

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А. Марков

markov58@bmstu.ru

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

Аннотация

Удовлетворение современных жестких требований к показателям топливной экономичности, токсичности отработавших газов, динамическим показателям возможно лишь при оснащении теплоэнергетических установок современными системами управления и регулирования. Наибольшее применение нашли теплоэнергетические установки, созданные на базе двигателей внутреннего сгорания. Они используются в сельскохозяйственных, строительно-дорожных и лесопромышленных машинах, в судостроении, на автомобильном и железнодорожном транспорте и др. Проведен анализ основных направлений дальнейшего совершенствования теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания и их систем автоматического управления и регулирования. Среди этих направлений — расширение функциональных возможностей таких систем, улучшение качества процессов управления и регулирования, их использование при адаптации теплоэнергетических установок к работе на альтернативных топливах. Важными аспектами совершенствования теплоэнергетических установок с двигателями внутреннего сгорания является необходимость исследования рабочих процессов двигателей и их систем в целях снижения токсичности отработавших газов. Показана актуальность исследований этих систем и проведена оценка современного уровня их развития. Характерной особенностью современных систем управления и регулирования теплоэнергетических установок является их повсеместное построение на современной микропроцессорной элементной базе

Ключевые слова

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

Поступила 24.03.2021

Принята 16.04.2021

© Автор(ы), 2021

Статья подготовлена по материалам докладов ВНТК имени профессора В.И. Крутова (27.01.2021)

Введение. В связи с тенденцией увеличения энергии, потребляемой в различных отраслях мировой экономики, суммарная мощность всех теплоэнергетических установок непрерывно возрастает [1, 2]. При этом ~ 80 % всей вырабатываемой энергии приходится на теплоэнергетические установки с тепловыми двигателями, преобразующими химическую энергию топлива в механическую. Другие типы энергетических установок (атомные, гидравлические, ветряные, солнечные, геотермальные и др.) вырабатывают остальные 20 % энергии. Тепловые двигатели потребляют ~ 70 % производимого в России жидкого нефтяного топлива. При этом ~ 80 % энергии, создаваемой тепловыми двигателями, вырабатывается поршневыми и комбинированными двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Остальные 20 % производятся газовыми и паровыми турбинами, паровыми машинами [3].

Повсеместное применение ДВС объясняется широкими возможностями использования этих двигателей в самых различных областях — на автомобильном и железнодорожном транспорте, в сельскохозяйственных машинах, в строительно-дорожных и лесопромышленных машинах, в судостроении, авиации, в стационарных энергетических установках. Целесообразность применения тех или иных энергетических установок в конкретных условиях определяется совокупностью различных факторов, важнейшими из которых являются их эксплуатационные показатели, стоимость самой установки, топлива и других эксплуатационных материалов, простота обслуживания. К наиболее энергоемким секторам национальной экономики относится автотранспортный комплекс, который является одним из основных потребителей моторных топлив.

Наилучшие показатели теплоэнергетических установок с ДВС достигаются лишь при их оснащении современными системами автоматического управления и регулирования (САУ и САР) [4–6]. К наиболее важным потребительским качествам ДВС относятся мощностные и массогабаритные параметры, показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) [7–9]. 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 выпускной системе двигателя различных средств очистки ОГ от токсичных компонентов [13–15].

Актуальным направлением развития теплоэнергетических установок с ДВС является их адаптация к работе на различных альтернативных видах топлива [16–18]. Замена традиционных нефтяных топлив — бензина, реак-

тивного топлива, керосина, дизельного топлива (ДТ), топливами, получаемыми из альтернативных сырьевых ресурсов, позволит обеспечить не только замещение нефтяных моторных топлив альтернативными, но и улучшить показатели токсичности ОГ. Приведенный далее анализ отражает современное состояние и перспективы развития САУ и САР теплоэнергетических установок различного назначения.

Методы исследования систем автоматического регулирования и управления. При проведении теоретических исследований использовались фундаментальные законы тепло- и массообмена, механики жидкости и газа, методы и математические модели теории рабочих процессов ДВС, теории автоматического регулирования и управления, методы одно- и многокритериальной оптимизации параметров теплоэнергетических установок и ряд других теоретических подходов [2, 4, 7, 19].

Среди методов теории автоматического регулирования и управления следует выделить построение переходных процессов с использованием математических моделей. Математическое описание САУ и САР может быть весьма разнообразно. Широко применяют системы линейных дифференциальных уравнений, описывающих элементы САУ и САР [4, 20]. В ряде случаев целесообразна разработка нелинейных математических моделей, содержащих нелинейные дифференциальные уравнения указанных элементов и учитывающих реальные нелинейные характеристики параметров ДВС. При этом указанные нелинейные характеристики могут быть заданы различным образом. Хорошие результаты дает описание этих характеристик полиномиальными зависимостями. Уравнения математических моделей решаются с использованием современных аналитических и численных методов. Свойства САУ и САР исследуются и с применением их частотных и логарифмических частотных характеристик. В ряде исследований применены методы анализа и синтеза САУ и САР [21–23].

Ряд исследований посвящен проблемам диагностики теплоэнергетических установок. Некоторые функции диагностики возлагаются на САУ и САР таких установок [24, 25], при этом система диагностики становится их неотъемлемой частью.

Разработка и совершенствование САУ и САР теплоэнергетических установок с ДВС невозможна без проведения экспериментальных исследований. Эти исследования позволяют оценить адекватность 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 профессор В.А. Марков (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. Показано, что удовлетворение непрерывно ужесточаемых требований к показателям топливной экономичности и токсичности ОГ ДВС невозможно без дальнейшего совершенствования их САУ и САР. Обозначен широкий круг задач разработки современных поршневых ДВС, их САУ и САР.

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Сапронов Д.П., Каменских С.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели особенности использования современных методов машинного обучения при разработке систем управления двигателями. Представлены результаты применения таких методов машинного обучения, как регрессионный анализ, случайный лес и нейронные сети для решения ряда задач, возникающих при разработке САУ двигателями. Первое направление, где использование указанных методов является эффективным, это описание функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса ДВС при полунатурном моделировании САУ в реальном масштабе времени. На примере коэффициентов полезного действия компрессора и турбины комбинированного ДВС показано, что наиболее точное их описание достигается при использовании нейронной сети. Это связано с тем, что наряду с точностью интерполяции исходных данных в статике достигается также адекватная рабочему процессу двигателей экстраполяция полученных характеристик, необходимая для расчета переходных процессов. Второе направление использования нейронной сети связано с построением регуляторов ДВС. Смоделированные переходные процессы изменения частоты вращения двигателя в составе САУ свидетельствуют о том, что нейронный регулятор обеспечивает более высокое качество регулирования по сравнению с классическим регулятором. Сделан вывод о целесообразности использования современных методов машинного обучения для создания САУ двигателями.

Хрящёв Ю.Е. (ЯГТУ) проанализировал особенности управления двигателем Стирлинга. Рассмотрено несколько способов управления мощностью этого двигателя. Среди них — регулирование состава топливовоздушной смеси при изменении подводимого к нагревателю количества теплоты, регулирование среднего давления в рабочем контуре двигателя при постоянных значениях максимальной температуры цикла, перепуск рабочего тела в контурах этого двигателя, регулирование степени сжатия и рабочего объема двигателя. Основным недостатком каждого метода считается то, что

реакция двигателя Стирлинга на изменение процессов в камере сгорания (КС) является медленной. Разработана схема управления мощностью двигателя посредством изменения величины давления рабочего тела. В этой схеме в качестве исполнительного механизма применены два управляющих электромагнитных клапана. Для задания и поддержания определенного значения тока, управляющего электромагнитными клапанами, применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) сигнала с частотой 25 кГц. При управлении периодом и скважностью ШИМ сигнала достигается требуемая скорость нарастания тока в управляющем клапане.

