

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.А. Марков

markov58@bmstu.ru

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

Аннотация

Удовлетворение жестких требований, предъявляемых к эксплуатационным показателям теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания, возможно лишь при оснащении энергетических установок системами автоматического управления и регулирования. Проанализированы направления совершенствования таких систем, среди которых выделено применение различных альтернативных моторных топлив. К перспективным альтернативным топливам следует отнести биотоплива и природный газ, а также безуглеродные топлива — водород и аммиак. Отмечено, что на современном этапе развития двигателестроения основными показателями, характеризующими работу двигателей внутреннего сгорания, являются их мощностные и динамические показатели, топливная экономичность и токсичность отработавших газов. Для улучшения таких показателей системы автоматического регулирования и управления должны реализовывать оптимизированные законы управления, которые обеспечивают согласование характеристик различных систем комбинированных двигателей внутреннего сгорания при изменении скоростного и нагрузочного режимов работы энергетических установок с учетом изменяющихся условий их эксплуатации. Наибольшие функциональные возможности имеют микропроцессорные системы автоматического управления и регулирования, построенные на элементной базе современной микропроцессорной техники. Такие системы позволяют обеспечить взаимосвязанное адаптивное управление параметрами теплоэнергетических установок

Ключевые слова

Теплоэнергетическая установка, двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, бензиновый двигатель, система автоматического управления, система автоматического регулирования, альтернативное топливо, природный газ

Поступила 11.11.2025

Принята 28.11.2025

© Автор(ы), 2026

*Работа подготовлена по материалам докладов ВНТК
им. профессора В.И. Крутова (29.01.2025)*

Введение. Динамичное развитие основных секторов промышленности, транспорта, сельского хозяйства невозможно без использования в них современных теплоэнергетических установок [1], особенностью которых является многорежимность, характеризующаяся частыми переходами от одного установившегося режима работы на другой и значительной долей неустановившихся режимов. Это характерно и для теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [2–4]. Такие теплоэнергетические установки потребляют до 70 % производимых в России нефтяных моторных топлив и выбрасывают в атмосферу до 80 % вредных веществ общего выброса всеми теплоэнергетическими установками [5, 6]. Задачи автоматизации работы, управления и регулирования этих теплоэнергетических установок весьма обширны — это поддержание параметров ДВС и их систем на заданном уровне, изменение параметров по требуемым законам, согласование характеристик и параметров работы систем двигателей: систем охлаждения, топливоподачи, воздухообеспечения, газораспределения, рециркуляции отработавших газов и др. Особенно это относится к мобильным энергетическим установкам, преимущественными режимами которых являются неустановившиеся режимы работы — переходные процессы.

Для выполнения таких функций ДВС оснащаются системами автоматического регулирования (САР) и системами автоматического управления (САУ) [7–10], которые должны способствовать обеспечению требуемых мощностных, динамических, топливно-экономических и экологических показателей ДВС. Системы управления и регулирования вносят коррективы в работу теплоэнергетических установок при изменении режима работы, а также при изменении условий эксплуатации — при смене атмосферных условий, свойств применяемого топлива и ряда других факторов.

Для современного двигателестроения приоритетными становятся экологические показатели ДВС, к которым относятся выбросы в атмосферу вредных веществ, — токсичность отработавших газов (ОГ) и шумность работы двигателей [11]. Кроме выбросов нормируемых токсичных компонентов — оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов и твердых частиц, учитываются также выбросы углекислого газа, который не является токсичным веществом, но способствует возникновению парникового эффекта. В связи с этим проводятся многочисленные исследования возможностей использования в ДВС безуглеродных топлив — водорода и аммиака, а также низкоуглеродных моторных топлив — биотоплив и природного газа [12–14]. Среди важных направлений совершенствования САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС следует выделить улуч-

шение статических и динамических показателей управления и регулирования этих систем, расширение их функциональных возможностей, совершенствование законов и алгоритмов, реализуемых САУ и САР, многосвязное многокритериальное управление процессами, протекающими в комбинированных ДВС и их системах [15–17].

Методы исследования САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС. При создании и совершенствовании САУ и САР применяются как аналитические методы, так и различные экспериментальные методы. При аналитических методах использованы фундаментальные законы механики, термодинамики, газовой динамики, теории рабочих процессов ДВС, теории автоматического регулирования и управления. При этом применены современные программные комплексы (ПК), известные методы анализа и синтеза САУ и САР, методы оптимизации, современные аналитические и численные методы реализации математических моделей [18–20]. При экспериментальных методах использованы методы планирования эксперимента, обработки экспериментальных данных, определения погрешностей измерения параметров ДВС, САР и САУ.

Основное содержание выполненных исследований. Во вступительном слове председательствующий профессор В.А. Марков (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отметил выдающуюся роль основателя конференции профессора В.И. Крутова в развитии теории автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок с ДВС. Отмечено, что обсуждаемые на конференции доклады посвящены не только проблемам разработки и совершенствования САУ и САР ДВС, но и смежным проблемам совершенствования мощностных и топливно-экономических характеристик двигателей, улучшения экологических показателей ДВС, использования в них различных альтернативных топлив.

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели направления развития работ по созданию электронного блока САУ поршневыми двигателями. Разработан макетный экземпляр электронного блока, успешно прошедший испытания на одноцилиндровом отсеке перспективного дизельного двигателя типа Д500. Это комбинированный V-образный четырехтактный ДВС размерностью 26,5/31 в 12-, 16-, 20-цилиндровом исполнении с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха, предназначенный для широкого ряда промышленных изделий нового поколения: в том числе тепловозов и атомных электростанций. После доработок изготовлен опытный образец блока для системы управления двигателем, конвертированным на газовое топливо. Такой газопоршневой двигатель предназначен для энергоцентра, в состав которого входит элек-

тостанция и блок когенерации энергии ОГ. В настоящее время система автоматики энергоцентра содержит большое число зарубежных компонентов (электронных блоков различного назначения). Одной из задач исследования являлась максимальная степень их замещения отечественными разработками. Необходимо также максимальное использование в САУ и САР отечественных датчиков режимных параметров, исполнительных устройств и механизмов. В процессе исследований проведены как натурные, так и полунатурные испытания. Для осуществления полунатурных испытаний разработана и верифицирована математическая модель газопоршневого двигателя. Проведено компьютерное моделирование САУ двигателем, по результатам которого отмечена эффективность использования разработанного блока управления в составе двигателя.

Хрящёв Ю.Е., Овчинников С.В., Тихомиров М.В., Малышев Д.М., Антошин Р.О., Чуркин М.А., Рожкова Т.А., Михайлова Е.Е. (ЯГТУ, ООО «Электротехнический завод ЭЛЗА», г. Ярославль) представили результаты разработки САУ нагружающим устройством испытательного стенда ДВС. Целями работ являлись проектирование САУ, системы сбора данных, исполнительного механизма нагружающего устройства, а также разработка программного обеспечения САУ. Приведены результаты модернизации нагружающего устройства испытательного стенда ДВС и разработки САУ, обеспечивающей необходимую точность, эффективность тестирования и безопасность. Рассмотрены состав и элементная база системы управления нагружающим устройством, логическая и структурная схемы испытательного стенда и его САУ, конструктивные особенности оригинальных исполнительных механизмов для испытательного стенда. Рассмотрена структурная схема выбора режима нагружающего устройства, описано программное обеспечение для его взаимодействия со стендом и алгоритмы управления, приведен пример настройки программы испытаний, показаны рабочие характеристики стенда. Разработка нашла применение в экспериментальном производстве и может быть использована как в серийном производстве на предприятиях двигателестроительной отрасли, так и на предприятиях автосервиса.

