

**ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

МАРЧЕНКО Андрей Петрович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ
ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ
ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ**

08.04.02 - Тепловые двигатели



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



00755946 (-)

КОПІЄЮ

Робота виконана на кафедрі Двигуна і внутрішнього згорання
Харківського державного політехнічного університету

Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Шокотов Н.К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Сахаревич В.Д.

доктор технических наук,
профессор Рыбальченко А.Г.

доктор технических наук,
профессор Стефановский Б.С.

Ведущая организация - ИТМаш НАН Украины

Защита состоится 17 11 1994 г. в 13³⁰ часов в ауд. 313
на заседании специализированного совета Д 114.04.01 по тепловым
двигателям для Харьковской государственной академии
железнодорожного транспорта по адресу:
310050, г. Харьков - 50, площадь Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковской
государственной академии железнодорожного транспорта.

Автореферат разослан 14 10 1994 г.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України
Лялюк В.М.

Ученый секретарь
специализированного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТИ И СТЕПЕНИ ИССЛЕДОВАННОСТИ ТЕМАТИКИ ДИССЕРТАЦИИ

Из основных тенденций мирового развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на первое место на Украине выдвигается повышение топливной экономичности, что обусловлено затруднениями с обеспечением моторным топливом за счет импорта.

Среди новых подходов к проблеме снижения расхода топлива ДВС в последнее время большое внимание уделено разработке так называемых турбокомпаундных ДВС, т.е. двигателей с силовыми газовыми турбинами (СТ) и системами вторичного использования теплоты (ВИТ). О таких силовых установках (СУ) появились многочисленные публикации. Однако представленные в этих публикациях исследования затрагивают главным образом судовые и стационарные КДВС и не имеют единого термодинамического подхода, причем, цилиндр КДВС и системы утилизации теплоты чаще всего рассматриваются независимо друг от друга.

Крайне недостаточно данных об условиях эффективности турбокомпаундных двигателей наземного транспорта. Мировой опыт двигателестроения, а также наши исследования показывают, что существенно обостряются научные и прикладные проблемы для таких СУ. В настоящее время в странах СНГ в области создания утилизационных контуров дизелей наземного транспорта накоплен лишь первоначальный теоретический опыт, отсутствуют или носят фрагментарный характер данные по характеристикам совместной работы КДВС и систем ВИТ. Поэтому назрела настоятельная потребность в обобщении и систематизации существующих научных положений теории рабочих процессов турбокомпаундных ДВС наземного транспорта на основе категорий 1-го и 2-го законов термодинамики, а также в разработке сов-

ременной методологии моделирования, анализа и оптимизации параметров этих двигателей, которая включает совокупность методик теоретического и экспериментального исследования, обеспечивающих выбор рациональных конструктивных и термодинамических параметров, схемных решений СУ.

С учетом этого в представленной к защите диссертации разработаны термодинамические основы повышения топливной экономичности транспортных дизелей за счет утилизации сбросной теплоты, предложены пути реализации этих теоретических положений в практику двигателестроения, что при общей характеристике диссертационной работы позволяет ее квалифицировать как актуальную, направленную на решение крупной научно-технической проблемы, которая имеет важное прикладное значение.

ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Разработка термодинамических основ повышения топливной экономичности транспортных дизелей за счет утилизации сбросной теплоты является целью исследования. Для ее достижения определены следующие основные задачи:

1. Разработка основ теории максимального теплоиспользования в двигателях внутреннего сгорания.

2. Разработка методологии теоретического и экспериментального исследования комбинированных транспортных ДВС с системами утилизации теплоты, состоящей из комплекса методик моделирования, анализа и оптимизации турбокомпаундных ДВС, сазигрующихся как на известных положениях теории, так и на новых научных положениях, органически сочетающих первый и второй законы термодинамики.

3. Проведение расчетно-экспериментального исследования турбокомпаундных ДВС и анализа основных влияющих факторов на

эффективность КДВС с системой утилизации теплоты в зависимости от условий эксплуатации СУ.

4. Научное обобщение и выработка практических рекомендаций, обеспечивающих максимальное теплоиспользование в комбинированных ДВС транспортных силовых установок.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО НАУЧНОЙ НОВИЗНЫ

Теоретическая ценность диссертационной работы определяется новыми алгоритмами и методиками расчетно-экспериментального исследования комбинированных ДВС (КДВС) с СТ и системами ВИТ, научными обобщениями автора, выполненными на базе единого термодинамического подхода, рекомендациями по выбору и реализации путей совершенствования теплоиспользования дизелей. При этом практическая ценность диссертационной работы определяется результатами расчетно-экспериментального исследования КДВС с силовыми газовыми турбинами и системами ВИТ, комплексом методик и алгоритмов для проведения этого исследования, которые в ходе выполнения хозяйственных и государственных НИР переданы к использованию в промышленности, отраслевых и академических институтах. В работе:

1. Показана возможность применения систем утилизации теплоты на автотракторных двигателях типа СМД (4ЧН12/14, 6ЧН13/11,5), тепловозных дизель-генераторах типа 10Д100 и Д80 (соответственно 10ДН20,7/2-25,4 и 16ЧН26/27), а также на транспортном дизель-генераторе типа 16ЧН32/32, которые при утилизации теплоты ОГ на номинальном режиме позволяют уменьшить удельный эффективный расход топлива (g_e) на величину до 15 г/(кВт.ч), утилизации теплот отработавших газов (ОГ), охлаждающей жидкости (ОЖ), промывочного воздуха - до 20 - 24 г/(кВт.ч), причем, среднеэксплуатационный расход топлива $g_{ср}$.

уменьшается соответственно на 3 - 6 и 5 - 8 г/(кВт.ч).

2. Обосновано, что рациональной системой утилизации судовых ДВС типа 6Д30/50 каботажного и портового флота в условиях Крыма является система, включающая теплофикационный контур и опреснительную установку, позволяющая компенсировать около 30% затрат на топливо.

3. Разработаны и переданы промышленности схемные решения КДВС с системами утилизации вторичных энергоресурсов автотракторных, тепловозных и судовых ДВС, выбраны рациональные термодинамические и конструктивные параметры систем утилизации вторичных энергоресурсов ДВС.

4. Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования КДВС с силовыми газовыми турбинами и утилизационными циклами Ренкина, которые показали, что:

4.1. Силовая газовая турбина и система ВИТ при $N_{\text{суп}} = \text{const}$ позволяют разгрузить поршневой двигатель по среднему индикаторному давлению и для высокофорсированных ДВС получить снижение g_0 не только за счет работы дополнительных систем, но и цилиндра ДВС;

4.2. Параметры рабочего процесса СТ, утилизационного цикла Ренкина и цилиндра ДВС имеют взаимную зависимость;

4.3. Вариатор, примененный в турбокомпаундной схеме с СТ расширяет номенклатуру КДВС, для которой возможно использование СТ, является важным фактором повышения эффективности СУ, позволяющим дополнительно на 2-4 г/(кВт.ч) уменьшить среднее эксплуатационный расход топлива по СУ, а также уменьшить с 0,72-0,75 до примерно 0,70 минимальные значения КПД лопаточных машин, выше которых применение СТ становится рациональным.

5. Приведены результаты исследования на двигателе

16ЧН26/27 высокотемпературного охлаждения (ВТО), позволившие:

5.1. Получить качественные и количественные характеристики перераспределения при ВТО статей теплового баланса, параметров рабочего процесса, характеристик температурного состояния гильзы и крышки цилиндров.

5.2. Показать, что эффективное использование теплоты ОЖ комбинированного ДВС в паросиловых циклах Ренкина возможно лишь при ВТО.

5.3. Обосновать возможность работы двигателя 16ЧН26/27 при ВТО с температурами ОЖ на выходе из ДВС более 110 °С.

6. Отмечено, что практическое значение имеют экспериментальные стенды и методики проведения испытаний, а также методики теоретического исследования систем утилизации теплоты тепловозных, судовых и автотракторных ДВС.

Научную новизну исследования составляет:

1. Термодинамические основы: теории образцовых циклов (ОЦ) тепловых двигателей с максимальным теплоиспользованием, включающие новые соотношения теоретического анализа этих циклов, описывающие как энергетические, так и эксергетические показатели поршневых двигателей, силовых газовых турбин, систем газотурбинного наддува (ГТН) и утилизации теплоты, позволяющие на основании разработанных методик теоретического и экспериментального исследования произвести оценку резервов совершенствования теплоиспользования в силовых установках с ДВС; теории бинарных циклов применительно к ОЦ двигателей внутреннего сгорания и смежных с ними систем утилизации теплоты.

2. Обобщенные уравнения для эффективного и эксергетического КПД тепловых двигателей.

3. Схемные решения комбинированных ДВС с системами ути-

лизации теплоты.

4. Комплекс методик и алгоритмов расчетно-экспериментального исследования рабочих процессов КДВС с системами утилизации теплоты, учитывающих особенности схемных решений СУ, включающий: методику расчета рабочего процесса СУ, состоящей из ДВС, силовой газовой турбины, систем утилизации теплоты и ГТН; метод расчета рабочего процесса в цилиндре паровой расширительной машины, реализованный в дифференциальной форме на основании уравнений состояния реальных рабочих тел (РТ); методику анализа реальных процессов в узлах комбинированного ДВС (в том числе и в цилиндре), основанную на положениях 1-го и 2-го законов термодинамики (балансы теплоты, работы, эксергии и энергии); методику экспериментального исследования макетного образца СУ с КДВС и утилизационным паросиловым циклом Ренкина; методику экспериментального исследования высокотемпературного охлаждения двигателя типа 16ЧН26/27; методику физического моделирования на одноцилиндровом отсеке и поршневом двигателе рабочего процесса комбинированного ДВС с силовой турбиной и системой ВИТ.

5. Качественные и количественные характеристики улучшения теплоиспользования в КДВС за счет применения систем утилизации сбросной их теплоты.

6. Результаты оценки влияния условий эксплуатации КДВС, параметров окружающей среды, применяемых в цикле Ренкина рабочих тел на схемные решения силовой установки, рациональные термодинамические и конструктивные параметры, а также эффективность СУ.

7. Результаты оценки влияния систем утилизации теплоты на показатели внутрцилиндровых процессов ДВС.

8. Энергетические и эксергетические диаграммы рабочих

процессов в цилиндре ДВС и смежных с ним систем утилизации теплоты.

УРОВЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ, ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК

Диссертация выполнена в соответствии с отраслевыми координационными планами НИР и ОКР Министерства тяжелого и транспортного машиностроения СССР по созданию транспортного дизель-генератора типа ЧН32/32 (постановление ГИИТ СССР N 467/241 от 9.12.1980 г.), Минтракторсельхозмаша СССР по проведению научных исследований и разработке технического проекта комбинированного адиабатного дизеля и по созданию перспективных тракторных двигателей (постановления ГИИТ СССР N 375 от 8.09.1980г. и N 555 от 30.10.1985г.).

Результаты научного исследования переданы: по тепловозным дизель-генераторам на ПО "Завод имени Малышева" (технический проект двигателя ДВО), автотракторным КДВС - ГСМБД (г.Харьков), НИКТИД (г.Владимир), НАН Украины, на ДЭТ и, наконец, применительно к судовым ДВС - Керченскому заводу "Зелли" и морскому торговому порту. Они используются также в практике научно-исследовательских работ лаборатории перспективных двигателей каф. ДВС ХГТУ, а также в учебном процессе для студентов специальности 15.01 - двигатели внутреннего сгорания при чтении курсов: "Термодинамика", "Теория рабочих процессов в ДВС", "Системы наддува и утилизации в ДВС".

Эффект от внедрения результатов диссертационного исследования оценен в 89,5 млн. руб. в год по ценам первого квартала 1983 года и около 150 тыс. рублей по ценам 1983 года.

АПРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ,

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на 16 всесоюзных, республикан-

ских и отраслевых научно-технических конференциях: "Высокий наддув поршневых двигателей и роторные двигатели" (Тбилиси, ИММ АН Грузии, 1981г.); "Повышение эффективности использования автомобильного транспорта и автомобильных дорог в условиях жаркого климата и высокогорных районов" (Ташкент, ТАДИ, 1982г.); "Создание и совершенствование быстроходных дизелей" (Токмак, ПО "Дизельмаш", 1982г.); "Современный уровень и пути совершенствования экономических и экологических показателей" (Ворошиловград, ВМИ, 1983г.); "Направления исследований по экономии жидкого топлива автономными локомотивами" (Коломна, ВНИТИ, 1984г.); "Проблемы форсирования и надежности тракторных и комбайновых двигателей" (Владимир, НИКИД, 1985 г.); "Теория и расчет мобильных машин и двигателей внутреннего сгорания" (Тбилиси, ИММ АН Грузии, 1985 г.); "Применение эксергетических методов анализа и оптимизации с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов" (Киев, ИТТ АН Украины; Николаев, НКИ, 1986 г.); "Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем на новых топливах" (Москва, МВТУ, 1987 г.); "Применение эксергетических методов анализа и оптимизации с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов" (Киев, ИТТ АН Украины; Харьков, ХПИ, 1988 г.); "Актуальные проблемы технического прогресса судовых турбинных установок" (Ленинград, ЛКИ, 1989 г.); "Эксергетический метод анализа и его применение в технических и экономических задачах" (Киев, ИТТ АН Украины; Николаев, НКИ, 1990 г.); "Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СССР" (Саратов, СИМСХ, 1990 г.); "Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла" (Новосибирск, ИТМ СО АН СССР, 1990 г.); "Актуаль-

ные проблемы развития двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок" (Ленинград, ЛКИ, 1990 г.).

Международных конференциях: "Дизельные двигатели '89" (Болгария, Варна, 1989 г.); "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье", (Украина, Харьков, ХПИ; Венгрия, Мишкольцский университет, 1993, 1994 г.г.); KONES-94 (Польша, Лодзин, 1994 г.).

Научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников ХИИТа (1981 - 1991 г.г.), ХПИ (1982 - 1992 г.г.).

Заседаниях НТС НИКТИДа (1983г.), ИММ АН Грузии (1984г.), ВНИТИ (1985г.), ПО "Коломенский завод" (1987 г.), ПО "Завод имени Малышева" (1988 г.), кафедры ДВС ХПИ (1992 г.).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 2 монографии (в соавторстве; обе в 1992 г.), 44 научных работы, в том числе получено 6 авторских свидетельств.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных литературных источников и 4 приложений. Работа содержит 253 стр. основного текста, 46 таблиц и 108 рисунков.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД В РАЗРАБОТКУ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ

В ходе выполнения диссертационной работы автором получены новые теоретические и практические результаты, которые и выносятся на защиту. К ним относятся:

1. Основы теории максимального теплоиспользования в силовых установках, состоящих из поршневых двигателей внутреннего сгорания и систем утилизации вторичных энергоресурсов.

2. Комплекс методик математического и физического моделирования, анализ и оптимизации реальных процессов в турбо-

компаундных ДВС, базирующихся на новых положениях, сочетающих 1-й и 2-й законы термодинамики, а также учитывающие особенности реальных рабочих тел.

3. Переданные промышленности схемные решения перспективных турбокомпаундных среднеоборотных и быстроходных ДВС, рациональные конструктивные и термодинамические параметры систем утилизации этих двигателей.

4. Результаты анализа теплоиспользования в КДВС с системами утилизации теплоты, оценки взаимного влияния рабочих процессов в цилиндре ДВС, лопаточных машинах и системе ВИТ, энергетические и эксергетические диаграммы рабочих процессов в таких силовых установках.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОЛОГИИ, МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДМЕТА И ОБЪЕКТА

Применяемая в диссертационной работе совокупность средств, методов и приемов базируется на принципах системности, которая предусматривает: комплексный подход к проблеме совершенствования теплоиспользования в ДВС; расчетно-экспериментальный метод научного исследования; разработку новых научных положений, позволяющих в сочетании с известными, рациональным образом обеспечить решение цели и задач диссертации.

При этом новые методики математического и физического моделирования рабочих процессов турбокомпаундных ДВС с силовыми газовыми и паровыми турбинами предусматривают использование фундаментальных 1-го и 2-го законов термодинамики (энергоэксергетический подход), идентификацию математических моделей с реальными процессами, зафиксированными экспериментально, обеспечивают осуществление возможности научных обобщений, выработку практических рекомендаций.

Объектом научного исследования является семейство турбокомпаундных дизелей, которые в диссертационной работе ранжированы по быстроходности (быстроходные и среднеоборотные), назначению (автотракторные, тепловозные, судовые), глубине утилизации вторичных энергоресурсов (ДВС с системами ГТН, ДВС с ГТН и СТ, ДВС с ГТН, СТ и системами утилизации потоков теплот ОГ, ОГ и ОЖ, ОГ и промежуточного охлаждения наддувочного воздуха и т.д.), назначению утилизационных контуров (для получения дополнительной работы, нужд теплофикации, опреснения морской воды).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ, ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Текст рукописи диссертационной работы содержит основные результаты диссертационного исследования. При этом во введении обоснована тема диссертационной работы, дана общая ее характеристика, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, которые выносятся на защиту.

Подчеркнуто, что в основу диссертационной работы положены теоретические труды и прикладные разработки научных школ и коллективов: ХГТУ (ХПИ), МГТУ, МАДИ, МЭИ, ИВНИИ, С-ПГТУ, С-ПИИ, С-ПВВСУ, ХГАЖТ (ХИИТ), ПО "Завод имени Малышева", ПО "Коломенский завод", ГСКБД, НИКТИД, КАДИ, ИГМаш НАН Украины, ИТТ НАН Украины, ИГМ НАН Украины, НКМ (г. Николаев), ЛМИ (г. Луганск), СГТУ (г. Саратов) и др. организаций Украины, а также зарубежных стран.

Показано, что диссертационное исследование выполнено применительно к быстроходным и среднеоборотным двигателям типов 4ЧН12/14, 6ЧН13/11,5, 10ДН20,7/2.25,4, 16ЧН26/27, 16ЧН32/32, 6Д30/50. Отмечено, что диссертационная работа явилась результатом сотрудничества автора с коллективом ОГК.

по дизелестроению ПО "Завод имени Малышева", ГСКБД, учеными кафедрами ДВС ХГТУ. Во введении подчеркнуто также, что при выполнении научного исследования отдельные вопросы были проработаны совместно с к.т.н. Никитиным А.В., к.т.н. Крестлингом Н.А., аспирантами Козельским В.Д., Ерошенковым Д.С., у которых автор являлся научным консультантом кандидатских диссертационных работ.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы утилизации сбросной теплоты дизелей.

На основании анализа данных технической литературы показано, что одно из направлений улучшения теплоиспользования связано с применением турбокомпаундных ДВС, включающих силовые газовые и паровые турбины (расширительные машины), причем, это направление имеет комплексный характер.

Теория и практика совместной работы ДВС и лопаточных машин в турбокомпаундных СУ исследована на основании трудов Б.Н. Стечкина, Н.М. Глаголева, А.Э. Симсона, Н.Н. Иванченко, Б.Г. Степанова, Н.К. Шокотова, Н.Ф. Разлейцева, С.А. Ерошенкова, В.Д. Сахаревича, А.Г. Рыбальченко, Д.А. Деховича, А.И. Губина, В.А. Петросянца, Я. Мацека (Чехия), К. Циннера (Германия), и др., анализа выполненных разработок на ПО "Завод имени Малышева", ПО "Коломенский завод", ЯМЗе, в ХГТУ, ХГАЖТ, ЦНИДИ, ГСКБД, НИКТИДе, в фирмах "Броун Бовери", МАН, "Зульцер", "Камминс", "Лейланд", "Мицубиси" и др.

Данный анализ позволил не только рассмотреть аспекты функционирования турбокомпаундных ДВС, но и показать, что некоторые из вопросов работы таких СУ еще крайне слабо исследованы. Это прежде всего относится к особенностям совместной работы силовой турбины и утилизационного цикла Ренкина, а также использования вариатора в цепи передачи

мощности от СТ к КДВС.

Анализ трудов в области теории и практики утилизационных контуров ДВС, высокотемпературного охлаждения Н.М. Глаголева, Ф.Л. Ливенцева, В.Г. Кривова, М.К. Овсянникова, А.Г. Курзона, В.В. Маслова, Н.К. Шокотова, А.А. Шейпаке и др., работ ученых дальнего зарубежья таких как К.С. Робертсон, С.Е. Эккард, Д. Боуд, С.К. Чен, Р. Лин, Д.Т. Морган и др., практических разработок, которые выполнены в С-ПВВИСУ, ПО "Завод имени Малышева", ХГТУ, С-ПГТУ, С-ПКИ, НИКТИДе, МАСИ и др., в фирмах Запада "Пилстик", Зульцер", "Термо-Электрон" и "Дженерал Электрик", "Катепиллер" и др. позволили сделать вывод о том, что вторичное использование теплоты является существенным резервом улучшения теплоиспользования в СУ с КДВС. Отмечено, что в настоящее время наивысший уровень теплоиспользования достигнут именно в СУ с КДВС и системами ВИТ (например, установка "Totem" фирмы "Фиат" имеет коэф. использования теплоты сгорания топлива около 92%).

