис. 2. Принципиальная схема системы высокотемпературного испарительного охлаждения с объединённой зоной охлаждения и испарения и вертикальным оребрением

- в) уменьшением распространения тепловых потоков, вызванных наличием собственной теплопроводности охлаждающего тела.
- 4. Дополнительные меры, обеспечивающие эксплуатацию системы охлаждения с повышенными параметрами.

На рис. 1 и 2 представлены принципиальные схемы конструкций систем высокотемпературного испарительного охлаждения, разработанные с учётом приведенных выше технических предложений.

Исходной величиной для расчета элементов системы охлаждения, является количество теплоты Q кДж/ч, которое необходимо отвести от двигателя в охлаждающую среду. Величину Q можно определить как через удельное количество теплоты q_{oxn} кДж/кВт·ч и эффективную мощность двигателя N_e кВт·ч, так и через общий (теплоотдача от стенки конвекцией) и частный (теплопередача через стенку) случаи записи уравнения Ньютона — Рихмана:

$$Q = q_{ox_{\it I}} \cdot N_e = \alpha_2 \cdot F_{ox_{\it I}} \cdot (t_{\it c} - t_{ox_{\it I}}) = rac{lpha_{\it I} \cdot F_{\it c} \cdot (t_{\it c} - t_{ox_{\it I}})}{(I + rac{\delta \cdot lpha_{\it I}}{\lambda} + rac{lpha_{\it I} \cdot F_{\it c}}{lpha_{\it c} \cdot F_{ox_{\it I}}})}$$
, где

 α_1 и α_2 - средние за время теплообмена коэффициенты теплоотдачи, от газов нагреваемой стенке и от стенки охлаждающему телу, $\mathrm{Bt/m^2\cdot K};$

 $F_{\it e}$ и $F_{\it oxn}$ - средние площади соответственно нагреваемой и охлаждаемой поверхностей, м²;

 $t_{\it c}$ и $t_{\it oxn}$ - средние температуры соответственно газов и охлаждающего тела, °C;

 λ - средний коэффициент теплопроводности материала стенки, $B\tau/M\cdot K$;

 δ - толщина стенки, м;

Из уравнения видно, что количество теплоты Q, передаваемое через стенки цилиндра и головки двигателя, зависит от их размеров и материала (влияние F_2 , F_{oxn} , $\delta u \lambda$), рабочего процесса двигателя (влияние α_I и t_2) и от параметров охлаждения - t_{oxn} , α_2 .

Приведенные уравнения можно совместно решить как относительно температуры охлаждающего тела, т.е. рассчитать её при остальных известных параметрах, так и относительно площади охлаждаемых поверхностей:

$$F_{oxn} = \frac{q_{oxn} \cdot N_e \cdot \lambda \cdot \alpha_1}{\alpha_2 \cdot (\alpha_1 \cdot \lambda \cdot F_e \cdot (t_e - t_{oxn}) - \lambda \cdot N_e \cdot q - \alpha_1 \cdot \delta \cdot N_e \cdot q_{oxn})},$$

т.е. получить необходимую величину площади охлаждаемых поверхностей при остальных известных или заданных параметрах.

Выбирая желаемую температуру охлаждающего тела (в пределах допустимых значений для данного участка охлаждения двигателя) и принимая средние значения на основе экспериментальных или расчётных данных по остальным параметрам, можно получить необходимую величину площади поверхности охлаждения при заданных условиях.

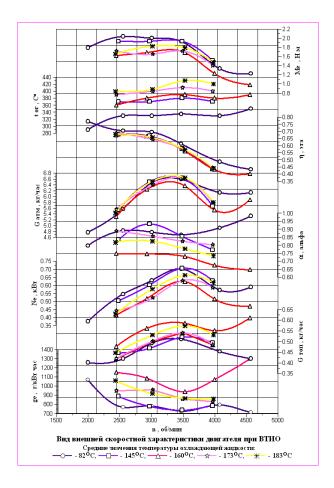
При решении, на основе рассмотренной выше формулы, оценочного примера, было получено то что, при условии сохранения постоянной тепловой нагрузки деталей двигателя (значений тепловых потоков), увеличение температуры теплоносителя со 100 до 200 °C, вызовет необходимость увеличения площади охлаждаемых поверхностей как минимум в 10 раз.

