

На правах рукописи

Handwritten signature of A. A. Malozemov in black ink, written diagonally across the page.

Малозёмов Андрей Адиевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК**

05.04.02 - Тепловые двигатели

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете  
ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН  
**Луканин Валентин Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РФ  
**Матиевский Дмитрий Дмитриевич**

доктор технических наук, доцент  
**Еникеев Рустэм Далилович**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
**Морозова Вера Сергеевна**

Ведущая организация: Открытое акционерное общество  
«**Производственное объединение  
Алтайский моторный завод**»

Защита состоится 25 мая 2011 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете  
по адресу: 454081, г.Челябинск, пр.Ленина, д.76, зал диссертационного совета,  
ауд. 1001 (10 этаж гл. корп.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского госу-  
дарственного университета

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим на-  
правлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря  
диссертационного совета. E-mail: D212.298.09@mail.ru, контактный телефон  
(351) 267-91-23

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Энергетическая безопасность – важнейшая составляющая национальной безопасности России. Одним из эффективных способов повышения энергетической безопасности является развитие автономных систем энергоснабжения (АСЭС) на базе энергоустановок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Однако имеется ряд проблем, затрудняющих развитие АСЭС, наиболее существенные из них:

- высокие затраты на топливо (до 80 % от общих затрат на эксплуатацию ДВС-электростанций), обусловленные недостаточно широким использованием местных топливо-энергетических ресурсов (ТЭР), альтернативных топлив, возобновляемых источников энергии (ВИЭ), работой двигателя на скоростных и нагрузочных режимах далеких от оптимальных;

- загрязнение окружающей среды вредными веществами (ВВ), содержащимися в отработавших газах (ОГ) первичных двигателей, выбросы углекислого газа, потребление атмосферного кислорода, шумовое «загрязнение»;

- большие безвозвратные потери энергии с теплом, выносимым с ОГ, через системы охлаждения и смазки, тепловое «загрязнение» атмосферы;

- качество электрической энергии, вырабатываемой ДВС-электростанциями (ДЭС), в большинстве случаев не соответствует требованиям к качеству энергии в сетях общего назначения.

Одним из эффективных способов решения этих проблем является внедрение многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) модульного типа на базе гибридных энергоустановок. Основные отличия МЭК от традиционных ДЭС:

- совместная работа двигатель-генераторной установки (ДГУ) с ветроэлектростанцией (ВЭС), либо другим ВИЭ, что предопределяет наличие в составе МЭК преобразователя частоты тока (ПЧ);

- работа ДГУ на оптимальном, с точки зрения топливной экономичности, скоростном режиме, зависящем от нагрузки, что влечет необходимость использования «всережимного» (частота тока – 60...110 % от номинального) генератора и ПЧ, а также системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ), реализующей оптимальный алгоритм управления скоростным режимом ДГУ в составе МЭК в зависимости от нагрузки;

- наличие системы утилизации сбросового тепла систем охлаждения, смазки и отвода отработавших газов первичного двигателя (СУТД);

- использование местных, в том числе газообразных, видов топлива (газовых конденсатов, топлив широкого фракционного состава, природного, попутного и газогенераторного газа, биогаза и т.д.).

В результате могут быть существенно снижены затраты на топливо, уменьшены удельные выбросы ВВ, уровни шума и вибрации, тепловая и механическая напряженность деталей ДГУ, улучшены показатели надежности, снижены требования к САРЧ, повышена стабильность частоты тока и улучшены другие показатели качества электроэнергии.

Согласно ГОСТ Р 51749 критерием энергетической эффективности ДЭС является расход условного топлива на единицу выработанной энергии, что неприемлемо для МЭК, т. к. не учитывается возможность выработки теплоты, свойства топлива, ресурс, выбросы ВВ с ОГ, уровень шума и вибрации, качество генерируемой энергии.

Математические модели гибридных энергетических установок (Н. Bindner, В. Saulnier, Н.М. Парникова и др.) включают лишь упрощенные модели первичного ДВС. Это не позволяет определить количество утилизируемой теплоты, граничные условия оценки надежности, выбросов ВВ с ОГ, не учитывают возможность работы ДВС с переменной частотой, не позволяют решать сопряженные задачи оптимизации МЭК. Математические методы оптимизации частотного режима ДВС (С. Rakopoulos, Р. Flynn, W. Dunbar и др.) не учитывают потери энергии в электротехнических устройствах МЭК и наличие СУТД.

Создание МЭК является актуальным направлением в энергетике, его развитие требует решения **научной проблемы** совершенствования методов и средств повышения их эффективности оптимизацией режимов функционирования и конструкции первичных ДВС.

**Цель исследования** – повысить эффективность (топливная экономичность, экологические показатели, надежность, качество электроэнергии) многофункциональных энерготехнологических комплексов совершенствованием двигатель-генераторных установок.

**Задачи исследования:**

1. Разработать систему критериев эффективности МЭК, учитывающую конструктивные особенности МЭК (работу с переменной частотой вращения и многотопливность первичного ДВС, наличие СУТД) и ограничивающие факторы (ресурс, выбросы ВВ с ОГ, уровень шума и вибрации первичного ДВС, качество генерируемой энергии).

2. На основе системы критериев эффективности МЭК, обосновать критерии оптимальности, параметры оптимизации и ограничивающие параметры ДГУ.

3. Разработать математическую модель МЭК. Установить зависимости, связывающие критерии эффективности МЭК, с режимами функционирования и конструктивными особенностями ДГУ и первичного ДВС.

4. Разработать метод синтеза алгоритма оптимального управления скоростным режимом первичного ДВС в составе МЭК в зависимости от нагрузки. Оценить влияние скоростного режима на критерии эффективности МЭК.

5. Выполнить оценку влияния вида топлива на критерии эффективности МЭК с первичным дизелем 4ЧН15/20,5 с камерой сгорания ЦНИДИ, обосновать его рациональные конструктивные и регулировочные параметры.

6. Разработать технические решения, реализующие обоснованные в ходе исследования методы совершенствования ДГУ в составе МЭК.

**Объект исследования** – процессы в двигатель-генераторных установках, определяющие эффективность МЭК.

**Предмет исследования** – методы и средства совершенствования двигатель-генераторных установок в составе МЭК.

**Методика исследования** включает методы теории поршневых ДВС и электротехники, математического моделирования и оптимизации сложных систем, численные и натурные эксперименты.

**Достоверность результатов** подтверждена их сопоставлением с данными других исследователей, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, применением современных средств и методов испытаний, соответствующих государственным и отраслевым стандартам.

**Научную новизну** имеют следующие положения, **выносимые на защиту**:

1. Система критериев эффективности МЭК с первичным ДВС, учитывающая особенности режимов их функционирования и структуры МЭК, включающая, кроме критерия по ГОСТ Р 51749 – удельного расхода топлива, ограничивающие параметры – установленную электрическую мощность, тепловую мощность, ресурс, качество генерируемой энергии, выбросы ВВ с ОГ, шум и вибрацию.

2. Математическая модель МЭК, отличающаяся новыми зависимостями, связывающими критерии эффективности с режимами функционирования, характеристиками и структурой ДГУ (использование различных видов топлива, работа с переменной частотой вращения, наличие ПЧ и СУТД) для определения:

- относительного изменения КПД МЭК на режимах постоянной и переменной частот вращения первичного ДВС;

- расходования ресурса первичного ДВС на основе оценки скорости накопления повреждений;

- относительного изменения потенциально утилизируемой теплоты на режимах постоянной и переменной частот вращения первичного ДВС.

3. Метод синтеза алгоритма оптимального управления скоростным режимом первичного ДВС в составе МЭК в зависимости от частоты вращения ДВС и электрической нагрузки, с учетом системы критериев оценки эффективности МЭК, отличающийся целевой функцией – расход топлива, отнесенный к электрической мощности МЭК.

4. Результаты оценки влияния:

- переменной частоты вращения коленчатого вала первичных двигателей типа Ч13/14 и ЧН13/14 на критерии эффективности МЭК, учитывающие изменение

КПД «всережимного» генератора, преобразователя частоты тока, системы утилизации сбросового тепла первичного ДВС;

- физико-химических свойств топлива (цетанового числа, фракционного состава), регулировочных характеристик первичного двигателя 4ЧН15/20,5 (запальной дозы, угла опережения подачи топлива, давления наддува) и свечи накаливания в камере сгорания для принудительного воспламенения на топливную экономичность и тепломеханическую нагруженность при работе на альтернативных видах жидкого топлива и по газожидкостному циклу на режимах МЭК.

**Практическую ценность** имеют разработанные методы и средства решения задач совершенствования ДГУ, позволяющие повысить эффективность МЭК, в том числе, расчетные программы, нормативно-технические документы, научно-обоснованные технические решения. Результаты исследования могут быть использованы при создании МЭК и их систем, модификаций первичных ДВС, предназначенных для работы в составе МЭК, модернизации существующих ДЭС и ВЭС, в учебном процессе.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертации внедрены:

- ОАО РАО «ЕЭС России» и входившими в его состав ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» и ЗАО «НПЦ Малой энергетики» (г. Москва) – при разработке «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», «Программы развития ветроэнергетики ОАО РАО «ЕЭС России»», проекта «Концепции технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года», систем стандартов организации «Дизельные и газопоршневые электростанции» и «Ветроэлектростанции», разработке и проведении стендовых и полевых испытаний МЭК на базе ВЭС «Заполярная» (г. Воркута), разработке проектов национальных стандартов РФ «Дизельные и газопоршневые электростанции. Общие технические условия» и «Дизельные и газопоршневые электростанции. Энергоэффективность».

- ОАО «ПО Алтайский моторный завод» (г. Барнаул) – при разработке модификаций дизелей для энергоустановок.

- ООО «ЧТЗ-Уралтрак» и ООО ГСКБ «Трансдизель» (г. Челябинск) – при разработке двигатель-генераторных установок и модификаций дизелей для них, включая многотопливные, создании системы утилизации сбросового тепла.

- ОАО ХК «Барнаултрансмаш» (г. Барнаул) – при разработке двигатель-генераторных установок, а также модификаций дизелей для них.

- АК «Якутскэнерго» и АК «Сахаэнерго» (р. Саха (Якутия)) – при реализации «Программы развития малой энергетики Республики Саха (Якутия)» и разработке СУТД для Верхоянской ДЭС.

- ОАО «НИИ автотракторной техники» и НП «Сертификационный центр автотракторной техники» (г. Челябинск) – при конструктивной доводке и проведении испытаний двигателей и энергоустановок.

- ЮУрГУ (г. Челябинск) – при реализации «Программы развития ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» на 2010-2019 годы».

Материалы исследования использованы при выполнении работ по государственным контрактам № 3420р/5872 от 17.08.2005 «Разработка программного обеспечения для доводки экологических характеристик транспортных дизелей. Разработка системы утилизации сбросового тепла дизеля» и № 8411.0816900.10.002 от 18.04.2008 «Создание модельного ряда дизельных двигателей жидкостного охлаждения», а также в 47 отчетах по результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Внедрение подтверждено актами.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были доложены и одобрены на заседаниях:

- международных научно-технических конференций: «Двигатель-97» (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 1997), «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения» (г. Челябинск, ЮУрГУ, 2003), «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (г. Барнаул, АлГТУ, 2008), СПбГАУ (г. Санкт-Петербург, 2008), «Достижения науки – агро-промышленному производству» (г. Челябинск, ЧГАА, 2010);

- межвузовских и межрегиональных конференций: «Научные исследования и опыт работы кафедр – основа образовательной деятельности института» (г. Челябинск, ЧВАИ, 2001), подпрограммы 205 «Транспорт» научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (г. Звенигород, МАИ-ТУ, 2002), «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин» (г. Челябинск, ЧВАИ/ЧВВАКИУ, 1999, 2008, 2010), «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса» (г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2010);

- юбилейных научно-технических конференций: «Гидравлика и гидропневмосистемы» (г. Челябинск, ЮУрГУ, 1998), молодых специалистов, посвященной 75-летию НАТИ, «Тракторостроение – XXI век» (г. Москва, 2001), посвященной 40-летию кафедры двигателей ЧВВАКИУ (г. Челябинск, 2008), «Повышение эффективности колесных и гусеничных машин многоцелевого назначения» (г. Челябинск, ЧВВАКИУ, 2010), посвященной 100-летию создания автомобильных войск России;

- научно-технических советов: ОАО «НИИ автотракторной техники» (г. Челябинск, 1996...2010), ООО «ЧТЗ-Уралтрак» (г. Челябинск, 2008, 2009), ОАО «РАО ЕЭС России» – секция «Малая и нетрадиционная энергетика» (г. Москва, 2003...2008), НП «НТС «ЕЭС России» (г. Москва, 2009), НП «Агродизель» (г. Москва, 2007, 2008).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 53 печатных работ, в том числе 17 работ в изданиях, рекомендованных ВАК, включая 1 монографию, и 2 патента РФ на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертация объемом 300 страниц состоит из введения, 6 глав, заключения, 2 приложений, содержит 41 таблицу, 166 рисунков, список использованной литературы, включающий 243 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы решаемые проблемы, приведена общая характеристика исследования.