Кроме того, работы А.Ф. Шеховцова, Н.И. Чайнова, Г.Б. Розенблита, Б.С. Стефановского, Ф.И. Абрамчука, Е.И. Третьяка и др. позволили выполнить оценку температурного состояния деталей цилиндрико-поршневой группы КДВС при ВТО и определить условия надежной работы.

В главе показано, что анализ эффективности рабочих процессов турбокомпаундных ДВС целесообразнее вести с позиций как первого, так и второго законов термодинамики. Это существенно обогащает информацию и позволяет более обосновано принимать технические решения. С этой целью рассмотрены энергетическая и энергоэкоэнергетическая схемы (рис.1), с помощью которых сделана предварительная оценка резервов улучшения теплоиспользования за счет утилизационных контуров КДВС.

Отмечается, что рис.1.а соответствует энергетический баланс в виде

$$\eta_e = 1 - q_{yx} - q_{xл} - q_w - \Delta_{ME} - \Delta_{NH} - q_L \quad (1)$$

а рис. 1.б - энергоэксергетический

$$\eta_e = 1 - (e_{q_{yx}} + e_{q_{xл}} + e_{q_w} + e_{q_L}) - (d_{xл} + d_N + d_{ц} + d_B + d_T) - \Delta_{ME} - a_Q \quad (2)$$

где e_{q_1} - относительная эксергия потока теплоты, $e_{q_1} = E_{q_1}/Q_x$; d_1 - относительные внутренние потери эксергии, $d_1 = D_1/Q_x$; a_Q - энергия теплоты, $a_Q = (A_{Q_x} - A_{Q_w})/Q_x$; Δ_j - доли соответствующих работ, $\Delta_j = L_j/Q_x$; q_j - потоки теплоты, $q_j = Q_j/Q_x$.

С учетом зависимостей (1) и (2) показано, что только 2/3 от теплоты, отводимой с отработавшими газами $q_{yx} = (H_{от} - H_0 - H_{ф})/Q_x$ является работоспособной. Существенно меньшие резервы заключены в потоках теплоты с ОЖ и маслом ($q_B + q_M \approx q_w + \Delta_{ME}$). Так, если для традиционных ДВС без ВТО $q_B = 10 - 35\%$, то e_{q_B} не превышает 2-3%. Менее 1% от Q_x составляет эксергия теплоты, отводимой в системе смазки. Обычно на уровне e_{q_B} находится и значение $e_{q_{xл}}$. Таким образом, резервы улучшения теплоиспользования за счет систем утилизации заключены в e_{q_B} , $e_{q_{yx}}$, $e_{q_{xл}}$. Они составляют примерно половину от резервов, определяемых на основании теплового баланса.

Показано, что составляющие энергетических балансов рис.1.а позволяют судить о количественных характеристиках вторичных энергоресурсов (ВЭР) КДВС, а энергоэксергетических (рис.1.б) - о качественных. Это предопределяло вывод о необходимости разработки единого термодинамического подхода к анализу процессов в КДВС, который раскрыл бы взаимосвязь энергетических и эксергетических характеристик КДВС, позволял бы предложить критерии оценки эффективности теплоиспользования в КДВС на основе 1-го и 2-го законов термодинамики.

Таким образом, на основании выполненного в первой главе

анализа не только рассмотрено современное состояние проблемы, но и детализированы задачи научного исследования.

Во второй главе рассмотрены термодинамические основы превращения теплоты в работу в силовых установках с ДВС с учетом переменной массы рабочего тела и необратимости процессов.

Представленные теоретические положения выполнены на основании трудов проф. Шокотова Н.К., а также видных ученых в области термодинамики А.И. Андрищенко, В.И. Крутова, М.П. Вукаловича, Д.П. Гохштейна, А.А. Долянского, В.М. Бродянского, Н.Н. Новикова, Д.В. Сивухина и др., ученых дальнего зарубежья таких как Г.Д. Бэр (Германия), Я. Шергут, Р. Петела (Польша), Г.Л. Борман, М.С. Брандс, П.Ф. Флинн, К.Л. Хоаг, С.К. Чен (США) и др.

Для процессов энергообмена в цилиндре ДВС (рис.2) уравнение сохранения энергии рабочего тела переменной массы

$$\delta E = dU + p dV = dH - V dp, \quad (3)$$

где δE - внешний энергообмен для элементарных процессов в цилиндре ДВС:

$$\delta E = \delta Q_x + \delta H_s + \delta H_{\phi} - \delta H_w - \delta Q_w. \quad (4)$$

С учетом особенностей изменения энтропии процессов, которые имеют место в КДВС при дросселировании, теплообмене, в лопаточных машинах были получены

$$dS = \delta S_q + \delta S_m = \left(\delta q_x - \delta q_w - \delta q_{\phi} - \delta q_s - \delta q_w \right) / T + dM h / (MT), \quad (5)$$

$$dS - dS_o = (\delta Q_x - \delta Q_w) / T + \left[\delta M_s (S_s - S_o) + \delta S_{необр}^s \right] + \quad (6)$$

$$\left[\delta M_{\phi} (S_{\phi} - S_o) + \delta S_{необр}^{\phi} \right] - \left[\delta M_w (S_w - S_o) + \delta S_{необр}^w \right],$$

где dS , δS_q , δS_m - соответственно полное изменение энтропии, вследствие энергообмена и массообмена.

Показано, что для любой термодинамической системы, имеющей с другими системами обмен теплотой, работой и рабочим телом в общем виде уравнение 2-го закона термодинамики

$$dS - dS_0 = \pm \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_i}{T} + \sum_{j=1}^k \{ \pm \delta M_j (s_j - s_0) + \delta S_{j-\text{необр}} \}, \quad (7)$$

где знак плюс соответствует случаю подвода теплоты δQ_i и рабочего тела δM_j , а минус - теплоотвода и истечения.

Уравнения 1-го и 2-го принципов термодинамики, труды видных ученых в области теплотехники, а также работы исследователей Н. Гюи (Франция), А. Стодолы (Словакия), З. Ранга (Югославия) позволяли рассмотреть эксергию и анергию в элементарных процессах в КДВС и получить для этих процессов дифференциальные уравнения. При этом для углубленного анализа энергетических преобразований введен новый критерий

$$\eta_{\text{max}} = 1 - T_0/T_m = E_Q/Q, \quad (8)$$

названный максимальным КПД.

Дифференциальное уравнение для эксергии рабочего тела в цилиндре ДВС

$$dE_v + \delta L_v = \delta E_{Q_1} - \delta E_{Q_2} + \delta E_s + \delta E_T - \delta D_s - \delta D_s - \delta D_\phi \quad (9)$$

или в общем виде для любой термодинамической системы неподвижного рабочего тела

$$dE_v + \delta L_v = \pm \sum_{i=1}^n \delta E_{Q_i} \pm \sum_{j=1}^m \delta E_j - \sum_{j=1}^m \delta D_j, \quad (10)$$

где dE_v - изменение эксергии неподвижного рабочего тела; δL_v - элементарная полезная работа; δE_{Q_i} , δE_j - соответственно элементарные эксергии потоков теплоты и вещества, причем,

$$\delta E_{Q_1} = Q_1 (1 - T_0/T), \quad (11)$$

$$\delta E_j = [\delta M_j (1 - T_0/T) - T_0 (S - S_0) \delta M_j]. \quad (12)$$

С учетом того, что теплоту, внутреннюю энергию и энталь-

пию условно можно разделить на работоспособную (эксергию) и неработоспособную (анергию) части, т.е. $Q = E_Q + A_Q$, $U = E_U + A_U$, $H = E + A$, а также с учетом приведенных выше уравнений, после преобразований

$$dA = \delta A_{Q_X} - \delta A_{Q_W} + \delta A_s + \delta A_{\Phi} - \delta A_T + \delta D_s + \delta D_{\Phi} + \delta D_{\Phi} \quad (13)$$

или в обобщенном виде

$$dA = \pm \sum_{i=1}^n \delta A_{Q_i} \pm \sum_{j=1}^m \delta A_j + \sum_{j=1}^m \delta D_j. \quad (14)$$

Уравнения (3) и (4), (9) и (10), (13) и (14) позволили разработать для комбинированных ДВС схемы энергетические, эксергетические, анергетические, анергоэксергетические, которые в диссертационной работе использованы при оценке термодинамической эффективности как отдельных узлов, так и всей СУ (например, схемы рис. 3).

Таким образом, во второй главе на базе 1-го и 2-го законов термодинамики обобщены процессы в системах с переменной массой, с учетом их необратимости.

В третьей главе рассмотрены основы максимального теплоиспользования в циклах двигателей внутреннего сгорания. Показано, что анализу теоретических циклов ДВС посвящены значительные разделы коллективных трудов, вышедших под редакцией проф. Крутова В.Н., а также проф. Орлина С.А. и проф. Круглова М.Г. Эта же тема широко представлена в монографиях и статьях видных ученых в области теплотехники и тепловых двигателей Д.А. Портнова, В.А. Магнитского, А.И. Андрищенко, М.П. Вукаловича, Д.П. Гохштейна, А.Б. Дубинина и др., ученых из дальнего зарубежья, таких как С.К. Чен, К.Л. Хсег, Р. Пинингер и др.

В главе последовательно рассмотрены циклы поршневых и

комбинированных ДВС, а затем циклы тепловых двигателей с системами утилизации теплоты, в которых может быть реализовано максимальное теплоиспользование.

Разрабатывая критерии сравнения теоретических циклов, автор исходил из того, что общепринятым критерием является термический КПД $\eta_t = L_t/Q_1$, и ему соответствующий для действительных циклов эффективный КПД $\eta_e = L_e/Q_x$. Кроме того, в технической литературе в последнее время в качестве критерия все более широкое использование находит эксергетический КПД, который применительно к схеме рис. 1.6 можно записать как $\eta_{ex} = L_e/E_{Q_x}$. Показано, что часто противопоставляемые среди двигателестроителей критерии η_e и η_{ex} можно с учетом уравнения (8) объединить в одной зависимости:

$$\eta_e = \frac{L_e}{Q_x} = \frac{L_e}{Q_x} \cdot \frac{E_{Q_x}}{E_{Q_x}} = \frac{E_{Q_x}}{Q_x} \cdot \frac{L_e}{E_{Q_x}} = \eta_{max} \cdot \eta_{ex} \quad (15)$$

Уравнение $\eta_e = \eta_{max} \cdot \eta_{ex}$ является принципиальным. Оно позволяет исследовать превращения располагаемой относительной эксергии $\eta_{max} = E_{Q_x}/Q_x$ в относительную эффективную работу $\eta_e = L_e/Q_x$.

