

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ****В.А. Марков**

markov58@bmstu.ru

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

Обоснована актуальность исследований, направленных на дальнейшее совершенствование систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок, преимущественно установок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Проведена оценка современного уровня их развития, проанализированы перспективы их использования в качестве мобильных и стационарных теплоэнергетических установок. Эти установки широко используются в различных отраслях экономики — в энергетике, на транспорте, сельском хозяйстве. Рассмотрены основные направления дальнейшего совершенствования этих установок и их систем автоматического управления и регулирования. Отмечено, что целями проводимых исследований являются дальнейшее увеличение мощностных показателей теплоэнергетических установок, улучшение показателей их топливной экономичности и токсичности отработавших газов, повышение динамических качеств двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены также основные направления совершенствования систем топливоподачи и воздухообеспечения двигателей, их рабочего процесса, адаптации двигателей к работе на различных альтернативных видах топлива. Сделан вывод о необходимости расширения функциональных возможностей систем управления и регулирования, реализации комплексного адаптивного управления теплоэнергетической установкой и ее системами, использования в структуре регуляторов электронных микропроцессорных устройств, многопараметрической оптимизации работы теплоэнергетической установки и ее элементов с учетом целого комплекса параметров этой установки

**Ключевые слова**

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

Поступила 23.06.2020

Принята 28.07.2020

© Автор(ы), 2020

*Статья подготовлена по материалам докладов ВНТК имени профессора В.И. Крутова (29.01.2020)*

**Введение.** Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) применяются практически во всех видах мобильных и стационарных теплоэнергетических установок и остаются основным типом тепловых двигателей благодаря своей экономичности, надежности и автономности. Как основной источник энергии для указанных установок ДВС остаются и основными потребителями нефтяных моторных топлив, при сгорании которых образуются вредные вещества, выбрасываемые в атмосферу [1–3]. В связи с этим к теплоэнергетическим установкам с ДВС предъявляется целый ряд достаточно жестких требований, основными из которых являются требования к их мощностным и динамическим показателям, к топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ). При этом требования к токсичности ОГ становятся приоритетными [4–6].

Следует отметить многорежимность мобильных энергетических установок с ДВС. При работе на режимах с частичными скоростными режимами и неполными нагрузками, а также на неустановившихся режимах нарушается согласованность различных частей комбинированных двигателей — поршневой части ДВС, системы газотурбинного наддува, систем топливоподачи, газораспределения, охлаждения [7–9] и др. Согласование параметров и характеристик этих систем обеспечивается путем оснащения теплоэнергетических установок различными системами автоматического управления и регулирования (САР и САУ) [10–12]. В этом случае возможно достижение требуемых показателей работы двигателей теплоэнергетических установок и удовлетворение предъявляемых к ним жестких требований.

Наряду с исследованиями САР и САУ поршневых двигателей необходимы исследования и других указанных ранее систем ДВС. Серьезными проблемами двигателестроения остаются проблемы улучшения качества рабочего процесса двигателей, обеспечивающего улучшенные показатели их топливной экономичности, снижение вредных выбросов с ОГ двигателей, их адаптация к работе на различных альтернативных видах топлива. Актуальность решения этих проблем подтверждается практикой эксплуатации теплоэнергетических установок с поршневыми двигателями и многочисленными исследованиями ДВС [13–16]. Приведенные работы отражают современное состояние и перспективы развития САР и САУ теплоэнергетических установок различного назначения.

**Методы решения задач совершенствования САР и САУ теплоэнергетических установок.** При совершенствовании этих систем используются различные подходы к их исследованию. При корректных подходах к исследованиям наиболее информативными и достоверными являются экспериментальные исследования САР и САУ. Они позволяют получить практиче-

ски любые данные по параметрам и характеристикам указанных систем. Вместе с тем экспериментальная оценка свойств САР и САУ осложняется необходимостью проведения трудоемких исследований. В этом случае необходимо изготовление нескольких вариантов экспериментальных образцов исследуемых систем, создание экспериментального стенда, оснащение его необходимыми средствами измерений и проведение трудоемких продолжительных испытаний.