В **первой главе** выполнен анализ состояния, перспектив развития и проблем совершенствования энергоустановок с поршневыми тепловыми двигателями.

Россия относится к числу наиболее энергоемких стран мира. Энергоемкость национального дохода РФ на единицу ВВП в 2 раза выше, чем в США, и в 3.5 раза выше, чем в Западной Европе. Доля затрат на энергию в общей себестоимости продукции достигает 20 %, тогда как в развитых странах она равна 2...3 %. Издержки на транспортирование энергии в РФ составляют 12 % от производства. В то же время, выработка энергии на малых электростанциях с использованием местных ТЭР, в первую очередь природного газа и газового конденсата, в 1,5...2,0 раза дешевле, чем переработка и подача газа на крупные ГРЭС с обратной подачей энергии. Энергетические обследования всех ДЭС АК «Якутскэнерго» показали, что их эффективность характеризуется высоким удельным расходом топлива на отпущенную электроэнергию – 455 г у.т./кВт·ч), отпущенное тепло – 216 кг у.т./Гкал. Одной из причин неэффективного расходования ТЭР является работа ДГУ с постоянной частотой вращения, которая не оптимальна с точки зрения топливной экономичности. Существенная экономия ТЭР может быть достигнута комбинированным производством электроэнергии и теплоты. Коэффициент использования топлива когенерационных установок достигает 85...90 %.

Одним из эффективных решений проблемы энергообеспечения удаленных регионов России является создание и внедрение многофункциональных энерготехнологических комплексов, представляющих систему взаимосвязанных модулей, количество и конфигурация которых определяется в зависимости от требований конкретных потребителей, и конструктивно отличающихся от традиционных ДЭС.

В главе изложены основные положения концепции развития АСЭС на основе МЭК, включающей цели, задачи, принципы, этапы реализации до 2030 года. Исследования рынка серийных ДГУ позволили выявить приоритеты потребителей при их выборе, определить тенденции развития конструкций. Показаны недостатки существующей системы нормативно-технической документации в области



малой энергетики, обоснована необходимость разработки новой системы отраслевых стандартов с требованиями к созданию, приемке и эксплуатации ДЭС.

Выполнен обзор работ по теме исследования. Проблемам повышения эффективности отечественной энергетики посвящены труды Г.Г. Ольховского, В.Б. Иванова, утилизации сбросового тепла – Д.Д. Матиевского, В.С. Кукиса, совершенствованию конструкции ДВС – Н.А. Иващенко, Н.Д. Чайнова, J. Heywood, H. Ricardo. Вопросы моделирования и совершенствования рабочего цикла ДВС (в том числе на альтернативных видах топлива) изучены в работах В.Н. Луканина, А.С. Хачияна, И.И. Вибе, Н.Ф. Разлейцева, А.С. Кулешова, А.Н. Лаврика, Е.А. Лазарева, M. Hiroyoshi, R. Reitz, V. Golovichev, G. Woschni, D. Assanis.

В конце главы обоснована решаемая научная проблема, определена цель и поставлены задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке теоретических основ повышения эффективности многофункциональных энерготехнологических комплексов.

Предложена система критериев эффективности энергоустановок с поршневыми ДВС, в том числе МЭК, представляющая совокупность абсолютных или удельных показателей (рис. 1), которая, в отличие от существующей, учитывает возможность выработки тепловой энергии, свойства топлива, ресурс, выбросы ВВ с ОГ, уровень шума и вибрации, качество генерируемой энергии.

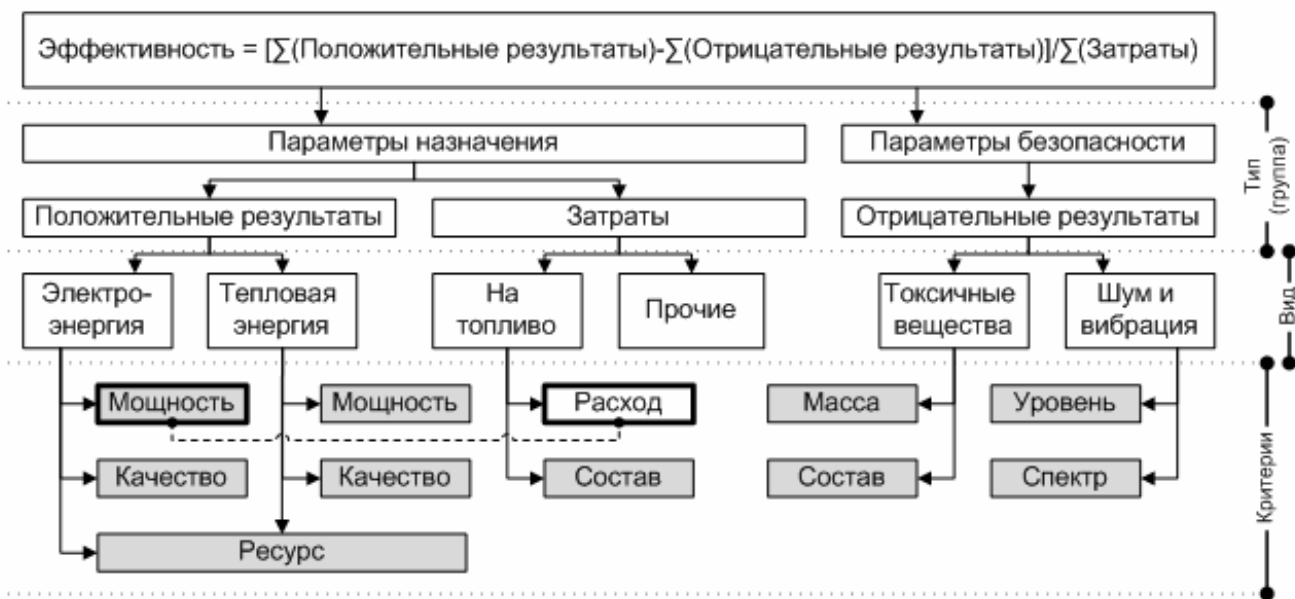


Рис. 1 – Система критериев эффективности энергоустановок с поршневыми ДВС:  – критерии по ГОСТ Р 51749),  – ограничивающие параметры

В качестве критерия оптимальности принят расход каждого вида топлива, отнесенный к электрической мощности МЭК ( $g_e$ ), т.к. стоимость топлива в затратах на эксплуатацию ДЭС достигает 80 %, стоимость электрической энергии на порядок выше стоимости эквивалентного количества тепловой энергии, производство которой не является основной функцией МЭК. На каждом этапе исследования

производится оценка влияния изменения критерия оптимальности на величины критериев эффективности и ограничивающие параметры МЭК.

Ограничивающими параметрами являются: установленная электрическая мощность (ГОСТ 13822), качество энергии (ГОСТ 13822, ГОСТ 13109), параметры безопасности (выбросы ВВ с ОГ (ГОСТ Р 51249, ГОСТ Р 41.96), дымность ОГ (ГОСТ Р 51250, ГОСТ 17.2.2.02), шум и вибрация (ГОСТ 13822)).

При моделировании использованы следующие допущения:

1. Стохастическая модель внешних параметров ДГУ преобразована к детерминированному эквиваленту с использованием типовых (рис. 2) или фактических графиков нагружения.

2. Количество варьируемых параметров ограничено техническими решениями, определяющими особенности МЭК.

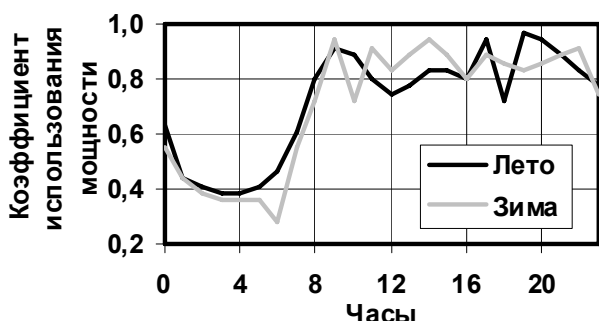


Рис. 2 – Характерные суточные графики электрической нагрузки АСЭС в рабочие дни

Разработанная математическая модель МЭК в отличие от существующих комплексно учитывает особенности режимов функционирования и конструкции МЭК, позволяет решать сопряженные задачи применительно к теплотехническому, механическому и электрическому оборудованию, определять параметры, входящие в систему критериев эффективности МЭК. Модель включает целевую функцию по критерию

минимального удельного расхода топлива и математическое описание зависимостей потенциально утилизируемой теплоты, ресурса, удельных выбросов ВВ с ОГ от режимов функционирования и характеристик ДГУ.

**Целевая функция по критерию минимального удельного расхода топлива МЭК** базируется на математическом описании процессов в ДГУ. Основой математической модели рабочего процесса первичного ДВС является система уравнений массового и энергетического балансов рабочего тела (РТ) (Б.М. Гончара и Н. Ricardo) в камере сгорания и уравнение состояния РТ:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \left( H_u \delta q_u \frac{dx}{d\tau} + \frac{dQ_w}{d\tau} + \frac{dQ_n}{d\tau} - \frac{dQ_m}{d\tau} - \frac{dQ_p}{d\tau} - u' \frac{dG'}{d\tau} - u'' \frac{dG''}{d\tau} - \frac{dL}{d\tau} \right) \frac{1}{C_v(G' + G'')} \\ \frac{dG'}{d\tau} &= \frac{dG'_n}{d\tau} - (1-r) \frac{dG_p}{d\tau} - \frac{dG'_m}{d\tau} - G_0 q_u \frac{dx}{d\tau} \\ \frac{dG''}{d\tau} &= \frac{dG''_n}{d\tau} - r \frac{dG_p}{d\tau} - \frac{dG''_m}{d\tau} + (G_0 + 1) q_u \frac{dx}{d\tau} \\ P &= \frac{(G' + G'')RT}{V} \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

где  $T, P, V, G$  – текущие температура, давление, объем и масса РТ, соответственно,  $H_u$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\delta$  – коэффициент эффективности сгорания,  $\frac{dx}{d\tau}$  – закон выгорания топлива,  $q_u$  – цикловая подача топлива,  $G_0$  – масса воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива,  $dQ_w$  – элементарное количество энергии, подведенное к РТ (или отведенное от него) в процессе теплообмена со стенками камеры сгорания (КС),  $dQ_n$  – элементарное количество энергии, подведенное к РТ (или отведенное от него) в процессе наполнения КС,  $dQ_m$  – элементарное количество энергии, подведенное к РТ (или отведенное от него) в процессе очистки КС,  $dQ_p$  – элементарное количество энергии, отведенное от РТ вследствие утечек в зазор между поршнем и цилиндром,  $dL$  – элементарная работа цикла,  $u$  – удельная внутренняя энергия РТ,  $dG_n$  – элементарное количество газа, поступившего в цилиндр через впускной клапан,  $dG_m$  – элементарное количество газа, вышедшего из цилиндра через выпускной клапан,  $dG_p$  – элементарное уменьшение массы РТ вследствие утечки через зазор между поршнем и цилиндром,  $C_v$  – удельная теплоемкость воздуха,  $r$  – доля отработавших газов в РТ,  $R$  – удельная газовая постоянная. Символы «'» и «''» относятся к воздуху и продуктам сгорания, соответственно.

Элементарное количество теплоты, подведенное к РТ (или отведенное от него) в процессе теплообмена со стенками цилиндра, находится из уравнения теплоотдачи Ньютона и зависимости  $G. Woschni$ . Закон выгорания топлива определяется по формуле И.И. Вибе, правомерность использования которой обусловлена тем, что при разработке модификаций первичных ДВС для МЭК обычно известны характеристики закона выгорания для различных режимов базового ДВС. Свойства топлива учитывались через эмпирические коэффициенты уравнения И.И. Вибе. Процессы в газоздушном тракте рассчитывались с использованием редуцированной системы уравнений (1).

Обоснованность выбора математической модели первичного ДВС подтверждена тем, что погрешность определения  $P_z$  первичного дизеля 4ЧН15/20,5 с использованием системы уравнений (1) не превышает 2 %, а среднего индикаторного давления – 0,2 %.

Давление механических потерь  $P_m$  определялось в зависимости от средней скорости поршня  $c_n$  и максимального давления сгорания  $P_z$  (модель S. Chen и P. Flynn):

$$P_m = K_1 + K_2 \cdot P_z + K_3 \cdot c_n + K_4 \cdot c_n^2, \quad (2)$$

где  $K_1 \dots K_4$  – эмпирические коэффициенты.