Уравнение (15) позволяет записать

$$\eta_e \leq \eta_{max} \quad (16)$$

где знак равенства относится к циклам с максимальным теплоиспользованием, под которыми понимается циклы с внутренними

¹ Легко показать, что для теоретических циклов аналогично $\eta_t = \eta_{max} \cdot \eta_{ex}$. В дальнейшем для удобства при анализе и теоретических, и действительных циклов приняты одинаковые обозначения критериев: η_e , η_{max} и η_{ex} .

$\sum_1 D_1$ и внешними $\sum_j E_j$ потерями эксергии, равными нулю.

Анализ уравнений (15) и (16) показывает, что повышение η_θ следует обеспечивать, во-первых, за счет увеличения η_{\max} , т.е. совершенствования внутрицилиндровых процессов и, во-вторых, путем повышения η_{ex} , т.е. уменьшения внутренней и внешней необратимости.

Внешняя необратимость поршневых двигателей связана с теплоотводом при $V = \text{const}$ (рис. 4) и определяется эксергией $E_{Q_{2v}}$. Для цикла с изохорно-изобарным подводом теплоты Q_1 ($\epsilon = 21,1$) продолженное расширение до атмосферного давления ($p_5 = p_0$), реализуемое при помощи газовой турбины, позволяет уменьшить отводимую в окружающую среду теплоту с $Q_{2v} = 1,36$ до $Q_{2p} = 1,24$ кДж/цикл, при этом $E_{2p} = 0,24$ кДж/цикл (двигатель 4Ч12/14, $p_{\max} = 10$ МПа, $Q_1 = 4,5$ кДж/цикл).

В цикле с максимальным теплоиспользованием все процессы, лежащие левее изохоры 1-4, относятся к поршневому ДВС, а правее ее - к смежным с ДВС системам. Данный цикл может быть осуществлен в теоретической СУ, имеющей поршневой двигатель, адиабатическую газовую турбину (участок 4-5-6) и изотермический компрессор (участок 6-1). Расширение до $p_6 < p_0$ и $T_6 = T_0 = 293$ К, позволяет получить работу, пропорциональную площади 5-6-1-5. Это максимально возможная работа системы утилизации, расположенной после газовой турбины (турбин) с расширением до $p_5 = p_0$.

Вычисления показали, что для этого цикла и принятых исходных данных p_{\max} , Q_1 , ϵ , p_0 , T_0 необходимо расширение до давления $p_6 = 0,023$ МПа, что позволяет достичь $T_6 = T_0 = 293$ К и в системе утилизации получить дополнительно $L_{\text{лит}} = E_{Q_{2p}} = 0,24$, а в силовой установке $L_{\text{св}} = E_{Q_1} = 3,51$ кДж/цикл.

Тогда $\eta_{\text{оу}} = \eta_{\text{max}} = 78,0\%$.

Представленный на рис.4 цикл с максимальным теплоиспользованием рекомендован в качестве образцового (эталонного) для ДВС и назван нами модифицированным циклом Тринклера-Сабата.

В главе рассмотрены также силовые установки с изобарными газовыми турбинами, системами ГТН и исследовано влияние κ_T и κ_K на показатели СУ. Показано, что переход к турбине с $P_T = \text{const}$ сопровождается диссипацией энергии в выпускном коллекторе (ВК), в результате которой всегда $\eta_{\text{оу}} < \eta_{\text{max}}$, т.е. цикл становится необратимым из-за внутренних потерь эксергии.

Анализ модифицированных циклов Отто, Дизеля, Тринклера-Сабата, цикла с изотермическим подводом теплоты в диссертационном исследовании выполнен при помощи разработанного автором комплекса уравнений типа (17), которые позволяют вычислять энергетические, эксергетические и энергоэксергетические показатели рассматриваемых силовых установок как в абсолютных, так и в относительных величинах: например, для η_{max} и $\Delta_{\text{ВНТ}}$ эти уравнения для двигателя с модифицированным циклом Тринклера-Сабата, изобарной газовой турбиной, системой ГТН и ВНТ записываются как

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{max}} = 1 - \frac{\ln(\lambda \rho^K)}{\varepsilon^{K-1} [(\lambda - 1) + K\lambda(\rho - 1)]} ; \\ \Delta_{\text{ВНТ}} = \frac{L_{\text{ВНТ}}}{Q_1} \frac{[(K-1)\frac{\kappa_T}{K} + \lambda \rho^K] \kappa_T^{\frac{1-K}{K}} + (K-1) \ln \kappa_T - K \left[1 + \ln \left(\frac{K-1}{K} \cdot \frac{\kappa_T}{K} + \frac{1}{K} \lambda \rho^K \right) \right]}{\varepsilon^{K-1} [(\lambda - 1) + K\lambda(\rho - 1)]} ; \end{array} \right. \quad (17)$$

При помощи разработанного комплекса уравнений исследо-

вано влияние ϵ , λ , ρ , κ , κ_k , κ_T ($p_T = \text{const}$, $p_T = \text{var}$) на эффективность теоретических СУ и отдельных ее элементов. При этом сделаны выводы: а) эффективность цикла с максимальным теплоиспользованием определяется качеством процессов в поршневом двигателе, затем в СТ и, наконец, на третьем месте вклад системы ВИТ, что позволило отметить: низкую эффективность реальных процессов в ДВС нельзя в полной мере компенсировать ни за счет силовой турбины, ни системы утилизации; б) чем выше КПД поршневого двигателя, тем меньше доля работы СТ и ВИТ.

В главе рассмотрены также условия максимального теплоиспользования в термодинамических бинарных циклах комбинированных ДВС. В этих циклах два рабочих тела: одно в поршневом ДВС, а другое - в системе утилизации. Показано, что в системе ВИТ может быть реализован, например, цикл 1-5-6-1 рис.4 с одно-, двух- и трехатомным идеальным рабочим телом. Принято, что в основном цикле - двухатомный идеальный газ. Сформулированы условия обратимого теплообмена в такой силовой установке, при этом коэффициент кратности, определяющий соотношение между количествами рабочих тел основного и дополнительного циклов,

$$n_p = \frac{M}{M_{\text{ВИТ}}} = \frac{\kappa_{\text{ВИТ}}(\kappa - 1)}{\kappa(\kappa_{\text{ВИТ}} - 1)}, \quad (18)$$

Рассмотрение термодинамических циклов поршневых ДВС, КДВС, КДВС с системами утилизации теплоты позволило определить основные тенденции совершенствования теплоиспользования реальных рабочих процессов комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

Четвертая глава посвящена разработке основ математического и физического моделирования действительных рабочих процессов комбинированных ДВС с системами утилизацией теплоты.

В главе описаны особенности экспериментальной базы диссертационного исследования, включающей научные стенды, созданные применительно к двигателям: 4ЧН12/14; 6ЧН13/11,5; 16ЧН26/27; 1ЧН32/32.

Научные стенды позволили осуществить моделирование рабочих процессов КДВС с СТ, КДВС с СТ и ВИТ, экспериментально исследовать работу двигателя 16ЧН26/27 при его высокотемпературном охлаждении. Спроектированные и изготовленные макетные образцы силовой газовой турбины (для двигателя 4ЧН12/14) и утилизационного паросилового цикла Ренкина (для ДВС 6ЧН13/11,5) позволили получить экспериментальные данные для идентификации математической модели рабочего процесса турбокомпаундного ДВС, а также исследовать работу таких двигателей на долевых режимах.

Математическая модель турбокомпаундного двигателя представляет собой комплекс алгоритмов для расчета рабочего процесса ДВС, системы наддува и СТ, утилизационного цикла Ренкина, анализа эффективности процессов теплоиспользования с позиций 1-го и 2-го законов термодинамики. Учитывая, что для алгоритма расчета рабочего процесса КДВС за основу была взята математическая модель кафедры ДВС ХИПУ, в главе основное внимание уделено описанию процессов в цикле Ренкина. При этом рассмотрены подходы к моделированию процессов в парогенераторе, конденсаторе, питательном насосе, а также в расширительных машинах (РМ): объемного типа и лопаточной.

Алгоритм расчета рабочего процесса цикла Ренкина с турбиной в качестве РМ базируется на разработках автора, которые были сделаны при выполнении кандидатской диссертации.

В главе предложен метод расчета в дифференциальной форме рабочего процесса объемной расширительной машины, в котором при помощи коэффициента сжимаемости

$$Z = p \cdot v / R \cdot T \quad (19)$$

учтены отличия реальных свойств рабочих тел от идеальных.

Для объемной РМ (рис.5) уравнение первого принципа термодинамики

$$\delta Q = \delta H_{12} - \delta H_{23} - \delta Q_w = dH - Vdp = dU + pdV. \quad (20)$$

На основании преобразований дифференциальных уравнений термодинамики, уравнений Максвелла, а также зависимостей (19) и (20) было получено для области перегретого пара

$$dT = \frac{\delta q - \frac{\left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]}{\left[1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T\right]} dv}{c_p - RZ \frac{\left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]^2}{\left[1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T\right]}}. \quad (21)$$

Если же рабочее тело находится в двухфазной области, то

$$dT = \frac{1}{c_v} \left[\delta q - \frac{r}{(v' - v')} dv \right]. \quad (22)$$

При моделировании процессов в объемной РМ взяты уравнение состояния в вириальной форме (для H_2O), а также уравнение состояния Редлиха-Квонга в модификации Соаве для других рабочих тел.

Уравнение Редлиха-Квонга в модификации Соаве позволяет определить параметры рабочих тел при ограниченном объеме табличных данных о их термодинамических свойствах. При этом

используется методика Лидерсена для определения критических давлений, температуры и удельного объема, методика Эдмистера для определения фактора ацентричности и другие методики, описанные в фундаментальном труде проф. Р.Рида, проф. Дж. Праусница, проф. Т. Шервуда - ученых из Массачусетского технологического института и Калифорнийского университета.

Проверка адекватности разработанных алгоритмов показала достаточно хорошую сходимость результатов: погрешность вычислений термодинамических функций на основании вириального уравнения не превышала 1%, а уравнения Редлиха-Квонга - 5%.

Разработанные математические модели позволяют определить конструктивные и термодинамические параметры основных узлов утилизационных контуров.

