

ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А. Марков

markov58@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью улучшения мощностных и динамических показателей теплоэнергетических установок, показателей их топливной экономичности и токсичности отработавших газов. Неотъемлемой частью таких установок являются системы автоматического управления и регулирования, обеспечивающие согласование характеристик элементов и систем комбинированных теплоэнергетических установок в широком диапазоне их эксплуатационных режимов. Наиболее важными критериями при таком согласовании работы элементов и систем являются показатели, характеризующие токсичность отработавших газов. В настоящее время широко применяются теплоэнергетические установки, выполненные на базе поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания. Проанализированы основные направления совершенствования теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания и их систем автоматического управления и регулирования. К этим направлениям относятся расширение функциональных возможностей указанных систем, включая управление системами очистки отработавших газов, адаптация теплоэнергетических установок к работе на альтернативных топливах, улучшение качества процессов управления и регулирования, минимизация доли неустановившихся режимов работы теплоэнергетических установок. Выполнена оценка современного уровня развития систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. Исследованы рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания и их систем. Рассмотрены наиболее важные систе-

Ключевые слова

Теплоэнергетическая установка, двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, бензиновый двигатель, система автоматического управления, система автоматического регулирования

мы комбинированных теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания, такие как системы топливоподачи, воздухообеспечения, газораспределения, охлаждения, смазки, очистки и рециркуляции отработавших газов. Отмечена также необходимость комплексной оптимизации параметров двигателя и его основных систем

Поступила 27.05.2022

Принята 11.06.2022

© Автор(ы), 2023

Статья подготовлена по материалам докладов ВНТК имени профессора В.И. Крутова (26.01.2022)

Введение. Непременным условием достижения наилучших показателей теплоэнергетических установок различного назначения является автоматизация их работы [1, 2]. Автоматизация проводится в следующих основных направлениях: автоматический контроль за работой установки, автоматический пуск и остановка, защита от аварийных режимов, автоматическое регулирование и управление параметрами установки. Наиболее совершенными и многофункциональными средствами автоматизации являются системы автоматического регулирования (САР) и системы автоматического управления (САУ) [3, 4]. В качестве регулируемых параметров различных теплоэнергетических установок следует выделить, например, частоту вращения вала двигателя, температуру охлаждающей жидкости и смазывающего масла — в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [5–8]. В теплоэнергетических установках других типов, кроме названных регулируемых параметров, следует отметить следующие: температуру рабочего тела в теплообменниках, давление рабочего тела в газовых ресиверах и трубопроводах, уровень в емкостях с жидкостями. Наиболее широко распространены системы поддержания постоянства этих регулируемых параметров — так называемые системы их стабилизации. При этом ~ 80 % энергии, создаваемой тепловыми двигателями, производится поршневыми и комбинированными ДВС. Остальные 20 % вырабатываются газовыми и паровыми турбинами, паровыми машинами [9].

При оптимизации значений указанных регулируемых параметров теплоэнергетических установок основными критериями являются мощностные показатели установок, показатели их топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ), показатели динамики процессов управления и регулирования САУ и САР. При этом требования к токсичности ОГ становятся приоритетными [10–12]. Удовлетворение жестких требований к названным показателям достигается как совершенствованием рабочего процесса ДВС и его систем — газотурбинного наддува, топливоподачи, газораспределения, охлаждения, так и установкой в вы-

пусковой системе двигателя различных средств очистки ОГ от токсичных компонентов [13–15].

Широкое применение теплоэнергетических установок с ДВС в самых различных областях — на автомобильном и железнодорожном транспорте, в сельскохозяйственных, строительно-дорожных и лесопромышленных машинах, в судостроении, авиации, стационарных энергетических установках обусловлено их высокой топливной экономичностью, приемлемыми массогабаритными показателями, простотой обслуживания, способностью работать на различных топливах [13, 14].

В связи с ужесточением требований к показателям токсичности ОГ и перспективой перехода к безуглеродной или малоуглеродной энергетике актуальным направлением совершенствования теплоэнергетических установок с ДВС является их адаптация к работе на различных альтернативных видах топлива [16–19]. Замещение топлив, производимых из нефти (реактивного и дизельного, бензина, керосина), альтернативными топливами позволяет заметно улучшить показатели токсичности ОГ. Приведенные далее результаты выполненных исследований отражают современное состояние и перспективы развития САУ и САР теплоэнергетических установок различного назначения.

Методы исследования систем автоматического регулирования и управления. Приведенные исследования выполнены с использованием теоретических и экспериментальных методов. К основным теоретическим методам относятся использование фундаментальных уравнений термодинамики, теплофизики, гидро- и газодинамики, теории рабочих процессов ДВС, теории автоматического регулирования и управления [1, 20, 21]. Кроме того, применялись методы оптимизации параметров теплоэнергетических установок, использовались современные численные методы решения дифференциальных уравнений и современные программные комплексы (ПК) для расчета рабочего процесса ДВС. Среди методов теории автоматического регулирования и управления следует выделить методы построения переходных процессов в САР и САУ и частотных характеристик [21, 22]. К методам оптимизации структуры и параметров САР и САУ в первую очередь следует отнести методы многокритериальной оптимизации. К ним относятся метод, основанный на использовании обобщенного критерия оптимальности (метод свертки), методы последовательных уступок и нахождения множества неулучшаемых точек [23, 24].

Экспериментальные методы исследований включали в себя исследования двигателя и его отдельных систем на безмоторных установках и моторных стендах. Среди безмоторных установок следует выделить стенды

для испытаний топливной аппаратуры, систем управления и регулирования. Моторные испытания проведены на одноцилиндровых установках и развернутых двигателях. Экспериментальные исследования позволяют оценить адекватность разрабатываемых математических моделей и достоверность полученных расчетных результатов. В ряде случаев использование экспериментальных подходов позволяет значительно сократить временные и материальные затраты при проведении исследовательских работ.

Основное содержание выполненных исследований. Во вступительном слове председательствующий профессор А.Г. Кузнецов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отметил значительную роль основателя ВНТК по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок профессора В.И. Крутова в фундаментальных исследованиях этого направления. В 1970 г. на кафедре «Теоретические основы теплотехники» (ныне «Теплофизика») МВТУ им. Н.Э. Баумана по инициативе В.И. Крутова был организован Научно-технический семинар, на котором заслушивались аспирантские доклады. Позже рамки этого семинара расширились — на нем представлялись не только аспирантские работы, но и результаты исследований ведущих ученых и работников промышленных предприятий страны. Этот семинар получил статус Всесоюзного. Уже после кончины Виталия Ивановича семинар был переименован во Всероссийскую научно-техническую конференцию имени профессора В.И. Крутова. В январе 2022 г. прошло 97-е заседание ВНТК, на котором было заслушано 32 доклада представителей организаций из Москвы, Санкт-Петербурга, Ярославля, Челябинска, Екатеринбурга, Самары, Саратова, Вологды, Тамбова. Семинар (конференция), организованный В.И. Крутовым, ежегодно проводит свои заседания уже более 50 лет.

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Каменских С.А., Сапронов Д.П. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели особенности использования алгоритмов нейронных сетей в работе стенда полунатурного моделирования САУ двигателей. Отмечено, что нейронные сети эффективны не только при разработке блока управления САУ, но и в моделях для стенда полунатурного моделирования. Особенно важны подобные алгоритмы в комплексных САУ с большим числом регулирующих воздействий. Исследования проводились на специализированном стенде производства National Instruments (США). В модели дизеля типа Д-500 (12 ЧН 26,5/31) ранее использовались полиномиальные зависимости. При моделировании САУ их применение достаточно эффективно, но требуется серьезная подготовка перед внедрением в математическую модель. Нейронные сети позволяют упростить подбор зависимости. Обучение проходит в автоматическом режиме, по-

этому после подготовки исходных данных появляется возможность проведения вычислений на компьютере. При работе в замкнутом варианте (HiL, Hardware-in-Loop) осуществляется моделирование работы двигателя с использованием реального блока управления. Изначально в блоке управления был заложен ПИД-закон для определения продолжительности впрыска топлива. В настоящее время этот алгоритм заменен нейронной сетью, обученной на примерах переходных процессов изменения частоты вращения вала двигателя. Входной массив данных для нейронной сети содержит несколько значений частоты вращения с дискретизацией по времени. На выходе нейронной сети формируется значение продолжительности управляющего импульса. Полученные результаты показывают высокую точность регулирования частоты вращения при использовании нейросетевых алгоритмов.