Дунин А.Ю., Пронченко Г.В., Филиппова Е.М., Филиппов В.Р. (МАДИ) проанализировали возможности улучшения экологических и экономических показателей дизельных двигателей при повышении давления наддува. Показано, что современные двигатели грузовых автомобилей имеют высокую степень форсирования — их среднее эффективное давление составляет 1,9...2,2 МПа. Двигатели следующего поколения будут иметь среднее эффективное давление 2,5 МПа, требуемое давление наддувочного воздуха

будет превышать 0,4 МПа. В этом случае необходимо применять двухступенчатый наддув с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Исследован двухступенчатый наддув двигателя при реализации цикла Миллера, который снижает температуру свежего заряда за счет раннего закрытия впускного клапана за 40...70 град п.к.в. до НМТ. С использованием ПК AVL Boost разработана методика подбора турбокомпрессоров двухступенчатой системы наддува двигателя типа КамАЗ (6 ЧН 13/15) с турбокомпрессором типа Garrett G45-1600 первой ступени и турбокомпрессором типа Garrett G42-1450 второй ступени. Двигатель имел мощность 453 кВт (среднее эффективное давление 2,4 МПа) при частоте вращения 1900 мин⁻¹. Проведены расчетные исследования рабочего процесса базового двигателя (без реализации цикла Миллера) и двигателя с двумя вариантами реализации цикла Миллера (обычного и глубокого — с закрытием впускного клапана, при 40 и 70 град п.к.в. до НМТ) на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ). На режиме максимальной мощности в базовом двигателе удельный эффективный расход топлива составил 198 г/(кВт · ч), выбросы оксидов азота 0,82 г/(кВт · ч), максимальное давление сгорания 22,6 МПа. При реализации обычного цикла Миллера удельный эффективный расход топлива уменьшился на 5 %, а выбросы оксидов азота снизились на 30 %. При реализации глубокого цикла Миллера удельный эффективный расход топлива и выбросы оксидов азота снизились на 12 и 59 %. Проведено моделирование процесса смесеобразования в автомобильном двигателе с номинальной частотой вращения 2400 мин⁻¹ и аккумуляторной топливной системой при давлении топлива в аккумуляторе 300 МПа с использованием ПК Дизель-РК. Исследованы распылители двух типов с малым 0,12 и средним 0,24 мм диаметрами распыливающих отверстий при неизменном числе отверстий, равном 8. Показано, что при малых отверстиях увеличивается продолжительность сгорания, а при средних отверстиях повышается доля топлива, поданного за период задержки воспламенения. На режиме максимальной мощности замена распылителей со средним диаметром отверстий на распылители с малым диаметром отверстий позволила снизить содержание оксидов азота в ОГ с 1150 до 650 ppm.

Гофман М.Д., Стряпунин А.С., Шатров М.Г., Яковенко А.Л. (МАДИ) провели исследование структурного шума дизельного двигателя от рабочего процесса на режимах работы в составе транспортного средства. Поскольку в условиях городского движения автомобиль значительное время движется с переменной скоростью, то возникает необходимость моделирования шума не только на установившихся режимах, но и в переход-

ных процессах. Для моделирования работы двигателя в составе транспортного средства при различных условиях его движения использован ПК AVL CRUISE M. Приведены методика и результаты исследования структурного шума, возникающего от рабочего процесса двигателя типа 4 ЧН 11/12,5, на стенде при работе по стационарному 13-режимному циклу, а также на неустановившихся режимах двигателя, работающего в составе грузового автомобиля. Выполнено моделирование разгона грузового автомобиля с измерением его внешнего шума согласно Правилам ЕЭК ООН № 51¹. Показаны отличия шума исследуемого двигателя при разгоне автомобиля на различных передачах и с разной загрузкой. В результате моделирования шума от рабочего процесса двигателя в составе автомобиля на режиме разгона выявлено, что общий уровень звуковой мощности от рабочего процесса достигает 98 дБ. Максимальная шумность двигателя отмечена на режимах ВСХ в диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя от 1800 до 2400 мин⁻¹, а также на режимах с номинальной частотой вращения вала двигателя 2400 мин⁻¹, при нагрузках соответствующих изменению крутящего момента двигателя от 200 до 370 Н · м (последнее значение — режим максимальной мощности). Приведены направления дальнейшей работы по моделированию двигателя в составе транспортного средства для оценки влияния условий его эксплуатации на структурный шум двигателя.

Александров А.В., Морозкин Т.В. (МАДИ) проанализировали взаимосвязь динамики вращения коленчатого вала и действующих на него крутящих моментов. Эту взаимосвязь можно использовать для разработки методики косвенного индицирования процессов, происходящих в цилиндрах ДВС. Такая методика подразумевает определение эффективного крутящего момента в каждом цилиндре на основании отклика — изменения частоты вращения коленчатого вала. Рассмотрены две формы связи: дифференциальная, характеризующая взаимосвязь ускорения коленчатого вала с крутящим моментом, и интегральная, характеризующая взаимосвязь кинетической энергии подвижных деталей двигателя с работой газовых сил. На практике значительную сложность составляет как определение угловой скорости коленчатого вала, так и определение действующих на него крутящих моментов. Рассмотрены проблемы определения угловой скоро-

¹ ГОСТ 41.51-99 (Правила ЕЭК ООН № 51). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств, имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими шумом. М., ИПК Изд-во стандартов, 2000.

сти вращения коленчатого вала на основании сигнала штатного датчика положения, приведены методика определения моментов сил трения и полезной нагрузки и экспериментальная методика определения момента инерции вращающихся деталей. Определены фронты сигнала датчика поворота коленчатого вала и выполнен расчет на их основании дифференцируемого графика скорости. Рассмотрены определение и компенсация дефектов инкрементного колеса, а также учет влияния крутильных колебаний на рассчитываемые параметры вращения коленчатого вала. Отмечено, что основное преимущество косвенного индицирования процессов в ДВС, базирующегося на оценке динамики вращения коленчатого вала, заключается в отсутствии дополнительных датчиков, но точность такого индицирования сравнительно невысока. Такое косвенное индицирование актуально при оценке характера рабочего процесса при эксплуатации транспортного средства, а также для верификации результатов прямого индицирования двигателя в составе энергетической установки.

Максимов И.В., Синявский В.В. (МАДИ) спрогнозировали возможности улучшения показателей газодизельного двигателя при использовании дизельных форсунок уменьшенных размеров и оптимизированной камеры сгорания (КС) [21]. Проанализирована возможность улучшения показателей газодизельного двигателя типа КамАЗ грузового автомобиля при установке форсунок меньшего размера. Это позволяет обеспечить их лучшее охлаждение нефтяным дизельным топливом (ДТ) и снизить запальную порцию его с 15 до 6 %. Замена штатных форсунок на форсунки уменьшенных размеров не исключает возможность работы двигателя на режиме с полной нагрузкой. В случае отсутствия природного газа (ПГ) у автомобиля остается возможность двигаться на «аварийном дизельном режиме» с уменьшенной скоростью. Использование уменьшенных форсунок позволяет заменить штатную дизельную КС на камеру, в большей степени адаптированную к работе двигателя на газовом топливе. Расчеты показателей двигателя выполнялись с помощью ПК AVL FIRE на режиме максимального крутящего момента. Исследованы штатные дизельные КС (цилиндрическая и смещенная цилиндрическая), а также опытные КС (коническая и омегаобразная). На режиме с полной нагрузкой замена штатных КС и форсунок на коническую КС и уменьшенные форсунки позволила снизить на 21 % выбросы с ОГ оксидов азота и на 34 % несгоревших углеводородов. При этом индикаторный КПД снизился на 1 %, однако в связи с уменьшением запальной порции ДТ затраты на топливо уменьшились на 10,3 %. На режиме с частичной нагрузкой (25 % номинальной) и запальной порцией топлива (25 % общей подачи топлива)

содержание в ОГ оксидов азота увеличилось на 25 %, но их абсолютная концентрация в ОГ оказалась низкой. При этом выбросы несгоревших углеводородов уменьшились на 34 %, а индикаторный КПД двигателя увеличился на 1 %.