Сформулированные и обобщенные в четвертой главе положения составляют научные основы физического и математического моделирования реальных рабочих процессов комбинированного ДВС с системами утилизации теплоты.

В пятой главе на основании анализа расчетных и экспериментальных данных по силовым установкам с ДВС типа СМД (4ЧН12/14; 6ЧН18/11,5), 10Д100 (10ДН20,7/2-25,4), Д80 (16ЧН26/27), 16ЧН32/32 рассмотрены условия эффективного применения силовых газовых турбин и утилизационных циклов Ренкина. Показано, что за счет систем ВИТ можно снизить удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме примерно на 15 г/(кВт.ч) и получить экономию топлива до 20 г/(кВт.ч) в случае использования в такой СУ еще и СТ. С учетом же загрузки СУ в эксплуатации экономия топлива может составить соответственно 3 - 5 и 5 - 8 г/(кВт.ч).

В главе представлены результаты исследования условий эффективного применения различных схем турбокомпаундных ДВС.

Получены данные о совместной работе СТ и систем ВИТ в СУ с ДВС. Они позволили раскрыть влияние утилизационных контуров на рациональные параметры рабочего процесса ДВС, а также показать взаимную зависимость параметров СТ и ВИТ. В частности отмечено, что рациональное отношение давления ОГ в выпускном коллекторе к давлению наддувочного воздуха во впускном (p_T/p_B) зависит не только от параметров ДВС и лопаточных машин, а еще и от утилизационного цикла Ренкина: в случае применения системы ВИТ и для $N_{ey} = const$ значение p_T/p_B меньше, чем для варианта КДВС без системы ВИТ.

Исследована перспективная схема турбокомпаундного ДВС с вариатором (B_r) в силовой цепи передачи мощности от СТ к КДВС. На основании экспериментальных данных по двигателю 4ЧН12/14 показано, что применение B_r является существенным резервом повышения эффективности турбокомпаундных ДВС. Он позволяет дополнительно примерно на 2-4 г/(кВт.ч) уменьшить среднээксплуатационный расход топлива. Кроме того отмечено, что для КДВС с B_r расширяется область возможного применения силовых газовых турбин. Это обусловлено тем, что граничное значение КПД лопаточных машин, выше которого использование СТ становится целесообразным; уменьшается с 72-75% (СУ без вариатора) примерно до уровня 70%.

В главе исследованы и другие схемные решения КДВС с системами утилизации вторичного энергоресурса ОГ. Это, во-первых, дизель-генераторная СУ тепловоза (рис. 6), в системе ВИТ которой предусмотрено использование теплоты электродинамического торможения (в штатной системе эта теплота рассеивается в окружающей среде при помощи тормозных реостатов). Результаты физического моделирования показали, что за счет этого эффективность системы ВИТ КДВС может быть повышена на

20-30%.

Во-вторых, исследована схема транспортной СУ рис.7 с паросиловым циклом Ренкина, избыточная мощность расширительной машины которого служит только для понижения давления ОГ за турбинами систем ГТН и СТ, т.е. для создания разрежения и, тем самым, увеличения перепада давлений, сбрасываемого на СТ.

Эти и другие схемные решения защищены авторскими свидетельствами и рекомендованы промышленности.

Показано, что схемное решение рассматриваемых СУ с системами ВИТ определяется также применяемыми в цикле Ренкина рабочими телами (РТ) (исследованы H_2O , CH_3OH , фреоны $CFC1_3$, $CHFC1_2$, C_4F_8), а также термодинамическими параметрами утилизационного паросилового контура. Основными из них являются давление p_1 и температура t_1 РТ перед РМ и давление p_2 в конденсаторе. При этом отмечено, что уровень рационального p_2 для СУ наземного транспорта определяется в основном температурой окружающей среды t_0 : для $t_0 = +50^\circ C$ значение $p_2 \approx 0,1$ МПа, $t_0 = 20^\circ C$ - $p_2 = 0,06 - 0,085$ МПа (рис.8), $t_0 = 0^\circ C$ - $p_2 < 0,06$ МПа.

Для различных p_2 определены габаритные размеры конденсатора и площади его теплообменных поверхностей F_k рис.9. Как показали исследования, лучшим g_{oo} соответствует и минимальные F_k , причем, характер изопараметрических линий $g_{oo} = f(p_2, t_1)$ и $F_k = f(p_2, p_1)$ - идентичен.

В главе приведены новые данные о взаимном влиянии рабочих процессов в цилиндре ДВС и утилизационных контурах. В частности, выполнен сравнительный анализ эффективности систем утилизации быстроходных дизелей 6ЧН13/11,5, 4ЧН12/14 и двигателей ЗИЛ 130, ВАЗ 2103. Показано, что снижение расхода топлива за счет систем ВИТ отработавших газов у двигателей

с внешним смесеобразованием при прочих равных условиях может быть в 1,5-2 раза существеннее, чем у дизельных КДВС. Это практически подтвердило сделанный в третьей главе теоретический вывод о том, что поршневые двигатели с меньшими КПД за счет систем ВИТ обычно имеют большие резервы по снижению ξ_{∞} .

Другие результаты этого исследования получены на основании экспериментальных данных по двигателю 1ЧНЗ2/32. Отмечено, что системы утилизации вторичного энергоресурса ОГ позволяют при $N_{\text{еу}} = \text{const}$ разгружать поршневой двигатель по среднему индикаторному давлению. Результаты физического моделирования, выполненные автором, показали, что при постановке на двигатель типа ЧНЗ2/32 системы ВИТ и СТ и условия $N_{\text{еу}} = \text{const}$ для поршневого ДВС возможно снижение $P_{\text{ед}}$ на 0,2-0,24 МПа, что в диапазоне $P_{\text{ед}} = 2,0-2,4$ МПа соответствует уменьшению расхода топлива на 4-6 г/(кВт.ч) только за счет внутрицилиндровых процессов.

В главе представлены впервые полученные дополняющие друг друга энергетические и эксергетические показатели процессов в цилиндре ДВС и смежных с ним системах утилизации, что позволило построить энергетические и эксергетические диаграммы таких СУ, показать вклад каждого из рассматриваемых процессов в формирование $\eta_{\text{еу}}$ и КПД отдельных узлов. На основании экспериментальных данных по поршневому двигателю и результатов физического моделирования систем утилизации отмечено, что критерий η_{max} двигателя 1ЧНЗ2/32 находится на уровне 70-75%. При постановке систем утилизации рост $\eta_{\text{еу}}$ примерно до 42% обеспечивается за счет уменьшения внешних потерь эксергии, что фиксируется увеличением эксергетического КПД $\eta_{\text{еу}}$.

При постановке систем утилизации (СТ и ВИТ) вторичного

энергоресурса ОГ потенциальные резервы, определенные по разности ($\eta_{\max} - \eta_{\text{сy}}$), используются не более, чем на 20%. Дальнейшее улучшение теплоиспользования возможно в том числе и за счет повышения глубины утилизации теплоты Q_2 , отводимой от ДВС в окружающую среду, что может быть реализовано в комплексных системах ВИТ.

В шестой главе рассмотрены научные основы и прикладные аспекты совершенствования теплоиспользования в СУ с ДВС за счет комплексной утилизации потоков теплот ОГ (Q_r), ОЖ ($Q_{\text{о}}$), промежуточного охлаждения наддувочного воздуха $Q_{\text{кл}}$ (в главе данные вопросы исследованы применительно к двигателю наземного транспорта 16ЧН26/27 и судовому 6Д30/50).

Являясь одним из основных двигателей судов портового и каботажного плавания, устаревшие 6Д30/50, имеющие низкие индикаторные и эффективные показатели, по целому ряду причин еще эксплуатируются и будут эксплуатироваться какое-то время.

В главе доказано, что для двигателя 6Д30/50 при его работе с однокамерным опреснителем и утилизационным котлом эффект, отнесенный к среднеэксплуатационным затратам на топливо, за счет теплофикации составляет около 11%, а опреснения морской воды - 20%. Причем, в случае применения ВТО на двигателе типа в 6Д30/50, а также при условии работы и Q_r , и $Q_{\text{о}}$ только для целей опреснения, что позволяет перейти к многокамерным опреснителям, производство дисциллята может возрасти в несколько раз.

Результаты выполненного анализа, схемные решения систем утилизации двигателя 6Д30/50 (например, схема рис.10) были переданы к внедрению Керченскому морскому порту и судостроительному заводу "Залив".

В главе также представлены результаты исследования путей совершенствования теплоиспользования в перспективном дизель-генераторе 16ЧН26/27 за счет утилизации в паросиловых циклах $Q_{г.}$, $Q_{в.}$, $Q_{х.л.}$. На основании экспериментальных данных по КДВС, экспериментального исследования высокотемпературного охлаждения этого двигателя, физического моделирования на развернутом КДВС систем утилизации был сделан вывод о том, что рациональной схемой системы ВИТ в этом случае является двухконтурная, включающая контур высокого давления (КВД) и низкого (КНД). Причем, в КВД в основном используется $Q_{г.}$, а в КНД - $Q_{в.}$ или $Q_{х.л.}$, или $Q_{в.} + Q_{х.л.}$. При этом условием эффективного применения $Q_{в.}$ является ВТО, а $Q_{х.л.}$ рационально использовать лишь в СУ с высокофорсированными КДВС.

Рассмотрены различные схемы КДВС с системами утилизации $Q_{г.}$, $Q_{в.}$, $Q_{м.}$: по мере их усложнения эффект от работы систем утилизации возрастал. Наибольшим он оказался для перспективной бинарной системы ВИТ, которая может быть рекомендована для судовых и стационарных КДВС. Ее особенностью является то, что в КВД рабочим телом является H_2O , а в КНД - CH_3OH , причем, конденсатор КВД выполняет роль испарителя и экономайзера для CH_3OH . Показано, что в данном случае может быть получено уменьшение расхода топлива на $\Delta g = 21$ г/(кВт.ч). В целом же в зависимости от уровня форсирования поршневого ДВС и условий его эксплуатации за счет утилизации $Q_{г.}$, $Q_{в.}$, $Q_{м.}$ в СУ наземного транспорта величина Δg может достигать 24 г/(кВт.ч).

Отмечено, что эффективность утилизационных контуров при ВТО определяется уровнем температур $t_{в.}^{*}$ ОЖ на выходе из поршневого ДВС: чем больше $t_{в.}^{*}$, тем эффективность систем ВИТ выше.