Математическая модель механической части «всерезимного» генератора основана на уравнении:

$$dw = \frac{1}{2H} \cdot \int_0^{\tau} (M_{кр} - M_e) d\tau - K_d \cdot dw, \quad (3)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент первичного ДВС на валу генератора, определяется с использованием уравнений (1) и (2),  $M_e$  – электрический момент на валу генератора,  $K_d$  – коэффициент демпфирования,  $H$  – инерционная постоянная генератора,  $w$  – скорость вращения вала генератора (в относительных единицах).

Для моделирования электрической части «всерезимного» генератора применялась известная система дифференциальных уравнений:

$$V_S = R_S \cdot I_S + L_S \cdot \frac{dI_S}{dt} + \frac{d\Psi_S}{dt}, \quad (4)$$

$$U_R = (R_R + R_D) \cdot I_R + L_R \cdot \frac{dI_R}{dt} + \frac{d\Psi_R}{dt},$$

где  $U, I, \Psi$  – обобщенные векторы напряжения, тока и потокосцепления статорных ( $S$ ) и роторных ( $R$ ) обмоток,  $R, D$  – активное сопротивление и индуктивность потоков рассеивания обмоток.

Целевая функция по критерию минимального удельного расхода топлива:

$$g_{\varepsilon} = \frac{G_m}{N_{\varepsilon}} = \frac{G_m}{N_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{ген мех} \cdot \eta_{ген эл} \cdot \eta_{пч} \cdot k_n}, \quad (5)$$

где  $G_m$  – часовой расход топлива,  $N_{\varepsilon}$  – электрическая мощность МЭК,  $N_i$  – индикаторная мощность первичного ДВС, определяемая по системе уравнений (1),  $\eta_m$  – механический КПД первичного ДВС, определяемый по уравнению (2),  $\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии,  $\eta_{ген мех}$ ,  $\eta_{ген эл}$  – механический и электрический КПД генератора,  $\eta_{пч}$  – КПД ПЧ,  $k_n$  – коэффициент неучтенных потерь.

Для традиционных ДЭС, работающих при  $n = const$ , отсутствуют зависимости КПД генератора и ПЧ от частоты вращения первичного двигателя. Их разработка является задачей исследования, решенной в 4-ой главе диссертационной работы.

### **Количество потенциально утилизируемой теплоты**

$$Q^{сум} = Q_w + Q_m \quad (6)$$

определяется с помощью уравнений (1), как энергия, отводимая через стенки КС в системы смазки и охлаждения ( $Q_w$ ) и с отработавшими газами ( $Q_m$ ). Влияние СУТД на индикаторный КПД первичного ДВС оценивается через величину её гидродинамического сопротивления по газовому тракту ( $\Delta P_r$ ) с использованием системы уравнений (1).

**Математическая модель для определения ресурса первичного ДВС.** Существующие в настоящее время математические методы определения скорости расходования ресурса ДВС (Н.С. Ждановского, М.А. Григорьева, И.Б. Гурвича и др.) основаны на статистических моделях изнашивания, которые не учитывают возможность функционального отказа вследствие накопления механических и термических повреждений. Отсутствуют зависимости, связывающие скорость накопления повреждений с режимами функционирования и конструктивными особенностями ДВС.

Разработана физико-статистическая математическая модель расходования ресурса первичного ДВС, основанная на подмоделях накопления повреждений А. Wöhler (ведущих к функциональному отказу) и изнашивания (ведущего к параметрическому отказу), принципах линейного суммирования повреждений и суперпозиции. Основу модели составляет система уравнений:

$$C_n = \sum_1^i \left( n_i^{2m+1} \cdot f_i \right), \quad (7)$$

$$C_{Pz} = \sum_1^i \left( P_{zi}^m \cdot n_i \cdot f_i \right), \quad (8)$$

$$C_T = \sum_1^i \left( C_{Ti}^m \cdot f_i \cdot n_i \right), \quad (9)$$

$$C_\varepsilon = \sum_1^i \left( |\varepsilon|^m \cdot f_i \cdot n_i \right), \quad (10)$$

$$C_{узн} = \sum_1^i \left( P_M \cdot f_i \cdot n_i \right), \quad (11)$$

где  $C_n$ ,  $C_{Pz}$ ,  $C_T$ ,  $C_\varepsilon$  – соответственно, условная скорость накопления повреждений под действием инерционных нагрузок, газовых сил, макротеплосмен, переменной частоты вращения,  $C_{узн}$  – условная скорость изнашивания,  $m$  – показатель, зависящий от свойств материала и характера нагрузки,  $f_i$  – частота возникновения  $i$ -го режима, определяемая статистическим анализом режимов функционирования.

Для оценки условной скорости накопления повреждений от воздействия макротеплосмен на  $i$ -ом режиме, на основе критерия тепломеханической напряженности фирмы Doxford, предложено выражение:

$$C_{Ti} = \left( \frac{G_{mi}}{G_{mi\ nom}} \right)^a \cdot \left( \frac{n_{nom}}{n_i} \cdot \left( \frac{P_{k\ nom}}{P_{ki}} \right)^{0.61} \right)^b, \quad (12)$$

где  $a$  и  $b$  – показатели степени, зависящие от рассматриваемой поверхности,  $P_k$  – давление воздуха перед органами впуска, символ «*nom*» относится к режиму, выбранному в качестве номинального.

Уровень газовых сил ( $P_z$ ) и параметры воздухообмена ( $G_m, P_k$ ) определяются с использованием математической модели рабочего цикла первичного ДВС (1).

Относительное изменение ресурса первичного ДВС при внесении изменений в режимы функционирования и характеристики ДГУ:

$$\frac{R}{R'} = \sum_1^j \left[ \frac{1}{C_j} - 1 \right] \cdot \frac{1}{C_{изн} \cdot C_{\Pi i}}, \quad (13)$$

где  $R$  – ресурс конвертированного ДВС,  $R'$  – ресурс базового ДВС до наступления функционального отказа,  $C_j$  – условная относительная скорость накопления повреждений под действием  $j$ -го фактора,  $C_{изн}$  – относительная скорость изнашивания ДВС,  $C_{\Pi i} = f(C_{изн})$  – относительная скорость изменения  $i$ -го параметра (эффективная мощность, удельный эффективный расход топлива, удельный расход масла на угар).

Погрешность расчета 90 % гамма-процентного ресурса дефорсированного в 2,5 раза по мощности и на 30 % по частоте вращения первичного дизеля 12ЧН15/18 не превышает 25 %, что является достаточным для инженерных расчетов на стадии проектирования.

Разработанная физико-статистическая математическая модель расходования ресурса первичного ДВС, в отличие от существующих, учитывает возможность функционального отказа вследствие накопления механических и термических повреждений и включает зависимости, связывающие скорость накопления повреждений с режимами функционирования и конструктивными особенностями первичного ДВС.

**Математическая модель для определения удельных выбросов ВВ с ОГ.** Для исследования химической кинетики процесса горения топлив различного фракционного состава (включая газовые) использована система уравнений Аррениуса в дифференциальной форме, решаемая численным методом с использованием баз данных по термодинамическим свойствам веществ NASA и Burcat, модель W. Pitz реакции окисления суррогатного топлива - нормального гептана ( $nC_7H_{16}$ )), включающая 159 веществ и 1544 реакции, дополненная механизмом горения метана. Для оценки кинетики образования ВВ применена модель Kilpinen-97 (450 реакций, 57 компонентов). Исходными данными для расчета являются индикаторные диаграммы, синтезированные с использованием системы уравнений (1), и начальные концентрации реагентов. Для нормирования выбросов различных видов ВВ с ОГ предложено использовать суммарный показатель токсичности:

$$P_m = \sum_1^4 \left( \frac{W_{i\ nom} - W_i'}{W_{i\ nom}} \cdot K_i \right), \quad (14)$$

где  $W_{i\text{ ном}}$  – концентрация  $i$ -го компонента отработавших газов дизеля при  $n_{\text{ном}}$ , млн<sup>-1</sup>;  $W'_i$  – концентрация  $i$ -го компонента отработавших газов дизеля при пониженной частоте вращения (по ГОСТ Р 41.96), млн<sup>-1</sup>;  $K_i$  – токсичность  $i$ -го компонента отработавших газов дизеля в соответствии с гигиеническими нормами ГН 2.1.6.1338-03.

Иерархическая структурная схема комплексной математической модели МЭК, иллюстрирующая взаимосвязь подмоделей, приведена на рис. 3. Математическая модель реализована в виде компьютерных программ. Для расчета рабочего процесса поршневого ДВС было разработано приложение «MAEngine» (свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7131 от 13.11.2006).

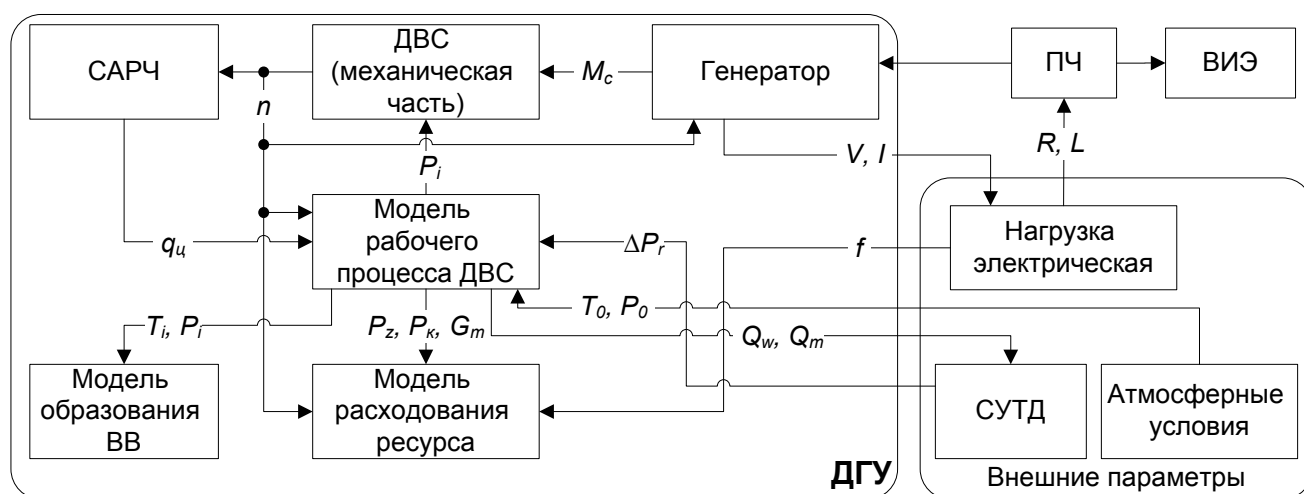


Рис. 3 – Иерархическая структурная схема математической модели МЭК

**Третья глава** посвящена развитию методов и средств экспериментальной оценки критериев эффективности МЭК.

В начале главы приведено описание метрологического обеспечения (объектов, приборов и оборудования, стандартных методик) экспериментальных исследований МЭК и его составляющих. Объектами экспериментального исследования являлись первичные поршневые двигатели типа 4ЧН15/20,5 производства ООО «ЧТЗ-Уралтрак», 4ЧН13/14, 4Ч13/14, 6Ч13/14, производства ОАО «ПО Алтайский моторный завод» и двигатель-генераторные установки на их базе, а также на базе двигателя 8ЧН13/14 ОАО «Автодизель» (ЯМЗ). Выбор объектов обусловлен их широким применением в малой энергетике.

Испытания МЭК проведены на ВЭС «Заполярная» (г. Воркута). Основой ВЭС является ВЭУ типа АВЭ-250С. ДГУ мощностью 200 кВт на базе дизеля 8ЧН13/14 и всережимного генератора, разработанного ОАО «Баранчинский электромеханический завод», вместе с преобразователем частоты «Liebert NXA» была смонтирована на шасси автомобиля КамАЗ, который устанавливался рядом с ВЭС (рис. 4).