На основании изложенных выше теоретических предпосылок и методических указаний была разработана действующая модель ДВС с комплексной системой утилизации теплоты на базе высокотемпературного испарительного охлаждения. Для проведения комплексных испытаний указанной модели был собран моторный исследовательский стенд.

Цель экспериментальных исследований — это проверка на практике теоретических предпосылок о возможности достижения в жидкостных системах охлаждения значительных температур охлаждающего тела без заметного негативного влияния на работоспособность двигателя, а так же оценка перспектив использования таких систем, в комплексе с другими агрегатами, в качестве источника рабочего тела для утилизационного контура.

Программа исследований модели ДВС состояла из двух основных разделов. Первый - это снятие стандартных скоростных характеристик двигателя в условиях работы при высокотемпературном испарительном охлаждении, рис. 3, и второй - составление тепловых балансов комплексной системы утилизации теплоты и двигателя в целом. На рис. 4, 5 и 6 отдельно представлены соответственно зависимости таких параметров двигателя, как M_e , N_e и g_e от температуры охлаждающего тела, а на рис. 7 — диаграмма на которой показаны основные составляющие теплового баланса.

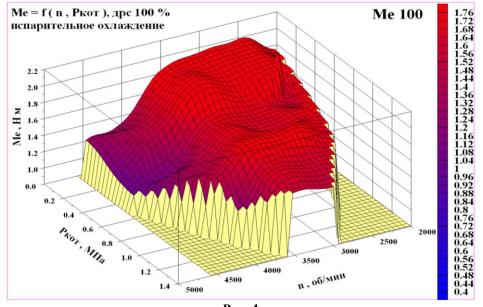
По результатам анализа испытаний модели ДВС, можно сделать следующие выводы: - Первое, полностью подтвердились теоретические предпосылки, лежащие в основе создания предлагаемых систем, экспериментально доказана возможность их создания и эксплуатации. На практике достигнута температура охлаждающей жидкости в рубашке охлаждения в 204 °C при сохранении работоспособности двигателя. Второе, комплексная система утилизации теплоты на основе предложенного способа высокотемпературного испарительного охлаждения позволяет получать водяной пар с давлениями и температурами более высокими, чем в обычных системах такого типа, утилизируя порядка 80-90% тепла отходящего в систему охлаждения и теряемого с выхлопными газами. Рис. 3

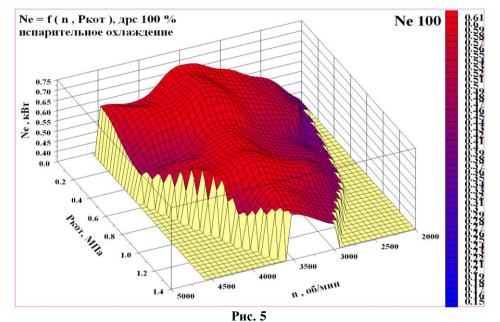


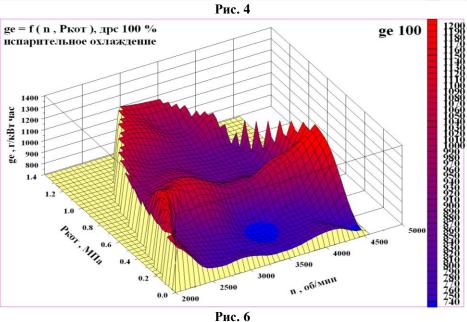
В третьей главе подробно рассмотрены вопросы, связанные с использованием получаемого в комплексных системах утилизации теплоты ДВС пара. Прежде всего, это вопросы, касающиеся проблемы разработки и создания ДВС с реализацией цикла с подачей дополнительного рабочего тела.