Душкин П.В., Кремнев В.В., Ховренок С.С. (НАМИ) представили методику формирования топливных адаптаций для двигателя с искровым зажиганием. Отмечено, что комплексное управление коэффициентом избытка воздуха бензинового двигателя с использованием пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора не всегда обеспечивает требуемую точность управления. В этом случае отклонения коэффициента избытка воздуха от его заданных значений обусловлены динамическими процессами в системах топливоподачи и воздухообеспечения, а также рядом конструктивных и эксплуатационных факторов. Обоснована необходимость использования топливных адаптаций при разработке таких САУ двигателями с искровым зажиганием. Под топливной адаптацией в данном случае понимается коррекция работы α -регулятора с λ -зондом в зависимости от режима работы ДВС. В процессе эксплуатации двигателя эти адаптации сохраняются в энергонезависимой памяти микроконтроллера САУ. Предложенная методика предполагает использование ПИ-регулятора топливоподачи, модели прогноза состава смеси в выпускной системе и искусственной нейронной сети типа «дерево локально-линейных моделей». Преимуществами использования предложенной методики являются повышение запаса устойчивости САУ при изменении уставки коэффициента избытка воздуха за счет прогноза состава смеси в выпускной системе и возможность сохранения работоспособности системы в отсутствии информации с λ -зонда (в частности, при холодном запуске двигателя и пропусках воспламенения). Проанализированы особенности построения рассматриваемой САУ при использовании топливных адаптаций и предварительные результаты ее работы на двигателе. Разработанная методика универсальна и может быть использована для различных задач адаптивного управления системами ДВС.

Гришин Ю.А., Сасунов Р.Ш. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели особенности реализации регулируемого динамического наддува в ДВС. Отмечено, что периодичность процессов в цилиндрах ДВС является причиной колебательных динамических явлений в газоздушных трактах. Эти явления могут быть использованы для улучшения мощностных и топливно-экономических показателей ДВС. При впуске во впускном патрубке двигателя перед клапаном образуется разрежение, и соответствующая волна разрежения, пришедшая к противоположному концу индиви-

дуального впускного трубопровода, отражается волной сжатия. Путем подбора длины и проходного сечения индивидуального трубопровода можно добиться прихода этой волны к цилиндру в наиболее благоприятный момент перед закрытием клапана, что приводит к заметному увеличению коэффициента наполнения. Как следствие, достигается прирост мощности и крутящего момента двигателя до 10...15 %. Примером практического использования динамического наддува является отечественный автомобильный двигатель типа ЗМЗ-4062.10 (4 Ч 9,2/8,6) с распределенным впрыском бензина и с настроенными индивидуальными впускными трубопроводами на каждый из четырех цилиндров. Другой пример — стационарный дизельный двигатель типа 2 Ч 8,5/11 электрогенератора, имеющий один настроенный трубопровод на два цилиндра. Используется этот эффект и в зарубежных двигателях. В качестве объекта расчетных исследований выбран автомобильный дизельный двигатель типа ЗМЗ-5143 (4 ЧН 8,7/9,4) с топливным насосом типа VE, с регулируемой системой турбонаддува и системой рециркуляции ОГ. С использованием численного метода распада произвольного разрыва (схема С.К. Годунова) определены оптимальные геометрические параметры впускных труб, обеспечивающих динамический наддув в дополнение к газотурбинному наддуву. При внутреннем диаметре трубопровода 42 мм на номинальном режиме при частоте вращения 4000 мин^{-1} длина трубопровода должна составлять 560 мм. На режиме максимального крутящего момента при частоте вращения 2100 мин^{-1} эта длина равна 1135 мм. В результате исследований выявлено, что при реализации динамического наддува имеется возможность форсирования этого двигателя по мощности и снижения удельного эффективного расхода топлива на 4 %.

Ольховой М.Г., Адгамов И.Ф., Шаталов К.В. (25-й ГосНИИ химмотологии МО РФ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели анализ влияния режимов работы бензинового двигателя на образование высокотемпературных отложений в его цилиндропоршневой группе. Объектом исследования являлся авиационный двухтактный двухцилиндровый двигатель типа РМЗ-500 (2 Ч 7,2/6,1) с рядным расположением цилиндров, воздушной системой охлаждения, поршневым управлением пуском, карбюраторным смесеобразованием и электронной системой зажигания. Двигатель с рабочим объемом 4,967 л имел максимальную мощность 36,5 кВт при частоте вращения коленчатого вала 6500 мин^{-1} . Диапазоны исследованных режимов: частота вращения коленчатого вала 3200...4000 мин^{-1} , температура головки цилиндра 190...220 °С, открытие дроссельной заслонки 100 %, открытие дроссельной заслонки 100 %, открытие дроссельной заслонки 100 %.

продолжительность испытаний 16 ч. Двигатель исследован на моторном стенде с динамометрическим нагружающим устройством на топливо-масляной смеси, содержащей 98 % (об.) товарного автомобильного бензина марки АИ-92-К5 и 2 % (об.) моторного масла марки «Лукойл МОТО 2Т», производимого на минеральной основе (базовое масло первой группы по классификации API) с вовлечением многофункционального пакета присадок. Исследовано влияние частоты вращения коленчатого вала и температуры головки двигателя на образование высокотемпературных отложений на деталях КС — на юбке поршня, поршневых кольцах, свече зажигания. Подтверждена общая тенденция роста высокотемпературных отложений (нагара и лака) с повышением температуры головки двигателя. Приведены зависимости толщины нагара в поршневых канавках и их загрязненности от частоты вращения вала и температуры головки двигателя. Выявлено, что количество нагара и загрязненность поршневых канавок имеют наибольшие значения при работе двигателя на режимах с частотой вращения 3400...3700 мин⁻¹. Отмечено, что для потери подвижности поршневого кольца достаточно образования лаковых отложений в зазоре между поршневым кольцом и полками поршневой канавки.

Плахов С.В., Фурман В.В., Марков В.А., Черезов И.А., Бирюков С.В. (ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили САУ топливоподачей тепловозного двухтопливного дизельного двигателя и результаты ее экспериментальных исследований. Показана целесообразность конвертирования этого двигателя для работы на природном газе (ПГ) по газодизельному циклу, при реализации которого ПГ воспламеняется от запальной дозы нефтяного ДТ. При такой работе двигателя обеспечиваются стабильное воспламенение топливовоздушной смеси в широком диапазоне эксплуатационных режимов и приемлемые значения показателей жесткости сгорания топлива. Разработана система электронного управления топливоподачей типа СУДМ.03 для тепловозного двигателя Д50 (6 ЧН 31,8/33,0), в которой подача ПГ осуществляется индивидуально по цилиндрам двигателя электроуправляемыми газовыми клапанами, установленными возле впускных клапанов каждого цилиндра, а подача запального ДТ — с помощью электроуправляемых топливных насосов высокого давления (ТНВД) с быстродействующими клапанами, размещенными в линиях высокого давления ТНВД. Экспериментальные исследования показали, что установка этой САУ на двигатель, работающий на режимах тепловозной характеристики, обеспечивает замещение

ДТ ПГ в количестве 60,3...94,1 % (масс.). В режимах маневровой работы тепловоза такое замещение за смену (за 12 ч) составило 89,7 %. Замена штатных распылителей (с девятью распыливающими отверстиями диаметром 0,38 мм) модифицированными (с тремя отверстиями диаметром 0,35 мм) заметно повысила процент замещения ДТ ПГ. На первой позиции контроллера машиниста (КМ) процент замещения увеличился от 60,3 до 79,7 % (масс.), на второй — от 74,1 до 88,7 % (масс.), на третьей — от 80,3 до 83,0 % (масс.), на четвертой — от 85,4 до 91,0 % (масс.). Перевод двигателя с дизельного цикла на газодизельный сопровождался заметным снижением дымности ОГ: на первой позиции КМ на 19,6 % (масс.), на второй на 13,0 % (масс.), на третьей на 5,9 % (масс.), на четвертой на 10,3 % (масс.).