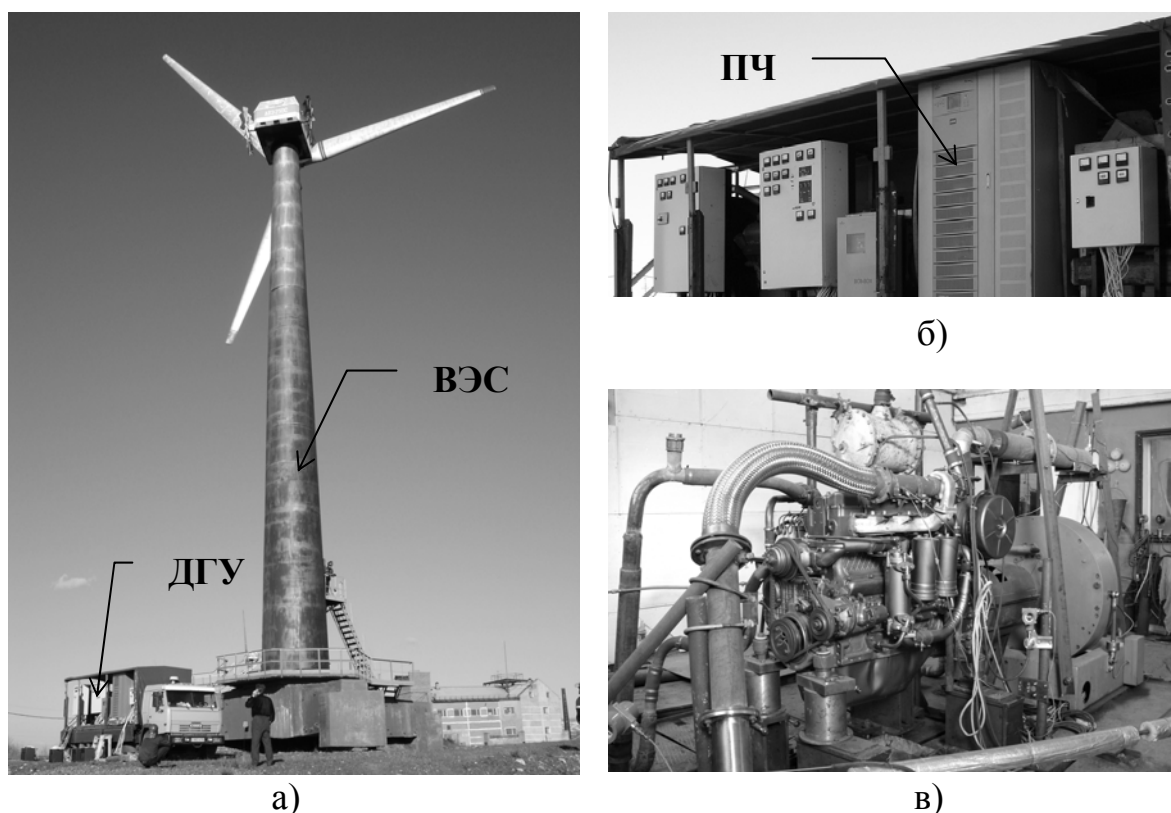


Рис. 4 – Объекты экспериментального исследования: а) МЭК на базе ВЭС «Заполярная» и дизеля 8ЧН13/14, б) система управления и ПЧ МЭК, в) первичный дизель 4ЧН13/14 на испытательном стенде

Разработаны методики, учитывающие новизну технических решений объектов исследования, оценку критериев эффективности МЭК, параметры первичного двигателя, электротехнических и других систем, включая методы и средства экспериментальных исследований:

- по переводу первичного двигателя с камерой сгорания ЦНИДИ на альтернативные жидкие виды топлива и газожидкостный рабочий цикл;
- оценки параметров ДГУ с переменной частотой вращения первичного ДВС, в том числе в составе МЭК;
- оценки параметров СУТД с разомкнутым вторичным контуром;
- определения механической нагруженности элементов трансмиссии ДГУ с повышающим редуктором.

Экспериментальные исследования по переводу первичного ДВС на жидкие альтернативные топлива выполнены на одноцилиндровом отсеке 1Ч15/20,5 со свечей накаливания (СН) в головке цилиндра.

Экспериментальные исследования по переводу первичного ДВС с камерой сгорания ЦНИДИ на газожидкостный цикл проведены на двигателе 4ЧН15/20,5, укомплектованном газоподающей аппаратурой с оригинальной системой автоматического регулирования дискретного типа (защищена Патентом РФ № 2105186 от 20.02.1998) и охладителем наддувочного воздуха.



При оценке выбросов вредных частиц с ОГ использовался гравиметрический метод (неполнопоточный минутуннель МТ-120 с изокинетическим пробоотборником и весы с точностью взвешивания  $10^{-6}$  г.).

В четвертой главе исследовано влияние режимов функционирования и конструктивных характеристик ДГУ на критерии эффективности МЭК, проведено расчетно-теоретическое и экспериментальное обоснование методов оптимизации частоты вращения ДГУ в составе МЭК по критерию минимального удельного расхода топлива МЭК.

В рабочем диапазоне генератора  $w = 0,67 \dots 1,00$  при электрический КПД, при уменьшении  $w$ , снижается на  $0,25 \dots 0,40$  %, в то время как механические потери пропорциональны кубу частоты вращения:

$$N_{\text{мех}} = 3,68 \cdot p \cdot (v_2 / 40)^3 \cdot \sqrt{l_1 \cdot 10^3}, \text{ Вт}, \quad (15)$$

где  $p$  – число полюсов;  $l_1$  – полная длина сердечника статора, мм;  $v_2$  – окружная скорость ротора, м/с.

На основании уравнения (15) получена зависимость для определения относительного изменения механического КПД «всерезимного» генератора  $\eta_{\text{ген мех}}$  на режимах постоянной ( $n = \text{const}$ ) и переменной ( $n = \text{var}$ ) частот вращения:

$$\frac{\eta_{\text{ген мех}}(n=\text{var})}{\eta_{\text{ген мех}}(n=\text{const})} = \frac{1 - \left( 1 - \frac{\eta_{\text{мех}}(n=\text{const})}{\sqrt{l_1(n=\text{var})/l_1(n=\text{const})}} \cdot \left( \frac{w_{n=\text{var}}}{w_{n=\text{const}}} \right)^3 \right)}{1 - \eta_{\text{мех}}(n=\text{const})}. \quad (16)$$

Выражение (16) учитывает необходимость увеличения длины сердечника статора для уменьшения нагрева «всерезимного» генератора из-за снижения электрического КПД.

Относительный КПД преобразователя частоты тока в рабочем диапазоне частот вращения варьируется от 0,995 (при номинальных нагрузке и частоте вращения) до 0,952 (при коэффициенте нагружения 0,2 и  $w = 0,67$  pu), соответственно КПД ПЧ:

$$\frac{\eta_{\text{пч}}(n=\text{var})}{\eta_{\text{пч}}(n=\text{const})} = 0,127 \cdot w + 0,873. \quad (17)$$

В рабочем диапазоне частот вращения ДГУ относительное изменение КПД электротехнической части МЭК при номинальном коэффициенте реактивной мощности составит (рис. 5):

$$\frac{\eta_{\text{э мэк}}(n=\text{var})}{\eta_{\text{э мэк}}(n=\text{const})} = 0,117 \cdot w + 0,898. \quad (18)$$

Расчет с использованием системы уравнений (1) и (2) показывает, что с уменьшением  $n$  индикаторный КПД первичного дизеля в рабочем диапазоне частот вращения ухудшается на 2...8 % (рис. 6), в то время как эффективный КПД растет (рис. 7). Основной «вклад» в повышение топливной экономичности первичного дизеля, при снижении частоты вращения, вносит уменьшение механических и насосных потерь.

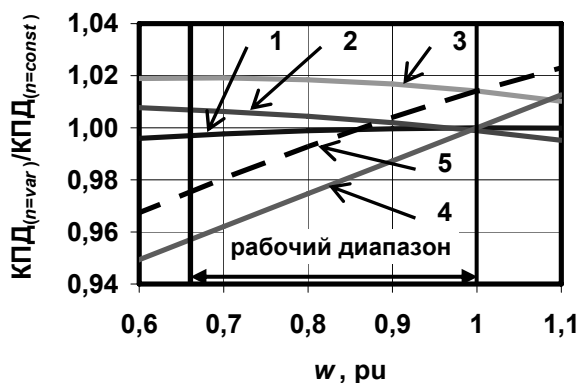


Рис. 5 – Зависимость относительного КПД электрической части МЭК от частоты вращения ДВС: 1, 2, 3 – электрический, механический и суммарный КПД генератора, соответственно, 4 – КПД ПЧ, 5 – суммарный КПД электрической части МЭК

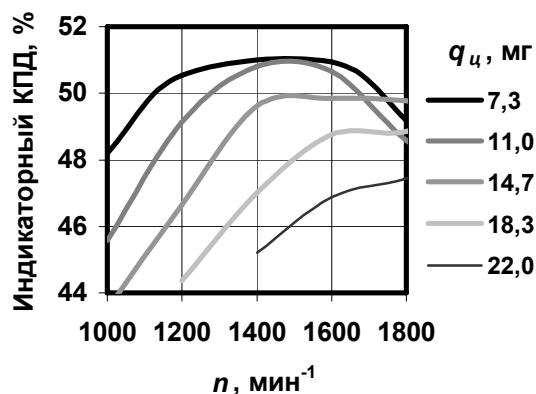


Рис. 6 – Расчетная зависимость индикаторного КПД первичного дизеля 1ЧН13/14 от частоты вращения ( $n$ ) и цикловой подачи топлива ( $q_u$ )

**Метод синтеза алгоритма оптимального управления частотой вращения ДГУ по критерию минимального удельного расхода топлива МЭК** основан на использовании традиционных математических методов поиска минимума функциональной зависимости  $g_9 = f(n, N_9)$ , найденной экспериментальным или расчетным (уравнения (1...4), (18)) путем. Например, для ДГУ на базе 8ЧН13/14 зависимость имеет вид:

$$g_9 = 414 - 0,908 \cdot N_9 - 0,226 \cdot n + 0,0114 \cdot N_9^2 - 0,00165 \cdot N_9 \cdot n + 0,000172 \cdot n^2, \quad (19)$$

где  $N_9$  – электрическая нагрузка генератора, кВт.

Линейная зависимость оптимальной частоты вращения от электрической нагрузки, полученная решением уравнения  $dg_9/dn = 0$ :

$$n = 4,8 \cdot N_9 + 660. \quad (20)$$

При условии

$$\frac{\eta_{э.мЭК}(n=const)}{\eta_{э.мЭК}(n=var)} > \frac{\eta_e(n=var)}{\eta_e(n=const)} \quad (21)$$

потери в электротехнической части МЭК превышают экономию от перевода первичного ДВС на режим  $n = var$ , в этом случае алгоритм САРЧ МЭК должен обеспечивать включение байпаса ПЧ и перевод двигателя на режим  $n = const$ . Минимально допустимая частота вращения первичного ДВС ограничена его технической характеристикой (рис. 8).

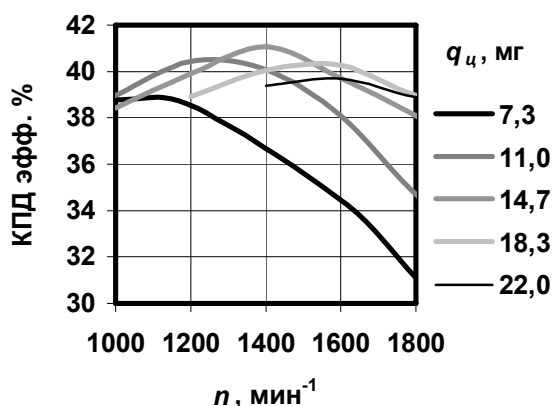


Рис. 7 – Расчетная зависимость эффективного КПД дизеля 1ЧН13/14 от частоты вращения ( $n$ ) и цикловой подачи топлива ( $q_u$ )

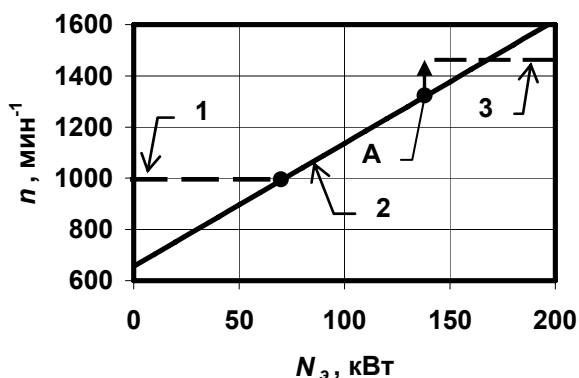


Рис. 8 – Алгоритм оптимального управления САРЧ МЭК на базе двигателя 8ЧН13/14: 1 – минимальная частота вращения, 2 – работа по оптимальной характеристике, 3 – постоянная номинальная частота вращения, А – отключение ПЧ

График *целевой функция по критерию минимального удельного расхода топлива МЭК* на базе дизеля 8ЧН13/14 в зависимости от электрической нагрузки и частоты вращения приведен на рис. 9. Зависимость потенциальной экономии топлива ( $\Delta g_{э}$ , %) от нагрузки приведена на рис. 10, ее максимальная величина, при работе МЭК на базе двигателя 8ЧН13/14 по оптимальной характеристике, может достичь 27 %. Экономия зависит от коэффициента использования установленной мощности и в типичных условиях эксплуатации (см. рис. 2) составит около 4,6 %. Испытания МЭК с САРЧ, реализующей синтезированный в ходе исследования алгоритм оптимального управления, на базе ВЭС «Заполярная» в условиях реальной эксплуатации, подтвердили результаты расчетно-теоретических исследований и лабораторных экспериментов.