На основе термодинамического анализа, изучения технической литературы и патентных исследований, была выбрана схема комбинированной силовой установки, предназначенной для использования в тепловых приводах наземной мобильной техники, в первую очередь на автомобилях. Такой силовой установкой должен стать ДВС, оснащённый комплексной системой утилизации теплоты на основе высокотемпературного испарительного охлаждения и имеющий техническую возможность реализации цикла с подачей дополнительного рабочего тела. Дополнительное рабочее тело, подаваемое в основной газовый цикл ДВС в конце такта расширения - перегретый водяной пар, получаемый в системе утилизации. На рис. 8 представлена принципиальная схема такой установки, а на рис. 9 вид её предполагаемой индикаторной диаграммы (в случае реализации на четырёхтактном двигателе).

В работе предложена методика определения влияния подачи дополнительного рабочего тела на основные индикаторные и эффективные показатели ДВС. По ней проведён сравнительный расчёт параметров стандартного четырёхтактного дизельного двигателя и аналогичного двигателя с реализацией парогазового цикла. В основе расчёта - оценка термодинамических изменений и, прежде всего, индикаторного давления в цилиндре двигателя в процессе расширения продуктов сгорания после впрыска пара (газа).







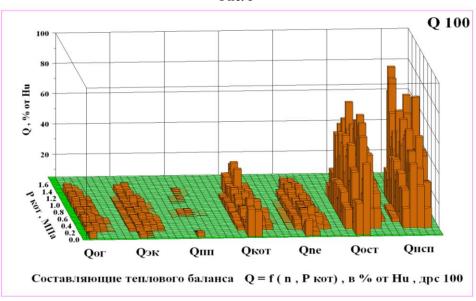


Рис. 7

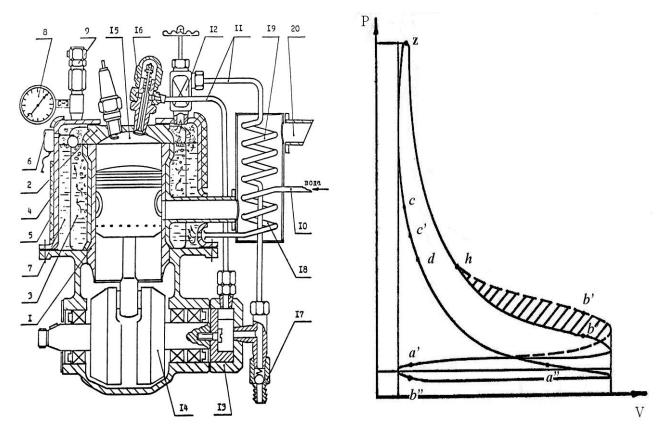


Рис. 8. Принципиальная схема предлагаемой силовой установки на базе ДВС, оборудованного комплексной системой утилизации теплоты

Рис. 9. Предполагаемый вид индикаторной диаграммы 4-х тактного поршневого ДВС при работе с подачей дополнительного рабочего тела

Дополнительная подача пара в расширяющиеся продукты сгорания - процесс достаточно сложный, и для его качественного описания требуются специальные математические модели, учитывающие как не стационарность задачи, переменность масс компонентов смеси, так и происходящие внутрицилиндровые процессы. Следует признать, что принятая в работе расчётная модель была предельно упрощена. Основное допущение — это отказ от учёта динамики процессов и замена нестационарной задачи стационарной. Было принято, что происходит мгновенный впрыск всего циклового количества пара в цилиндр двигателя. Затем, также мгновенно происходит перемешивание рабочих тел, их теплообмен и установление новых параметров смеси. Далее, уже полученная смесь продолжает расширяться.