Хрящёв Ю.Е., Бойков Д.В., Перепелин А.П. (ЯГТУ, ПАО «Автодизель», г. Ярославль) рассмотрели особенности корректировки внешней скоростной характеристики (ВСХ) многотопливных дизелей с аккумуляторной системой топливоподачи. Отмечено, что ограничение максимальной подачи топлива и максимального крутящего момента дизеля на режимах ВСХ позволяет избежать нежелательного увеличения тепловой и механической перегрузок. Причины, вызывающие различия в форме ВСХ, заключаются в изменении свойств топлива и давления наддувочного воздуха. При изменении этих факторов необходимо корректировать ВСХ. Некоторые особенности корректировки ВСХ имеют дизели, оснащенные аккумуляторной системой топливоподачи типа Common Rail. В дизелях с такой системой регулирование цикловой подачи топлива осуществляется изменением продолжительности открытия электроуправляемой форсунки (массовое дозирование), а в разделенных системах — объемным дозированием подачи в топливном насосе высокого давления (ТНВД). Отмечено, что при переходе на облегченное топливо (в частности, на керосин) с меньшими плотностью и вязкостью и большей сжимаемостью изменение мощностных показателей дизелей с аккумуляторной системой менее значительно по сравнению с дизелями с разделенными системами топливоподачи. Так, при массовом дозировании топлива (система топливоподачи типа Common Rail) и переводе многотопливного дизеля автомобильного типа с дизельного на резервное топливо, имеющего при температуре 20 °С плотность 770 кг/м³ и вязкость 0,95 мм²/с, снижение номинальной мощности и максимального крутящего момента составило 2,1 и 2,2 %. При объемном дозировании топлива (система с ТНВД) эти значения составили 9,1 и 18,2 %. Разработана блок-схема алгоритма коррекции подачи топлива.

Душкин П.В., Евдонин Е.С., Кузьмин А.И., Ховренко С.С., Кремнев В.В. (МАДИ, ФГУП «НАМИ», ETAS GmbH, Германия) предложили методику автоматизации стендовых испытаний ДВС для калибровки системы управления. В этой методике калибруемыми параметрами являются частота вращения и нагрузка двигателя, параметры окружающей среды, угол опережения зажигания (УОЗ) или угол опережения впрыскивания топлива, давление впрыскивания топлива, рециркуляция ОГ, давление наддува, фазы газораспределения. В новейших моделях САУ автомобильных двигателей число калибруемых значений указанных параметров уже превысило 50 000. Калибровка этих параметров проводится из условия обеспечения требуемых показателей токсичности ОГ, выброса CO_2 и расхода топлива. Цель работы — отработка методики ускоренных калибровочных испытаний. При этом решались следующие задачи: подготовка стендового оборудования для обеспечения надежной работы установки, подготовка оборудования системы сбора данных, разработка методики автоматизированного сбора данных для построения эмпирической модели ДВС, построение эмпирической модели, проведение оптимизационных расчетов. Получаемые по методике данные позволяют построить достоверную эмпирическую модель, описывающую зависимость основных показателей работы двигателя от УОЗ. Эта модель позволяет оптимизировать управляющие воздействия с учетом необходимых ограничений. Апробация методики подтвердила ее эффективность. Для решения задачи поиска оптимальных значений УОЗ в ручном режиме требуется порядка 48 с на одну режимную точку, а при автоматизации испытаний это время сокращается до 10 с.

Душкин П.В., Медин Ф.А., Кузьмин А.И., Евдонин Е.С. (МАДИ, ФГУП «НАМИ», ETAS GmbH, Германия) подготовили лабораторные работы для дисциплины «Управление техническими системами». Задачами этих работ являлись изучение линейных звеньев и динамических систем, особенностей использования в них обратных связей, исследование устойчивости и качества процесса регулирования. Тема первой лабораторной работы — «Обратная связь. Регулятор частоты вращения для автоматизации испытаний», второй — «Исследование устойчивости динамической системы. Настройка ПИД-регулятора. Определение передаточных функций реальных звеньев». Представлены первые наработки по подготовке новых лабораторных работ в моторном боксе. Особенность подготовленного для этого оборудования заключается в том, что система управления моторным стендом и система управления ДВС, разработанные в ФГУП «НАМИ», позволяют реализовывать различные за-

дачи, связанные с алгоритмами управления. Во второй работе рассмотрена калибровка коэффициентов ПИД-регулятора системы управления тормозной машиной, работающей в режиме поддержания заданной частоты вращения. Достоинствами подготовленной лабораторной установки являются: возможность быстрой смены алгоритмов управления, использование оборудования и программного обеспечения, применяемых при разработке серийных электронных блоков управления. Наличие датчиков режимных параметров дает возможность быстрого переоборудования стенда для проведения лабораторных работ по теории рабочего процесса, а также возможность проведения лабораторных работ дистанционно.

Дунин А.Ю., Голубков Л.Н., Нгуен Т.К., Нгуен В.З., Калинина С.М. (МАДИ) провели оценку возможностей совершенствования рабочего процесса дизеля при повышении давления впрыскивания до 300 МПа. Приведены результаты экспериментального и расчетного исследований влияния давления впрыскивания на показатели рабочего цикла дизеля типа 1 ЧН 12/13. Анализ полученных данных подтверждает возможность снижения выбросов токсичных компонентов ОГ до уровня требований норм Euro-6 и Tier-4. Сделан вывод о том, что увеличение давления впрыскивания до 300 МПа в сочетании с повышением давления наддува до 0,35 МПа является эффективным средством снижения содержания дисперсных частиц в ОГ. Проведено моделирование рабочего процесса исследуемого дизеля при изменении отношения диаметра камеры сгорания (КС) в поршне к ее глубине от 3,4 до 10 при неизменной степени сжатия 15,4. Это соответствовало изменению диаметра КС от 67 до 100 мм. С ростом указанного отношения сокращается задержка воспламенения (из-за увеличения доли объемного смесеобразования) и увеличивается количество теплоты, отводимой в стенки КС. С повышением давления наддува процесс тепловыделения начинается раньше и большее количество топлива сгорает в объеме КС. В результате наилучшее, с точки зрения достижения индикаторных показателей дизеля, значение отношения диаметра к глубине КС смещается в сторону больших значений. Увеличение давления в топливном аккумуляторе приводит к увеличению крутизны переднего фронта дифференциальной характеристики впрыскивания с переносом максимального значения интенсивности нарастания тепловыделения ближе к началу топливоподачи. Для снижения интенсивности нарастания тепловыделения эффективно предварительное впрыскивание топлива.

Яковенко А.Л., Шатров М.Г., Предеин А.А., Стряпунин А.С. (МАДИ) провели исследования структурного шума дизеля с использованием современных информационных технологий. Приведена методика исследования структурного шума дизеля от рабочего процесса в ПК AVL Excite. Показано, что применение современных информационных технологий для моделирования шума ДВС позволяет расширить спектр получаемых результатов, что повышает качество работ по исследованию и снижению шума и вибраций двигателя. Выполнены исследования звукового поля дизеля 4 ЧН 11/12,5 и расчет его звуковой мощности от рабочего процесса на режимах ВСХ, результаты которого сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что в диапазоне частот вращения вала двигателя от 1400 до 2400 мин⁻¹ (кроме 1800 мин⁻¹) отличие данных, полученных в ПК AVL Excite, от экспериментальных составляет 0,7...2 дБ. Таким образом, применение ПК AVL Excite в целом повысило точность расчетов структурного шума исследуемого дизеля. Выполнена оценка вклада поверхностей корпусных деталей двигателя в общий уровень звуковой мощности, в результате которой установлено, что вклад поверхности блока-картера составляет 35...53 %, что больше вклада остальных поверхностей на всех исследуемых частотах вращения коленчатого вала на режимах ВСХ. Поверхность крышки привода механизма газораспределения является наименее активным излучателем шума.