**Количество потенциально утилизируемой теплоты** для ДГУ с переменной частотой вращения находится численным решением системы уравнений (1) относительно  $Q_w$  и  $Q_m$  для конкретных типов первичных ДВС:

$$Q' = \frac{Q_{n=var}^{сум}}{Q_{n=const}^{сум}} = \frac{(Q_w n=var + Q_w n=const) \cdot \frac{Q_w n=var}{Q_w n=const} + (Q_m n=var + Q_m n=const) \cdot \frac{Q_m n=var}{Q_m n=const}}{Q_w n=var + Q_w n=const + Q_m n=var + Q_m n=const} \quad (22)$$

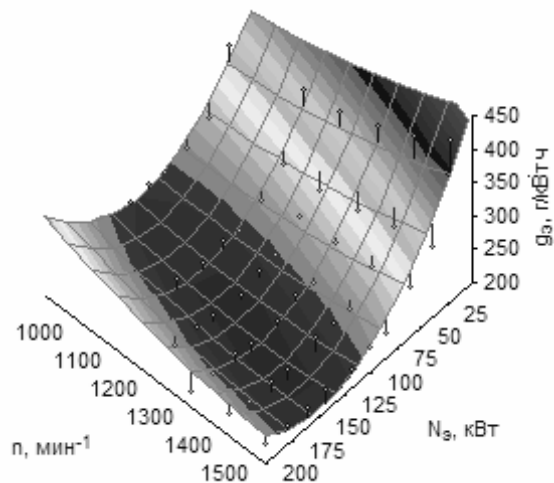


Рис. 9 – График целевой функции по критерию минимального удельного расхода топлива МЭК на базе дизеля 8ЧН13/14

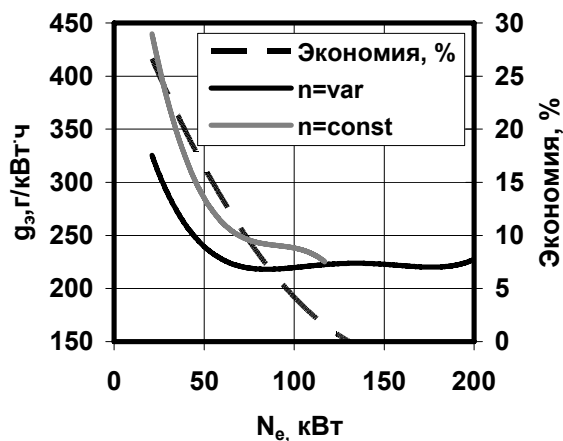


Рис. 10 – Удельный расход топлива и потенциальная экономия при работе ДГУ на базе дизеля 8ЧН13/14 по оптимальной характеристике

Теоретическая оценка влияния оптимизации скоростного режима ДГУ на потенциально утилизируемую теплоту первичного ДВС показала, что она уменьшается на 2...15 %, в зависимости от нагрузки (рис. 11), в условиях реальной эксплуатации (рис. 2) за год – на 4 % (рис. 12).

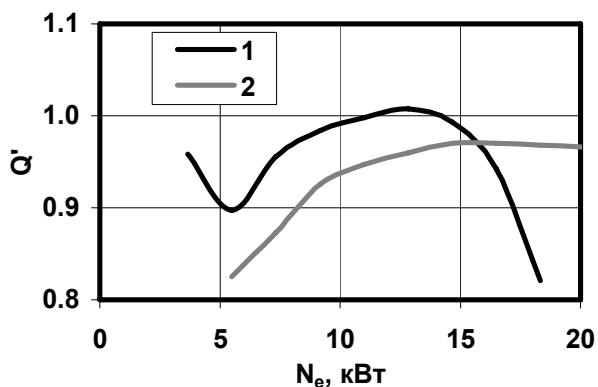


Рис. 11 – Расчетная зависимость относительного изменения потенциально утилизируемой теплоты дизеля: 1 – 1Ч13/14, 2 – 1ЧН13/14

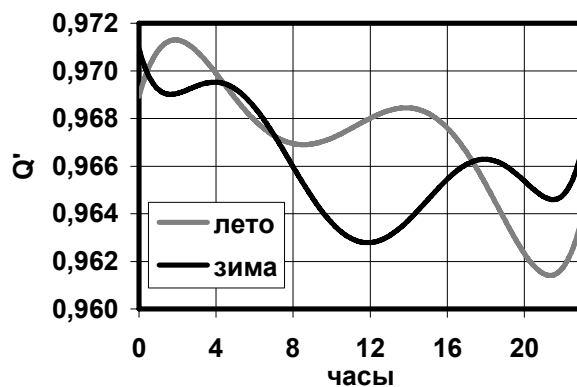


Рис. 12 – Относительное изменение потенциально утилизируемой теплоты дизеля 8ЧН13/14, работающего по графику нагрузки (рис. 2)

Проведена расчетно-теоретическая оценка влияния оптимизации скоростного режима ДГУ в составе МЭК на *ресурс первичного ДВС* с использованием типичных гистограмм распределения нагрузки и частоты вращения оптимизированного ( $n = var$ ) и базового ( $n = const$ ) вариантов ДГУ. Зависимость ресурса первичного ДВС от режимов функционирования ДГУ находится численным решением системы уравнений (1, 2, 7...12) для конкретных типов первичных ДВС (рис. 13).

Расчетом установлено, что средний ресурс первичного ДВС при переводе ДГУ на базе дизеля 12ЧН15/18 на режим  $n = var$  в условиях реальной эксплуатации (рис. 2) возрастет на 35 %.

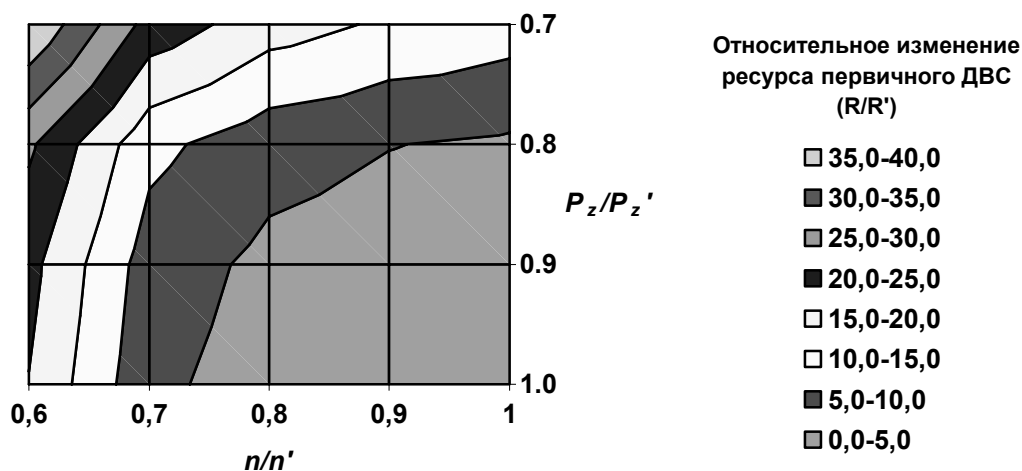


Рис. 13 – Расчетная зависимость относительного изменения ресурса первичного ДВС 12ЧН15/18 от относительного изменения газовой силы и номинальной частоты вращения

Теоретическая оценка влияния оптимизации скоростного режима ДГУ на **выбросы ВВ с ОГ первичного ДВС** проводилась с использованием кинетической модели Kilpinen-97. Определена динамика образования ВВ в КС первичного ДВС в зависимости от скорости нарастания температуры РТ ( $dT$ , К/град.ПКВ), рассчитанной с использованием системы уравнений (1), рис. 14.

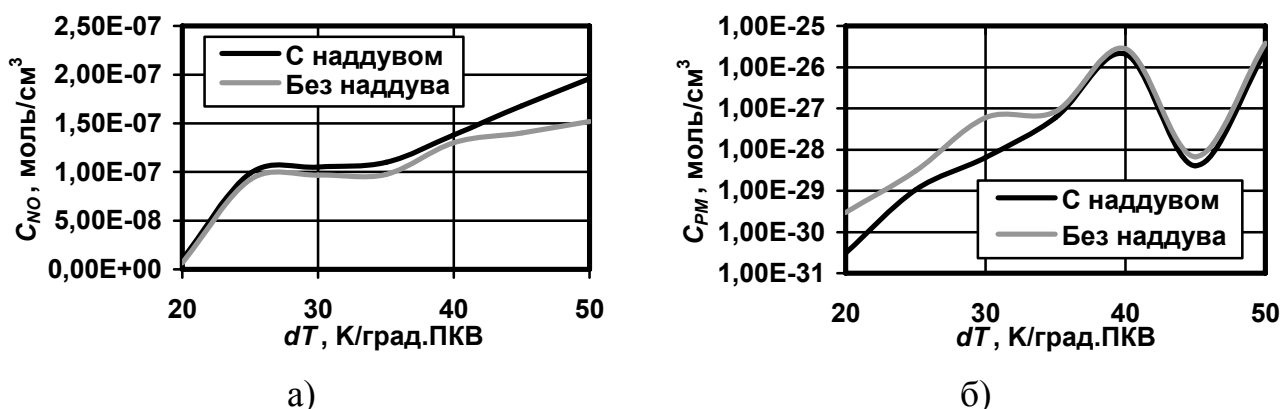


Рис. 14 – Зависимость концентрации оксида азота NO (а) и сажевых частиц РТ (б) от  $dT$  в момент открытия выпускного клапана при сгорании суррогатного топлива  $nC_7H_{16}$  (нормального гептана)

Экспериментальное исследование проведено для дизелей типа Ч13/14, ЧН13/14. Показано (рис. 14), что оптимизация частоты вращения первичных дизелей 6Ч13/14 и 4ЧН13/14 положительно сказывается на снижении выбросов ВВ с ОГ, для этих двигателей суммарный относительный показатель токсичности уменьшается (рис. 13), в том числе: выбросы CO снижаются на 10...50 %, СН – на

10...20 %, вредных частиц – в 1,5... 4 раза. Для всех исследуемых двигателей ограничивающие параметры токсичности ОГ соответствуют ГОСТ Р 41.96.

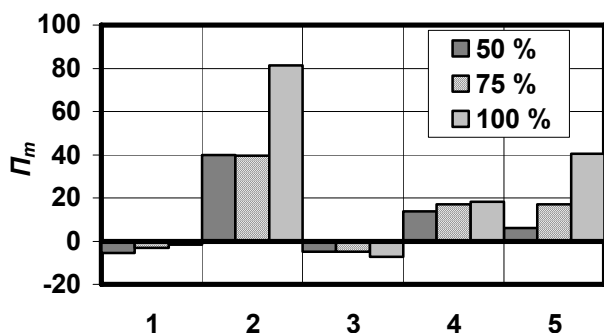


Рис. 13 – Показатель токсичности  $P_m$  при  $n = 50, 75, 100$  % от  $n_{nom}$ : 1 – 6Ч13/14, 2 – 4Ч13/14, 3 – 4ЧН13/14 (Д-3047), 4 – 4ЧН13/14 (Д-442ВСИ), 5 – 6ЧН13/14

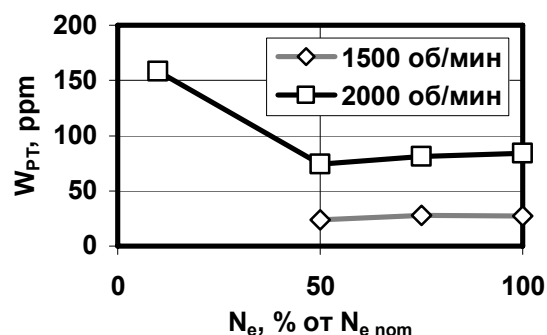


Рис. 14 – Выбросы вредных частиц с ОГ дизеля 4ЧН13/14 (Д-3047)

Испытания МЭК на базе ВЭС «Заполярная» подтвердили, что использование ПЧ обеспечивает соответствие ограничивающих параметров *качества электрической энергии* требованиям ГОСТ 13109 к сетям общего назначения. В частности, установившееся отклонение частоты тока не превышает 0,2...0,4 %, в отличие от традиционных ДЭС, для которых эта величина составляет 0,5...1,5 %.

Теоретическая и экспериментальная оценка *влияния вида топлива на критерии эффективности МЭК* проводилась на примере первичного многотопливного ДВС типа ЧН15/20,5, рабочий процесс которого, в силу особенностей геометрии камеры сгорания ЦНИДИ, отличается от других двигателей, рассмотренных в работах В.Н. Луканина, А.С. Хачияна, Ю.В. Галышева, G. Lugas и других исследователей.