Евдонин Е.С., Душкин П.В., Ховренко С.С., Калинина С.М., Кременев В.В. (МАДИ) предложили методику автоматизированного сбора данных и статистическую модель для оптимизации управления ДВС. Отмечено, что калибровочные испытания ДВС — дорогостоящий и трудоемкий процесс, причем сложность калибровочных испытаний постоянно увеличивается. Так, в 2010 г. число калибруемых параметров достигало 25 000, в 2015 г. — 35 000, а в новейших системах управления оно уже превышает 50 000 параметров. В связи с этим разработана методика, нацеленная на повышение эффективности стендовых испытаний ДВС. Основу методики составляют усовершенствование традиционного метода планирования эксперимента, автоматизация сбора данных путем применения различных сценариев, разработка по полученным данным эмпирической модели ДВС и ее применение для оптимизации управления ДВС. На текущем этапе исследования методика представлена на примере виртуальных испытаний учебной модели бензинового ДВС, работающей в режиме реального времени.

Шатров М.Г., Яковенко А.Л., Алексеев И.В., Богданов С.Н., Глазков А.О. (МАДИ) рассмотрели особенности моделирования структурного шума ДВС на этапах его проектирования. Приведены подходы к моделированию структурного шума ДВС на этапах формирования концепции и детальной проработки двигателя. Показаны эмпирические формулы для расчета шума ДВС, полученные на основе экспериментальных данных, проанализирована их область применения. Рассмотрена разработанная методика расчета структурного шума ДВС, которая может быть использована многоаспектно в зависимости от применяемых инструментальных средств для моделирования конструкции и расчета рабочего процесса ДВС. Данная методика неоднократно экспериментально проверена. Полученные результаты измерений структурного шума на примере дизеля 8СН12/13 подтвердили достаточную точность расчетов. Показаны возможности использования ПК AVL Excite для оценки структурного шума ДВС, рассмотрены его преимущества и недостатки. К преимуществам от-

носятся детализация конструкции двигателя, учет реальной геометрии, возможность расчета распределения скорости колебаний по поверхности ДВС и его звукового поля, а также возможность комплексных исследований влияния параметров рабочего процесса и конструкции двигателя на уровни шума и вибраций. Недостатками комплекса являются большое число исходных данных, сложность задания конечно-элементной модели корпусных деталей двигателя, сложность и длительность расчета шума на неустановившихся режимах.

Шатров М.Г., Дунин А.Ю., Нгуен Тхинь Куинь, Калинина С.М., Беляев П.И. (МАДИ) проанализировали особенности реализации рабочего процесса дизеля при давлении впрыскивания до 300 МПа. Приведены результаты экспериментального и расчетного исследований влияния давления впрыскивания на показатели рабочего цикла дизеля. Эксперименты проведены на одноцилиндровой установке 1 ЧН 12/13, оборудованной регулируемым наддувом и системой индицирования. Анализ полученных данных по этому двигателю при давлениях впрыскивания до 300 МПа подтвердил принципиальную возможность снижения выбросов токсичных составляющих ОГ до уровня требований норм Euro-6 и Tier-4. Увеличение давления впрыскивания до 300 МПа в сочетании с повышением давления наддува до 0,35 МПа является эффективным средством снижения дымности ОГ. При увеличении давления впрыскивания топлива от 150 до 300 МПа эмиссия оксидов азота уменьшилась на 23,2 %, но этого недостаточно для достижения требований норм Euro-6, регламентирующих выбросы оксидов азота на уровне 0,4 г/(кВт · ч). Для удовлетворения этим требованиям дополнительно применена рециркуляция ОГ (степень рециркуляции 27 %). Однако это сопровождалось увеличением на 4,9 % удельного эффективного расхода топлива и снижением на 4,3 % индикаторной мощности.

Марков В.А., Патрахальцев Н.Н., Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Спиридонова Л.В. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН, МАДИ) исследовали способ улучшения приемистости транспортного средства путем перевода четырехтактного бензинового двигателя на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими частотами вращения. Отмечено, что худшие показатели топливной экономичности двухтактных бензиновых двигателей отчасти компенсируются лучшими показателями их удельной мощности. Рассмотрены особенности перевода двигателя типа 2/4 Sight известной двигателестроительной фирмы Ricardo (Великобритания) с четырехтактного на двухтактный цикл. Этот базовый V-образный шестицилиндровый дизельный двигатель (схема V6) рабочим объемом 2,1 л имел показатели, характерные для бензиновых двигателей схемы V8 рабочим объемом

3...4 л. Для реализации двухтактного цикла двигатель оснащен двухступенчатым наддувом с промежуточным охлаждением воздуха и системой переключения клапанов газораспределения. При переводе двигателя на двухтактный цикл его крутящий момент составил 450 Н·м, что соизмеримо с крутящим моментом четырехтактного двигателя без наддува рабочим объемом 4,5 л. При увеличении скорости транспортного средства от 80 до 120 км/ч время разгона легкового автомобиля премиум-класса массой 1815 кг, оснащенного двигателем 2/4 Sight с возможностью его перевода на двухтактный цикл, сократилось с 8,1 до 6,7 с по сравнению с автомобилем штатной комплектации, т. е. более чем на 17 %.

Нгуен Тхинь Куинь, Дунин А.Ю., Шатров М.Г., Душкин П.В., Голомонов Б.Д. (МАДИ) исследовали влияние давления в топливном аккумуляторе системы Common Rail и длительности управляющего импульса на форму характеристики впрыскивания. Отмечено, что процесс топливоподачи во многом определяется длительностью управляющего импульса от электронной САУ и давлением топлива в аккумуляторе. Он также зависит от волновых явлений в линии высокого давления топливной системы, которые оказывают существенное влияние на топливоподачу при многократном впрыскивании. Приведена методика и результаты исследования влияния режима течения топлива на колебания давления в объемах аккумуляторной топливной системы, сопровождающие процесс впрыскивания. В ходе исследований топливо подавалось через распыливающие отверстия форсунки в камеру постоянного объема с калиброванным отверстием для его слива в линию низкого давления. Применение жиклеров разных диаметров позволило получить различные значения и характер изменения противодействия в процессе топливоподачи.

Драган Ю.Е. (ГумИ ВлГУ) экспериментально проверил методику обработки осциллограмм, записанных при исследовании системы топливоподачи типа Common Rail. Проведены синхронные осциллографические записи показаний емкостных датчиков, которые отражают перемещения якоря электромагнитного клапана и иглы распылителя электрогидравлической форсунки (ЭГФ). На переднем фронте процесса цикловой подачи этапу подъема иглы распылителя предшествует этап разгрузки предварительно деформированных деталей ЭГФ, включая плунжерный мультипликатор запирания со штангой, иглу и распылитель. На заднем фронте после этапа посадки иглы продолжается этап деформирования деталей ЭГФ. Между этими фронтами возможны два конструктивных варианта ограничения подъема иглы: ограничение традиционным упором иглы в проставку, обеспечивающим постоянство максимального подъема иг-

лы, и ограничение подъемом мультипликатора в камере управления до упора в седло. Во втором случае максимальный подъем иглы зависит от давления топлива в аккумуляторе. Для оценки адекватности принятых критериев для граничных точек использованы зависимости эффективных проходных сечений пятисоплового распылителя ЭГФ от подъема иглы. Эти зависимости получены при экспериментальной проливке топлива через этот распылитель на специальном стенде. Интенсивности расходов топлива при выстое иглы у упора определялись по максимальному значению эффективного проходного сечения распылителя, а на этапах подъема и посадки иглы — по среднему его значению. Разработанная методика проверялась при обработке осциллограмм в 24 опытах, записанных при напряжениях на обмотке управляющего клапана от 80 до 150 В, при суммарной длительности форсирующего и удерживающего импульсов тока от 0,3 до 1,0 мс, при давлениях топлива в аккумуляторе от 60 до 80 МПа.

Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В., Коссова Л.Е. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов, ВНИИЖТ) провели экспериментальные исследования процесса впрыскивания топлива дизельными форсунками тепловозного дизеля. Исследуемый дизель Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства АО «Пензадизельмаш» оснащен форсунками Д50.06.004 с распылителем, имеющим 9 распыливающих отверстий диаметром 0,38 мм. Угол конуса иглы форсунки равен 60° , ее ход — $0,45 \pm 0,05$ мм, давление топлива, соответствующее началу подъема иглы форсунки, равно 27,5 МПа. Форсунка соединена с топливным насосом нагнетательным топливопроводом длиной 1615 мм и наружным диаметром 3,5 мм. Исследуемый дизель оборудован электроуправляемым топливным насосом типа 4ЭТН.06 с системой электронного управления подачей топлива типа ЭСУВТ.01, разработанной проектно-производственным предприятием ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). В этой системе управление процессом топливоподачи осуществляется посредством быстродействующего электрогидравлического клапана, установленного в магистрали высокого давления топливной системы. Указанный насос имеет насосную секцию с плунжером диаметром 20 мм и ходом 26 мм. При испытаниях исследовано 33 режима работы системы топливоподачи с частотой вращения кулачкового вала от 120 до 375 мин⁻¹. На номинальном режиме работы частота вращения кулачкового вала составляла 375 мин⁻¹, длительность удержания 12,5 град поворота кулачкового вала, цикловая подача топлива 1,527 г/цикл. Максимальное давление топлива на выходе из электроуправляемого насоса составило 105 МПа, в полости распылителя форсунки —

98 МПа. Показана необходимость оптимизации характеристики впрыскивания.

Марков В.А., Камалтдинов В.Г., Поздняков Е.Ф., Бовэнь Са (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск) исследовали влияние геометрии проточной части дизельной форсунки на параметры течения топлива в распылителе. Предложен метод улучшения качества процессов впрыскивания и распыливания топлива, основанный на оптимизации геометрии проточной части дизельных форсунок. Разработаны конструкции распылителей форсунок, обеспечивающие улучшение качества указанных процессов. Особенностью этих форсунок является выполнение на носке иглы местных гидравлических сопротивлений, турбулизирующих поток топлива в проточной части распылителя. С использованием ПК Fluent проведены расчетные исследования влияния геометрии проточной части распылителя форсунки на параметры потока топлива. Выбрана оптимальная геометрия указанных гидравлических сопротивлений для опытного распылителя. Проведены экспериментальные исследования дизеля, оснащенного форсунками с серийным и опытным распылителями. Подтверждена возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ при оснащении дизеля форсунками с опытными распылителями. Моторные испытания дизеля Д-243 (4 Ч 11/12,5) с распылителями форсунок с оптимальной геометрией проточной части показали, что на режиме максимальной мощности замена серийных распылителей опытными позволила уменьшить удельный эффективный расход топлива с 275,2 до 270,4 г/(кВт·ч), т. е. на 1,7 %, и дымность ОГ с 23,5 до 12,5 % по шкале Хартриджа, т. е. на 46,8 %. При этом концентрации оксидов азота в ОГ возросла от 1743 до 1923 ppm, т. е. на 10,3 %, и отмечена тенденция снижения содержания в ОГ монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

Вальехо Мальдонадо П.Р., Девянин С.Н., Марков В.А., Нормуродов А.А., Быковская Л.И. (РУДН, РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели сравнительный анализ параметров впрыскивания и распыливания дизельного топлива, рапсового масла (РМ) и их смесей в дизелях различных типов. Обоснована необходимость адаптации дизелей к работе на растительных маслах. Рассмотрена возможность использования РМ и его смесей с нефтяным ДТ в качестве моторных топлив. Проведены экспериментальные исследования впрыскивания топлива малоразмерного высокооборотного дизеля МД-6 (1 Ч 8,0/7,5) при его работе на нефтяном ДТ и РМ и расчетные исследования топливоподачи автотракторного дизеля Д-245 (1 ЧН 11/12,5), работающего на смесях ука-

занных топлив. Показано, что с точки зрения качества процесса впрыскивания топлива возможна работа исследуемых дизелей как на чистом РМ, так и на смесях нефтяного ДТ и РМ с любой концентрацией последнего. Перевод этих дизелей с нефтяного ДТ на РМ сопровождается некоторым увеличением массовой цикловой подачи топлива, максимального давления впрыскивания и продолжительности топливоподачи. При этом в малоразмерном высокооборотном дизеле различия в массовой цикловой подаче нефтяного ДТ и РМ больше, чем в автотракторном дизеле. Так, при переводе автотракторного дизеля с нефтяного ДТ на РМ на режиме полной подачи топлива массовая цикловая подача топлива увеличилась на 12 %, а в малоразмерном высокооборотном дизеле — на ~ 27 %. С точки зрения протекания рабочего процесса этих дизелей изменения других параметров процесса впрыскивания топлива при смене его типа менее значимы.

Александров А.В., Долгов И.А., Морозкин Т.В., Николаев С.Е., Кнюшков Д.С. (МАДИ) разработали методику косвенного индицирования давления в цилиндре ДВС. Отмечены различия индицирования, проводимого в лабораторных условиях и направленного на исследование и совершенствование рабочего процесса, и индицирования, выполняемого на автомобиле. Во втором случае индицирование проводят для доводки программы блока управления и при диагностике. Поскольку процедура индицирования достаточно трудоемкая и требует дорогостоящего оборудования, то в некоторых случаях прямое индицирование можно заменить косвенным. Коленчатый вал двигателя формирует крутящие моменты от газовых сил во всех цилиндрах, и его ускорение должно отражать равнодействующую всех моментов. На режимах с низкой частотой вращения наблюдается хорошая согласованность индикаторных диаграмм с графиками крутящего момента, частоты вращения и ускорения коленчатого вала. По мере увеличения частоты вращения вклад в крутящий момент инерционных сил увеличивается, и связь индикаторных диаграмм со скоростью и ускорением коленчатого вала постепенно теряется. Предусматривается учет действия на крутящий момент инерционных сил от деталей, совершающих возвратно-поступательное и плоскопараллельное движения, а также использование двух форм связи между крутящим моментом и параметрами, определяемыми на основании обработки сигнала датчика положения коленчатого вала. Дифференциальная форма этой связи учитывает ускорение коленчатого вала и действующий на него суммарный крутящий момент. Интегральная форма связывает изменение кинетической энергии подвижных деталей ДВС за некоторый угол пово-

рота с работой внешних сил. На первом этапе разработки методики решается задача получения согласующихся между собой данных прямого индицирования и параметров, полученных в результате обработки сигнала датчика положения коленчатого вала.

Кулешов А.С., Марков В.А., Трифонов В.Л., Денисов А.Д., Неверова В.В., Землемерова А.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) выполнили расчетные исследования рабочего процесса автомобильного дизельного двигателя. Исследован рабочий процесс дизеля Д-245 (4 ЧН 11/12,5) производства Минского моторного завода. Отмечено значительное влияние степени сжатия, угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) и фаз газораспределения на показатели топливной экономичности дизеля. С использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного профессором Кулешовым А.С., проведена комплексная оптимизация значений указанных параметров, обеспечивающая наилучшие показатели топливной экономичности дизеля. На номинальном режиме работы дизеля наименьший удельный эффективный расход топлива получен при следующих оптимальных значениях параметров дизеля: степень сжатия 18,2; УОВТ 9 град п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ); фазы газораспределения — начало впуска 26 град п.к.в. до нижней мертвой точки (НМТ), конец впуска 38 град п.к.в. после ВМТ; начало выпуска 54 град п.к.в. до НМТ, конец выпуска 26 град п.к.в. после ВМТ. При таких оптимизированных значениях исследуемых параметров рабочего процесса дизеля получены следующие значения его показателей: максимальное давление впрыскивания топлива 43,96 МПа; максимальное давление сгорания 13,26 МПа; эффективная мощность 83,41 кВт; среднее эффективное давление 0,878 МПа; крутящий момент 331,9 Н·м; удельный эффективный расход топлива 238,3 г/(кВт·ч). При работе дизеля на режимах внешней скоростной характеристики и снижения частоты вращения коленчатого вала с 2400 до 1200 мин⁻¹ для достижения наилучшей топливной экономичности необходимо уменьшать УОВТ с 9 до 6 град п.к.в. до ВМТ.