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Неверов В.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ) представили способ форсирования четырехтактного двигателя его переводом на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими частотами вращения. Целесообразность такого форсирования обусловлена необходимостью иметь повышенные мощность и крутящий момент в начальный период разгона, что позволяет улучшить динамические показатели ДВС и приемистость транспортных средств, оборудованных этими двигателями. Для эффективного улучшения показателей топливной экономичности предложен перевод четырехтактного двигателя на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими частотами вращения. Отмечено, что худшие показатели топливной экономичности у двухтактных двигателей отчасти компенсируются лучшими показателями их удельной мощности. Рассмотрены особенности перевода бензинового двигателя типа 2/4 Sight двигателестроительной фирмы Ricardo (Великобритания) с четырехтактного цикла на двухтактный. Для реализации двухтактной работы применены двухступенчатый наддув с промежуточным охлаждением воздуха

и система переключения клапанов газораспределения. Отмечено, что такой метод улучшения мощностных и динамических показателей ДВС применим и к дизельным двигателям. Исследован дизель типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5), установленный на гусеничную машину. На режимах с частотой вращения от 1600 до 2400 мин⁻¹ этот двигатель работает по четырехтактному циклу, а при меньших частотах вращения — по двухтактному. Проведены расчетные исследования рабочего процесса этого двигателя и показана целесообразность его перевода на двухтактный цикл на режимах ВСХ с низкими частотами вращения.

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Неверов В.А., Савастенко А.А., Трифонов В.Л. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ) провели расчетные исследования динамических показателей дизельного двигателя и гусеничной машины (ГМ). Отмечено, что мощностные и динамические показатели являются одними из основных для ДВС и транспортных средств, оборудованных этими двигателями. Описан приведенный в предыдущем исследовании метод улучшения названных показателей путем перевода четырехтактного двигателя на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими частотами вращения. Такой перевод на двухтактный цикл дизеля типа Д-245 позволил существенно (примерно в 2 раза) увеличить крутящий момент двигателя на режимах ВСХ с частотами вращения коленчатого вала, меньшими 1600 мин⁻¹ и, соответственно, улучшить динамические показатели двигателя и ГМ. Приведена динамическая модель дизеля и ГМ. Выполнены расчетные исследования разгона ГМ массой 6000 кг с базовым дизелем типа Д-245 и модернизированным двигателем, выполненным с возможностью его перевода «на ходу» с четырехтактного на двухтактный цикл работы на режимах ВСХ с пониженной частотой вращения. Расчеты подтвердили возможность улучшения динамических показателей этой ГМ при реализации рассматриваемого способа форсирования двигателя. Время разгона ГМ до скорости $v = 54,85$ км/ч составило 50,57 с, что меньше на 7,19 с или на 12,4 % по сравнению с ГМ, оснащенной базовым двигателем. Путь ее разгона до указанной скорости оказался равным 483,49 м, что меньше на 87,14 м или на 15,3 % по сравнению с ГМ, оснащенной базовым двигателем.

Кулешов А.С., Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) исследовали влияние запальной дозы дизельного топлива на рабочий процесс тепловозного газодизельного двигателя. Отмечено, что природный газ характеризуется плохой самовоспламеняемостью в условиях КС дизеля. В связи

с этим целесообразна реализация газодизельного цикла, в котором для воспламенения природного газа используется запальная доза нефтяного дизельного топлива. С использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК проведены расчетные исследования влияния запальной дозы дизельного топлива на рабочий процесс тепловозного газодизельного двигателя типа Д50 (6 ЧН 31,8/33). Рассчитаны дизельный и газодизельный циклы двигателя с запальной дозой дизельного топлива, равной 5, 10, 15 и 20 %. Различия значений эффективного КПД исследуемого дизеля при изменениях запальной дозы дизельного топлива не превышали 2,7 %. Перевод дизеля на газодизельный цикл существенно (на 90 %) уменьшил дымность ОГ. При этом снижались и удельные массовые выбросы с ОГ оксидов азота (до 18 %) и углекислого газа (до 23 %). Отмечено, что природный газ является низкоуглеродным газомоторным топливом, применение которого позволяет существенно уменьшить выбросы основного парникового газа — диоксида углерода по сравнению с использованием нефтяного дизельного топлива. Приведен вывод о целесообразности изменения запальной дозы ДТ газодизельного двигателя с изменением скоростного и нагрузочного режимов работы.

Балакин А.Ю., Росляков А.Д., Клочков Ю.С. (СамГУПС, г. Самара, СПбПУ) рассмотрели метод повышения надежности работы дизельных двигателей путем подачи гомогенной смеси воздуха и этанола во впускной коллектор. Цель работы — исследование негативных физических процессов в дизелях, вызванных малым значением цетанового числа этанола. Выполнены расчетные оценки термодинамического состояния продуктов сгорания смесей этанола и нефтяного дизельного топлива в различных пропорциях и расчеты теплового состояния элементов форсунок. В качестве технического решения для компенсации малого значения цетанового числа этанола используют подачу в КС запальной дозы нефтяного дизельного топлива. Приведены методика и расчет прогрева топлива в пограничном слое канала распылителя форсунки дизеля типа Д-240 (4 Ч 11,0/12,5) за цикл впрыска топлива. Результаты расчетных исследований сведены к следующим основным выводам. Ввиду пониженной теплотворной способности этанола для сохранения неизменными коэффициента избытка воздуха и мощности дизеля необходимо подавать больший расход смесевое топлива. При этом следует учитывать тот факт, что этанол имеет примеси воды (до 8 %), количество которых допускается в соответствии с техническими требованиями на производство и поставку этанола. В связи с этим при прочих равных условиях мощность дизеля может несколько повышаться из-за увеличения содержания

паров воды в продуктах сгорания. При подаче в КС этанола с помощью дизельных форсунок возможно их заклинивание из-за низкой вязкости этанола и содержания воды. Поэтому целесообразно подавать этанол с помощью автономной системы, например через впускной коллектор дизеля. При уменьшении доли запальной дозы нефтяного дизельного топлива до значения менее 15 % (с учетом разной теплоты сгорания этанола и нефтяного дизельного топлива) требуется дополнительное охлаждение корпуса форсунки.

Марков В.А., Са Бовэнь, Девянин С.Н., Зыков С.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Быков А.Е. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, РУДН) проанализировали результаты сравнительных испытаний альтернативных топлив биологического происхождения для дизелей. Проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5) на смесях нефтяного дизельного топлива с растительными маслами — рапсовым (РМ) и подсолнечным (ПМ), а также на смесях ДТ с метиловыми эфирами растительных масел — рапсового (МЭРМ) и подсолнечного (МЭПМ). Причем объемное содержание указанных компонентов в смеси с нефтяным дизельным топливом достигало 60 %. Для решения задачи оптимизации состава указанных смесевых биотоплив с учетом показателей токсичности ОГ использован метод свертки, при котором обобщенный критерий оптимальности определялся в виде суммы четырех частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ оксидов азота и дымность ОГ по шкале Хартриджа. Причем эти два показателя определялись на двух основных режимах ВСХ — максимальной мощности и максимального крутящего момента. Поскольку указанные частные критерии имеют различную размерность, обобщенный критерий оптимальности определялся в относительных единицах. При работе на нефтяном дизельном топливе обобщенный критерий равен единице. Отмечено, что при росте содержания этих биодобавок в исследуемых смесях значения принятого обобщенного критерия оптимальности монотонно уменьшаются. Для смесей нефтяного дизельного топлива с РМ минимум обобщенного критерия, равный 0,736, получен для смеси 40 % дизельного топлива и 60 % РМ. У смесей дизельного топлива с ПМ минимум этого критерия, равный 0,818, отмечен при 20%-ном содержании ПМ в смеси. При работе на смесях дизельного топлива с МЭРМ минимальное значение обобщенного критерия (0,747) достигнуто при 60%-ном содержании МЭРМ в смеси, а для смесей дизельного топлива с МЭПМ этот минимум (0,738) достигнут при 40%-ном содержании МЭПМ в смеси. В результате анализа указанных значений принятого

обобщенного критерия оптимальности выявлено, что рассматриваемые биодобавки в нефтяное дизельное топливо дают примерно одинаковое улучшение показателей токсичности ОГ.

Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Быковская Л.И., Нормуродов А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева) исследовали возможность снижения дымности ОГ дизелей введением биодобавок растительного происхождения в топливо. Результаты испытаний дизеля типа Д-245 подтвердили эффективность использования РМ, ПМ и МЭРМ в качестве экологичной добавки (до ~ 60 % (об.)) в нефтяное дизельное топливо. Подтверждена зависимость дымности ОГ от массового содержания атомов кислорода в смесях. Увеличение содержания кислорода в топливе от 0,4 % (работа на чистом дизельном топливе) до ~ 7 % (работа на смеси 40 % дизельного топлива и 60 % РМ) позволило уменьшить в 2–2,5 раза дымность ОГ. Установлена взаимосвязь дымности ОГ с выбросами других нормируемых токсичных компонентов — оксидов азота, монооксида углерода и несгоревших углеводородов на режимах ВСХ. При этом рассмотрена работа дизеля на режимах ВСХ с $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимального крутящего момента) и с $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимальной мощности) на чистом дизельном топливе и его смесях с 20 % РМ, ПМ и МЭРМ. При работе дизеля на указанных режимах ВСХ на смесях нефтяного дизельного топлива и РМ дымность ОГ изменялась от 25 % по шкале Хартриджа (работа на чистом дизельном топливе) до 8 % по шкале Хартриджа (работа на смеси 80 % дизельного топлива и 20 % РМ). Наиболее выраженной является взаимосвязь содержания в ОГ монооксида углерода СО и дымности ОГ K_x . Уменьшению дымности ОГ от 25 до 8 % по шкале Хартриджа на режимах ВСХ соответствует 40...60%-ное снижение содержания СО в ОГ. Менее выражена взаимосвязь содержания в ОГ углеводородов C_nH_m и дымности ОГ K_x . Уменьшению дымности ОГ от 25 до 8 % по шкале Хартриджа соответствует 30...50%-ное снижение содержания C_nH_m в ОГ. Наименее выраженной является взаимосвязь концентрации в ОГ оксидов азота NO_x и дымности ОГ K_x . Уменьшению дымности ОГ в указанном диапазоне соответствует 15...25%-ное снижение содержания NO_x в ОГ.

Марков В.А., Са Бовэнь, Девянин С.Н., Зыков С.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Нормуродов А.А., Денисов А.Д. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, РУДН) провели исследование работы дизеля на смесевых биотопливах с добавками РМ. Рассмотрена работа двигателя на смесях нефтяного дизельного топлива и РМ, а также

на эмульсиях этих смесей с водой. Проведены испытания дизеля типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5), работающего на этих топливах. Подтверждена возможность значительного улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ при использовании рассматриваемых топлив. Показано, что наличие воды в эмульгированном биотопливе оказывает более существенное влияние на эмиссию оксидов азота, чем наличие в нем РМ. Влияние содержания в исследованных эмульсиях РМ и воды на дымность ОГ оказалось соизмеримым. Проведено CFD-моделирование течения потока биотоплив в распылителе дизельной форсунки. Расчеты выполнены для нефтяного дизельного топлива и эмульсии, содержащей 70 % РМ и 30 % этанола. По результатам моделирования выявлено, что эмульгирование РМ этанолом изменяет характеристики его течения. При использовании эмульсии РМ и этанола отмечена более высокая скорость впрыска, но пониженный массовый расход топлива и коэффициент расхода по сравнению с работой на РМ. По сравнению с течением нефтяного дизельного топлива указанная эмульсия имеет более высокий массовый расход, но меньшую скорость впрыска и коэффициент расхода. При противодавлении 0,1 МПа кинетическая энергия турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия эмульсии выше, чем у нефтяного дизельного топлива. При противодавлении 8,9 МПа, напротив, течение нефтяного дизельного топлива характеризуется наибольшими значениями кинетической энергии турбулентности потока на выходе из отверстия. По результатам исследований проведена оценка эффективности использования смесевых биотоплив с добавками РМ в качестве топлива для дизелей.

Девянин С.Н., Марков В.А., Левшин А.Г., Кобозева Т.П., Неверов В.А. (РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, МГТУ им. Н.Э. Баумана) исследовали возможности использования соевого масла (СМ) как экологической добавки в нефтяное дизельное топливо. Отмечено, что СМ является одним из наиболее распространенных растительных масел. Структура производства растительных масел в России такова: доля ПМ в общем объеме производства масел составляет 86,84 %, СМ — 7,96 %, РМ — 4,84 %. В России сою возделывают прежде всего как ценную высокобелковую культуру для производства кормов (соевого шрота). При этом СМ может рассматриваться как побочный продукт животноводства. Рассмотрена возможность использования СМ в качестве экологической добавки в нефтяное дизельное топливо. Исследованы смеси с содержанием СМ до 20 % (об.). Проведены расчетные исследования процессов распыливания топлива и смесеобразования в дизеле типа Д-245 при его работе

на смесях нефтяного дизельного топлива и СМ. При переводе дизеля с нефтяного дизельного топлива на смесь 80 % дизельного топлива и 20 % СМ показатели распыливания топлива изменяются незначительно: длина струи на момент окончания впрыскивания увеличилась от 41,9 до 43,4 мм (на 3,6 %), угол раскрытия конуса струи на момент окончания впрыскивания уменьшился от 20,8 до 19,6° (на 5,8 %), средний диаметр капле по Заутеру увеличился от 24,3 до 28,0 мкм (на 15,2 %). Проведены испытания дизеля типа Д-245, работающего на смеси 80 % дизельного топлива и 20 % СМ. Перевод дизеля типа Д-245 с нефтяного дизельного топлива на смесевое на режимах 13-режимного цикла (нормы ЕСЕ R 49) приводит к снижению интегральных выбросов оксидов азота на 19,1 %, монооксида углерода на 10,5 %, несгоревших углеводородов на 8,9 %.

Марков В.А., Мещеряков А.Г., Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБНУ ВНИИТиН, г. Тамбов) рассмотрели влияние биодизельного топлива на работу дизельной топливной аппаратуры (ТА). Исследуемое топливо представляло собой сложный метиловый эфир рыжикового масла, получаемый путем переэтерификации жирных кислот этого масла метиловым спиртом в присутствии щелочного катализатора. В связи с различиями свойств биотоплива и нефтяного дизельного топлива при адаптации дизелей к работе на биотопливах возникает проблема ухудшения качества процессов подачи и распыливания топлива. Проведены экспериментальные исследования ТА дизеля на нефтяном дизельном топливе и его смесях с указанным эфиром. Исследованы смеси нефтяного дизельного топлива с добавками указанного эфира в объеме 20, 30 и 50 %. Объектом исследований являлся дизель типа Д65Н (4 Ч 11/13) производства Рыбинского авиационного завода. Показатели работы дизельной ТА в значительной степени определяются плотностью и вязкостью топлива. Нефтяное дизельное топливо по ГОСТ 32511–2013 имеет плотность в диапазоне 820...845 кг/м³ и кинематическую вязкость 2...4,5 мм²/с (при температуре 40 °С). При таких свойствах топлива наблюдается стабильная работа ТА. У ТНВД исследуемого дизеля прослеживается тенденция к ухудшению показателей работы на топливах с вязкостью более 4,5 мм²/с. Работа на топливе с повышенной вязкостью сопровождается ухудшением качества процессов распыливания топлива и смесеобразования. Для повышения эффективности работы дизеля на указанных смесях необходимо корректировать работу ТА под конкретное топливо, либо снижать вязкость топлива, повышая его температуру или добавляя в него маловязкие компоненты.

Ерохов В.И. (Московский Политех) проанализировал эффективность восстановителя оксидов азота ОГ транспортных двигателей. Отмечена необходимость кардинального решения задачи снижения эмиссии сажи и выбросов оксидов азота, вызванная ужесточением требований к выбросам этих двух наиболее значимых токсичных компонентов ОГ дизелей. Целью исследования являлась разработка комплексного метода улучшения указанных параметров токсичности ОГ. Для достижения этой цели уточнена модель образования оксидов азота и проведен анализ методов их нейтрализации. Указано, что наиболее эффективным методом снижения эмиссии оксидов азота является подача мочевины в выпускную систему дизеля. Разработаны методика расчета подачи мочевины и система восстановления оксидов азота. Проведен анализ комплексной системы AdBlue SCR «DeNO_x», используемой для снижения эмиссии выбросов оксидов азота. В комплексной системе AdBlue SCR «DeNO_x» восстановления оксидов азота используется жидкий реагент, представляющий собой водный раствор, состоящий из 32,5 % высокоочищенной мочевины и 67,5 % деминерализованной воды. Применение мочевины в системе нейтрализации ОГ дизелей на 100...150 °С снижает температуру начала химической реакции восстановления оксидов азота. Средний расход мочевины составляет ~ 6 % расхода топлива, при этом ее стоимость в 4 раза больше стоимости базового топлива. Запас мочевины транспортного средства обеспечивает пробег 5000 км магистрального автопоезда. Применение комплексной системы AdBlue SCR «DeNO_x» обеспечивает снижение выбросов оксидов азота до 95 % и выполнение требований экологической эффективности дизелей уровня Euro-5.