В качестве наиболее общего случая рассмотрен газодизельный рабочий цикл, частными вариантами которого являются рабочий процесс на газовом топливе (запальная доза жидкого топлива  $\Delta_{dm}=0$  %) и рабочий процесс на жидком топливе ( $\Delta_{dm}=100$  %). Особенности рабочего процесса определяются величиной  $\Delta_{dm}$ . Уменьшение  $\Delta_{dm}$  ведет к увеличению индикаторного КПД (рис. 15) и росту максимального давления рабочего цикла  $P_z$ , что вызвано изменением химической кинетики горения топлива и уменьшением ПЗВ. Поэтому была выполнена расчетно-теоретическая оценка влияния доли суррогатного топлива  $nC_7H_{16}$  и температуры РТ на величину ПЗВ (рис. 16), определены концентрационные пределы воспламенения (рис. 17). Установлено, что при доле  $nC_7H_{16}$  70...100 % от суммарной подачи топлива кинетика горения имеет двустадийный характер. При доле  $nC_7H_{16}$  от 16 % до 70 % – один максимум скорости горения. При доле  $nC_7H_{16}$  менее 16 % самовоспламенения не происходит и необходимо принудительное воспламенение топливовоздушной смеси. Уменьшение доли  $nC_7H_{16}$  влечет увели-

чение ПЗВ из-за тормозящего влияния  $\text{CH}_4$  на скорость реакции окисления и, соответственно, рост тепловых и механических нагрузок на детали первичного ДВС, поэтому необходима корректировка угла опережения впрыска топлива в соответствии с рис. 16.

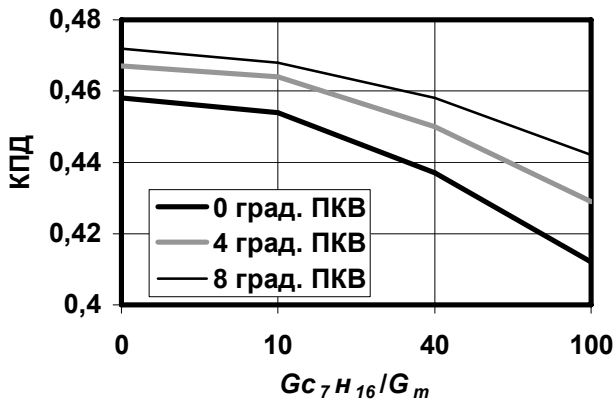


Рис. 15 – Расчетная зависимость  $\eta_i$  газодизеля 4ЧН15/20,5 от доли  $n\text{C}_7\text{H}_{16}$  и  $\varphi_{ign}$  ( $\pi_\kappa = 1,3$ ), согласно системе уравнений (1)

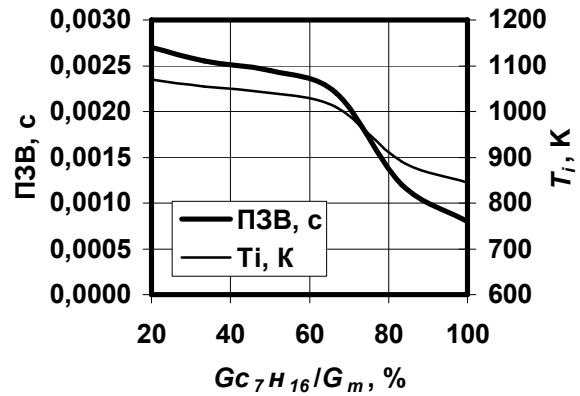


Рис. 16 – Зависимость ПЗВ от доли  $n\text{C}_7\text{H}_{16}$  и температуры РТ ( $q_u = 0,184$  г)

Согласно выражению (8), рост  $P_z$  влечет увеличение условной скорости накопления повреждений под действием газовых сил, поэтому была определена область допустимых режимов работы первичного двигателя в зависимости от среднего эффективного давления РТ в КС ( $P_e$ ) и  $\Delta_{dm}$  из условия сохранения ресурса при  $n = const$  на уровне базового дизеля (рис. 18).

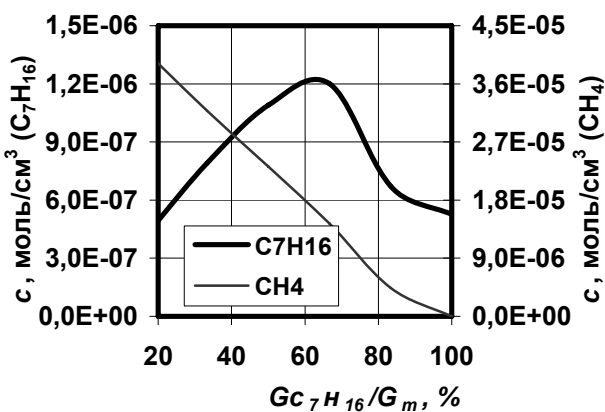


Рис. 17 – Концентрационные пределы воспламенения  $n\text{C}_7\text{H}_{16}$  и метана  $\text{CH}_4$  ( $q_u = 0,184$  г)

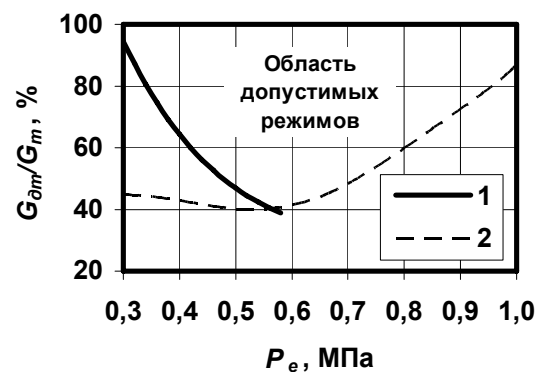


Рис. 18 – Режимы работы газодизеля 4ЧН15/20,5: 1 – температура распылителя  $t_{нф} = 180$  °С, 2 –  $P_z = 9$  МПа

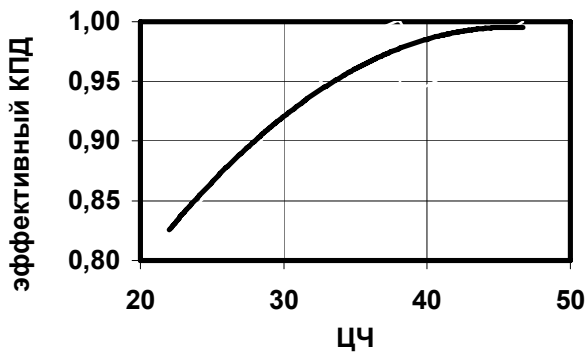


Рис. 19 – Зависимость (относительно дизельного топлива) максимального эффективного КПД первичного ДВС с КС ЦНИДИ от ЦЧ

В пятой главе предложены технические и организационные решения по повышению эффективности МЭК, реализующие разработанные методы совершенствования ДГУ в их составе на базе первичных ДВС 4ЧН15/20,5 (включая многотопливные модификации), 12ЧН15/18, В2Ч8,2/7,8, 4Ч13/14, 4ЧН13/14, 6Ч13/14, 6ЧН13/14, 4ЧН13/15, 6ЧН13/15, СУТД для двигателей 6ЧН13/14, 4ЧН15/20,5, 6ЧН25/34 (рис. 20) и внедренные в производство.

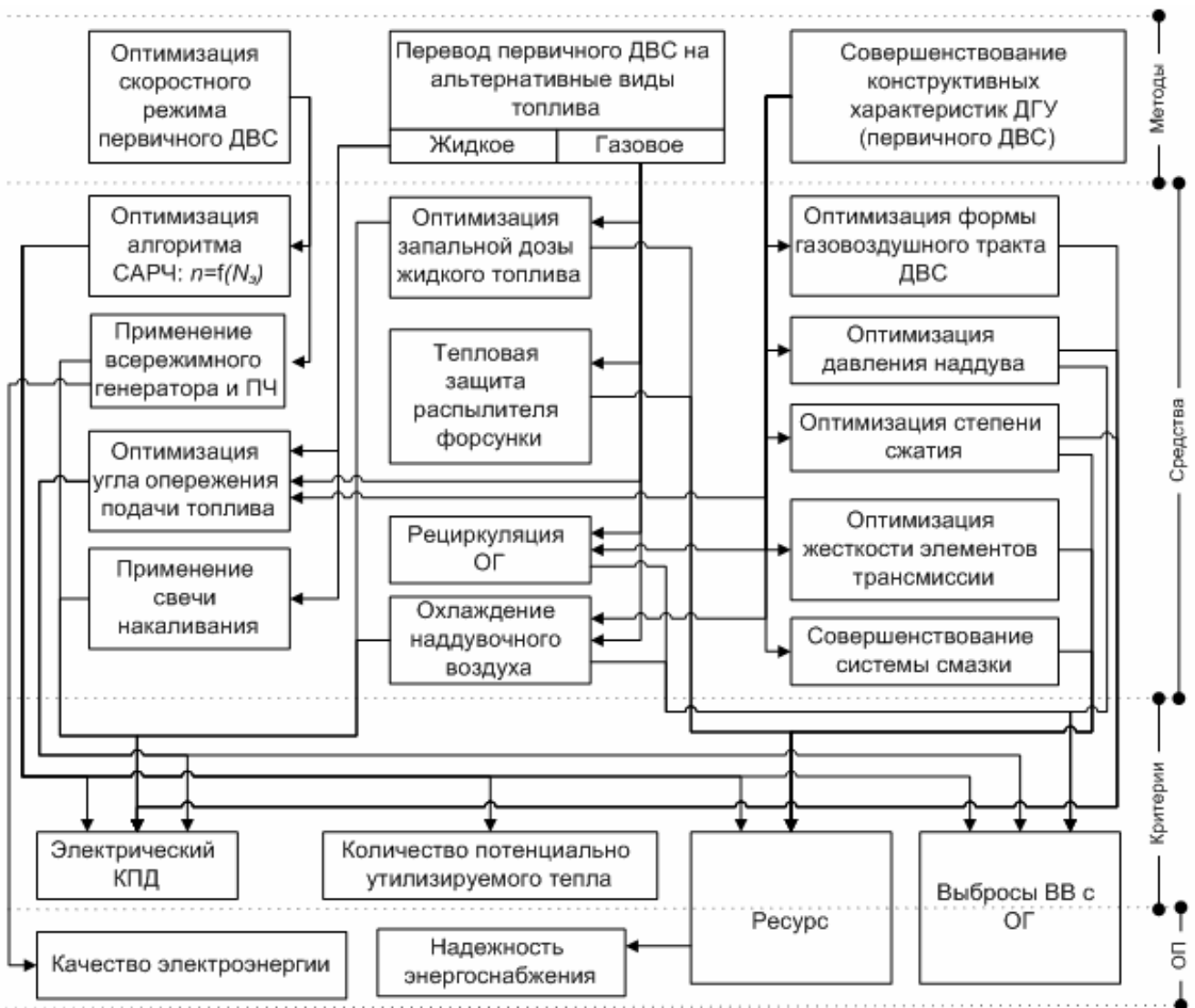


Рис. 20 – Методы и средства совершенствования характеристик и режимов функционирования ДГУ в составе МЭК и их влияние на критерии оптимальности и ограничивающие параметры (ОП) ДГУ



С использованием результатов теоретических исследований химической кинетики образования ВВ, для **снижения выбросов ВВ с ОГ** первичного дизеля 4ЧН15/20,5 с КС ЦНИДИ, предложено использование частичной рециркуляции ОГ. Определена рациональная величина перепуска – 10 % от расхода воздуха, которая позволяет снизить удельные выбросы оксидов азота на 30 % и углеводородов на 45 %. Экспериментально определены рациональные значения регулировочных (угол опережения подачи топлива, давление наддува) и конструктивных (наличие ОНВ, особенности топливной аппаратуры) параметров, обеспечивающих нормативные значения удельных выбросов ВВ с ОГ дизелей 4ЧН15/20,5, 4Ч13/14, 4ЧН13/14, 6Ч13/14, 6ЧН13/14, 4ЧН13/15, 6ЧН13/15.

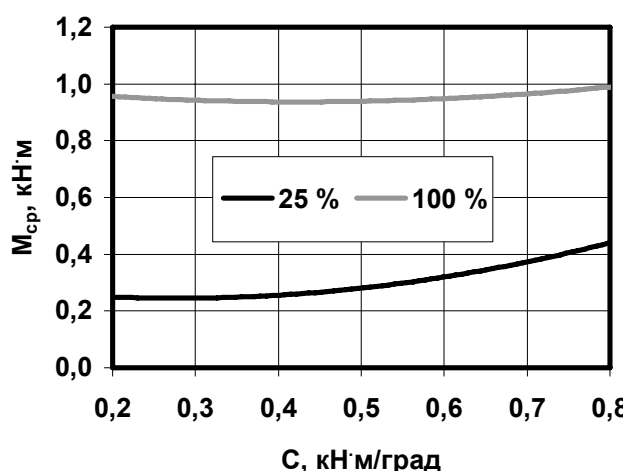


Рис. 21 – Зависимость среднего крутящего момента ( $M_{ср}$ ) на валу первичного дизеля 4ЧН15/20,5 установки ДГУ-100С при нагрузке 25 % и 100 % от номинальной от жесткости муфты

Наименьшие значения амплитуды крутящего момента ( $M_{кр}$ ) на всех режимах обеспечиваются при жесткости ( $C$ ) муфты 0,3...0,4 кН·м/град.