Марков В.А., Камалтдинов В.Г., Бовэнь Са, Неверов В.А., Нормуродов А.А., Быков А.Е. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск) провели расчетные исследования показателей дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками растительных масел. В связи с этим возникает проблема ухудшения качества процессов распыливания растительных масел. Отмечено, что по своим физико-химическим свойствам растительные масла существенно отличаются от нефтяного ДТ. Проведенные с использованием упомянутого ПК ДИЗЕЛЬ-РК расчетные исследования этих процессов при работе дизеля Д-245 (4 ЧН 11/12,5) на смесях нефтяного ДТ

и РМ подтвердили приемлемое качество процессов распыливания топлива и смесеобразования и возможность улучшения показателей токсичности ОГ. В связи с возможностью закоксовывания распыливающих отверстий форсунок и отложения нагара на деталях камеры сгорания рекомендована работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном ДТ с небольшой добавкой РМ. Возможна работа исследуемого дизеля при любой концентрации РМ в смесевом биотопливе. Однако в ряде исследований дизелей, работающих на чистых растительных маслах или на смесях нефтяного ДТ и растительных масел, показано, что длительная работа двигателя на этих топливах может сопровождаться закоксовыванием отверстий распылителей форсунок и отложением нагара на стенках камеры сгорания. Поэтому обычно организуется работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном ДТ с небольшими добавками этих биотоплив. Последующие расчеты проведены для дизеля, работающего на нефтяном ДТ с небольшими добавками РМ в количестве 0...10 % по объему. На номинальном режиме работы дизеля в указанном диапазоне изменения концентраций РМ в смеси удельный эффективный расход топлива увеличивается от 225,7 до 228,7 г/(кВт·ч), но эффективный КПД дизеля изменяется незначительно. При увеличении концентрации РМ в нефтяном ДТ от 0 до 10 % концентрация в ОГ оксидов азота уменьшается с 677 до 660 ppm. В этом же диапазоне изменения концентрации РМ в смеси дымность ОГ уменьшается с 11,2 до 9,0 % по шкале Хартриджа.

Бардин Д.С., Муратов А.В., Носырев Д.Я., Балакин А.Ю. (СамГУПС, г. Самара) провели расчетное исследование рабочего процесса двигателя 16 ЧН 26/26, работающего по газодизельному и газовому циклам. Расчетно-теоретические исследования работы указанного тепловозного дизеля, работающего на газообразном топливе, выполнено методом численного моделирования. Использована математическая модель расчета рабочего процесса дизеля по методике профессора Орлина А.С. Эта модель позволяла варьировать долю запальной дозы дизельного топлива при работе дизеля на природном газе по газодизельному циклу и выбрать ее оптимальное значение, обеспечивающее наивысшие эффективность и экономичность работы дизеля. Используемая методика позволяет также оценить влияние изменения состава топлива на внутрицилиндровые параметры: максимальную температуру и давление цикла, индикаторное и эффективное давления. Проведенные расчетные исследования позволили оценить удельный эффективный расход топлива и эффективную мощность исследуемого дизеля на различных скоростных режимах его

работы. Сделан вывод о целесообразности использования природного газа в качестве топлива для тепловозного дизеля.

Балакин А.Ю., Муратов А.В., Мустафаев Ю.К., Бардин Д.С. (СамГУПС, г. Самара) представили метод стендовых испытаний дизеля Д-242 (4 Ч 11/12,5), работающего по газодизельному циклу в лабораторных условиях. Отмечено, что к основным проблемам использования природного газа в качестве моторного топлива для тепловозных дизелей относятся невозможность перевода дизеля на газомоторное топливо без существенных конструктивных изменений двигателя, худшие эксплуатационные характеристики газопоршневых двигателей в сравнении с дизельными и несовершенство существующих САР и САУ. В целях решения указанных проблем и создания современной системы перевода дизелей на газомоторные топлива выполнен комплекс расчетно-экспериментальных исследований. Их целями являлись оценка влияния подачи природного газа на параметры рабочего цикла, эффективные, экономические и экологические показатели работы дизеля и выбор оптимальных настроечных характеристик и правочных коэффициентов алгоритма управления. На лабораторном стенде реализован способ работы исследуемого дизеля, заключающийся в подаче природного газа в качестве топлива в воздушный ресивер, в результате чего происходит частичное замещение дизельного топлива экологически чистым альтернативным топливом. При сравнительных лабораторно-стендовых испытаниях проведена настройка САР вращения и мощности двигателя, работающего по газодизельному циклу. Определены оптимальные значения УОВТ запальной дозы нефтяного ДТ, периода подачи газа, углов открытия и закрытия впускных клапанов. Проведены сравнительные исследования работы дизеля на нефтяном ДТ (дизельный цикл) и с подачей природного газа (газодизельный цикл) в широком диапазоне эксплуатационных режимов. При этом оценивались показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. Выполнен сравнительный анализ тепловой напряженности деталей при работе дизеля по дизельному и газодизельному циклам.

Ерохов В.И. (Московский политехнический университет) рассмотрел особенности применения диметилового эфира (ДМЭ) в качестве моторного топлива для дизелей. Отмечена перспективность этого вида топлива. Проанализированы его физико-химические и моторные свойства. Показано, что ДМЭ отличается от нефтяного ДТ повышенным цетановым числом (более 55 единиц против 45 у нефтяного ДТ), меньшим периодом задержки воспламенения и большей продолжительностью сгорания. Рассмотрены различные способы организации работы дизеля на ДМЭ. Сделан вывод

о целесообразности подачи ДМЭ непосредственно в цилиндры дизеля. Приведены конструктивные и функциональные особенности топливной аппаратуры нового поколения для подачи ДМЭ в цилиндры дизеля. Разработана система управления топливоподачей ДМЭ для современного дизеля. Исследовано влияние угла опережения впрыскивания ДМЭ на показатели работы двигателя. Отмечено слабое влияние давления начала впрыскивания (в интервале от 10 до 25 МПа) на показатели дизеля — расход топлива, эмиссию монооксида углерода и легких несгоревших углеводородов. Приведены показатели токсичности ОГ при работе автомобильного дизеля на ДМЭ. Показано, что при его переводе с нефтяного ДТ на ДМЭ дымность ОГ снижается практически до нуля и радикально (на порядок) снижается эмиссия оксидов азота. При этом несколько возрастают выбросы монооксида углерода и легких несгоревших углеводородов. Приведена оценка технической, социально-экономической и экологической эффективности применения ДМЭ на автомобильном транспорте.

Марков В.А., Камалтдинов В.Г., Поздняков Е.Ф., Бирюков Н.Н., Карпец Ф.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск, ООО «Техно-Хилл Клуб», Москва) проанализировали показатели дизельного двигателя при подаче водородно-воздушной смеси на впуске. Рассмотрены проблемы, возникающие при конвертировании дизеля к работе на водороде. Проанализированы особенности организации рабочего процесса двигателей, работающих на водороде. Исследован способ подачи в дизель водородно-воздушной смеси с использованием установки Leader-4M, разработанной ООО «Техно-Хилл Клуб». При экспериментальных исследованиях испытан дизель Д-245 (4 ЧН 11/12,5). Использование этой установки позволило подавать на впуск исследуемого дизеля 0,9 % (масс.) водорода (с учетом разности теплотворных способностей нефтяного ДТ и водорода) на режиме максимальной мощности и 4,1 % водорода на режиме холостого хода. Проведены экспериментальные исследования стационарного дизеля Д-245 (4 Ч 11/12,5) с подачей водорода на впуске, получаемого на этой установке. За счет подачи на впуск указанного количества водорода отмечено небольшое повышение эффективных показателей дизеля. При этом на режиме максимальной мощности эффективный КПД дизеля увеличивается незначительно, а на режимах с частичной нагрузкой рост эффективного КПД достигает 5,6 %. Указанная подача водорода на впуске дизеля позволила снизить дымность ОГ при росте содержания в ОГ оксидов азота. На режиме максимальной мощности подача водорода на впуске привела к снижению дымности ОГ с 10,1 до 8,2 % по шкале Хартриджа, т. е. на 18,8 %. На этом режиме подача