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Попов А.Е., Лысов И.О., Фурзиков В.В. (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «УДМЗ», г. Екатеринбург) выполнили экспериментальные исследования влияния давления наддува на показатели рабочего цикла HCCI двигателя. Объектом исследования являлся двигатель типа 4 ЧН 13/15 с расчетной мощностью 184 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2100 мин⁻¹. Следующие параметры принимались постоянными: геометрическая степень сжатия 14; угол закрытия впускных клапанов 55 град поворота коленчатого вала (п.к.в.) после нижней мертвой точки (НМТ); температура рабочего тела в начале сжатия 355 К; цикловая подача смесового топлива (27 % диметилового эфира и 73 % природного газа) 0,16 г. Выявлено, что увеличение давления начала сжатия от 0,24 до 0,3 МПа (на 25 %) при постоянстве других параметров приводит к существенному увеличению

от 1,65 до 2,09 (на 26,7 %) коэффициента избытка воздуха по смесевому топливу и значительному уменьшению от 2312 до 2083 К (на 9,9 %) максимальной расчетной температуры газа в цилиндре. В результате этого уменьшается тепловая напряженность двигателя и возможно снижение выбросов оксидов азота. Одновременно существенно увеличивается от 18,06 до 20,65 МПа (на 14,3 %) максимальное расчетное давление в цилиндре и связанная с ним механическая напряженность деталей кривошипно-шатунного механизма. Индикаторные показатели рабочего цикла при этом улучшаются незначительно (на 1,21...1,26 %).

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Лысов И.О., Попов А.Е., Яруллин Р.Р. (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты экспериментальных исследований особенностей топливоподачи и распределения топлива по КС на режимах пуска дизеля с объемным смесеобразованием. Исследования форсированного транспортного дизеля типа В-2 (12 Ч 15/18) с распылителем $8 \times 0,3 \times 140^\circ$ (восемь распыливающих отверстий диаметром 0,3 мм с углом 140° (в плане) относительно оси распылителя) проводились при одновременной регистрации давления впрыска (под иглой форсунки), давления в трубопроводе высокого давления, подъема иглы форсунки и фоторегистрации топливных струй через прозрачное окно в камере постоянного объема на различных скоростных режимах (при частотах вращения коленчатого вала 40...100 мин⁻¹) и противодавлениях в КС 0,60...0,98 МПа, имитирующих плотность реальной среды, в которую впрыскивалось топливо в дизеле при пуске. Результаты экспериментов показали, что для исследованных режимов характерен дробящий впрыск топлива. Причем дробление происходит не просто на отдельные впрыски (обычно 2–4), следующие с некоторым интервалом, а каждый из них состоит из 5–7 микровпрысков. При частоте вращения вала ТНВД 100 мин⁻¹ в первой серии микро-впрысков расчетные средние диаметры капель составляли более 70 мкм и имели начальную скорость не более 35 м/с. Основная доля топлива распыливалась значительно хуже, с начальными скоростями менее 30 м/с. При меньших частотах вращения коленчатого вала (до 40 мин⁻¹) мелкость распыливания ухудшилась на ~ 20 %, а начальная скорость капель уменьшилась более чем на 20 %.

Гайворонский А.И., Гордин М.В., Марков В.А., Карпец Ф.С. (Московский Политех, МГТУ им. Н.Э. Баумана) проанализировали технологии промышленного получения водорода и его использования в транспортных энергетических установках. Отмечена перспективность использова-

ния водорода в ДВС при переходе к углеродно-нейтральной энергетике. Рассмотрены проблемы, возникающие при конвертировании ДВС к работе на водороде. Проанализированы особенности организации рабочего процесса двигателей, работающих на водороде. Исследован способ подачи в дизельный двигатель водорода, получаемого путем электролиза воды. Проведены экспериментальные исследования дизеля типа Д-243 (4 Ч 11/12,5) в составе дизель-генераторной установки, работающей на нефтяном дизельном топливе с подачей водорода во впускную систему двигателя. На режиме максимальной мощности подача водорода в цилиндры двигателя составила 0,9 % (масс.) с учетом разности теплотворной способности нефтяного дизельного топлива и водорода. При снижении нагрузки на двигатель подача водорода увеличилась до 4,1 % (на режиме холостого хода). Реализация указанного способа работы двигателя позволила повысить его топливную экономичность, снизить дымность ОГ, выбросы СО и несгоревших углеводородов при небольшом росте выбросов оксидов азота. На режиме максимальной мощности указанная подача водорода в цилиндры привела к снижению дымности ОГ с 10,1 до 8,2 % (на 18,8 %) по шкале Хартриджа, при этом содержание в ОГ оксидов азота увеличилось от 1413 до 1502 ppm (на 6,3 %).

Фомин В.М., Апельинский Д.В. (Московский Политех) проанализировали перспективы внедрения альтернативных энергоресурсов в водородную энергетику отечественного транспорта. Приведены накопленный научно-технический потенциал в отечественной исследовательской практике, конкретные технические решения по применению отдельных видов водородных энергоресурсов в сфере транспортной энергетики, а также результаты сравнительного анализа и опытной апробации эффективности применения водородного топлива, полученного из альтернативных энергоносителей методом термохимической конверсии. Исследован способ организации рабочего процесса дизеля, основанный на применении синтезированного водородсодержащего газа — синтез-газа, содержащего водород и СО. Опытная апробация данного способа организации рабочего процесса осуществлена в дизеле типа 4 Ч 10,5/12. При реализации этого способа дизель оснащался бортовой системой синтеза указанного водородсодержащего газа из метанола за счет теплоты ОГ. Синтез-газ поступал во впускную систему дизеля, где смешивался с воздушным зарядом. Затем указанная смесь поступала в цилиндры двигателя, где воспламенялась от впрыскиваемого в цилиндры дизельного топлива. На номинальном режиме работы дизеля энергосберегающий эффект составил 4,5 %. Получены следующие

экологические показатели исследуемого дизеля: дымность ОГ уменьшилась на 45 %, выбросов оксидов азота — на 16 %.

Муратов А.В., Балакин А.Ю. (СамГУПС, г. Самара) проанализировали проблемы и перспективы использования газомоторного топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта. Перевод дизелей тепловозов на газообразное топливо может осуществляться двумя путями — созданием тепловозов с новыми газопоршневыми двигателями и модернизацией тепловозов существующего парка путем переоборудования дизельных двигателей этих тепловозов на газодизельный цикл. Отмечено, что работа газодизелей на режимах, соответствующих четвертой позиции контроллера и ниже, характеризуется нестабильной подачей запальной дозы дизельного топлива и недопустимым обеднением газозооной смеси. Для обеспечения работы дизеля с полной нагрузкой при низких позициях контроллера необходимо обеспечить устойчивую и качественную подачу запального дизельного топлива. Дросселирование воздуха на входе в двигатель дает эффект снижения массы воздушного заряда в цилиндрах двигателя. Для обеспечения работы дизеля на режиме холостого хода необходимо дросселирование воздуха на входе в двигатель для снижения давления в ресивере до 50...65 кПа и отключение не менее половины цилиндров. Определены минимальные конструкционные изменения штатной топливной аппаратуры, необходимые для обеспечения устойчивой работы тепловоза на газовом топливе. Предлагаемые решения позволяют обеспечить работу двигателя на газовом топливе на всех эксплуатационных режимах. Для обеспечения длительной работы дизеля в широком диапазоне эксплуатационных режимов необходима замена штатных форсунок на форсунки с меньшей подачей ДТ и изменение настроек системы управления впрыском топлива.