На основе результатов теоретической и экспериментальной оценки влияния вида топлива на характеристики рабочих процессов, обоснованы **рациональные регулировочные параметры газодизеля** первичного двигателя 4ЧН15/20,5 с камерой сгорания ЦНИДИ (рекомендуемый расход запального топлива – 5,9...7,9 кг/ч, угол начала подачи топлива – 17 град. ПКВ до ВМТ,  $\pi_k = 1,3$ ). Рекомендовано использование форсунки с тепловой защитой, разработанной В.Е. Лазаревым, которая позволяет снизить температуру распылителя на величину до 40 °С.

Обосновано **применение свечи накаливания**, как средства повышения эффективного КПД (до 1,5 %) и надежности первичного ДВС (величина  $P_z$  на бензине А-76 снижается на 5 %, скорость нарастания давления на 8 %). Определены опти-

Одной из задач при проектировании ДГУ является **выбор рационального сочетания характеристик жесткости** всех элементов, обеспечивающих стабильность частоты тока при высокой надежности, что является важным при нагрузке МЭК близкой к номинальной, когда ПЧ отключен. Динамическая нагруженность установки ДГУ-100С экспериментально исследовалась с муфтой трансмиссии жесткостью от 0,30 до 0,85 кН·м/град на типичных режимах: запуск дизеля, холостой ход, установившийся режим (рис. 21), неустановившийся режим (сброс-наброс нагрузки), пуск асинхронного двигателя.

мальные, с точки зрения топливной экономичности и тепломеханической нагруженности, регулировочные параметры топливной аппаратуры, режимы работы СН (температура штифта – 1300 К, напряжение питания – 15...18 В).

Разработана **система отраслевых стандартов «Дизельные и газопоршневые электростанции (ДЭС и ГПЭС). Нормы и требования»:**

- Условия создания;
- Условия поставки;
- Организация эксплуатации и технического обслуживания;
- Условия предоставления продукции;
- Охрана труда при эксплуатации и техническом обслуживании.

Система стандартов создана с использованием системы критериев эффективности ДЭС, охватывает все этапы их жизненного цикла и учитывает всё более широкое распространение многотопливных первичных ДВС, СУТД, гибридных энергоустановок, т.е. решений составляющих основу технической концепции МЭК. Также разработаны: **система стандартов «Ветроэлектростанции»**, которая, в части касающейся ДГУ, вобрала требования к ДЭС (ГПЭС), **методика энергетических обследований ДЭС** и ряд других нормативных документов с требованиями к условиям эксплуатации ДЭС и МЭК.

Создан профильный **подкомитет Росстандарта РФ «Многофункциональные энерготехнологические комплексы»**. Разработана **концепция развития автономных систем энергоснабжения на основе МЭК**, основные положения которой вошли в «Энергетическую стратегию России на период до 2030 года», «Программу развития ветроэнергетики ОАО РАО «ЕЭС России»», проект «Концепции технической политики в электроэнергетики России на период до 2030 года», программы развития региональных энергокомпаний. Разработаны и реализуются **пилотные проекты МЭК**.

В **шестой главе** разработана методика технико-экономического обоснования (ТЭО) МЭК, учитывающая особенности его конструкции и режимов функционирования, а также реальные режимы эксплуатации энергоустановки. Выполнена оценка уступок при оптимизации по критериям электрического КПД, ресурса, удельных выбросов ВВ с ОГ и количества потенциально утилизируемой теплоты. Для нормирования величин уступок использованы экономические показатели.

Переход на режим работы  $n = var$  позволяет снизить годовые затраты на приобретение дизельного топлива (для МЭК, работающего по графику электрической нагрузки – рис. 2) на 4,6 %, при этом недоотпуск тепловой энергии из-за изменения теплового баланса первичного ДВС составит 2,1 % от экономии топлива. Максимальное изменение годовой платы за выбросы ВВ с ОГ –  $\pm 0,1$  % от экономии топлива. Уменьшение годовой амортизации за счет повышения ресурса ДГУ в составе МЭК составит 25 % от экономии топлива. ПЧ, имеющий ресурс непрерывной работы 10 лет, если он приобретается отдельно, окупается за 2,9 года.

Утилизация теплоты первичного ДВС позволяет снизить затраты на приобретение тепловой энергии на величину 3,6 % от стоимости эксплуатации МЭК. Экономический эффект замещения дизельного топлива альтернативными видами жидкого и/или газообразного топлива зависит от местных условий, стоимости топлива, затрат на его транспортировку и подготовку, например, для центральных регионов России замещение дизельного топлива сжатым природным газом при прочих равных условиях позволит снизить эксплуатационные затраты в 2 раза. В итоге, затраты на эксплуатацию МЭК уменьшаются по сравнению с традиционной ДЭС на 9,7 % и более (в зависимости от вида топлива и ВИЭ).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

В результате диссертационного исследования, направленного на повышение эффективности многофункциональных энерготехнологических комплексов:

1. Разработана система критериев эффективности МЭК с первичным ДВС, учитывающая особенности режимов их функционирования и структуры МЭК, включающая, кроме критерия по ГОСТ Р 51749 – удельного расхода топлива, ограничивающие параметры – установленную электрическую мощность, тепловую мощность, ресурс, качество генерируемой энергии, выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов, уровень шума и вибрации.

2. На основе предложенной системы критериев эффективности МЭК обоснованы: критерий оптимальности – расход топлива, отнесенный к электрической мощности МЭК для каждого вида топлива, параметры оптимизации ДГУ (в соответствии с целевой функцией оптимизации), включающие индикаторную мощность на различных видах топлива и КПД механических потерь первичного ДВС, КПД трансмиссии ДГУ, электрический и механический КПД «всережимного» генератора, КПД преобразователя частоты тока, ограничивающие параметры – в соответствии с действующими стандартами.

3. Разработана математическая модель МЭК, отличающаяся новыми зависимостями, связывающими критерии эффективности с режимами функционирования, характеристиками и структурой ДГУ (использование различных видов топлива, работа с переменной частотой вращения, наличие преобразователя частоты и СУТД) для определения:

- относительного изменения КПД МЭК на режимах постоянной и переменной частот вращения первичного ДВС;

- расходования ресурса первичного ДВС на основе оценки скорости накопления повреждений;

- относительного изменения количества потенциально утилизируемой теплоты на режимах постоянной и переменной частот вращения первичного ДВС.

4. Разработан метод синтеза алгоритма оптимального управления скоростным режимом первичного ДВС в составе МЭК, основанный на минимизации зависимости расхода топлива, отнесенного к электрической мощности МЭК, от частоты вращения ДВС и электрической нагрузки, с учетом критериев оценки эффективности МЭК.

Реализация алгоритма позволила повысить эффективность МЭК: снизить максимальный расход топлива ДГУ на базе дизелей типа Ч13/14 и ЧН13/14 до 27 %, средний эксплуатационный расход топлива до 4,6 %, повысить средний ресурс первичного ДВС до 35 %, снизить удельные выбросы вредных веществ с отработавшими газами, в том числе наиболее опасных твердых частиц – до 4 раз. При этом в условиях реальной эксплуатации снижается потенциально утилизируемая теплота первичного ДВС до 4 %. Экспериментально доказано, что использование преобразователя частоты тока в составе МЭК обеспечивает показатели качества электрической энергии, соответствующие требованиям к сетям общего назначения, установившееся отклонение частоты тока не превышает 0,2...0,4 %, для традиционных ДЭС – 0,5...1,5 %.

5. Выполнена оценка влияния:

- переменной частоты вращения коленчатого вала первичных двигателей типа Ч13/14 и ЧН13/14 на критерии эффективности МЭК, учитывающие изменение КПД «всерезимного» генератора, преобразователя частоты тока, системы утилизации сбросового тепла первичного ДВС;

- физико-химических свойств топлива (цетанового числа, фракционного состава), регулировочных характеристик первичного двигателя 4ЧН15/20,5 (запальной дозы, угла опережения подачи топлива, давления наддува) и свечи накаливания в камере сгорания для принудительного воспламенения на топливную экономичность и тепломеханическую нагруженность при работе на альтернативных видах жидкого топлива и по газожидкостному рабочему циклу, которая позволила обосновать рациональные конструктивные и регулировочные параметры многотопливного первичного ДВС и обеспечить повышение КПД ДГУ на базе двигателя 4ЧН15/20,5, работающего по газожидкостному циклу до 3 %, на альтернативных жидких топливах – до 1,5 %.

6. Разработаны технические решения, реализующие обоснованные в ходе исследования методы совершенствования ДГУ в составе МЭК. Обоснованы рациональные регулировочные параметры газодизельной и многотопливной модификации первичного двигателя 4ЧН15/20,5 (рекомендуемый расход запального топлива – 5,9...7,9 кг/ч, угол начала подачи топлива – 17 град ПКВ, степень повышения давления компрессора – 1,3), жесткость упругой муфты трансмиссии ДГУ (0,3...0,4 кН·м/град). Экспериментально доказана эффективность использования системы автоматического регулирования, реализующей алгоритм оптимального управления скоростным режимом первичного ДВС, системы пода-

чи газа с дискретным регулированием, распылителей форсунок с тепловой защитой, свечей накаливания, системы рециркуляции отработавших газов, что позволило в совокупности снизить затраты на эксплуатацию МЭК по сравнению с традиционной ДЭС на 9,7 % и более (в зависимости от вида топлива и характеристик возобновляемого источника энергии), с учетом ограничивающих параметров системы критериев эффективности МЭК.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

#### *Монография*

1. Бондарь, В.Н. Совершенствование энергоустановок с поршневыми ДВС [Текст] / В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов**. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 199 с.

#### *Ведущие рецензируемые научные журналы и издания*

2. **Малозёмов, А. А.** Мини-ТЭЦ на базе электростанции ДГУ-100С [Текст] / А.А. Малозёмов, М.А. Казанцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. – № 9. – С. 17–18.

3. **Малозёмов, А.А.** Снижение токсичности отработавших газов дизеля Д-180 [Текст] / А.А. Малозёмов, М.А. Казанцев, А.В. Даренских // Вестник ЮУрГУ. – Серия «Машиностроение». – № 5. – Вып. 5. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – С. 50–54.

4. Лазарев, В.Е. Метод оценки интенсивности изнашивания и ресурса прецизионного сопряжения распылителя топлива в дизеле [Текст] / В.Е. Лазарев, В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов** // Двигателестроение. – 2007. – № 3. – С. 26–29.

5. Бондарь, В.Н., Снижение токсичности отработавших газов дизеля Д-180 [Текст] / В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов** // Научно-технический журнал «Транспорт Урала». – 2007. – № 4(15). – С. 115–117.

6. Лазарев, В.Е. Расчетно-экспериментальная оценка изношенности игл распылителей топлива в дизелях [Текст] / В. Е. Лазарев, В. Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов** // Двигателестроение. – 2008. – № 1. – С. 17–19.

7. Бондарь, В.Н. Совершенствование методики испытаний дизелей специального назначения в холодильной камере [Текст] / В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов**, В.Н. Белоусов // Вестник академии военных наук. – № 3 (24). – 2008. – С. 129–132.

8. Копеин, А.В. Оценка выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей на стадии проектирования [Текст] / А.В. Копеин, **А.А. Малозёмов** // Вестник академии военных наук. – № 3 (24). – 2008. – С. 106–110.

9. Бондарь, В.Н. Оценка токсичности отработавших газов дизелей одного типоразмера с использованием регрессионных зависимостей [Текст] / В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов**, А.В. Копеин, В.В. Герцев // Вестник ЮУрГУ. – № 23. – Вып. 12. – Серия «Машиностроение». – Челябинск, 2008. – С. 81–85.

10. Бондарь, В.Н. Экспериментальное определение выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей гравиметрическим методом [Текст] / В.Н. Бондарь, **А.А. Малозёмов** // Вестник ЮУрГУ. – № 23. – Вып.12. – Серия «Машиностроение». – Челябинск, 2008. – С. 94–95.

11. **Малозёмов, А.А.** Топливная экономичность многофункционального энерготехнологического комплекса с переменной частотой вращения первичного дизельного двигателя [Текст] / А.А. Малозёмов, О.А. Алешков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. – Вып. 1. – Новосибирск: ФГОУ ВПО «НГАВТ», 2009. – С. 191–192.

12. Алешков, О.А. Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе [Текст] / О.А. Алешков, **А.А. Малозёмов** // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 199–209.

13. **Малозёмов, А.А.** Расчетно-экспериментальная оценка влияния уровня дефорсирования на ресурс дизеля типа В-2 [Текст] / А.А. Малозёмов, А.С. Шикин // Вестник ЮУрГУ. – № 33. – Вып.14. – Серия «Машиностроение». – Челябинск, 2009 – С. 51–56.