Силюта А.Г., Савастенко А.А., Савастенко Э.А. (АО «ВНИИЖТ», МАДИ) представили метод обеспечения воспламенения смесового топлива в цилиндрах газодизельных тепловозных двигателей. В этих двигателях обычно реализуется газодизельный цикл, в котором воспламенение газового топлива в КС происходит от теплоты сгорания запальной дозы нефтяного ДТ. Рассмотрены причины неустойчивой работы газодизельных двигателей тепловозов на режимах малых нагрузок и холостого хода. К этим режимам относятся режимы, соответствующие позициям КМ от нулевой до четвертой, на которых тепловозный двигатель работает 70...90 % общего времени эксплуатации. В результате испытаний газодизельного двигателя тепловоза типа ТЭМ18-001 выявили, что для обеспечения гарантированного воспламенения смесового топлива во всем диапазоне рабочих режимов необходимо обеспечить определенную объемную концентрацию ПГ в смеси. На режимах, соответствующих четвертой и третьей позициям КМ, необходимо обеспечение объемной концентрации ПГ в смеси не более 4,09 и 3,95 %. Для этого перед впускным коллектором двигателя устанавливается дроссельная заслонка. На режимах малых нагрузок (вторая и первая позиции КМ) и на режиме холостого хода (нулевая позиция КМ) обычно реализуется работа только на нефтяном ДТ. Проведен анализ возможности регулирования объемной концентрации ПГ отключением части цилиндров и обоснованы пределы их отключения с учетом ограничений по крутящему моменту, температуре ОГ и максимальному давлению сгорания. На режимах, соответствующих второй и первой позициям КМ, и режиме холостого хода возможно обеспечение объемной концентрации ПГ в смеси, равной 4,08...9,93 % при отключении части цилиндров (двух цилиндров на второй позиции КМ; четырех или пяти цилиндров на первой позиции КМ; пяти цилиндров на режиме холо-

стого хода). Регулирование рабочего объема двигателей уже используется в качестве инструмента количественного регулирования объемной концентрации ПГ для обеспечения гарантированного воспламенения смесевых топлив в КС. При этом температура ОГ перед турбиной не превысила 540 °С, максимальное давление сгорания 8,5 МПа.

Кулешов А.С., Кулешов А.А., Марков В.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты расчетных исследований параметров поршневого двигателя, конвертированного для работы на пропан-бутановых смесях (сжиженном углеводородном газе, СУГ). Рассмотрены преимущества использования СУГ в качестве газомоторного топлива и проблемы конвертирования двигателей для работы на таких смесях. Обоснован выбор организации рабочего процесса двигателя, конвертируемого для работы на СУГ, заключающийся в подаче СУГ в газовой фазе вблизи впускных клапанов каждого цилиндра. Исследования двигателя типа КамАЗ 445 (4 ЧН 10,7/12,4) при работе на режиме максимальной мощности при частоте вращения 2300 мин⁻¹ и на режиме холостого хода при частоте вращения 700 мин⁻¹ выполнены с использованием ПК «Дизель-РК». Для организации работы двигателя на СУГ степень сжатия должна быть уменьшена до 9,5, а коэффициент избытка воздуха должен составлять ~ 1,4. На режиме максимальной мощности степень повышения давления в компрессоре должна быть равна 1,7, что значительно меньше, чем у исходного дизельного двигателя (2,63). Для регулировки наддува двигатель должен быть оборудован дроссельной заслонкой, установленной перед впускным коллектором. Воспламенение СУГ в цилиндре двигателя целесообразно осуществлять свечой зажигания, установленной непосредственно в цилиндре. Оптимальный угол опережения зажигания равен 20 град п.к.в. до ВМТ. На режиме холостого хода необходимо дросселировать наддувочный воздух до давления 0,31 бар (абс.). Для увеличения мощности двигателя, работающего на СУГ, желательно перейти на номинальную частоту вращения, равную 2600 мин⁻¹, и использовать вместо пропан-бутановой смеси ПБА (пропан-бутан автомобильный), содержащей 50 ± 10 % пропана, пропан автомобильный, включающий 90 ± 10 % пропана. Желателен переход от КС типа double lip исходного двигателя к цилиндрической КС. Снижение детонации и увеличение мощности двигателя, работающего на СУГ на режимах с полной нагрузкой, достигается при подаче воды на впуске для увеличения до 10 % влагосодержания рабочей смеси. Совместная реализация этих мероприятий позволит увеличить максимальную мощность двигателя до 136...140 кВт.

Камалтдинов В.Г., Попов А.Е., Лысов И.О., Добрынин Т.Д., Гонтарев Е.П. (ЮУрГУ, ЧАТТ, г. Челябинск) провели экспериментальные исследования процесса сгорания метановоздушных смесей с искровым зажиганием в камере постоянного объема. Приведены результаты экспериментов процессов смесеобразования, принудительного зажигания и сгорания метановоздушной смеси в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха от 0,86 до 1,5 при начальной температуре 293 К в КС постоянного объема диаметром 225 мм с регистрацией на скоростную видеокамеру. На первом этапе исследований по КС развивалось голубое пламя с различной яркостью свечения. На втором этапе происходило объемное сгорание всей охваченной голубым пламенем смеси с ярким оранжевым или белым свечением. Максимальная скорость развития фронта голубого пламени зафиксирована при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,05. В начале процесса она равна 0,88 м/с с постепенным снижением до 0,62...0,75 м/с. По мере обеднения горючей смеси за счет увеличения подачи воздуха скорость развития фронта голубого пламени снижалась. При коэффициенте избытка воздуха 1,27 максимальная скорость составила 0,50 м/с со снижением до 0,38 м/с. При коэффициенте избытка воздуха 1,5 яркость свечения голубого пламени значительно уменьшилась и скорость его развития составила всего 0,13...0,25 м/с. Богатая смесь с коэффициентом избытка воздуха 0,86 сгорала с меньшей скоростью, чем при коэффициенте избытка воздуха 1,05, но с большей, чем при его значении, равном 1,27, а максимальная скорость развития фронта голубого пламени составила 0,62 м/с.