Шепелин П.В., Амиров Н.Э. (СамГУПС, г. Самара) проанализировали возможности использования энергонакопителей на основе водородных ячеек в системе рекуперативного торможения подвижного состава железнодорожного транспорта. Рассмотрены основные проблемы в сфере железнодорожного транспорта, связанные с процессом электрического рекуперативного торможения. На примере Куйбышевской железной дороги проанализированы возможности рекуперации избыточной электрической энергии. Рассмотрены различные типы накопителей энергии и оценена возможность применения таких систем накопления. Проведены подбор и схемное моделирование процесса зарядки систем накопления избыточной рекуперативной энергии на основе водородных электролизеров. Данная система накопления избыточной энергии в процессе

электрического рекуперативного торможения является перспективным направлением развития железнодорожного транспорта. Перевод неавтономного подвижного состава на водородные виды топлива снижает потребление дизельного и газомоторного топлива, также возможна отдача накопленной энергии в контактную сеть и использование тепловой энергии, получаемой при конверсии водорода, для отопительных систем существующей инфраструктуры. Внедрение систем такого рода позволит уменьшить расход электроэнергии на тягу поездов. Экономия энергии одного состава достигает 360 кВт · ч. Приведенное технико-экономическое обоснование внедрения таких систем накопления энергии показывает эффективность их применения на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Антипов Ю.А., Шкарин К.В., Шаталова И.И., Топтыгин И.В. (РУДН) исследовали возможности повышения эффективности дизельной электростанции (ДЭС) малой мощности. Отмечено, что с учетом стоимости моторных топлив и их доставки к месту потребления проблема экономии топлива является весьма актуальной. В качестве основных и резервных источников энергии в России используется ряд ДЭС в блочном исполнении с диапазоном мощностей от 60 до 400 кВт. Реализован один из способов повышения эффективности ДЭС, заключающийся в ее совместной работе с тепловым насосом (ТН) воздушного типа. Рассмотрена ДЭС с дизелем типа ЯМЗ АД-60-Т400 (4 Ч 13/14), работающая в схеме с компрессионным воздушным ТН (мощность двигателя 60 кВт, частота вырабатываемого электрического тока 50 Гц, напряжение 400 В). В качестве низкопотенциального источника энергии использован наружный воздух, рабочий агент воздушного ТН фреон R600a. Часть электрической мощности, вырабатываемой ДЭС, использована для привода компрессора ТН. Расчеты эффективности установки выполнены для следующих условий: мощность, подаваемая на компрессор, 10 кВт, температура наружного воздуха, поступающего в испаритель ТН, изменялась от 8 до 25 °С. Расчеты показали, что совместная работа ДЭС и воздушного ТН позволяет не только обеспечить отдельный поселок электричеством, но и снабдить его тепловой энергией для нужд отопления и горячего водоснабжения. При КПД дизеля 37 % благодаря применению ТН коэффициент использования теплоты топлива увеличился до 52,5 % при температуре наружного воздуха 10 °С и до 58 % при температуре наружного воздуха 25 °С.

Шкарин К.В., Антипов Ю.А., Шаталова И.И., Фролов М.Ю. (РУДН) оценили возможности повышения эффективности применения ТН в условиях холодного климата. Из всех низкопотенциальных источников тепло-

ты наиболее предпочтительным является воздух, но он имеет один существенный недостаток — при пониженной температуре окружающей среды коэффициент преобразования ТН заметно снижается. Для поддержания требуемой температуры внутри помещения необходимо использовать дополнительные источники теплоты. Рассмотрена схема энергообеспечения отдельного поселка, расположенного в удаленной местности с холодным климатом, где нет централизованного электрического снабжения, а также отсутствует газовое снабжение. Установка включает в себя электростанцию с дизелем в блочном исполнении, работающую совместно с воздушным ТН. Дизель не имел системы утилизации вторичных энергоресурсов, но снабжен радиатором для отвода теплоты охлаждающей жидкости и масла в окружающую среду. Воздушный ТН вырабатывает тепловую энергию для удовлетворения нужд поселка в отоплении и горячем водоснабжении. На привод компрессора ТН затрачивается часть электрической энергии, вырабатываемой генератором. Подогретый наружный воздух, пройдя радиатор, не выбрасывается в атмосферу, а направляется в испаритель ТН. Рассмотрена электростанция на базе дизеля мощностью 60 кВт с КПД 37 %. Доля теплоты топлива, отдаваемая в охлаждающую жидкость, составляет 0,15, доля теплоты, отдаваемая в масло, — 0,05. Тепловой насос компрессионного типа (источник низкопотенциальной теплоты — наружный воздух в диапазоне от -25 до 15 °С; рабочий агент R600a.) Выявлено, что подогрев наружного воздуха на входе в испаритель ТН за счет использования теплоты охлаждения двигателя и масла позволяет расширить температурный диапазон эффективного применения воздушных ТН в регионах с холодным климатом.

Смирнов С.В., Воробьев А.А. (РУДН) смоделировали процесс гидродинамического трения юбки составного поршня ДВС. Отмечено, что на механические потери в цилиндропоршневой группе приходится ~ 50 % всех механических потерь в ДВС. Разработана математическая модель расчета гидродинамических параметров масляного слоя в сопряжении юбка поршня–цилиндр с учетом деформаций юбки составного поршня и ее перемещений в цилиндре двигателя. Разработаны методики и программы для автоматизированного формирования матрицы податливости юбки поршня для проведения упругогидродинамических расчетов. Исследовано влияние размерности расчетной сетки на качество определяемых результатов и время расчетов, предложена оптимальная относительная площадь контрольного элемента для проведения расчетов. При решении упругогидродинамической задачи использован метод конечных разностей, а для решения задач определения деформаций — метод конечных элементов. Пред-

ложен и апробирован расчетно-экспериментальный метод определения деформаций юбки поршня, используемый для верификации конечно-элементной модели и составления матрицы податливости. Проведена верификация математической модели расчета гидродинамических параметров масляного слоя в сопряжении юбка поршня–цилиндр по экспериментальным данным дизеля с воздушным охлаждением типа 8ДВТ-330 (8 ЧН 15/16). Расчетным путем определены оптимальные параметры продольного и поперечного профилей для юбки составного поршня, обеспечивающие условия гидродинамического трения с минимальной мощностью механических потерь.

Новиков В.А., Ощепков П.П. (РУДН) исследовали влияние снижения давления сгорания в первом цилиндре многоцилиндрового ДВС на неравномерность частоты вращения коленчатого вала. Показано, что для шестицилиндрового двигателя типа IVECO F4HE9687P доля моментов инерции поступательно движущихся деталей двигателя составляет 3,4 % значения момента инерции маховика. Обработка полученных значений частот вращений по углу п.к.в. проводилась в несколько этапов, получаемые значения сглаживались по среднему арифметическому по 25 точкам. Исходя из этих значений, определены наибольшая и наименьшая частоты вращения и соответствующие им углы п.к.в., а также средняя частота вращения коленчатого вала за рабочий цикл (значение угла локализации цилиндра с неисправностью). Найден показатель наличия неисправности, определяемый отношением изменения частоты вращения к продолжительности участка по углу п.к.в. для прямых, соединяющих точки значений наибольшей и наименьшей частот вращения. Для долей снижения давления в первом цилиндре, равных 5, 10, 20, 30 и 40 %, значения угла локализации находятся в пределах от 460,9 до 474,3 град п.к.в., что относится к интервалу рабочего хода в первом цилиндре от 360 до 480 град п.к.в. (очередность рабочих ходов в цилиндрах 1–5–3–6–2–4). Определены также наибольшее и наименьшее значения показателя наличия неисправности, а также отношения максимального и минимального значений показателя наличия неисправности.