водорода на впуске привела к увеличению содержания в ОГ оксидов азота от 1413 до 1502 ppm, т. е. на 6,3 %. При указанной подаче водорода на впуске отмечена тенденция снижения выбросов с ОГ монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Попов А.Е., Лысов И.О., Чернов К.Е. (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) привели результаты экспериментальных исследований влияния увеличенной энергии зажигания на показатели газового двигателя. Исследованы особенности протекания рабочего цикла газопоршневого двигателя при работе на метане, воспламеняемом системой зажигания. Испытания проведены на двигателе типа ВАЗ-21124 с увеличенной до 12 степенью сжатия для работы на обедненных топливно-воздушных смесях с коэффициентом избытка воздуха от 1,3 до 1,6. Регистрация индикаторных диаграмм проводилась с помощью датчика давления фирмы AVL, установленного дополнительно в КС четвертого цилиндра. Для обеспечения эффективного сгорания использовалась экспериментальная система зажигания с увеличенной энергией зажигания. Регулирование энергии зажигания осуществлялось включением/отключением дополнительных модулей зажигания. Испытания проводились с одним, двумя и четырьмя модулями зажигания, работающими одновременно при энергиях зажигания 75, 150 и 300 мДж соответственно. Результаты обработки индикаторных диаграмм показали, что при увеличении энергии зажигания процесс сгорания обедненных топливно-воздушных смесей протекал более активно. При этом скорость нарастания давления и максимальное давление газов в цилиндре существенно повышались, а эффективные и индикаторные показатели улучшались на 2...4 %.

Камалтдинов В.Г., Марков В.А., Лысов И.О., Попов А.Е., Яруллина Р.Р. (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили результаты расчетных исследований влияния динамики смесеобразования на процесс сгорания и показатели рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля. Приведено описание разработанной математической модели закона изменения скорости смешения паров топлива с воздухом и программы для моделирования рабочего цикла дизеля ЧН 15/16 с системой топливоподачи аккумуляторного типа. Установлено, что при увеличении поданной в первой половине процесса впрыска доли топлива от 30 до 62 % продолжительность основного процесса сгорания уменьшается с 60 до 40 град п.к.в., максимальное давление в цилиндре увеличивается от 12,6 до 15,2 МПа (на 20,5 %), максимальная температура цикла повышается на 57 °С (на 3,4 %), а индикаторные показатели рабочего цикла улучшаются на 5,7 %. При увеличении продолжительности смешения паров топлива

от 50 до 90 град п.к.в. продолжительность основного процесса сгорания увеличивается от 22–25 до 40 град п.к.в., индикаторные показатели улучшаются на 32 %, максимальная температура сначала возрастает на 115 К (до 1752 К), а затем снижается, а максимальное давление в цилиндре сначала увеличивается до 16,55 МПа, затем снижается на 8,8 %. При дальнейшем увеличении продолжительности смешения паров топлива до 110 град п.к.в. процесс сгорания растягивается, и большая часть топлива сгорает после ВМТ, максимальные давление и температура в цилиндре существенно снижаются с 13,3 МПа и 1650 К соответственно, а индикаторные показатели ухудшаются на 2,1 %. Таким образом, эффективный процесс сгорания дизеля может быть достигнут при подаче не менее 55 % топлива в первой половине процесса впрыска и при продолжительности смешения топлива с воздухом ~ 90 град п.к.в.

Фомин В.М., Апельинский Д.В. (Московский политехнический университет) исследовали кинетику окисления азота при горении расслоенных смесей. Отмечено, что в условиях горения расслоенных смесей в КС ДВС целевой задачей моделирования образования оксидов азота является оценка пространственных полей распределения температур и коэффициента избытка воздуха в объеме КС. Отмечено, что на режиме работы ДВС с послойным распределением заряда процессы впрыска, испарения, перемешивания и горения в небольшом объеме КС протекают интенсивно и практически одновременно. В результате во время расширения в цилиндре находится однородно-перемешанная (гомогенная) смесь. Продолжительность интервала активного горения и время его подхода к каждой выделенной зоне КС могут быть установлены по известному закону тепловыделения. По полученным данным проведен расчет локальной концентрации оксидов азота в составе продуктов сгорания каждой зоны КС. Расчеты проведены применительно к двигателю типа BAG автомобиля Golf фирмы Volkswagen. На режимах с высокими нагрузками ДВС работал на гомогенных смесях стехиометрического состава, а на частичных — на обедненных смесях с расслоением заряда. В соответствии со штатной программой управления фирмы Bosch для указанного ДВС установлен предельно максимальный режим работы с послойной организацией заряда, который реализуется при среднем эффективном давлении 0,4 МПа и частоте вращения вала 3000 мин⁻¹. Для этого режима среднее по объему камеры сгорания значение коэффициента избытка воздуха равно 2,3. Конечная температура горения и ее максимальное значение в начальной зоне для богатых смесей ($\alpha = 0,9$) достигается быстрее, чем для бедных. В результате в зонах с бедной смесью температура сгорания и содержание в ОГ

оксидов азота оказываются существенно ниже. Совокупное влияние температурного и концентрационного факторов проявилось следующим образом. Осредненное по объему КС расчетное содержание оксидов азота в продуктах сгорания после их перемешивания соответствует 710 ppm. В варианте системы горения однородной смеси концентрация оксидов азота оказалась в 2 раза выше, чем в варианте горения с послойным распределением заряда.

Ощепков П.П., Шаталов И.К., Шаталова И.И., Шкарин К.В. (РУДН) исследовали возможность использования вторичных ресурсов судового дизеля для повышения его мощности и топливной экономичности. У наиболее экономичных малооборотных судовых дизелей удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме составляет 178 г/(кВт·ч) при эффективном КПД 47 %. У среднеоборотных четырехтактных дизелей эти показатели равны 186...195 кг/(кВт·ч) и 43...45 %. Перспективы дальнейшего роста экономичности этих дизелей ограничены. Поэтому определенный интерес представляет применение на судах пародизельных установок. Такая установка включает в себя дизель, теплообменник (паровой котел), конденсатор, насос, паровую турбину и редуктор. В этой установке ОГ дизеля с высокой температурой поступают в теплообменник, где из конденсата, подаваемого насосом, образуется пар с повышенными давлением и температурой. Пар расширяется в паровой турбине, приводящей винт через редуктор (турбозубчатый агрегат). Отработавший пар из турбины поступает в конденсатор. Давление конденсата равно 0,007...0,005 МПа, а температура составляет 20...40 °С. Выполнен расчет параметров пародизельной установки с четырехтактным дизелем с газотурбинным наддувом номинальной мощностью 4000 кВт при степени повышения давления в компрессоре 2, коэффициенте избытка воздуха 2 и коэффициенте продувки 1,1. Температура ОГ дизеля на этом режиме составляет ~ 500 °С, а температура выходящих из теплообменника газов — ~ 100 °С. Расчеты показали, что использование теплоты ОГ судовых дизелей для выработки пара позволяет создать пародизельную силовую установку, у которой топливная экономичность и мощность на 20...25 % может превысить аналогичные показатели традиционного дизеля.

Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шаталова И.И., Петрив К.В. (РУДН) оценили возможности повышения эффективности использования вторичных ресурсов поршневого двигателя. Известно, что когенерационные установки (КУ) на базе поршневых двигателей широко используются при децентрализованном энергообеспечении. Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) таких установок достигает 0,8–0,9. Эффективность КУ может

значительно снижаться в связи с характером суточного графика потребления электрической нагрузки и сезонным графиком потребления тепловой энергии, которое весьма неравномерно. Оно максимально в холодный период и минимально летом (15...20 % на горячее водоснабжение). Таким образом, КУ в течение всего года работает с пониженной нагрузкой и, как показывают расчеты, ее среднегодовой КИТ снижается на 20...25 %. Одним из способов повышения экономичности КУ может быть подключение к схеме дополнительного постоянного потребителя тепловой энергии. Таким потребителем может быть теплица, обеспечивающая свежими овощами данный поселок. Приведены результаты оценки эффективности использования КУ, предназначенной не только для энергообеспечения отдельного поселка, но и для обогрева теплицы. Рассмотрена КУ с электрической и тепловой мощностью 315 и 415 кВт. Ее коэффициент использования теплоты топлива равен 0,83. Принято, что рабочая площадь теплицы равна 5000 м², потребность в тепловой энергии на обогрев 50 Вт/м². Показано, что подключение теплицы в схему энергообеспечения отдельного поселка позволяет повысить использование вторичных ресурсов поршневого двигателя и увеличить среднегодовой КИТ на 17...20 % по сравнению со штатным режимом работы без теплицы.