Анализ экспериментальных данных по двигателю 16ЧН26/27 с ВТО позволил уточнить характер перераспределения статей теплового баланса для различных $t_{в}^{**}$, значений температур по длине гильзы цилиндров (рис. 11), а также в характерных точках крышки цилиндра. Была доказана возможность работы двигателя 16ЧН26/27 с $t_{в}^{**} > 110^{\circ}\text{C}$, что открывает большие возможности для эффективной утилизации $Q_{в}$.

На основании обобщения представленных в шестой главе материалов был сделан вывод о перспективности ВТО для двигателя 16ЧН26/27, а также комплексных систем утилизации теплоты двигателей 6Д30/50 и 16ЧН26/27.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе поставлена и решена научно-техническая проблема разработки термодинамических основ повышения топливной экономичности транспортных дизелей за счет утилизации сбросной теплоты.

В диссертационной работе:

1. На основании анализа и обобщений опыта работы ведущих двигателестроительных фирм показан комплексный характер задачи улучшения теплоиспользования в силовых установках с ДВС, обоснованы перспективы ее решения как при помощи традиционных путей (совершенствования поршневых ДВС), так и нетрадиционных (применение турбокомпаундных схем).

2. Проведено расчетно-экспериментальное исследование, научные обобщения и практические рекомендации его базируются на новых теоретических положениях и оригинальных математических моделях, которые также являются практическим результатом диссертационной работы. К ним относятся:

2.1. Термодинамические основы процессов в ДВС (с учетом необратимости), для которых: в дифференциальной и интег-

ральной формах получены обобщенные уравнения балансов энтропии, энергии и эксергии; разработана энергоэксергетическая схема термодинамического узла и системы узлов; предложен новый критерий углубленного теоретического анализа η_{max} , позволяющий получить объединенное уравнение для эксергетического и эффективного КПД;

2.2. Термодинамические основы теории циклов двигателей внутреннего сгорания с максимальным теплоиспользованием, позволившие: получить образцовые циклы тепловых двигателей, а также новые, разработанные на базе положений 1-го и 2-го законов термодинамики, соотношения для их теоретического анализа; исследовать бинарные циклы КДВС; показать, что дополнительная работа идеальных систем утилизации теплоты по своей величине обратно пропорциональна эффективности теоретического цикла поршневого ДВС и однозначно определяется параметрами рабочего процесса в цилиндре этого ДВС; обосновать, что максимально возможная работа теплового двигателя достигается в теоретическом цикле КДВС, у которого, например, расширение рабочего тела происходит до давления, соответствующего температуре окружающей среды t_0 , с последующим его изотермическим сжатием до давления p_0 .

2.3. Комплекс новых методик расчетно-экспериментального исследования комбинированных ДВС с силовыми газовыми турбинами и системами вторичного использования теплоты. Это прежде всего: методика расчета рабочего процесса СУ, состоящей из КДВС, силовой газовой турбины, систем ГТН и вторичного использования теплоты; метод расчета рабочего процесса в цилиндре утилизационной расширительной машины, реализованный в дифференциальной форме и позволяющий вести оптимизацию ее конструктивных и термодинамических параметров; методика ана-

лиза реальных процессов в узлах комбинированного ДВС (в том числе и в цилиндре), основанная на положениях 1-го и 2-го законов термодинамики; методика физического моделирования на одноцилиндровом отсеке рабочего процесса комбинированного ДВС с силовой газовой турбиной и системой ВИТ; методика экспериментального исследования макетного образца СУ с КДВС и утилизационным циклом Ренкина; методика экспериментального исследования высокотемпературного охлаждения среднеоборотного КДВС типа 16ЧН26/27.

3. На основании термодинамического анализа качества вторичных энергоресурсов КДВС показано, что наибольшую энергетическую ценность для систем утилизации теплоты современных быстроходных и среднеоборотных дизелей имеют отработавшие газы, использование которых в системах ВИТ позволяет на номинальном режиме получить экономию топлива до 15 г/(кВт·ч), а с учетом условий эксплуатации примерно 3 - 5 г/(кВт·ч).

4. Применительно к двигателям 4ЧН12/14 и 16 ЧН32/32 исследована возможность совершенствования теплоиспользования в комбинированных ДВС за счет применения силовых газовых турбин и утилизационных циклов Ренкина.

Выполненный анализ позволил раскрыть взаимную зависимость параметров рабочего процесса в цилиндре ДВС, силовой газовой турбине и паросиловом контуре. При этом показано, что:

4.1. Для КДВС с силовыми газовыми турбинами при $N_{\text{ср}} = \text{const}$ рациональное отношение давлений $p_{\text{т}}/p_{\text{с}}$ определяется показателями рабочего процесса поршневого ДВС, лопаточных машин и систем ВИТ, причем, для СУ с паросиловым контуром это отношение имеет меньшее значение, чем для КДВС без

такого контура.

4.2. Применение силовых газовых турбин и утилизационных циклов Ренкина при $N_{ey} = \text{const}$ позволяет разгрузить поршневой двигатель по среднему индикаторному давлению и обеспечить для высокофорсированных ДВС снижение удельного расхода топлива не только за счет работы дополнительных систем СТ и ВИТ, а также и цилиндра ДВС.

5. Впервые выполнено исследование влияния систем утилизации теплоты (СТ и ВИТ) на рабочий процесс в цилиндре поршневого двигателя с применением энергетических и эксергетических методов исследования. С единых термодинамических позиций рассмотрены процессы во всей силовой установке, состоящей из поршневого ДВС, силовой газовой турбины, систем ГТН и ВИТ. На этой основе получены энергетические и эксергетические диаграммы, позволяющие показать вклад каждого из исследуемых элементов СУ в формирование КПД и оценить резервы улучшения теплоиспользования за счет их совершенствования.

6. Выполненный комплекс расчетно-экспериментальных исследований КДВС 4ЧН12/14, 6ЧН13/11,5, 16ЧН26/27, 16ЧН32/32, 10ДН20,7/2*25,4 позволил определить и обосновать основные конструктивные и термодинамические параметры утилизационных контуров данных двигателей. Показано, что на значения этих параметров существенное влияние оказывают схемные решения комбинированных СУ, применяемые в паросиловом цикле рабочие тела и параметры окружающей среды.

7. Сравнительный анализ эффективности систем утилизации двигателей с внешним и внутренним смесеобразованием показал, что при прочих равных условиях большие резервы уменьшения расхода топлива за счет систем ВИТ имеют двигатели с внешним смесеобразованием.

8. Применительно к дизель-генератору 16ЧН26/27 исследована эффективность применения комплексных систем утилизации теплоты отработавших газов $Q_{Г}$, охлаждающей жидкости $Q_{В}$ и промежуточного охлаждения наддувочного воздуха $Q_{хл}$, определены условия рационального применения таких систем. При этом показано, что:

8.1. Наиболее эффективной схемой комплексной системы утилизации теплот $Q_{Г}$, $Q_{В}$, $Q_{хл}$ является двухконтурная, имеющая контур высокого и низкого давления.

8.2. Условием эффективного использования $Q_{В}$ в цикла Ренкина является высокотемпературное охлаждение ДВС, а $Q_{хл}$ - высокий уровень форсирования поршневого двигателя по среднему индикаторному давлению.

8.3. Наибольшее термодинамическое совершенство присуще бинарной системе утилизации теплоты, у которой, например, в КВД в качестве рабочего тела используется H_2O , а в КНД - CH_3OH , причем, конденсатор КВД служит подогревателем и испарителем для КНД.

Приведено ряд оригинальных схем систем утилизации для дизелей наземного транспорта. Отмечено, что в таких КДВС при утилизации $Q_{В}$ и $Q_{хл}$ уменьшаются или ликвидируются затраты мощности на обслуживание стандартных систем охлаждения, что, в свою очередь, обеспечивает повышение эффективности СУ.

9. Исследована возможность применения систем утилизации теплоты ДВС на судах портового и каботажного плавания. Применительно к двигателю 6Д30/50 показано, что в условиях Крыма рациональная система утилизации включает теплофикационный контур и опреснительную установку. Оценка эффекта в ценах 1993 г. для топлива и опресненной воды и с учетом условий эксплуатации двигателей типа 6Д30/50 на судах Керченского

морского порта позволила отметить, что дополнительные контуры могут компенсировать до 30 % среднеексплуатационных затрат на топливо.

10. Результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора, переданы промышленности в виде отчетов по НИР, в частности, на ПО "Завод имени Малышева" (г. Харьков), СКБ по турбокомпрессорам при ДЭТ (г. Дергачи), Керченский судостроительный завод "Залив", в лабораторию перспективных двигателей кафедры ДВС ХГПУ, НИКТИД (г. Владимир) и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности /Ф.И.Абрамчук, А.П.Марченко, Н.Ф.Разлейцев, Е.И.Третьяк, А.Ф.Шеховцов, Н.К.Шокотов. Под общ. ред. А.Ф.Шеховцова. - К. 1992. - 272 с.

2. Процессы в перспективных дизелях / А.Ф.Шеховцов,Ф.И.Абрамчук, В.И.Крутов, А.П.Марченко, Н.Ф.Разлейцев, И.И.Оукчев, Е.И.Третьяк, Н.К.Шокотов, Э.Эплер. Под общ. ред. А.Ф.Шеховцова. - Х. 1992. - 352 с.

3. Шокотов Н.К., Марченко А.П. К вопросу об исследовании на цифровой ЭВМ рабочего процесса комбинированного дизеля с системой вторичного использования теплоты // Двигатели внутр. сгорания. 1983. Вып. 37. с. 106 - 112.

4. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Сорокотяга А.С. Анализ эффективности процессов комбинированного дизеля, с системой вторичного использования теплоты методом балансов теплоты, эксергии и энергии // Двигатели внутр. сгорания. 1983. Вып. 37. с. 101-106.

5. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Федосов А.П. Работа комбинированного ДВС с системой вторичного использования теплоты на долевых режимах поршневого двигателя // Двигатели

внутр. сгорания. 1986. Вып. 43. с. 51 - 55.

6. Влияние к.п.д. лопаточных машин на эффективность двигателя с силовой турбиной / Севрук И.В., Сорочотяга А.С., Марченко А.П. и др. - Двигатели внутр. сгорания. 1988. Вып. 48. с. 62-65.

7. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Козельский В.Д. Выбор рациональных параметров системы утилизации теплоты отработавших газов // Двигатели внутр. сгорания. 1988. Вып. 48. с. 120 - 124.

8. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Никитин А.В. Результаты расчетно-экспериментального исследования турбокомпаундного дизеля // Двигатели внутр. сгорания. 1990. Вып. 51. с. 53-59.