Раков В.А. (ВоГУ) провел исследование эффективности рекуперативного торможения автотранспортных средств. Установлены взаимосвязи рекуперативного торможения с топливной экономичностью и экологической безопасностью автомобилей, разработаны методики оценки и критерии эффективности такого торможения, проведены испытания. При испытаниях использованы стенд для гибридных энергоустановок автомобилей с накопителями электрической энергии конденсаторного типа, ходовой

макет автомобиля с тяговым электроприводом 30 кВт с накопителями электрической энергии, гибридный автомобиль Toyota Prius с никель-металлогидридной аккумуляторной батареей. При испытании задавали циклы разгона–торможения и определяли напряжение в электрическом накопителе энергии и силу тока в цепи привода. Далее рассчитывали энергию в конденсаторном накопителе в начале и конце разгонов и торможений. С точки зрения отношения энергий торможения и разгона привода эффективность рекуперации составила 24 % (k_{r1}), с точки зрения отношения энергии торможения к кинетической энергии движущегося привода, — 36 % (k_{r2}). Отмечено, что эффективность рекуперации снижается при достижении электрическим приводом и накопителем максимальной мощности в режиме быстрого заряда. При этом критерий k_{r1} определяет эффективность работы всего электрического привода с двигателем в режиме разгона и торможения, а критерий k_{r2} — эффективность электрического привода в режиме рекуперации. При испытании автомобиля Toyota Prius с комбинированной энергоустановкой проводилась серия разгонов до скорости 40 км/ч и торможений до остановки с работающей и отключенной системой рекуперации энергии. Испытания показали, что при работающей системе рекуперативного торможения расход топлива был меньше на 16 %. В результате теоретических исследований выявлено, что для автомобиля категории М1 максимальная мощность системы рекуперации энергии должна составлять 15 кВт, что обеспечивается накопителем энергии емкостью 3,5 кДж. Использование системы рекуперации энергии торможения позволяет улучшить на 12...16 % топливную экономичность автомобилей в городских условиях.

Епифанов В.С., Зябров В.А., Попов Д.А. (РУТ (МИИТ)) исследовали возможность использования неравномерности угловой скорости вращения валопровода судового двигателя в качестве диагностического параметра. Отмечено, что неравномерность крутящего момента судового дизеля, обусловленная переменными составляющими мгновенных угловых скоростей кривошипов коленчатого вала, вызывает их крутильные колебания. Эти колебания также предопределяют неравномерность частоты вращения энергетической установки. Среднее значение крутящего момента — условно постоянная величина, а средние значения за цикл опрокидывающего момента от крутильных колебаний и момента от сил инерции равны нулю. Переменная составляющая за цикл крутящего момента относительно его среднего значения также равна нулю. Однако за соответствующий период ими совершается работа, что и приводит к изменению мгновенной угловой

скорости. Для количественной оценки переменной составляющей момента или работы целесообразно воспользоваться их среднеквадратическим значением. Как показали расчеты, в зависимости от режима работы двигателя, его конструктивных особенностей, действия дополнительных составляющих (опрокидывающего момента от крутильных колебаний, противовесов) периодическая составляющая крутящего момента как увеличивается, так и уменьшается. Полученные значения периодической составляющей крутящего момента коррелируются с неравномерностью вращения вала дизеля. Ее увеличение с ростом нагрузки отрицательно влияет на экономичность и надежность работы системы двигатель–потребитель механической энергии. Сделан вывод о возможности использования неравномерности угловой скорости вращения валопровода в качестве важного диагностического параметра.

Зябров В.А., Крутиев С.М. (РУТ (МИИТ)) исследовали возможности кратковременного повышения мощности судового дизеля для предотвращения аварии судна. Приведены результаты экспериментального исследования подачи кислорода в судовую дизель для кратковременного (не более 5 мин) повышения мощности без превышения ограничительных характеристик. Экспериментальная установка включала в себя судовую двигатель типа 6 Ч 18/22, нагружение которого осуществлялось гидротормозом. Во впускной коллектор подавался кислород, который перемешивался со свежим зарядом, образуя гомогенную смесь. Однородность смеси во впускном коллекторе обеспечивалась удлиненным впускным трубопроводом. Концентрация кислорода на впуске контролировалась датчиком кислорода. Показано, что на нагрузочном режиме с мощностью двигателя 134 кВт увеличение до 30 % концентрации кислорода в свежем заряде (обычно содержание кислорода составляет 21 %) уменьшает на 8,58 % удельный эффективный расход топлива. Такой эффект объясняется сокращением периода задержки воспламенения, фаз кинетического горения и догорания, а период фазы диффузионного горения при этом возрастает. В целом подача кислорода на впуске как средства форсирования дизеля на режимах с перегрузкой позволяет эффективно решить проблему недостатка кислорода в КС, уменьшить концентрацию продуктов неполного сгорания топлива в ОГ и закоксовывание деталей КС на режимах с высокими нагрузками.

Крутиев С.М., Зябров В.А., Епифанов В.С. (РУТ (МИИТ)) провели экспериментальные исследования влияния изменения состава свежего заряда воздуха на экологические показатели двигателя. Эта работа является продолжением исследований двигателя типа 6 Ч 18/22 с подачей кислорода

на впуске. Отмечено, что добавление кислорода во впускной коллектор двигателя без каких-либо сложных устройств и изменения конструкции двигателя является рентабельным способом кратковременного повышения мощности судового дизеля и улучшения показателей токсичности ОГ. Показано, что увеличение содержания кислорода в свежем заряде позволяет улучшить показатели топливной экономичности и снизить концентрации в ОГ продуктов неполного сгорания — сажи, монооксида углерода, несгоревших углеводородов. В частности, на нагрузочном режиме 134 кВт увеличение от 21 до 30 % содержания кислорода в свежем заряде уменьшает от 0,22 до 0,01 % содержание монооксида углерода в ОГ, но при этом отмечено увеличение от 700 до 3900 ppm содержания оксидов азота в ОГ. Для уменьшения эмиссии оксидов азота решено уменьшить максимальную температуру в цилиндре дизеля путем увлажнения впускного воздуха. При испытаниях установлено, что на нагрузочном режиме 134 кВт подача воды на впуске в количестве 20 % подачи топлива позволила снизить на 44 % выбросы оксидов азота для режима с концентрацией кислорода 25 % и на 46 % для режима с концентрацией 30 % кислорода. Для режима без подачи кислорода концентрация оксидов азота уменьшилась всего на 15...18 %. Подача воды на впуске на режимах с повышенной мощностью является действенным способом уменьшения негативного эффекта повышения эмиссии оксидов азота при использовании кислорода в аварийных ситуациях.

Строкин А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрел особенности моделирования процессов шумообразования в быстроходных ДВС. Отмечено, что широко распространены источники шума, генерирующие звук в результате местного резкого вытеснения некоторого объема газа в окружающую среду или путем всасывания объема воздуха из окружающей среды. Примерами таких источников могут служить процессы впуска и выпуска ДВС. При моделировании процесса шумообразования в этих источниках использована более простая модель пульсирующей сферы (более сложная модель пульсирующего поршня для реальных задач снижения шума дает несущественные уточнения в результатах расчета). При этом сделано допущение, что характерный размер источника шума много меньше расчетной длины волны. Для данной модели необходимо задать конфигурацию объемного шумообразующего периодического импульса, а также сам объем импульса. Конфигурация импульсов впуска и выхлопа различна, но в обоих случаях можно выделить основную наиболее мощную часть импульса, ответственную за генерацию шума. Так, для выхлопа можно учитывать только участок свободного выпуска ОГ и соответствующее ему время, а для

выпуска — часть импульса, соответствующую первой половине этого процесса с условным временем основного шумообразования. При исследованиях реальный импульс моделировался импульсом затухающей синусоиды, объем и длительность которых соответствовали выбранным шумообразующим объемам и их модельной длительности. После разложения этих импульсов в ряд Фурье, используя для модели пульсирующей сферы полученные спектральные составляющие амплитуды объемной скорости, определяли спектр звуковой мощности соответствующего источника шума и уровни его звуковой мощности. Полученные результаты показали достаточную для практики точность расчетов, а соответствующие аналитические формулы позволяют делать прогнозы и выполнять анализ ожидаемого шума от этих источников.

Заключение. Результаты анализа выполненных исследований могут быть сведены к следующим основным выводам.

Эффективность работы теплоэнергетических установок характеризуется целым комплексом показателей — мощностными и динамическими, топливно-экономическими и экологическими, ресурсом и простотой обслуживания при эксплуатации.

Достижение наибольшей эффективности работы теплоэнергетических установок с поршневыми ДВС возможно лишь при их оснащении современными САР и САУ. Использование таких систем позволяет обеспечить согласование характеристик элементов и систем комбинированных теплоэнергетических установок в широком диапазоне их эксплуатационных режимов. При этом уменьшается доля неустановившихся режимов, отличающихся недостаточно высокими показателями топливной экономичности и токсичности ОГ.