Главными результатами проведённого расчёта стало то, что использование на ДВС цикла с подачей перегретого водяного пара, обеспечивает, в случае сохранения геометрических размеров, рост таких основных эффективных показателей двигателя как — мощность, крутящий момент и снижение удельного расход топлива, в среднем на 15%.

Для практической реализации предлагаемого цикла был разработан и изготовлен комплект аппаратуры, обеспечивающий синхронизированную подачу дополнительного рабочего тела в цилиндры двигателя на рабочем ходу. Часть третьей главы посвящена подробному описанию процесса её создания и эволюции конструкции. В итоге удалось создать надёжную и эффективную систему и установить её на действующую модель ДВС.

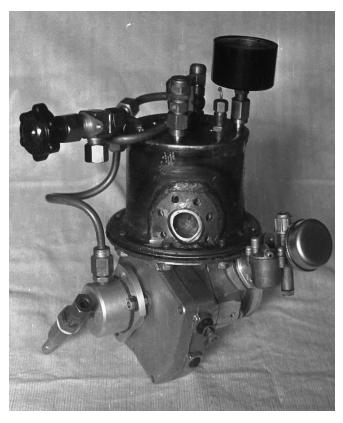




Рис. 10. Один из первоначальных вариантов конструкции силовой установки на базе ДВС, оборудованного комплексной системой утилизации теплоты

Рис. 11. Окончательный, наиболее работоспособный вариант силовой установки на базе ДВС, оборудованного комплексной системой утилизации теплоты

Варианты конструкции силовой установки представлены на рис. 10 и 11. Однако реализовать комбинированный цикл с подачей дополнительного рабочего тела — водяного пара, в полном объёме не удалось. Повлияла высокая чувствительность системы зажигания двигателя к качеству впрыскиваемого пара.

В связи с неудачами в экспериментальном осуществлении парогазового цикла, на основе данных индицирования стандартного двухтактного рабочего процесса базового ДВС, а также данных по испытаниям системы утилизации теплоты, был проведён, по предложенной ранее методике, математический эксперимент по изучению влияния процесса подачи пара на рабочие характеристики двигателя.

Технические сложности, возникшие при работе двигателя с впрыском пара, было решено обойти, заменив пар сжатым воздухом. Замена пара сжатым воздухом позволила реализовать цикл с подачей дополнительного рабочего тела в полном объёме. Естественно, такой цикл является газогазовым, а не парогазовым, но практически эти циклы очень близки, и их можно считать разновидностями общего комбинированного цикла или цикла с подачей дополнительного рабочего тела. Были сняты рабочие характеристики двигателя для вариантов цикла с подачей сжатого воздуха при нормальной температуре и подогретого. На основе этих исследований можно оценить и влияние на рабочий цикл подачи пара. Внешняя характеристика двигателя при его работе с подачей в цикл сжатого горячего воздуха представлена на рис. 12.

Обобщая эксперименты с подачей сжатого воздуха в цилиндры двигателя в течение рабочего хода, можно сделать следующие выводы. Впрыск подогретого сжатого воздуха существенно улучшает основные эффективные характеристики двигателя почти во всём диапазоне режимов работы.

Впрыск воздуха при нормальной температуре не так однозначно влияет на эффективные показатели двигателя.

Проявились отдельные режимы, где подача сжатого воздуха определённого давления, ухудшает основные эффективные показатели. Но общее влияние подачи холодного сжатого воздуха так же положительное, хотя и выражено менее значительно, по сравнению с подачей горячего. Не проявилось прямого влияния величины давления сжатого воздуха на рост значений эффективных параметров ДВС.