9. Улучшение нагрузочной характеристики двигателя 4ЧН12/14 с силовой турбиной / Шокотов Н.К., Никитин А.В., Марченко А.П. и др. - Двигатели внутр. сгорания. 1993. Вып. 54. с. 3-9.

10. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Тришев А.В. Система высокотемпературного охлаждения двигателя внутреннего сгорания // А.с. N 1638334, БИ 1991, N 12.

11. Силовая установка. / Н.К. Шокотов, А.П. Марченко, А.Ф. Шевцов и др., - А.с. N 1668714, БИ 1991, N 29.

12. Способ работы дизель-генераторной установки и дизель-генераторная установка / В.Н. Зайончковский, В.Г. Кривов, А.П. Марченко и др. - А.с. N 1668621, БИ 1991, N 39.

13. Марченко А.П., Сорочотяга А.С. Методика оптимизации рабочего процесса комбинированного дизеля // Деп. в ГНТБ Украины, N 1162-Ук89, 1989. 10 с.

14. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Крестлинг Н.А. Пути рационального использования сбросной теплоты двигателя 6Д30/50 морского буксира в условиях Крыма и математическая

модель оценки их эффективности // Тез. докл. международной конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье" Харьков - Мишкольц, 1993. с. 194 - 195.

15. Марченко А.П. Особенности математического моделирования, анализа и оптимизации турбокомпаундных двигателей внутреннего сгорания // Тез. докл. международной конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье" Харьков - Мишкольц, 1993. с. 165 - 167.

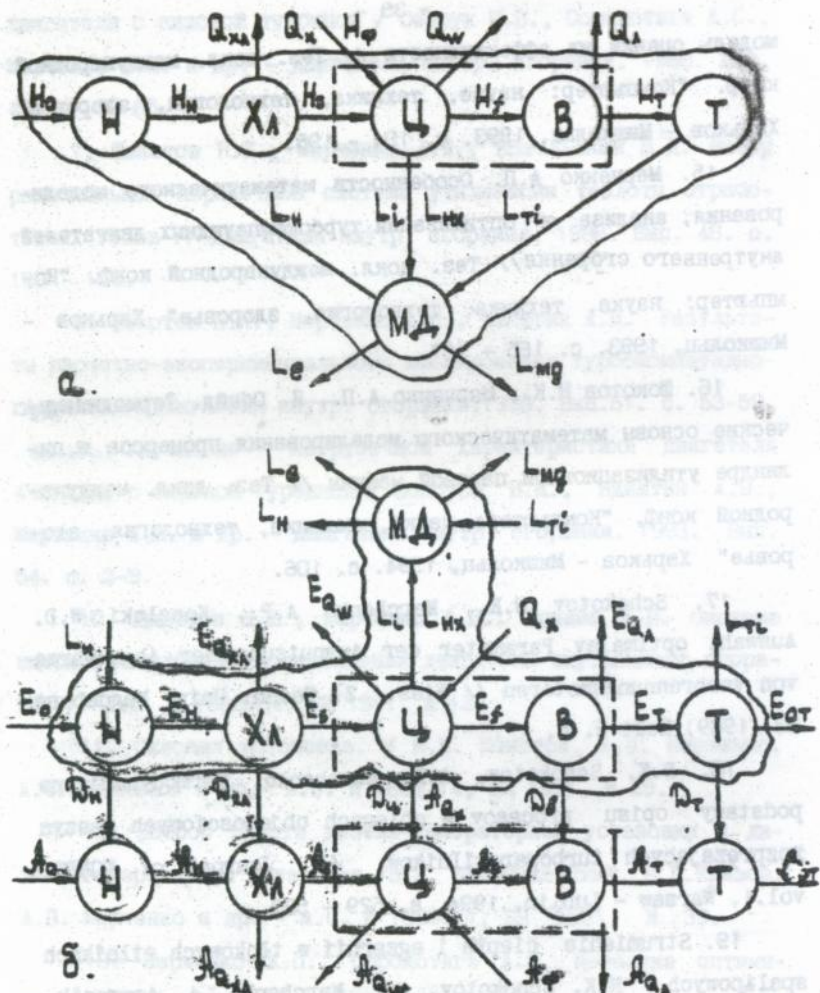
16. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Я. Обейд. Термодинамические основы математического моделирования процессов в цилиндре утилизационной паровой машины // Тез. докл. международной конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье" Харьков - Мишкольц, 1994. с. 106.

17. Schokotov N.K., Marchenko A.P., Koselcki W.D. Auswahl optimaler Parameter der Ausnutzung der Abgaswärme von Verbrennungsmotoren // Wiss. Z. Techn. Univ. Magdeburg 33 (1989) Heft 5. с.

18. N.K. Schokotov, A.P. Marchenko. Termodynamiczne podstawy opisu procesów w obiegach objętościowych maszyn rozprężających turboparosilników // Journal of KONES, vol.1, Warsaw - Lublin, 1994, s. 529 - 533.

19. Strumienie ciepła i egzernii w tłokowych silnikach spalipowych / N.K. Schokotov, A.P. Marchenko, A. Amwroził, M. Poniewski - Journal of KONES, vol.1, No 1, Warsaw - Lublin, 1994. s. 534 - 542.

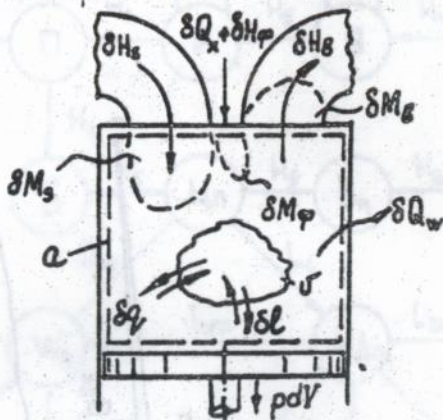
Схемы комбинированных ДВС



Н, Т - нагнетатель и турбина системы ГН; ХЛ - воздухоохлади-
 тель; Ц - цилиндр ДВС; В - выпускной коллектор;
 а - энергетическая схема; б - анергоэнергетическая

Рис.1

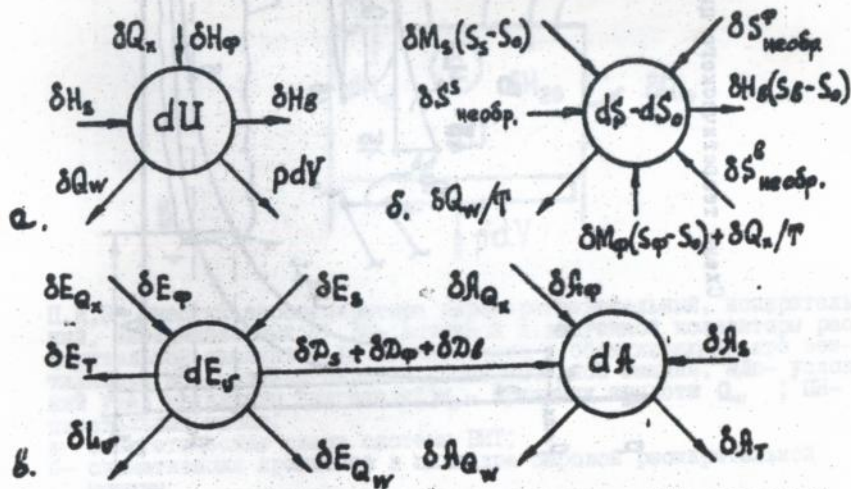
Схематизация процессов энергообмена в цилиндре ДВС



а - контрольная поверхность

Рис.2

Схематизация балансов по цилиндру ДВС



Схемы энергетическая /а/, энтропийная /б/, энергоак-
ергетическая /в/

Рис.3

Схема теоретического цикла комбинированного ДВС

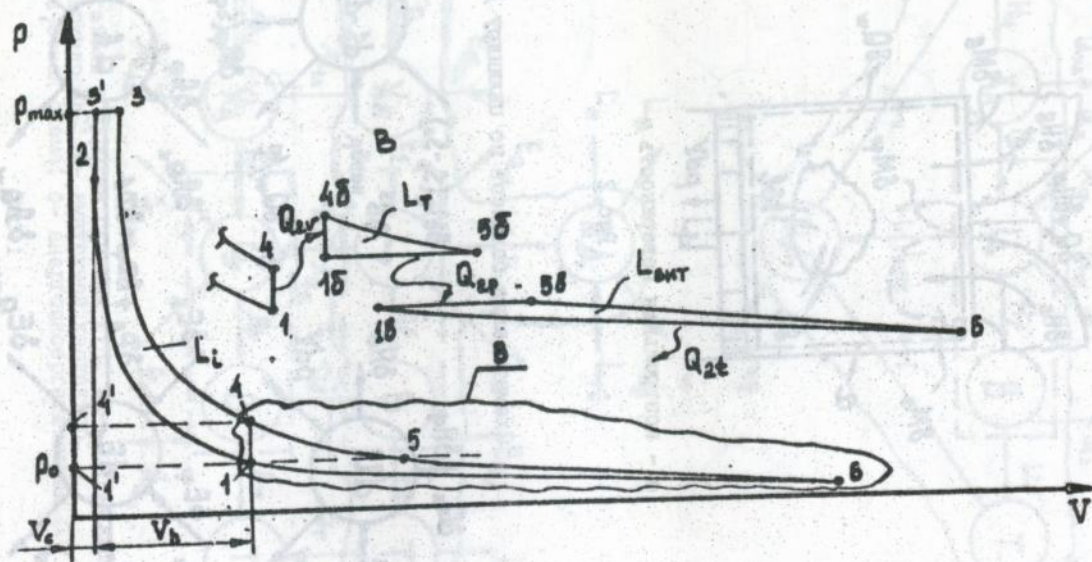
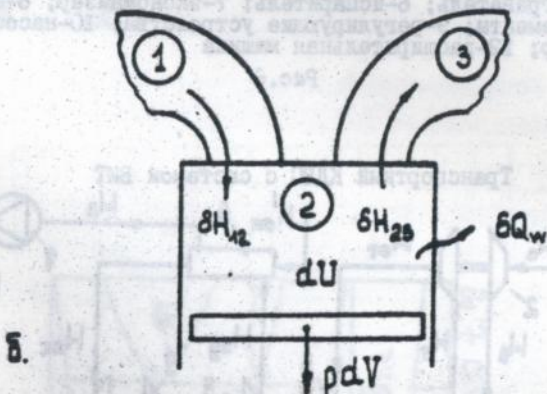
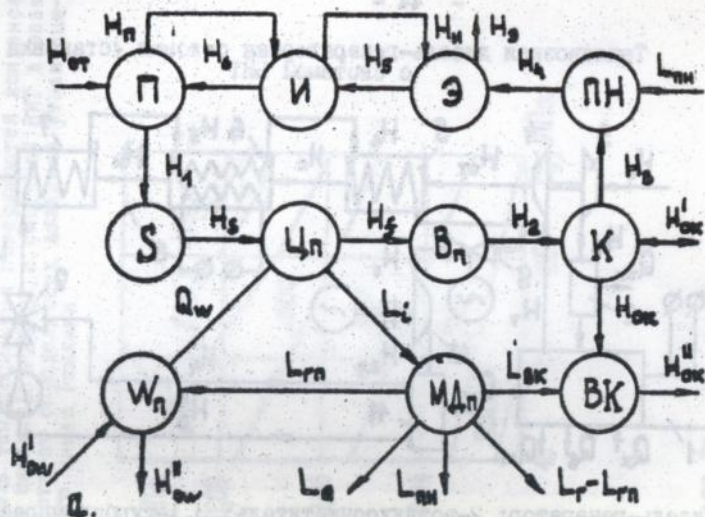