Камалтдинов В.Г., Нефёдов С.В., Лысов И.О., Попов А.Е., Добрынин Т.Д., Ефимов Ю.А. (ЮУрГУ, г. Челябинск, УДМЗ, г. Екатеринбург) представили обзор литературных источников по применению активных форкамер в современных газопоршневых двигателях, работающих на обедненных метановоздушных смесях. В результате проведенного анализа определено, что на промышленных газопоршневых двигателях с большим объемом цилиндра для работы на бедных рабочих смесях преимущественно применяется форкамерно-факельное зажигание. При этом за счет образования нескольких очагов воспламенения обеспечивается надежное воспламенение и эффективное сгорание бедных газозвудушных смесей с минимальной токсичностью ОГ. Установлено, что лучшие результаты при работе на бедных смесях достигают при использовании активных форкамер, позволяющих при независимой подаче топлива в форкамеру получать достаточно богатую смесь. Искровое воспламенение и сгорание этой смеси приводит к образованию нескольких турбулентных газовых струй с продуктами частичного сгорания, вырывающихся с большой ско-

ростью из сопел форкамеры. В результате взаимодействия этих струй, имеющих высокие тепловую и кинетическую энергии, и ионизационные эффекты, с бедной газовойсмесью в основной КС происходит воспламенение смеси с формированием горящих факелов. Быстрое развитие этих факелов и обеспечивает эффективное и полное сгорание даже самых бедных газовойсмесей с коэффициентом избытка воздуха 2,5. Также установлено, что для эффективной работы форкамерных двигателей должны выполняться оптимальные соотношения основных конструктивных параметров форкамеры: объема, площади горловины, диаметров и числа сопловых отверстий. На основании проведенного анализа разработана форкамера с узкой горловиной и оптимальными соотношениями основных параметров для газопоршневого двигателя типа ЧН 18,5/21,5.

Камалтдинов В.Г., Попов А.Е., Лысов И.О., Фурзиков В.В. (ЮУрГУ, г. Челябинск, УДМЗ, г. Екатеринбург) рассчитали параметры регулировок и рабочего цикла одноцилиндрового дизельного двигателя, работающего на режиме обкатки после ремонта. Приведены результаты моделирования рабочих циклов одноцилиндрового дизельного двигателя типа ЧН 18,5/21,5 на восьми режимах обкатки от холостого хода при частоте вращения коленчатого вала 500 мин⁻¹ до нагрузки 100 % при частоте вращения 1900 мин⁻¹ после проведения ремонта. По результатам моделирования рабочего цикла двигателя для каждого из указанных режимов установлено, что с увеличением частоты вращения коленчатого вала от 500 до 1900 мин⁻¹ для плавного увеличения нагрузки на двигатель и, соответственно, на пары трения, необходимо одновременно пошагово увеличивать цикловую подачу топлива и угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) (с работой на каждом промежуточном режиме не менее 30 мин). Рекомендуемый диапазон изменения УОВТ составляет 3...12 град п.к.в. до ВМТ. По расчетной оценке при повышении эффективной мощности от 3 до 100 % полной нагрузки цикловую подачу топлива необходимо увеличить более чем в 5,5 раза от режима холостого хода. Это приведет к значительному повышению (в ~ 4,7 раза) максимального давления сгорания в цилиндре и механической нагруженности деталей кривошипно-шатунного механизма. В то же время максимальная температура сгорания, характеризующая тепловую напряженность деталей рабочего пространства дизельного двигателя, которая особенно важна при обкатке двигателя, увеличится не столь существенно: всего на 24,6 % (от 1400 до 1745 К). Такие режимы обкатки обеспечат длительную последующую работу дизельного двигателя.

Камалтдинов В.Г., Лысов И.О., Попов А.Е., Фурзиков В.В. (ЮУрГУ, г. Челябинск, УДМЗ, г. Екатеринбург) расчетным путем спрогнозировали

параметры рабочего цикла одноцилиндрового дизельного двигателя типа ЧН 18,5/21,5 на нагрузочных режимах. С использованием разработанной математической модели проведены расчетные исследования параметров рабочего цикла указанного двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1800 мин^{-1} и изменении нагрузки от 40 до 100 % при постоянных регулировочных параметрах топливоподачи и воздухообеспечения. Полученные значения показателей рабочего цикла на указанных режимах позволили сделать следующие прогнозы. Для повышения эффективной мощности двигателя от 40 до 100 % при постоянной цикловой подаче свежего заряда (воздуха) и постоянном УОВТ потребуется увеличить в 2,35 раза цикловую подачу топлива. При этом продолжительность сгорания топлива увеличится от 38 до 60 град п.к.в. В результате для заданного повышения эффективной мощности двигателя потребуется увеличить на ~ 51 % индикаторную мощность рабочего цикла. Одновременно увеличится на 15 % удельный индикаторный расход топлива и уменьшится до 0,5047 (на ~ 15,2 %) индикаторный КПД двигателя. В то же время при сохранении неизменными УОВТ, а также значений давления и температуры свежего заряда в начале сжатия максимальное давление сгорания останется на том же уровне, а коэффициент избытка воздуха снизится с 4,35 до 1,85. Это приведет к одновременному повышению до 1815 К максимальной температуры сгорания и до 875 К температуры газов на выходе из цилиндра.

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Слепцов О.Н., Неверов В.А., Остроухов А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели анализ статических и динамических характеристик дизельного двигателя с турбокомпрессором и приводным компрессором. С использованием ПК «Дизель-РК» выполнен сравнительный анализ статических показателей двигателя типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5) со штатной системой газотурбинного наддува и системой наддува с приводным компрессором. Исследованы установившиеся режимы ВСХ с частотами вращения 2400, 2000, 1600, 1200 и 800 мин^{-1} . Показано, что замена системы наддува с турбокомпрессором системой наддува с приводным компрессором оказывает заметное влияние на статические показатели двигателя. При такой замене отмечено уменьшение на 5,8...6,6 % эффективной мощности двигателя, увеличение на 6,1...8,5 % удельного эффективного расхода топлива, снижение в 1,6–2,1 раза дымности ОГ, увеличение в 1,4–2,0 раза концентрации в них оксидов азота и на 6,1...8,4 % выброса диоксида углерода. Схема системы наддува оказывает определяющее влияние и на динамические показатели двигателя. Проведены расчетные исследования двигателя типа Д6Н (6 ЧН 15/18), работающего в составе дизель-генераторной установки (ДГУ). Проведена оценка динамических качеств

двигателя с системой газотурбинного наддува и двигателя, оснащенного силовой турбиной и приводным компрессором. С использованием ПК SimInTech исследован переходный процесс наброса полной нагрузки на двигатель на скоростном режиме с частотой вращения 1500 мин^{-1} . Замена системы газотурбинного наддува силовой турбиной и приводным компрессором приводит к сокращению продолжительности этого процесса с 3,07 до 2,82 с. При этом выполняются требования ГОСТ Р 55231–2012², устанавливающего для САР второго класса точности предельное значение продолжительности переходного процесса на уровне 3 с. Провал частоты вращения в переходном процессе увеличился от 2,3 до 2,6 %. Однако такое перерегулирование существенно меньше предельного значения перерегулирования (7,5 %), допускаемого ГОСТ Р 55231–2012. Отмечено, что на установившихся режимах преимущества имеют двигатели с турбонаддувом, а на неустановившихся — двигатели с приводным компрессором.

Марков В.А., Девянин С.Н., Слепцов О.Н., Неверов В.А., Болдырев А.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева) исследовали процесс топливоподачи смесевых топлив с добавками рапсового масла (РМ). Отмечено, что использование смесей нефтяного ДТ и РМ в качестве моторного топлива для дизельного двигателя сдерживается различиями свойств этих топлив, наиболее выраженными при низких температурах. Отмечено, что снижение температуры топлива оказывает наибольшее влияние на его кинематическую вязкость. В частности, при температуре 50°C кинематическая вязкость нефтяного ДТ составляет $\sim 4 \text{ мм}^2/\text{с}$, а вязкость РМ — $\sim 30 \text{ мм}^2/\text{с}$. При снижении температуры топлива до 10°C кинематическая вязкость нефтяного ДТ и РМ возрастает до 7 и $100 \text{ мм}^2/\text{с}$. Предложены формулы, описывающие зависимости вязкости нефтяного ДТ, РМ и их смесей от температуры. Рассмотрены свойства смесей нефтяного ДТ с РМ с его содержанием в смеси 0...25 % (об.). Показано, что при переходе от летнего ДТ к его смеси с РМ с содержанием масла 10 % (об.) температура помутнения повышается на $0,4^\circ\text{C}$, а предельная температура фильтрации повышается на 4°C . С помощью ПК Ansys Fluent смоделировано стационарное течение топлива в проточной части распылителя форсунки двигателя типа Д-245 (4 ЧН 11/12,5). Получены средние по выходному сечению распыливающего отверстия значения параметров потока топлив при неизменном давлении 51,5 МПа на входе в распыли-

² ГОСТ Р 55231–2012. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия. М., Стандартинформ, 2013.