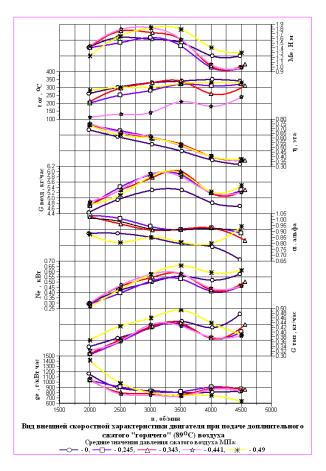


Рис. 12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1. С целью повышения эффективности систем утилизации теплоты ДВС, на основе оценки теплового состояния деталей ЦПГ ДВС, сделан вывод о возможности повышения температуры теплоносителя в рубашке охлаждения двигателя без ущерба для его работоспособности. На основе этого предложен способ высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с рабочими параметрами (температура, давление), значительно превышающими существующие значения в аналогичных системах. Увеличение температуры охлаждающего тела позволяет повысить эффективность паросиловых утилизационных контуров, создаваемых на основе ДВС, и обеспечивает рост эффективности ДВС при независимом использовании систем высокотемпературного охлаждения.
- 2. В предлагаемой системе охлаждения относительно легко достигаются рабочие температуры охлаждающего тела в 180-200 °C, а в специальных условиях теоретически достижимы температуры и до 300-350 °C. В зависимости от степени повышения температуры в контурах охлаждения, необходимы изменения в конструкциях деталей ЦПГ и в способах организации процесса охлаждения. Основным конструктивным изменением является необходимость увеличения площади поверхностей охлаждения деталей ЦПГ ДВС. Предложена расчётная формула, дающая связь между температурой охлаждающего тела и необходимой площадью поверхностей охлаждения деталей при условии неизменности их теплового нагружения.

- 3. На основе анализа термодинамических циклов тепловых машин, предложен вариант комбинированного парогазового (газогазового) цикла, или цикла с подачей дополнительного рабочего тела, для преимущественной реализации на поршневых ДВС. Предложена методика определения влияния подачи дополнительного рабочего тела на основные индикаторные и эффективные показатели поршневого ДВС. На её основе проведён сравнительный расчёт параметров стандартного четырёхтактного дизельного двигателя и аналогичного двигателя с реализацией рассматриваемого цикла.
- 4. Для практической оценки возможностей осуществления предлагаемых технических решений (система высокотемпературного испарительного охлаждения с повышенными параметрами и цикл с подачей дополнительного рабочего тела) разработана и изготовлена действующая модель силовой установки, предназначенная для стендовых испытаний. Для испытаний модели подготовлен моторный стенд с комплексом приборов и оборудования, обеспечивающий снятие стандартных и специальных характеристик. Подготовлены методики проведения испытаний.
- 5. Результаты стендовых моторных испытаний действующей модели силовой установки полностью подтвердили теоретические предпосылки, лежащие в основе создания предлагаемых систем высокотемпературного охлаждения, практически доказана возможность разработки и эксплуатации таких систем. Получены экспериментальные зависимости влияния повышенной температуры охлаждающего тела на основные эффективные показатели двухтактного ДВС и на параметры комплексной системы утилизации теплоты, созданной на его основе. Достигнута температура охлаждающей жидкости в рубашке охлаждения в 204 °C при сохранении работоспособности двигателя. Система утилизации теплоты на основе предложенного способа высокотемпературного испарительного охлаждения позволяет получать водяной пар с давлениями и температурами более высокими, чем в обычных системах такого типа, утилизируя порядка 80-90% вторичной теплоты.
- 6. На основе данных индицирования рабочего процесса базового ДВС и данных по тепловому балансу системы утилизации действующей модели, проведён математический эксперимент по изучению влияния процесса подачи пара на рабочие характеристики двигателя.
- 7. На действующей модели были реализованы варианты газогазового комбинированного цикла, с подачей в рабочий процесс в качестве дополнительного рабочего тела сжатого воздуха с различной температурой. Впрыск подогретого сжатого воздуха существенно улучшает основные эффективные характеристики двигателя почти во всём диапазоне режимов работы. Впрыск воздуха при нормальной температуре влияет на них не так однозначно. На отдельных режимах подача сжатого воздуха приводит к спаду характеристик. Общее влияние подачи холодного сжатого воздуха положительное, но выражено менее значительно, по сравнению с подачей горячего.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