Марков В.А., Поздняков Е.Ф., Бовэнь Са, Сусметов А.Е. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск) провели исследования дизеля с опытными форсунками и рециркуляцией отработавших газов. Опытные форсунки отличались от серийных наличием на носке иглы распылителя местных гидравлических сопротивлений. Это позволило увеличить турбулентность потока топлива на выходе из распыливающих отверстий и улучшить качество процесса смесеобразования. Но при этом увеличивалась эмиссия оксидов азота с ОГ. В качестве средства снижения выбросов оксидов азота рассмотрена рециркуляция ОГ. Отмечена необходимость регулирования количества рециркулируемых ОГ в соответствии со скоростным и нагрузочным режимами работы дизеля. Подтверждена возможность улучшения экологических показателей дизеля Д-243 (4 Ч 11/12,5) дизель-генераторной установки с опытными распылителями форсунок путем организации рециркуляции их ОГ. На режиме максимальной мощности 36,6 кВт организация рециркуляции ОГ в количестве 10 % общего количества поступающих в КС воздуха и ОГ позволила уменьшить концентрацию оксидов азота в ОГ с 1923 до 1366, т. е. на 29 %. При этом удельный эффективный расход топлива возрос от 270,4 до 275,6 г/(кВт · ч), т. е. на 2 %.

Раков В.А. (Вологодский государственный университет) предложил метод прогнозирования эксплуатационных свойств автотранспортных

средств с энергоустановками различных типов. Основой метода являются тягово-мощностной и энергетический расчет, а исходными данными — масса автомобиля, коэффициент обтекаемости, площадь поперечного сечения и коэффициент сопротивления качению. По полученным при расчете балансу сил сопротивления, действующих на автомобиль, средней положительной и средней отрицательной мощностям на ведущих колесах определяются энергетические характеристики энергоустановки. Вычисляются основные параметры ее компонентов — максимальная мощность ДВС, максимальная емкость накопителя энергии, номинальная мощность тягового электропривода. Известны три основных типа гибридных энергоустановок (ГЭУ) — установки с последовательной, параллельной и смешанной схемой соединения ее элементов. Для сравнения используется модель расчета основных параметров автомобиля с традиционным ДВС. Условием расчета параметров ГЭУ является постоянство энергии в электрическом аккумуляторе в начале и конце испытания. Первоисточник энергии — только ДВС, т. е. без возможности подзаряда аккумулятора от внешней электрической сети. Приведено прогнозирование расхода топлива легковым автомобилем массой 1500 кг, движущимся по стандартному испытательному циклу WLTC. Расход топлива автомобилем с бензиновым ДВС за цикл составил 9,5 л/100 км (222 г/км выброса CO₂), тот же автомобиль с ГЭУ последовательного типа имел расход 5,5 л/100 км (128 г/км CO₂), с ГЭУ параллельного типа — 7,1 л/100 км (166 г/км CO₂), с ГЭУ смешанного типа — 5,62 л/100 км (131 г/км CO₂). Расчетный расход топлива автомобилем с ГЭУ в городских условиях снижается на 25...41 %. Мониторинг реальной эксплуатации показал снижение расхода топлива автомобилем с ГЭУ смешанного типа на 38 % по сравнению с аналогичным автомобилем с бензиновым ДВС.

Смирнов П.И. (Вологодский государственный университет) проанализировал результаты применения триботехнической композиции в смазочной системе ДВС. Исследованы параметры одноцилиндрового дизеля автомобильного типа до и после введения в него исследуемой товарной триботехнической композиции ArmActiv Moto 4. После 50-часовых испытаний на моторном стенде с введением присадки в моторное масло отмечено снижение удельного эффективного расхода топлива на 4...6 % практически на всех скоростных режимах работы двигателя. Наибольшее увеличение крутящего момента двигателя, составившее ~ 2,3 %, зафиксировано в диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя от 2400 до 2850 мин⁻¹. Влияние композиции на показатели моторного масла будет установлено после получения и расшифровки анализов проб масла. Для более детального анализа влияния указанной трибологической композиции на мощност-

ные и топливно-экономические показатели двигателя планируется провести испытания на двигателе большего рабочего объема.

Крутиев С.М., Зябров В.А. (МГАВТ) провели экспериментальные исследования возможности кратковременного повышения мощности судового дизеля для предотвращения аварии судна. Отмечено, что недостатком широко используемых систем воздухообеспечения с турбокомпрессорами относится их инерционность, что приводит к недостатку воздуха в начальной фазе процессов разгона ДВС. Нагнетатели воздуха с электрическим приводом, позволяющие практически мгновенно увеличивать подачу воздуха, не нашли широкого применения. Для решения указанной проблемы предложена методика, позволяющая форсировать двигатель путем увеличения концентрации кислорода в свежем воздушном заряде. Проведены экспериментальные исследования при добавлении кислорода на впуске двигателя 6 Ч 18/22 судовой пропульсивной установки. Во впускной коллектор двигателя подавался кислород из кислородного баллона через редуктор, понижающий давление. Однородность воздушного заряда во впускном коллекторе обеспечивалась путем использования впускного трубопровода длиной 2,5 м. Концентрация кислорода на впуске контролировалась датчиком кислорода, а температура и давление воздушного заряда — термометром и вакуумметром. При этом подача кислорода не влияла на температуру и давление воздушного заряда во впускном трубопроводе. Увеличение концентрации кислорода в свежем заряде до 25 % приводило к росту мощности на 7,2 % (до 118 кВт), а при росте концентрации кислорода в смеси до 30 % — на 10 % (до 121 кВт). При подаче кислорода на впуске отмечено снижение расхода топлива. Так, на режиме с полной нагрузкой при подаче воздушного заряда с 25 % кислорода топливная экономичность улучшилась на 7,5 %, а при 30 % кислорода в заряде — на 10 % по сравнению с работой на обычной топливовоздушной смеси. Отмечено, что добавление кислорода во впускной коллектор является простым и рентабельным способом кратковременного повышения мощности судового дизеля.

Соляков О.В., Уварова Л.А., Якунчиков В.В. (Российский университет транспорта, МГТУ «СТАНКИН», МГАВТ) разработали модель движения судна смешанного (река–море) плавания в условиях стесненного фарватера для системы его автоматического управления. Отмечено, что использование существующих математических методик расчета движения судов может привести к достаточно большой погрешности вычислений. Поэтому они не могут быть применены в чистом виде для реальных задач движения при полной автоматизации движения по протяженному

маршруту. Поэтому решение такой задачи автоматизации движения судна может быть в настоящее время только комплексным. Рассмотрен способ решения задачи автоматизации движения судна по стесненному фарватеру с помощью САУ, использующей данные датчиков судна (положения, внешних условий, динамических параметров), а также прогностической модели динамики судна в реальных условиях. Предложенная аналитическая модель движения судна в стесненном фарватере (речном русле) использует известные уравнения и зависимости, частично оптимизированные авторами. Аналитическая прогностическая модель движения судна в стесненном фарватере (речном русле) учитывает запас глубины под корпусом судна, вязкостное и волновое сопротивление движению, параметры винта и характеристики работы главного двигателя. Предложенная методика позволяет обеспечить достаточную точность управления органами движения судна, прогнозирование траектории судна на участках маршрута с точностью до ширины его корпуса при обратной связи с его местоположением, что позволяет судну безопасно двигаться по судовому ходу с приемлемой точностью. В качестве дальнейшего развития САУ судов в любых внешних условиях, при наличии участников движения любой интенсивности планируется использовать обучаемую нейронную сеть, которая в процессе обучения включает данные, полученные аналитико-численными подходами.

Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Марков В.А. (МАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели исследование влияния метода восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей на показатели их работы. Рассмотрены существующие методы восстановления указанных прецизионных деталей путем гальванических покрытий из нитрида титана, оксида алюминия и некоторых других. Приведен сравнительный анализ поверхностной твердости материалов с нанесенными на них различными покрытиями. Рассмотрены преимущества и недостатки различных способов восстановления деталей топливной аппаратуры, а также их влияние на показатели работы системы топливоподачи. Показано, что нанесение гальванических покрытий позволяет повысить ресурс плунжерных пар и распылителей дизельной топливной аппаратуры за счет увеличения микротвердости поверхности относительно заводских показателей.

Савельев М.А., Заяц Ю.А., Рассохин А.Е. (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань) провели экспериментальные исследования системы управления циркуляцией теплоносителя на дизеле ЯМЗ-238Д. Целью исследований являлось получение зависимостей показателей теплового состояния дизеля от режимов его работы и интенсивности циркуляции теплоносителя

в системе охлаждения (СО), а также оценка затрат на электрический привод жидкостного насоса (ЖН) при различной его производительности и заданных параметрах СО. Доказана возможность сокращения на 13...25 % времени выхода двигателя на температуры принятия нагрузки при его прогреве на режиме холостого хода. В исследованном интервале диапазона скоростных режимов работы ДВС от 400 до 3500 мин⁻¹ выявлены зависимости параметров теплового состояния от частоты вращения вала ЖН. Осуществлена термостабилизация охлаждающей жидкости (ОЖ) на переходных режимах сброса нагрузки в режиме ручного регулирования частоты вращения вала привода ЖН. Установлено, что сохранение или ступенчатое снижение производительности ЖН в течение 2...3 мин после останова двигателя предотвращает локальный перегрев деталей и закипание теплоносителя. Определена зависимость скорости изменения температур рабочих сред и контрольных точек двигателя от теплоперепада с окружающей средой после его останова. Сделан вывод о возможности использования управляемой циркуляции теплоносителя в СО для поддержания оптимального теплового состояния ДВС.

Савельев М.А., Рассохин А.Е., Заяц Ю.А. (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань) представили результаты исследования возможностей применения предпускового подогревателя для резервирования системы охлаждения дизеля. Исследована возможность резервирования элементов СО — ЖН, теплорассеивающего узла, вентилятора автомобиля КАМАЗ-4350 с использованием предпускового подогревателя ПЖД-30. Перед проведением эксперимента оценено техническое состояние автомобиля. Двигатель был прогрет до температуры ОЖ, соответствующей началу открытия термостатов (80 °С), и выведен на режим холостого хода с частотой вращения коленчатого вала ~ 600 мин⁻¹. Разработанный способ резервирования позволяет проводить регулирование и термостабилизацию теплового состояния ДВС до некоторых критических скоростных и нагрузочных режимов без использования радиатора и вентилятора. Энергопотребление насосного агрегата составило: на режиме пуска 359 Вт; на номинальном режиме 233...237 Вт. Производительность жидкостной секции ПДЖ-30 недостаточна для обеспечения циркуляции ОЖ по большому кругу, так как система функционального резервирования ЖН может полноценно использоваться только на режиме прогрева. К направлениям дальнейшего повышения эффективности разработанного способа резервирования относятся применение ЖН и воздушного нагнетателя увеличенной производительности с возможностью многопараметрического управления, а также приме-

нение дополнительного теплообменника типа ОЖ–воздух, последовательно присоединяемого после выпускного газового тракта подогревателя, с интегрированным в него термоэлектрическим генератором.

Савельев М.А., Рыжкович В.П., Заяц Ю.А. (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань, ВНК ВДВ) исследовали автономность автоматических средств обеспечения технической готовности транспортных средств в условиях холодного климата и разработали способы ее повышения. Установлено, что в условиях низких температур существующие автоматические подогреватели разряжают аккумуляторные батареи (АКБ) за 2,5...12 ч в зависимости от условий эксплуатации. Экспериментально исследован автоматический подогреватель АПЖ-20Д-24Т, получены характеристики его энергопотребления, выявлен алгоритм работы структурных элементов, тепловые характеристики и характеристики сигналов управления. Доказана возможность использования остаточной теплоты ОГ подогревателя для выработки электрической энергии. В результате разработаны автономная система автоматического обеспечения и перечень конструктивных изменений АПЖ-20Д-24Т, позволяющие уменьшить на 73 % энергопотребление. В целях повышения автономности работы подогревателя предложены следующие способы повышения технической готовности транспортного средства: использование для оценки температуры ДВС в режиме остывания выносного датчика рубашки СО, увеличение теплового диапазона остывания, утепление и подогрев аккумуляторной батареи, зональное капсулирование (покрытие элементов СО напыляемыми эластичными теплоизоляционными материалами). Комплексное применение этих способов позволило увеличить время автономной работы подогревателя ПЖД-30М более чем в 5 раз.

Строкин А.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрел особенности прогнозирования и управления развитием динамических процессов с использованием закона Вебера — Фехнера. Указано, что в безопасности систем человек–машина–окружающая среда существенную роль играет человеческий фактор. При этом параметры окружающей среды должны соответствовать оптимальным или допустимым, а интерфейс машины и рабочее место человека-оператора — его психофизиологическим характеристикам. Основным психофизиологическим законом является закон Вебера — Фехнера, устанавливающий связь между интенсивностью воздействия какого-либо внешнего фактора на оператора и характером его реакции на это воздействие и утверждающий, что интенсивность ощущения чего-либо прямо пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя. При этом под раздражителями понимаются факторы, с которыми может взаимодейство-

вать оператор — физические, химические, биологические и психофизиологические факторы. Несмотря на различную природу этих факторов, следует отметить, что все они имеют энергетический потенциал и несут некую информацию человеку. Оператор обменивается энергией с окружающей средой, при этом ~ 95 % всей информации он получает от периодических процессов — световых, звуковых и вибрационных воздействий. Поскольку человек хорошо различает частотные световые и звуковые диапазоны, предполагается, что он в состоянии раскладывать сложные колебания потоков среды на отдельные гармонические колебания. При этом он выделяет из них резонансные гармоники и формирует соответствующий отклик, оставаясь в пределах действия закона Вебера — Фехнера. Особое значение это обстоятельство имеет в ноосфере, где управленческие или прогнозные решения сопровождаются амплитудными характеристиками малой интенсивности, а внешние резонансные воздействия могут существенно повлиять на принятие окончательного решения.

Балакин А.Ю., Муратов А.В. (СамГУПС, г. Самара) представили межотраслевую лабораторию «Газомоторное и водородное топливо». Она создана по индивидуальному проекту, разработанному ООО «ГАЗПРОМ трансгаз Самара». Деятельность лаборатории направлена на энергосбережение и повышение энергоэффективности транспорта с использованием альтернативных видов топлива — природного газа, водорода, биотоплив. Лабораторные установки созданы на базе дизелей разных типоразмеров. Один из них дизель типа Д-242 (4 Ч 11/12,5) рабочим объемом ~ 5 л, другой — рабочим объемом 1,4 л и турбонаддувом. Дизель без наддува, работающий по газодизельному циклу, оборудован системой управления подачей природного газа под давлением до 0,6 МПа. Лаборатория имеет эффективную систему хранения и подвода газомоторного топлива, позволяющая использовать метан в качестве моторного топлива для лабораторных установок. Система подачи природного газа включает в себя электронную систему управления и контроля параметром (СУДМ), разработанную «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов. Система позволяет регулировать запальную дозу нефтяного ДТ и синхронизировать работу элементов газовой и топливной систем. Проведен цикл экспериментальных исследований по отладке СУДМ, определению необходимых эмпирических коэффициентов и аппроксимирующих зависимостей для выбора оптимальных режимов работы двигателя по газодизельному циклу. Проводятся также исследования в области использования водородного топлива на транспорте. С этой целью в лаборатории установлен мобильный малоразмерный дизель типа DV4TD с высокоточной системой контроля и диагностирования

параметров ДВС. Актуальным направлением деятельности лаборатории является использование биотоплив в силовых энергетических установках, проводится комплекс исследований в целях выбора типа используемого биотоплива.