тель форсунки при противодавлении 8,9 МПа. Отмечено, что определяющее влияние на процесс распыливания топлива оказывает кинетическая энергия турбулентности потока в распыливающем отверстии. При кинематической вязкости топлива 3,8 мм²/с средняя кинетическая энергия турбулентности на выходе из распыливающего отверстия составляет 2200 м²/с², а при кинематической вязкости топлива 87 мм²/с эта энергия снижается до 1450 м²/с². Приведенные значения параметров потока топлива на выходе из распыливающего отверстия использованы при расчете динамики распространения струй топлива в КС двигателя.

Вальехо Мальдонадо П.Р., Девянин С.Н., Марков В.А., Блинов А.С., Шлёнов М.И. (РУДН, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели оценку влияния угла опережения впрыскивания топлива на показатели дизельного двигателя, работающего на нефтяном ДТ и РМ. В качестве объекта исследования выбран двигатель типа МД-6 (1 Ч 8,0/7,5) без наддува, имеющий КС в поршне и объемно-пленочное смесеобразование. При испытаниях этот двигатель работал в составе миниэлектростанции типа АД4-Т400-В. Двигатель в составе электростанции работал на режимах регуляторной характеристики практически при постоянной частоте вращения, равной ~ 3000 мин⁻¹. При переводе этого двигателя с ДТ на РМ отмечены ухудшение качества впрыскивания и распыливания топлива, рост удельного эффективного расхода топлива, ухудшение экологических показателей. Эти явления отчасти устраняются при регулировании УОВТ. Перевод двигателя на РМ приводит к значительному росту эмиссии монооксида углерода. При его работе на РМ на режиме с полной нагрузкой (среднее эффективное давление 0,42 МПа) с УОВТ, равным 25 град п.к.в. до ВМТ, содержание монооксида углерода в ОГ составляет 9000 ppm, что на порядок превышает аналогичный показатель двигателя, работающего на ДТ. Заметное снижение выброса этого токсичного компонента достигается путем увеличения УОВТ. При работе на РМ на указанном режиме увеличение УОВТ до 33 град п.к.в. до ВМТ позволяет снизить содержание монооксида углерода в ОГ до 2600 ppm. Это объясняется тем, что при работе двигателя на РМ на этом режиме с УОВТ, равными 25 и 33 град п.к.в. до ВМТ, коэффициент избытка воздуха оказался равным 1,2 и 1,6, а содержание кислорода в ОГ 6 и 10 %. На этом же режиме работы на РМ увеличение УОВТ от 25 до 33 град п.к.в. до ВМТ приводит к снижению дымности ОГ до 4 единиц по шкале Bosch (на 13 %).

Лебедев А.В., Муратов А.В. (СамГУПС, г. Самара) проанализировали возможности повышения эффективности работы тепловозных дизельных

двигателей в эксплуатации. Отмечено, что основным критерием, характеризующим энергоэффективность тепловозов, работающих на ДТ, является удельный эффективный расход топлива. На эксплуатационный расход топлива влияют следующие факторы: тип двигателя, его технические характеристики, масса поезда, особенности участка пути, квалификация машиниста и др. Для эффективной работы двигателей обычно повышают массу грузовых поездов. Для оценки повышения энергоэффективности проведены тяговые расчеты с использованием характеристик исследуемого участка. В качестве тяговых единиц подвижного состава использованы тепловозы серии 2ТЭ10М и локомотивы более мощной серии 2ТЭ25КМ и 2ТЭ116У. Показано, что применение поездов с повышенной массой снижает на 9...10 % эксплуатационный расход топлива. В качестве другого мероприятия рассмотрено использование электронной САУ подачи топлива для оптимального регулирования УОВТ. Показано, что в двигателе типа K6S310DR (6 ЧН 31/36) на режиме максимальной мощности 990 кВт при частоте вращения 750 мин^{-1} , степени сжатия 14 и уменьшении УОВТ с 24 до 18 град п.к.в. до ВМТ удельный эффективный расход топлива снижается на $12 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, а содержание оксидов азота в ОГ — на 76 ppm.

Раков В.А. (ВоГУ, г. Вологда) проанализировал особенности определения максимальной мощности комбинированных энергетических установок (КЭУ) гибридных автомобилей. Отмечено, что максимальная мощность энергоустановок с ДВС определяется на режимах ВСХ. В КЭУ гибридных автомобилей ввиду наличия электрических двигателей и бензинового ДВС существует проблема определения их суммарной мощности, которая используется для целей налогообложения. В законодательных документах указано, что следует суммарно учитывать мощность ДВС и максимальную полезную мощность электротяги при постоянном токе, которую система тяги может обеспечивать в течение 30 мин. Однако производители автомобилей 30-минутную мощность не указывают, что вызывает сложности в ее определении. Максимальная полезная мощность системы электротяги при постоянном токе, которую система тяги может обеспечивать в течение 30 мин, указывается в Правилах ЕЭК ООН № 85³, но ввиду невозможности

³ ГОСТ Р 41.85–99 (Правила ЕЭК ООН № 85). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей внутреннего сгорания или систем электротяги, предназначенных для приведения в движение механических транспортных средств категорий М и N, в отношении измерения полезной мощности и максимальной 30-минутной мощности систем электротяги. М., ИПК Изд-во стандартов, 2001.

демонтажа электропривода провести испытания и замеры по утвержденной процедуре нереально. В связи с этим предлагается следующий метод определения 30-минутной мощности. В системе тягового электропривода используется бортовой источник энергии — тяговая аккумуляторная батарея (АКБ), непосредственно влияющий на тяговые характеристики энергоустановки. В качестве примера рассмотрена гибридная установка с тяговым электродвигателем номинальной и пиковой мощностями 50 и 110 кВт, который питается от АКБ с запасом энергии 16 кВт. Такая АКБ может отдавать 50 кВт мощности в течение не более 19 мин, а на режиме 30-минутной мощности АКБ отдаст не 50, а 32 кВт. Таким образом, при определении налоговой ставки правильнее учитывать максимальную полезную 30-минутную мощность с учетом АКБ. В неподзаряжаемых гибридных автомобилях в качестве налоговой ставки правильнее учитывать только мощность ДВС, являющегося единственным источником энергии. В автомобилях с КЭУ последовательного типа максимальная 30-минутная мощность ограничена только характеристиками системы тягового электропривода.