Современные САР и САУ представляют собой многофункциональные системы, построенные на базе микропроцессорной техники. Они реализуют оптимальное многокритериальное управление параметрами теплоэнергетических установок с учетом изменяющихся условий эксплуатации. При этом функциональные возможности САУ и САР расширяются — наряду с традиционной задачей стабилизации частоты вращения коленчатого вала ДВС, температуры охлаждающей жидкости и смазывающего масла, возникает ряд дополнительных функций, среди которых необходимо выделить регулирование системы газотурбинного наддува, фаз газораспределения, количества рециркулируемых ОГ и др.

При создании современных САР и САУ более широко применяются новые подходы к их разработке. При этом используются стенды полунатурного моделирования таких систем, методы их машинного обучения,

такие как регрессионный анализ и нейронные сети, создаются системы с нечеткой логикой и др.

В связи с необходимостью перевода теплоэнергетических установок на альтернативные топлива (природный газ, водород, биотопливо, смешанное топливо с добавлением углеродных нанотрубок) на САУ и САР возлагаются функции компенсации различий физико-химических свойств нефтяных моторных топлив и используемых альтернативных топлив.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архаров А.М., Афанасьев В.Н. Теплотехника. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [2] Григорьев В.А., Зорин В.М., ред. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Кн. 4. М., Энергоатомиздат, 1991.
- [3] Пономарев В.М., Литвинов А.П., ред. Основы автоматического регулирования и управления. М., Высшая школа, 1974.
- [4] Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. СПб., Политехника, 2003.
- [5] Крутов В.И., ред. Основы теории автоматического регулирования. М., Машиностроение, 1984.
- [6] Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. М., Легион-Автодата, 2001.
- [7] Луков Н.М. Автоматические системы управления и регулирования тепловозов. М., Изд-во МИИТ, 1983.
- [8] Толшин В.И., Сизых В.А. Автоматизация судовых энергетических установок. М., РКонсульт, 2003.
- [9] Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания. М., Изд-во РУДН, 2009.
- [10] Ерохов В.И. Токсичность современных автомобилей. Методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу. М., Форум, 2013.
- [11] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [12] Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир, Изд-во ВГУ, 2000.
- [13] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 1990.
- [14] Луканин В.Н., Шатров М.Г., ред. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов. М., Высшая школа, 2010.
- [15] Ипатов И.И., Кутенев В.Ф., Лукшо В.А. и др. Автотранспорт и экология мегаполисов. М., Машиностроение, 2011.

- [16] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ, 2000.
- [17] Александров А.А., Марков В.А., ред. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., ООО «Инженер», ООО «Онико-М», 2012.
- [18] Ватолин Д.С. Особенности применения СПГ в качестве топлива для судовых ДВС. *Двигателестроение*, 2020, № 3, с. 28–34.
- [19] Марков В.А., Са Бовэнь, Неверов В.А. и др. Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел. *Двигателестроение*, 2020, № 4, с. 18–24.
- [20] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 4. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2013.
- [21] Пупков К.А., Егупов Н.Д., ред. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
- [22] Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
- [23] Пупков К.А., Фалдин Н.В., Егупов Н.Д. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [24] Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М., Факториал Пресс, 2002.

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А. Тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 1 (144), с. 97–126.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-97-126>

**TRENDS IN IMPROVING AUTOMATIC CONTROL
AND REGULATION SYSTEMS OF THE THERMAL
POWER PLANTS**

V.A. Markov

markov58@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Relevance of the article is determined by the need to improve power and dynamic performance of the thermal power plants and indicators of their fuel efficiency and toxicity of the exhaust gases. An integral part of these facilities are the automatic control and regulation systems that ensure coordination of the elements and systems of the combined thermal and power facilities in a wide range of their operating modes. The most important criteria in such elements and systems coordination are the indicators characterizing toxicity of the exhaust gases. Currently, thermal power plants based on the piston and combined internal combustion engines are widely used. Main areas of improving thermal power plants with the internal combustion engines and their automatic control and regulation systems were analyzed. For example, expanding their functionality including the exhaust gas purification systems control and the use of thermal power plants in adaptation to operate on the alternative fuels; improving the quality of control and regulation processes and minimizing the share of unsteady operating modes of the thermal power plants. Current level of systems for automatic control and regulation of the thermal power plants was evaluated. Working processes of the internal combustion engines and their systems were studied. The most important systems of the combined thermal power plants with internal combustion engines, such as fuel supply, air supply, gas distribution, cooling, lubrication, purification and exhaust gas recirculation systems were considered. The need was also noted for comprehensive optimization of the engine parameters and its main systems

Keywords

*Thermal power plant,
internal combustion engine,
diesel engine, gasoline engine,
automatic control system,
automatic regulation system*

Received 27.05.2022

Accepted 11.06.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Afanasyev V.N. *Teplotekhnika [Heat engineering]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.
- [2] Grigoryev V.A., Zorin V.M., eds. *Promyshlennaya teploenergetika i teplotekhnika. Kn. 4 [Industrial heat power and thermal engineering. Vol. 4]*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991.
- [3] Ponomarev V.M., Litvinov A.P., eds. *Osnovy avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya [Fundamentals of automatic regulation and control]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974.

- [4] Erofeev A.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2003.
- [5] Krutov V.I., ed. Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya [Fundamentals of automatic control theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984.
- [6] Pinskiy F.I., Davtyan R.I., Chernyak B.Ya. Mikroprotsessornye sistemy upravleniya avtomobilnymi dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [Microprocessor control systems for automobile combustion engines]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2001.
- [7] Lukov N.M. Avtomaticheskie sistemy upravleniya i regulirovaniya teplovozov [Automatic control and regulation systems for diesel locomotives]. Moscow, MIIT Publ., 1983.
- [8] Tolshin V.I., Sizykh V.A. Avtomatizatsiya sudovykh energeticheskikh ustanovok [Automation of ship power plants]. Moscow, RKonsult Publ., 2003.
- [9] Patrakhaltsev N.N. Neustanovivshiesya rezhimy raboty dvigateley vnutrennego sgoraniya [Unsteady modes of combustion engines]. Moscow, RUDN Publ., 2009.
- [10] Erokhov V.I. Toksichnost sovremennykh avtomobiley. Metody i sredstva snizheniya vrednykh vybrosov v atmosferu [Toxicity of modern cars. Methods and techniques for lowering hazardous emission into atmosphere]. Moscow, Forum Publ., 2013.
- [11] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of diesel exhaust gases]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002.
- [12] Kulchitskiy A.R. Toksichnost avtomobilnykh i traktornykh dvigateley [Toxicity of automobile and tractor engines]. Vladimir, VSU Publ., 2000.
- [13] Orlin A.S., Kruglov M.G., eds. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.
- [14] Lukanin V.N., Shatrov M.G., eds. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya rabochikh protsessov [Combustion engines. Theory of working processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010.
- [15] Ipatov I.I., Kutenev V.F., Luksho V.A., et al. Avtotransport i ekologiya megapolisov [Motor transport and ecology of metropolises]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011.
- [16] Lotko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. Primenenie alternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Using alternative fuels in combustion engines]. Moscow, MADI Publ., 2000.
- [17] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. Alternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, LLC "Inzhener" Publ., LLC "Oniko-M" Publ., 2012.
- [18] Vatolin D.S. LNG as a fuel for marine reciprocating engines. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2020, no. 3, pp. 28–34 (in Russ.).
- [19] Markov V.A., Sa Boven, Neverov V.A., et al. Toxicity of exhaust gas of a diesel engine firing diesel fuel added with vegetable oil. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2020, no. 4, pp. 18–24 (in Russ.).
- [20] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., eds. Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. 4. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Machine building. Encyclopedia. Vol. 4. Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013.

- [21] Pupkov K.A., Egupov N.D., eds. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. T. 1. Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automated control theory. Vol. 1. Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automated control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004.
- [22] Pupkov K.A., Egupov N.D., eds. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. T. 5. Metody sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automated control theory. Vol. 5. Methods of modern automated control theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004.
- [23] Pupkov K.A., Faldin N.V., Egupov N.D. *Metody sinteza optimalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of synthesis of optimal automatic control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000.
- [24] Vasilyev F.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow, Faktorial Press Publ., 2002.

Markov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A. Trends in improving automatic control and regulation systems of the thermal power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 1 (144), pp. 97–126 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-97-126>