14. **Малозёмов, А.А.** Теоретические основы оптимизации режимов функционирования двигатель-генераторных установок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов [Текст] / А.А. Малозёмов // Вестник академии военных наук. – № 1 (30). – 2010. – С. 100–109.

15. Романов, В.А. Аппроксимационные уравнения для расчета индикаторных и эффективных показателей дизеля [Текст] / В.А. Романов, А.В. Тананыкин, **А.А. Малозёмов**, В.С. Кукис // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. – Вып. 2. – Новосибирск: ФГОУ ВПО «НГАВТ», 2009. – С. 223–225.

#### *Патенты*

16. Пат. 2137937 Российская Федерация, МПК7 F02D19/02, F02M21/02. Способ подачи и дозирования топлива в газодизеле и устройство для подачи и дозирования топлива [Текст] / К.П. Седелев, Е.А. Лазарев, А.Н. Лаврик, Г.П. Мицын, И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов**; заявитель и патентообладатель Челябинский государственный технический университет. – № 98103970/06; заявл. 03.03.98 ; опубл. 20.09.99. – 2 с.

17. Пат. 2301899 Российская Федерация, МПК7 F02B37/12. Способ и устройство управления газообменом в дизеле с газотурбинным наддувом [Текст] / Е.А. Лазарев, **А.А. Малозёмов**, В.Н. Бондарь, М.А. Казанцев, В.Е. Лазарев; заявитель и патентообладатель ООО «Федеральный учебный межвузовский научный производственный центр». – № 2006100153/06; заявл. 10.01.06 ; опубл. 27.06.2007. – 8 с.

#### *Региональные издания*

18. **Малозёмов, А.А.** Индукционный период в дизеле с воспламенением от свечи накаливания [Текст] / А.А. Малозёмов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1994. – Т. 8. – С. 66–72.

19. **Малозёмов, А.А.** Дополнительный критерий воспламенения топливовоздушной смеси в цилиндре дизеля свечей накаливания [Текст] / А.А. Малозёмов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1994. – Т. 8. – С. 72–73.

20. **Малозёмов, А.А.** Результаты экспериментальных исследований влияния режима работы многотопливного дизеля со свечей накаливания на величину периода задержки воспламенения [Текст] / А.А. Малозёмов, А.Н. Лаврик, Г.П. Мицын // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1995. – Т. 11. – С. 68–73.

21. **Малозёмов, А.А.** Расчет периода задержки воспламенения для многотопливного дизеля с воспламенением от свечи накаливания [Текст] / А.А. Малозёмов, А.Н. Лаврик, И.Я. Редько // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1995. – Т. 12. – С. 37–42.

22. Лаврик, А.Н. Определение режимов работы свечи накаливания в камере сгорания многотопливного дизеля [Текст] / А.Н. Лаврик, И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов**, Н.В. Анфилогов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1995. – Т. 16. – С. 84–87.

23. Лаврик, А.Н. Экспериментальное исследование тепловой нагруженности поршня и распылителя форсунки газодизельной модификации двигателя Д-160 [Текст] / А.Н. Лаврик, Е.А. Лазарев, **А.А. Малозёмов**, В.Е. Лазарев // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1997. – Т. 22. – С. 27–31.

24. Седелев, К.П. Влияние регулировочных параметров топливной аппаратуры на механическую и тепловую нагруженность газодизеля [Текст] / К.П. Седелев, **А.А. Малозёмов**, А.Н. Лаврик, Е.А. Лазарев, И.Я. Редько // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1998. – Т. 25. – С. 25–29.

25. Седелев, К.П. Особенности рабочего цикла и процесса сгорания топлива в газодизеле [Текст] / К.П. Седелев, **А.А. Малозёмов**, А.Н. Лаврик, Е.А. Лазарев // Вестник Российской академии транспорта. Уральское межрегиональное отделение. – Вып.2. – Курган, 1999. – С. 55–59.

26. Ливинский, А.П. Проблемы и перспективы использования газового топлива для передвижных электростанций (электроагрегатов) на базе поршневых двигателей [Текст] / А.П. Ливинский, В.Н. Луканин, **А.А. Малозёмов**, И.Я. Редько // «Техника и технология строительства и эксплуатации автомобильных дорог». Сб. научн. тр. – М.: МАДИ (ТУ); УФ МАДИ (ТУ), 2000. – С. 24–39.

27. **Малозёмов, А.А.** Результаты экспериментальных работ по переводу двигателя Д-160 (Д 180) на газовое топливо [Текст] / А.А. Малозёмов // «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». Научный вестник. – Челябинск: ЧВАИ, 2001. – Вып. 12. – С. 87–91.

28. **Малозёмов, А.А.** Оптимизация теплового баланса системы смазки дизеля Д 180 (Д-160) [Текст] / А.А. Малозёмов // «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». Научный вестник. – Челябинск : ЧВАИ, 2001. – Вып. 12. – С. 143–148.

29. Редько, И.Я. Разработка газовой модификации двигателя Д 180 с искровым воспламенением для привода ДГУ-100С [Текст] / И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов**, М.А. Казанцев // «Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог». Сб. науч. тр. – М.: МАДИ (ГТУ) Уральский филиал, 2001. – С. 156–160.

30. **Малозёмов, А.А.** Прогнозирование экологических параметров дизеля на стадии проектирования [Текст]. / А.А. Малозёмов // «Инженерная защита окружающей среды в транспортно-дорожном комплексе». Сб. науч. тр. – М.: МАДИ (ГТУ) Уральский филиал, 2002. – С. 201–207.

31. Быстров, О.И. Метод оптимизации формы впускного тракта головки цилиндра мини-дизеля ЧТЗ [Текст] / О.И. Быстров, **А.А. Малозёмов**, М. А. Казанцев // «Научный вестник. Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». – Вып. 17. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2004. – С. 18–26.

32. Ильковский, К.К. Дизельные электроагрегаты – база малой энергетики [Текст] / К.К. Ильковский, И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов** // Науч. –техн. журнал «Малая энергетика». – 2004. – № 1. – С. 15–24.

33. Редько, И.Я. Состояние, проблемы и перспективы применения средств малой энергетики на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания для нефтедобывающей отрасли [Текст] / И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов**, М.А. Казанцев // Науч. –техн. журнал «Малая энергетика». – 2006. – № 1–2.. – С. 92–98.

34. **Малозёмов, А.А.** Математическая модель и программа для расчета основных параметров электроагрегата с приводом от поршневого двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А.А. Малозёмов // Оптимизация режимов работы электротехнических систем» Межвузовский сб. науч. тр. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 110–117.

35. **Малозёмов, А.А.** Математическое моделирование химической кинетики образования токсичных веществ в дизеле [Текст] / А.А. Малозёмов // Научный вестник «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». – Вып. 18. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. – С. 3–8.

36. **Малозёмов, А.А.** Математическая модель двигателя на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов [Текст] / А.А. Малозёмов // Научный вестник «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». – Вып. 18. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. – С. 8–15.

37. **Малозёмов, А.А.** Расчет рабочего цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания методом энергетического и массового баланса рабочего тела «MAEngine» [Текст] / А.А. Малозёмов // Компьютерные учебные программы и инновации. – М., 2006. – № 10. –32 с.

38. Кукис, В.С. Оценка энергетической эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в автономных многофункциональных энергетических комплексах [Текст] / В.С. Кукис, **А.А. Малозёмов**, О.А. Алешков // Известия международной академии аграрного образования. – Вып. № 7 (2008). – Т. 1. – «Информационные технологии в эксплуатации МТП АПК». – СПб.: Изд-во СПбГАУ, 2008. – С. 126–129.

39. Кукис, В.С. Расчетная оценка пределов форсирования дизелей с учетом требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами [Текст] / В.С. Кукис, **А.А. Малозёмов**, А.В. Копеин // Известия международной академии аграрного образования. – Вып. № 7 (2008). – Т. 1. – «Информационные технологии в эксплуатации МТП АПК». – СПб.: Изд-во СПбГАУ, 2008. – С. 126–129.

40. Редько, И.Я. Система стандартов организации «Дизельные и газопоршневые электростанции» [Текст] / И.Я. Редько, **А.А. Малозёмов** // «Академия энергетики». – 2009. – № 4 (30). – С. 36–41.



41. **Малозёмов, А.А.** Точность численных методов Рунге-Кутта с фиксированным шагом, применяемых для решения систем дифференциальных уравнений массового и энергетического баланса рабочего тела в камере сгорания дизеля [Текст] / А.А. Малозёмов // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин многоцелевого назначения: Науч. вестник. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2010. – С. 116–121.

42. **Малозёмов, А.А.** Повышение топливной экономичности подъемно-транспортных машин оптимизацией скоростного режима двигатель-генератора [Текст] / А.А. Малозёмов, В.С. Соболев // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин многоцелевого назначения: науч. вестник. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2010. – С. 122–127.

*Материалы международных, всероссийских и региональных конференций*

43. Седелев, К.П. Особенности рабочего цикла, учитываемые при конвертации тракторного дизеля в газодизель для ДГУ [Текст] / К.П. Седелев, **А.А. Малозёмов**, В.Н. Бондарь, А.Н. Лаврик, Г.П. Мицын, И.Я. Редько // «Двигатель-97». Материалы международной науч.-техн. конф. – М.: МГТУ, 1997. – С. 36 – 37.

44. Лазарев, В.Е. Распылитель топливоподающей форсунки с тепловой защитой для дизеля использующего альтернативные топлива [Текст] / В.Е. Лазарев, А.Н. Лаврик, Г.П. Мицын, В.И. Кавьяров, **А.А. Малозёмов**, В.Н. Бондарь // «Двигатель-97». Материалы международной науч.-техн. конф. – М.: МГТУ, 1997. – С. 97–98.

45. Седелев, К.П. Некоторые особенности рабочего цикла газодизеля [Текст] / К.П. Седелев, Е.А. Лазарев, А.Н. Лаврик, **А.А. Малозёмов**, И.Я. Редько // «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». Материалы международной науч.-техн. конф. – Челябинск: ЧВАИ, 1999. – С. 26–30.

46. Седелев, К.П. Совершенствование параметров рабочего цикла газодизеля с использованием математического моделирования [Текст] / К.П. Седелев, Е.А. Лазарев, А.Н. Лаврик, **А.А. Малозёмов**, И.Я. Редько // «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин». Материалы международной. науч. –техн. конф. – Челябинск: ЧВАИ, 1999. – С. 31–32.

47. **Малозёмов, А.А.** Разработка газодизельной и газовой, с искровым воспламенением, модификации тракторного двигателя Д-180 [Текст] / А.А. Малозёмов // «Тракторостроение – XXI век». Материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов, посвященной 75-летию НАТИ / – М.: НАТИ, 2001. – С. 42–44.

48. **Малозёмов, А.А.** Разработка мини-ТЭЦ на базе дизель-генераторной установки ДГУ-100С [Текст] / А.А. Малозёмов, С.К. Рахимов // «Научные исследования и опыт работы кафедр – основа образовательной деятельности института». Материалы межвузовской науч.-методич. конф. – Челябинск: ЧВАИ, 2001. – С. 106–110.

49. Лазарев, В.Е. Тепловая защита распылителей топливopодающих форсунок транспортных дизелей при использовании альтернативных топлив [Текст] / В.Е. Лазарев, А.Н. Лаврик, Г.П. Мицын, Е.А. Лазарев, **А.А. Малозёмов** // Тезисы докладов отчетной конференции-выставки подпрограммы 205 «Транспорт» Научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». – М.–Звенигород: МАИ-ТУ, 2002. – С. 268–270.

50. **Малозёмов, А. А.** Экспериментальная оценка и оптимизация динамической нагруженности трансмиссии двигатель-генератора на различных режимах [Текст] / А. А. Малозёмов, С. И. Черепанов // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. – Челябинск : ЧВВАКИУ, 2008. – С. 49–60.

51. **Малозёмов, А. А.** Повышение топливной экономичности первичного дизеля энергоустановки оптимизацией скоростного режима [Текст] / А. А. Малозёмов, А. В. Копеин, О. А. Алешков // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. – Челябинск : ЧВВАКИУ, 2008. – С. 60–65.

52. **Малозёмов, А. А.** Математическая модель для расчета параметров рабочего процесса дизеля и химической кинетики образования токсичных веществ [Текст] / А. А. Малозёмов, В.Н. Бондарь, А.В. Шавлов, А.А. Селедкин // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2010. –С. 89–92.

*Свидетельства о регистрации программ*

53. Свидетельство о гос. регистрации программного продукта № 50200601917. Расчет рабочего цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания методом энергетического и массового баланса рабочего тела «MAEngine» [Текст]. / **А.А. Малозёмов** ; заявитель ЗАО ФУМНПЦ, – М.: ВНИИЦ, 2006. – 1 с.