Дунин А.Ю., Зунг Н.В., Ахметжанова Э.У., Петров А.М., Конюшков Д.С. (МАДИ) рассмотрели возможности улучшения показателей рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием при его работе на альтернативном безуглеродном топливе в составе КЭУ [22]. Отмечено, что все большую актуальность приобретает использование в энергетических установках с ДВС безуглеродных моторных топлив — водорода и аммиака, что обеспечивает переход к углеродно-нейтральной энергетике. Приведены результаты расчетного исследования рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием при его работе на аммиаке в составе КЭУ легкового автомобиля, движущегося по ездовому циклу NEDC (New European Driving Cycle). В качестве объектов исследования выбраны двухцилиндровый (типа 2 Ч 7,6/7) и четырехцилиндровый (типа 4 Ч 7,6/7) двигатели со степенью сжатия 9,9. Исследование проведено при условии поддержания стехиометрического состава смеси как при работе на бензине, так и аммиаке. Рассмотрены различные схемы передачи энергии от ДВС и тяговых электродвигателей на ведущие колеса автомобиля. В первой схеме (КЭУ1) первичным является тяговый электродвигатель (ДВС отсутствует), во второй схеме (КЭУ2) первичным является ДВС, а вторичным тяговый электродвигатель, в третьей схеме (КЭУ3) 90 % энергии передается на колеса автомобиля от тягового электродвигателя и 10 % энергии от ДВС. Для заданной суммарной мощности силовой установки с четырехцилиндровым

ДВС проведен расчет расхода топлива на ездовом цикле (с КЭУ). В базовом четырехцилиндровом двигателе (без КЭУ), работающем на бензине, расход топлива в указанном цикле составил 0,98 л. Поскольку аммиак имеет меньшую теплотворную способность, при конвертировании двигателя на аммиак ездовой расход топлива увеличился до 2,8 л. В этом случае ездовой расход топлива оказался равен 3,27 л в КЭУ1; 3,75 л в КЭУ2; 2,04 л в КЭУ3. В двухцилиндровом двигателе, работающем на аммиаке, ездовой расход топлива был равен 2,33 л, при этом в КЭУ1 расход топлива составил 3,12 л, в КЭУ2 — 3,58 л, в КЭУ3 — 1,22 л.

Росляков А.Д., Силюта А.Г., Пешков А.Б., Абдуллин Л.М., Плахов С.В. (СамГУПС, г. Самара, АО «ВНИИЖТ», ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) рассмотрели проблему повышения температуры форсунок при замещении части ДТ ПГ в двухтопливных двигателях. Отмечено, что уменьшенный расход запального ДТ через форсунки по сравнению с его расходом в чисто дизельном цикле приводит к недостаточному охлаждению форсунок протекающим через него ДТ. В результате происходит коксование распыливающих отверстий форсунки и возможно зависание ее иглы. В зависимости от степени совершенства газодизельной системы топливоподачи в газодизельных двигателях расход ДТ обычно составляет 15...30 % общей подачи топлива. При уменьшении запальной дозы ДТ на величину менее 15 % из-за описанных явлений отмечается сокращение срока службы распылителей форсунок. Рассмотрены особенности протекания рабочего процесса в газодизельном двигателе. Приведена модель окисления углеводородного топлива, основанная на анализе скорости химических реакций с использованием закона Аррениуса и отражающая наличие промежуточных стадий окисления топлива. При этом использованы константы скоростей реакций, определенные экспериментально. Подтверждена взаимосвязь температуры форсунки и доли замещения части ПГ дизельным топливом. Показано, что в газодизельном цикле температура поверхности форсунок увеличивается на 25...35 °С по сравнению с дизельным циклом.

Матюхин Л.М. (МАДИ) проанализировал особенности определения потерь свежего заряда при наличии продувки цилиндров бензинового двигателя. Рассмотрены показатели, характеризующие состав рабочей смеси, наполнение цилиндров двигателя свежим зарядом и степень их очистки от остаточных газов. Проанализированы значения этих параметров при внешнем и внутреннем смесеобразовании и приведены их значения при работе двигателя на бензине, метане, пропане, метаноле, этаноле, бутаноле, пропаноле. Показано, что наполнение цилиндров поршневого ДВС рабочей смесью определяется свойствами топлива и коэффициентом избытка

воздуха. Приведены формулы для определения парциальных объемов компонентов рабочей смеси при работе на указанных топливах. Проведена оценка влияния степени рециркуляции ОГ на стехиометрический состав рабочей смеси. Показано, что наполнение цилиндров свежим зарядом и состав смеси оказывают определяющее влияние на индикаторные показатели двигателя, а также на показатели токсичности его ОГ. Пока-зана целесообразность исследования процессов газообмена, наполнения и очистки цилиндров ДВС с использованием значений парциальных объемов компонентов рабочей смеси. Такой подход позволяет уточнить аналитические зависимости для основных показателей двигателя, характеризующих его топливную экономичность и выбросы вредных веществ с ОГ при работе на различных топливах.

Заключение. Представленные результаты исследований сводятся к следующим основным выводам.

Современные теплоэнергетические установки с ДВС потребляют до 70 % производимых в России нефтяных топлив и выбрасывают в атмосферу до 80 % вредных веществ от их общего выброса всеми теплоэнергетическими установками. Для улучшения мощностных, топливно-экономических и экологических показателей этих установок они оснащаются САУ и САР.

Системы управления и регулирования обеспечивают согласование характеристик систем и параметров элементов комбинированных двигателей — систем охлаждения, топливоподачи, воздухообеспечения, газораспределения, рециркуляции отработавших газов и др. Особенно это важно для мобильных энергетических установок, в которых преимущественными являются неуставившиеся режимы работы — переходные процессы.

В настоящее время приоритетными становятся экологические показатели теплоэнергетических установок с ДВС, к которым относятся шумность работы двигателей и выбросы в атмосферу вредных веществ — оксидов азота, монооксида углерода, несгоревших углеводородов и твердых частиц, а также углекислого газа, способствующего возникновению парникового эффекта.

В качестве эффективного средства улучшения экологических показателей теплоэнергетических установок с ДВС рассматривается их конвертирование для работы на различных альтернативных моторных топливах. Наиболее перспективными из них являются безуглеродные топлива — водород и аммиак, а также низкоуглеродные топлива — биотопливо и ПГ, а также сжиженный нефтяной газ.

При разработке и совершенствовании САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС важным аспектом является необходимость обеспечения максимальной степени замещения компонентов этих систем отечественной элементной базой — датчиками режимных параметров, электронными блоками управления, исполнительными устройствами и механизмами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Марков В.А. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и направления их совершенствования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 1 (152), с. 142–168. EDN: UWELZA
- [2] Хрящев Ю.Е., Тихомиров М.В., Епанешников Д.А. Алгоритмы управления двигателями внутреннего сгорания. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2014.
- [3] Bosch R. Системы управления дизельными двигателями. М., За рулем, 2004.
- [4] Bosch R. Системы управления бензиновыми двигателями. М., За рулем, 2005.
- [5] Гайворонский А.И., Гордин М.В., Марков В.А. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике. *Двигателестроение*, 2022, № 2, с. 4–28. EDN: WGWIAU
- [6] Пискунов И.В., Глаголева О.Ф., Голубева И.А. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 2. Водородное топливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 5, с. 53–62. EDN: GLJEFC
- [7] Марков В.А. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 4 (139), с. 94–123. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-94-123>
- [8] Марков В.А. Проблемы и перспективы совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 128–155. EDN: НКCYSS
- [9] Марков В.А. Тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение*, 2023, № 1 (144), с. 97–126. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-97-126>
- [10] Плахов С.В. Разработка и исследование систем электронного управления топливоподачей тепловозных газодизельных двигателей. *Двигателестроение*, 2025, № 3, с. 34–56.
- [11] Ипатов И.И., Кутенев В.Ф., Лукшо В.А. и др. Автотранспорт и экология мегаполисов. М., Машиностроение, 2010.
- [12] Пискунов И.В., Ершов М.А., Глаголева О.Ф. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 3. Биотопливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 6, с. 39–46. EDN: LEMVYU