- 1. **Богданов В.Н.** Комбинированный двигатель внутреннего сгорания и паровой двигатель / В.Н. Богданов // Повышение экологичности и эффективности автомобиля: Межвузовский сборник научных трудов. Москва: МАСИ, 1990. С.18-28.
- 2. **Богданов В.Н.** Комбинированный ДВС и паровой двигатель / В.Н. Богданов // Российские гранты в области транспортных наук за 1993 г. Под ред. д.т.н. проф. Калявина В.П.,- С-Пб.: Элмор, 1994. С. 16
- 3. **Богданов В.Н.** Повышение эффективности и улучшение экологичности транспортных двигателей за счёт воздействия на выхлопную систему струйными аппаратами / А.А. Шейпак, М.А. Чекалов, В.Н. Богданов // Межвузовский сборник научных трудов. Москва: МГИУ, 1996. С. 15-19.
- 4. **Богданов В.Н.** Применение бинарных и парогазовых циклов в автотранспортных двигателях / А.А. Шейпак, М.А. Чекалов, В.Н. Богданов // Материалы 6-го Международного научно-практического семинара. Под ред. Эфроса В.В., Владимир: Владимирский Гос. Ун-т, 1997. С. 98-101.
- 5. **Bogdanov V.N.** Heat transfer in utilization system of internal combustion engines / A.A. Sheypak, M.A. Chekalov, V.N. Bogdanov, V.N. Kopanev // International conference of heat and mass transfer. Kunpur: Indian institute of technology, 1997.
- 6. **Богданов В.Н.** Повышение эффективности и улучшение экологии транспортных двигателей за счёт воздействия на выхлопную систему струйными аппаратами / А.А. Шейпак, М.А. Чекалов, В.Н. Богданов // Межвузовский сборник научных трудов. Москва: МГИУ, 2004. С. 27-30.
- 7. **Богданов В.Н.** Разработка и исследование системы высокотемпературного испарительного охлаждения ДВС с повышенными параметрами охлаждающего тела / В.Н. Богданов // Техника, технологии и перспективные материалы. Межвузовский сборник научных трудов. Москва: МГИУ, 2005. С. 28-33.
- 8. **Bogdanov Victor** Computational study of ejector-pumps / Serguei Timouchev, Andrey Aksenov, Victor Bogdanov // 2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition. Houston, TX, USA: June 19-23, 2005.
- 9. **Богданов В.Н.** Исследование термодинамического цикла поршневого ДВС с подачей дополнительного рабочего тела / В.Н. Богданов // Машиностроение и инженерное образование. М: МГИУ, №3 (20) 2009. С. 2-17. (входит в Перечень ВАК).
- 10. **Богданов В.Н.** Исследование системы высокотемпературного испарительного охлаждения поршневого ДВС / А.А. Шейпак, В.Н. Богданов // Грузовик: Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай. № 6, 2010. С. 29-39. (входит в Перечень ВАК).
- 11. **Богданов В.Н.** Использование струйных аппаратов для повышения эффективности ДВС / Д.И. Никитин, В.Н. Богданов // XVI Всероссийская научнотехническая конференция студентов и аспирантов. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Сборник докладов. Москва: МЭИ: 2012. С. 143-147.

- 12. **Богданов В.Н.** А.с. 1420203 СССР, F 02 G 5/02 Силовая установка / А.А. Шейпак, А.Г. Серх и В.Н. Богданов (СССР). № 4093052/25-06 ; заявл. 25.07.86 ; опубл. 30. 08. 1988, Бюл. № 32. 2 с. : ил.
- 13. **Богданов В.Н.** А.с. 1615428 СССР, F 02 M 25/02 Двигатель внутреннего сгорания / В.Н. Богданов (СССР). № 4604752/25-06 ; заявл. 14.11.88 ; опубл. 23.12. 90, Бюл. № 47. 3 с. : ил.