Рис. 4

Схематизация процессов в системе утилизации теплоты: КИЭ



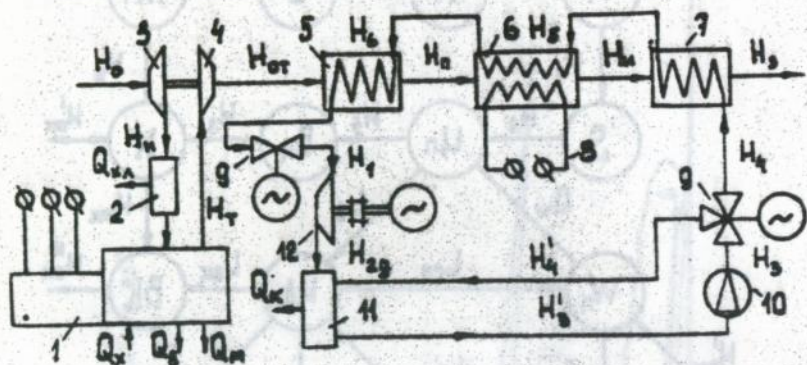
П, И, Э - участки парогенератора пароперегревательный, испарительный, экономайзерный; S, Вп - впускной и выпускной коллекторы расширительной машины; К, ВК - конденсатор и обслуживающий его вентилятор; Цп - цилиндр паровой расширительной машины; МДп - условный узел механизмы двигателя; Wп - приемник теплоты Q_w ; ПН - питательный насос;

а - энергетическая схема системы ВИТ;

б - схематизация процессов в цилиндре паровой расширительной машины

Рис. 5

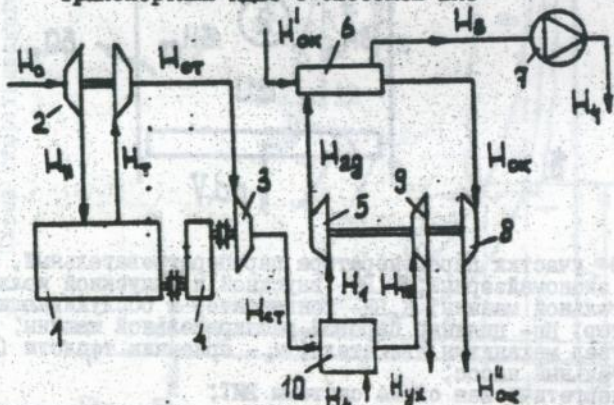
Тепловозная дизель-генераторная силовая установка
с системой ВИТ



1-дизель-генератор; 2-воздухоочиститель; 3,4-турбокомпрессор;
5-пароперегреватель; 6-испаритель; 7-экономайзер; 8-нагрева-
тельные элементы; 9-регулирующие устройства; 10-насос; 11-
конденсатор; 12-расширительная машина

Рис.6

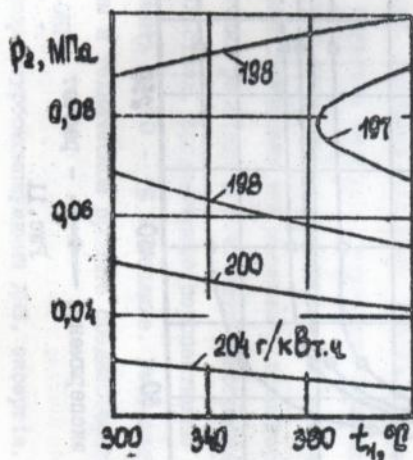
Транспортный КДВС с системой ВИТ



1-КДВС; 2-турбокомпрессор; 3-силовая турбина; 4-редуктор;
5-расширительная машина; 6-конденсатор; 7-насос; 8-вентиль
конденсатора; 9-компрессор ДГ; 10-парогенератор

Рис.7

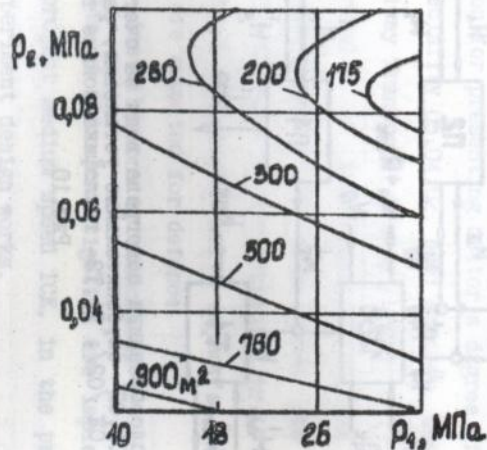
Влияние определяющих параметров цикла Ренкина на среднее эксплуатационное расходе топлива КДВС 16ЧН26/27 с системой ВИТ



$p_1 = 3 \text{ MPa}$

Рис. 8

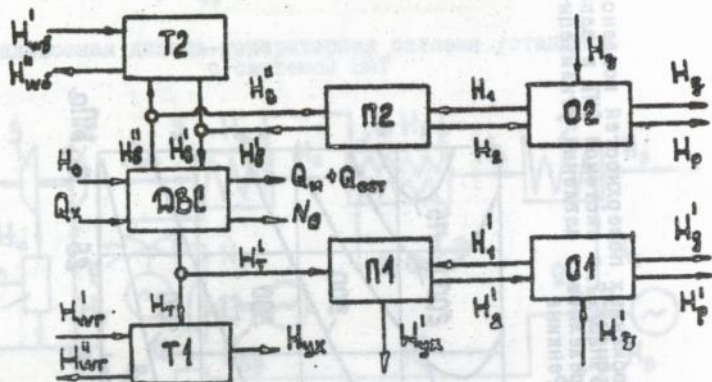
Площадь теплообменных поверхностей конденсатора дизеля 16ЧН26/27 с системой ВИТ в зависимости от определяющих давлений утилизационного цикла Ренкина



$t_1 = 400 ^\circ\text{C}; t_0 = 20 ^\circ\text{C}$

Рис. 9

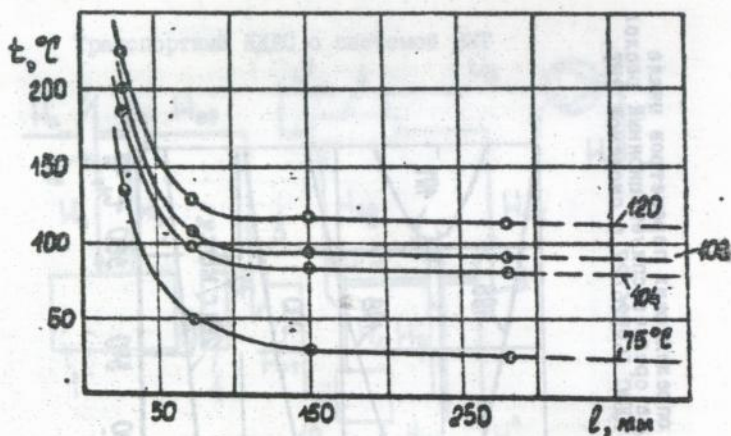
Схема СУ с дизелем 6Д30/50 и комбинированной системой утилизации теплоты ОГ и ОК



П1, П2- теплообменники подогрева воды за счет теплот $Q_{ог}$ /П1/ и $Q_{ок}$ /П2/; О1, О2- опреснительные установки, работающие в контурах ОГ /О1/ и ОК /О2/; Т1, Т2- теплофикационные теплообменники

Рис.10

Распределение температур по длине гильзы цилиндра двигателя 16ЧН26/27 при ВТО



● - эксперимент; ○ - расчет

Рис.11

Marchenko A.P.

Thermodynamic foundations of increasing fuel efficiency of transport diesels owing to the utilization of waste heat.

The dissertation for presenting doctor's degree of technical sciences on speciality 05.04.02, heat engines, Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, 1994.

Methods and results of investigation of new energetic diagrams of turbocompaund ICE with power gas and stem turbines for ground transrort are presented in 44 scientific papers including 2 monographs and 6 author's certificates for invention, are submitted for defence.

The suggested installations to economy up to 10 - 16 % of fuel. The results of this investigation are implemented in the technical project medium speed ICE, in the practice of research and experiment design works.

Марченко А.П. Термодинамические основы повышения топливной экономичности транспортных дизелей за счет утилизации сбросной теплоты.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 - тепловые двигатели, Харьковская госуд. академия жел.-дор. трансп., Харьков, 1994.

На защиту вынесены методы и результаты исследования новых энергетических схем турбокомпаундных ДВС с силовыми газовыми и паровыми турбинами для наземного транспорта, изложенные в 44 научных работах, в т.ч. двух монографиях и 6 авторских свидетельствах. Предлагаемые перспективные установки позволяют экономить до 10 - 16 % топлива. Результаты исследования внедрены в техническом проекте среднеоборотного ДВС, практике НИР и ОКР.

Ключові слова: турбокомпаундний ДВС, екоенергія.

АВ 31.233

А В Т О Р Е

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ
ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ
ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ**

МАРЧЕНКО Андрей Петрович

**Ответственный за выпуск
к.т.н., доцент Савенко В.В.**

Подписано к печати

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Печать офсетная. Усл. печ. лист , уч.-изд. лист

Заказ 527 Тираж 100 экз Бесплатно

Издания ХГАЖТа, 310050, г. Харьков - 50, пл. Фейербаха, 7.

Тип. ХГАЖТа, 310050, г. Харьков - 50, пл. Фейербаха, 7.