- [13] Пискунов И.В., Глаголева О.Ф., Голубева И.А. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 1. Газомоторное топливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 4, с. 68–77. EDN: XUXXTK
- [14] Лиханов В.А., Лопатин О.П., Юрлов А.С. Экспериментальные исследования токсичности дизеля при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла. *Двигателестроение*, 2025, № 3, с. 72–81.
- [15] Хрящёв Ю.Е., Бойков Д.В., Перепелин А.П. К вопросу о формировании внешней скоростной характеристики многотопливных дизелей. *Двигателестроение*, 2022, № 2, с. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.18698/jec.2022.2.53-60>
- [16] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Каменских С.А. Разработка нейросетевого регулятора для дизеля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-90-100>
- [17] Душкин П.В., Савастенко А.А., Ховренко С.С. и др. Автоматизация настройки ПИ-регулятора системы управления давлением топлива в аккумуляторной топливной системе дизеля. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 51–63. EDN: YTHNPQ
- [18] Голубков Л.Н., Душкин П.В., Савастенко А.А. и др. Разработка быстродействующей модели для проверки алгоритмов управления дизельной аккумуляторной топливной системой. *Двигателестроение*, 2024, № 3, с. 14–20.
- [19] Wang Y., Shi Y., Cai M., et al. Optimization of air-fuel ratio control of fuel-powered UAV engine using adaptive fuzzy-PID. *J. Franklin Inst.*, 2018, vol. 355, no. 17, pp. 8554–8575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.09.003>
- [20] Zhang K., Huang X., Xie Z., et al. Design and optimization of a novel electrically controlled high pressure fuel injection system for heavy fuel aircraft piston engine. *Chin. J. Aeronaut.*, 2018, vol. 31, no. 9, pp. 1920–1928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.06.013>
- [21] Максимов И.В., Синявский В.В., Шатров М.Г. Влияние размеров форсунки и формы камеры сгорания на показатели газодизеля. *Двигателестроение*, 2025, № 2, с. 51–60.
- [22] Дунин А.Ю., Нгуен Ван Зунг, Ахметжанова Э.У. и др. Применение комбинированной энергетической установки для улучшения характеристик двигателя с искровым зажиганием при работе на безуглеродном топливе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 1 (156), с. 101–114. EDN: AKOYXB

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. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 2 (157), с. 137–162. EDN: PVDFKT

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION SYSTEMS OF THERMAL POWER PLANTS WITH INTERNAL COMBUSTION ENGINES

V.A. Markov

markov58@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

Meeting the stringent requirements for the performance of thermal power plants with internal combustion engines is only possible if the power plants are equipped with automatic control and regulation systems. The article analyzes the main directions for improving such systems. Among these areas, the use of various alternative motor fuels should be highlighted. Biofuels and natural gas, as well as carbon-free fuels such as hydrogen and ammonia, should be considered the most promising alternative fuels. It is noted that at the present stage of engine building development, the main indicators characterizing the operation of internal combustion engines are their power and dynamic characteristics, fuel efficiency and toxicity of their exhaust gases. To improve these indicators, automatic control systems and controls must implement optimized control laws to ensure that the characteristics of various systems of combined internal combustion engines are consistent with changes in the speed and load modes of operation of power plants, taking into account changing operating conditions. The most functional microprocessor-based automatic control and regulation systems are based on modern microprocessor technology. These systems allow for interconnected adaptive control of the parameters of thermal power plants

Keywords

Thermal power plant, internal combustion engine, diesel engine, gasoline engine, automatic control system, automatic regulation system, alternative fuel, natural gas

Received 11.11.2025

Accepted 28.11.2025

© Author(s), 2026

The article was based on materials of the reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference n.a. Professor V.I. Krutov (29.01.2025)

REFERENCES

- [1] Markov V.A. Automatic control and regulation systems of the thermal power plants and approaches to their improvement. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 1 (152), pp. 142–168 (in Russ.).
EDN: UWELZA

- [2] Khryashchev Yu.E., Tikhomirov M.V., Epaneshnikov D.A. Algoritmy upravleniya dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [Algorithms for controlling internal combustion engines]. Yaroslavl, YaGTU Publ., 2014.
- [3] Bosch R. Diesel-engine management. Bentley, 2004.
- [4] Bosch R. Gasoline engine management handbook. Brooklands Books, 2005.
- [5] Gayvoronskiy A.I., Gordin M.V., Markov V.A. Problems and prospects of using carbon-free and low-carbon motor fuels in various scenarios of transition to carbon-neutral energy. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2022, no. 2, pp. 4–28 (in Russ.). EDN: WGWIAU
- [6] Piskunov I.V., Glagoleva O.F., Golubeva I.A. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 2. Hydrogen fuel. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 5, pp. 53–62 (in Russ.). EDN: GLJEFC
- [7] Markov V.A. Automatic control and regulation systems for heat and power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 4 (139), pp. 94–123 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-94-123>
- [8] Markov V.A. Problems and prospects of improving the automatic control and regulation systems of the thermal power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 128–155 (in Russ.). EDN: HKCYSS
- [9] 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>
- [10] Plakhov S.V. Design, development and study of the electronic control systems for the diesel-gas locomotive engine fuel supply. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2025, no. 3, pp. 34–56 (in Russ.).
- [11] Ipatov I.I., Kutenev V.F., Luksho V.A., et al. *Avtotransport i ekologiya megapolisov* [Motor transport and ecology of metropolises]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010.
- [12] Piskunov I.V., Ershov M.A., Glagoleva O.F. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 3. Biofuels. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 6, pp. 39–46 (in Russ.). EDN: LEMVYU
- [13] Piskunov I.V., Glagoleva O.F., Golubeva I.A. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 1. Gas engine fuel. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 4, pp. 68–77 (in Russ.). EDN: XUXXTK
- [14] Likhanov V.A., Lopatin O.P., Yurlov A.S. Experimental study and analysis of the toxic components formation in a diesel engine running on methanol and the rapeseed oil methyl ester. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2025, no. 3, pp. 72–81 (in Russ.).
- [15] Khryashchov Yu.Ye., Boykov D.V., Perepelin A.P. On the issue of adjusting the external speed characteristics of multi-fuel diesel engines. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2022, no. 2, pp. 53–60 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/jec.2022.2.53-60>

- [16] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Kamenskikh S.A. On the issue of developing the diesel engine neural network controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 5, pp. 90–100 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-90-100>
- [17] Dushkin P.V., Savastenko A.A., Khovrenok S.S., et al. Automation of the setting of the PI-controller of the fuel pressure control system in the diesel battery fuel system. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 51–63 (in Russ.). EDN: YTUHPQ
- [18] Golubkov L.N., Dushkin P.V., Savastenko A.A., et al. Development of a high speed model for testing the control algorithms for a diesel battery fuel system. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2024, no. 3, pp. 14–20 (in Russ.).
- [19] Wang Y., Shi Y., Cai M., et al. Optimization of air-fuel ratio control of fuel-powered UAV engine using adaptive fuzzy-PID. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, vol. 355, iss. 17, pp. 8554–8575.
- [20] Zhang K., Huang X., Zhifeng X.I.E., et al. Design and optimization of a novel electrically controlled high pressure fuel injection system for heavy fuel aircraft piston engine. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, vol. 31, iss. 9, pp. 1920–1928.
- [21] Maximov I.V., Sinyavskiy V.V., Shatrov M.G. Injector size and combustion chamber shape influence on the gas-diesel engine performance. *Dvigatelsestroenie* [Engines Construction], 2025, no. 2 (300), pp. 51–60 (in Russ.).
- [22] Dunin A.Yu., Nguyen Van Dung, Akhmetzhanova E.U., et al. Use of a combination power system to improve the performance of a spark-ignition engine running on carbon-free fuel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 1 (156), pp. 101–114 (in Russ.). EDN: AKOYXB

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

Please cite this article in English as:

Markov V.A. Automatic control and regulation systems of thermal power plants with internal combustion engines. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 2 (157), pp. 137–162 (in Russ.). EDN: PVDFKT