Заключение. Результаты анализа выполненных исследований сводятся к следующим основным выводам. При ужесточении требований к показателям токсичности ОГ теплоэнергетических установок с ДВС, к показателям их топливной экономичности, показателям динамики процессов управления и регулирования САУ и САР становятся важнейшими системами этих теплоэнергетических установок.

Основным направлением совершенствования САУ и САР является улучшение качества процессов управления и регулирования, уменьшение доли неустановившихся режимов работы теплоэнергетических установок. Это способствует улучшению указанных эксплуатационно-технических показателей таких установок.

Функциональные возможности САУ и САР расширяются. Кроме традиционной задачи поддержания постоянства регулируемого параметра — частоты вращения коленчатого вала ДВС, температуры ОЖ и смазывающего масла, ряда других параметров, на САУ и САР возлагаются и дополнительные функции — это регулирование фаз газораспределения, параметров системы газотурбинного наддува, количества рециркулируемых ОГ и др.

Ряд исследований направлен на совершенствование параметров теплоэнергетических установок, конвертируемых на альтернативные топлива — природный газ, водород, биотоплива, смесевые топлива с добавлением углеродных нанотрубок. При этом на САУ и САР возлагаются функции компенсации различий физико-химических свойств нефтяных моторных топлив и используемых альтернативных топлив.

Характерной особенностью современных САУ и САР теплоэнергетических установок является их повсеместное построение на современной микропроцессорной элементной базе. Применение таких систем позволяет реализовывать комплексное адаптивное управление параметрами теплоэнергетических установок и их систем и тем самым обеспечить удовлетворение современным жестким требованиям к эксплуатационно-техническим показателям этих установок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зоркальцев В.И. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию. Новосибирск, Наука, 2000.

- [2] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 4. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2013.
- [3] Александров А.А., Марков В.А., ред. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., ООО «Инженер», ООО «Онико-М», 2012.
- [4] Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 1989.
- [5] Bosch. Системы управления дизельными двигателями. М., За рулем, 2004.
- [6] Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями. М., За рулем, 2005.
- [7] Шатрова М.Г. Автомобильные двигатели. М., Академия, 2011.
- [8] Охотников Б.Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2014.
- [9] Медовщиков Ю.В. Основы тепловых двигателей внутреннего сгорания. М., Русайнс, 2018.
- [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] Ипатов А.А., Кутенев В.Ф., Лукшо В.А. и др. Автотранспорт и экология мегаполисов. М., Машиностроение, 2011.
- [14] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [15] Шароглазов Б.А., ред. Двигатели внутреннего сгорания. Теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2005.
- [16] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ, 2000.
- [17] Шатров М.Г., Хачиян А.С., Голубков Л.Н. и др. Совершенствование рабочих процессов автотракторных дизелей и их топливных систем, работающих на альтернативных топливах. М., Изд-во МАДИ, 2012.
- [18] Марков В.А., ред. Моторные топлива, производимые из растительных масел. Рига, Lambert Academic Publ., 2019.
- [19] Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М., Факториал Пресс, 2002.
- [20] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М., Легион-Автодата, 2005.
- [21] Пупков К.А., Фалдин Н.В., Егупов Н.Д. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [22] 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.

[23] Пупков К.А., Егупов Н.Д., ред. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

[24] Губертус Г. Диагностика дизельных двигателей. М., За рулем, 2004.

[25] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М., Легион-Автодата, 2013.

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные 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. *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>

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION SYSTEMS FOR HEAT AND POWER PLANTS

V.A. Markov

markov58@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The modern stringent requirements for fuel efficiency, exhaust gases toxicity and dynamic performance can only be met by equipping thermal power plants with modern control and regulation systems. Thermal power plants based on internal combustion engines have found the greatest application. They are used in different fields — automobile and railway transport, agricultural, road-building and forestry machines, in ship-building, aviation, stationary power plants. The analysis of the main directions for further improvement of thermal power plants with internal combustion engines and their automated control and regulation systems has been carried out. Among these directions are an expansion of functional capabilities in such systems, improvement of control and regulation processes quality and their use at adaptation of thermal power plants to work on alternative fuels. The important aspects for improvement of thermal power plants with internal combustion engines are the neces-

Keywords

Heat and power plant, internal combustion engine, diesel engine, gasoline engine, automatic control system, automatic regulation system

sity of studying the working processes of engines and their systems in order to decrease the exhaust gases toxicity. The relevance of these systems research is shown and the evaluation of the current level in their development is made. A characteristic feature of modern control and regulation systems of thermal power plants is their widespread construction on modern microprocessor element base

Received 24.03.2021

Accepted 16.04.2021

© Author(s), 2021

The paper was based on the materials of the reports of the all-Russian scientific and technical conference n.a. Professor V.I. Krutov (27.01.2021)

REFERENCES

- [1] Zorkal'tsev V.I. Mirovaya energetika i perekhod k ustoychivomu razvitiyu [World energetics and transition to sustainable development]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000.
- [2] 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.
- [3] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. Al'ternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, LLC "Inzhener" Publ., LLC "Oniko-M" Publ., 2012.
- [4] Krutov V.I. Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigateley vnutrennego sgoraniya [Automated regulation and control on combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [5] Bosch. Sistemy upravleniya dizel'nymi dvigatelyami [Bosch. Control systems for diesel engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2004.
- [6] Bosch. Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami [Bosch. Control systems for petrol engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2005.
- [7] Shatrova M.G. Avtomobil'nye dvigateli [Car engines]. Moscow, Akademiya Publ., 2011.
- [8] Okhotnikov B.L. Eksploatatsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Exploitation of combustion engines]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2014.
- [9] Medovshchikov Yu.V. Osnovy teplovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Fundamentals of heat combustion engines]. Moscow, Rusayns Publ., 2018.
- [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 engine burnt gases]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002.
- [12] Kul'chitskiy A.R. Toksichnost' avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley [Exhaust emission of automotive and tractor engines]. Vladimir, VGU Publ., 2000.

- [13] Ipatov A.A., Kutenev V.F., Luksho V.A., et al. Avtotransport i ekologiya megapolisov [Motor transport and ecology of metropolises]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011.
- [14] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016.
- [15] Sharoglazov B.A., ed. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Combustion engines. Theory, modelling and calculation of processes]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2005.
- [16] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Using alternative fuels in combustion engines]. Moscow, MADI Publ., 2000.
- [17] Shatrov M.G., Khachiyani A.S., Golubkov L.N., et al. Sovershenstvovanie rabochikh protsessov avtotraktornykh dizeley i ikh toplivnykh sistem, rabotayushchikh na al'ternativnykh toplivakh [Improvement of working processes in diesel tractor engines and their fuel systems working on alternative fuels]. Moscow, MADI Publ., 2012.
- [18] Markov V.A., ed. Motornye topliva, proizvodimye iz rastitel'nykh masel [Motor fuels made from oils]. Riga, Lambert Academic Publ., 2019.
- [19] Vasil'yev F.P. Metody optimizatsii [Optimization method]. Moscow, Faktorial Press Publ., 2002.
- [20] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley [Fuel equipment and diesel control systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005.
- [21] Pupkov K.A., Faldin N.V., Egupov N.D. Metody sinteza optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Synthesis methods for optimum automated control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Hubertus G. Dieseldiagnose. Fehlersuche an modernen Dieselmotoren. Würzburg, Vogel Buchverlag, 2001.
- [25] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis toplivopodayushchikh sistem dizeley [Design, computation and technical service of diesel fuel-delivery systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013.

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. 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>

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография авторов
**А.Е. Бром, В.М. Картвелишвили,
И.Н. Омельченко**

**«Теория и практика
моделирования динамики
экономических систем
в промышленности»**



Исследованы актуальные научные проблемы моделирования динамических процессов в экономических системах. Изложены основы моделирования динамики производственно-сбытовых и социально-психологических процессов взаимодействия экономических субъектов. Представлены разработанные авторами динамические модели, отражающие различные аспекты функционирования экономических систем в промышленности. Проанализированы прикладные аспекты использования инструментов системной динамики и агентного моделирования для исследования мультиагентного взаимодействия и проблем внедрения современных технологий цифрового производства.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<https://bmstu.press>