В ряде случаев представляются рациональными расчетные методы исследования, базирующиеся на современных моделях САР и САУ, моделях объектов регулирования и управления. Использование современных программных комплексов для моделирования САР и САУ позволяет с наименьшими материальными и временными затратами оценить свойства этих систем, их влияние на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ теплоэнергетических установок. При этом появляется возможность расчетного исследования значительного числа вариантов САР и САУ, что не всегда возможно при использовании экспериментальных методов исследования.

Еще одним направлением исследования указанных систем является их полунатурное моделирование, при котором натурные элементы регуляторов (электронные блоки, датчики, исполнительные устройства) сопрягаются с динамической моделью двигателя, которая имитирует его функционирование в реальном времени. Такое полунатурное моделирование позволяет сократить сроки разработки теплоэнергетической установки, уменьшить стоимость процесса разработки и испытаний САР и САУ.

При исследованиях статических и динамических качеств САР и САУ могут быть использованы различные методы. Среди них оценка устойчивости систем управления и регулирования, расчеты переходных процессов в этих системах с использованием линейных и нелинейных математических моделей, построение частотных характеристик систем и их элементов, получение и анализ их логарифмических частотных характеристик, использование методов оптимизации параметров САР и САУ, ряд других методов.

**Основное содержание выполненных исследований.** Во вступительном слове ведущий конференции — профессор А.Г. Кузнецов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отметил возрастающий интерес к исследованиям САР и САУ теплоэнергетических установок с ДВС. Показан широкий круг задач разработки современных поршневых ДВС, их САР и САУ.

В работе Лю Ин, А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонова, В.В. Фурмана, И.А. Черезова, С.В. Плахова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) «Расчетное и экспериментальное исследование тепло-

возного дизеля при отключении цилиндров» приведены результаты исследования этого метода улучшения эксплуатационных показателей тепловозного дизеля. Расчетное исследование, проведенное на компьютерной модели в программном комплексе (ПК) GT Power, показало, что при отключении части цилиндров для снижения расхода топлива необходимо закрыть клапаны неработающих цилиндров. Метод отключения цилиндров эффективен на режимах холостого хода и малых нагрузок. Испытания дизеля Д50 (6ЧН31,8/33) на режимах тепловозной характеристики с низкой частотой вращения подтвердили выводы расчетного анализа. Хорошее совпадение данных экспериментального исследования с результатами расчетов показывает возможность использования разработанной компьютерной программы для исследования метода отключения цилиндров дизелей.

А.Г. Кузнецов, М.Ю. Копытов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) разработали климатическую камеру для испытаний двигателей в условиях, приближенных к условиям Крайнего Севера. Приведена схема климатической камеры с установкой, обеспечивающей снабжение испытательного стенда воздухом заданной температуры, поддержание которой на различных режимах осуществляется системой автоматического регулирования. Приведена разработанная математическая динамическая модель температурного состояния климатической камеры, предназначенная для расчета переходных процессов изменения температуры элементов испытательного стенда при отладке его системы регулирования.

О.Н. Соколов, Ю.Е. Хрящёв (АО ГМЗ «Агат», ФГБОУ ВО «ЯГТУ») исследовали динамику впрыскивания и надежность топливных форсунок при работе авиационного дизеля на керосине ТС-1. Рассмотрены конструкции форсунок, применяемых для впрыскивания керосина ТС-1 в цилиндры высокооборотного авиационного дизеля. Проведены исследования динамики впрыскивания керосина ТС-1 с использованием трех типов топливных форсунок и определено влияние их конструктивных особенностей на колебания давления топлива в полостях системы топливоподачи. В целях разработки алгоритма управления установлены особенности работы форсунок при двухфазной подаче керосина ТС-1 в дизель. Экспериментально подтверждено существенное повышение надежности форсунок алмазоподобным покрытием (DLC) на наиболее ответственных прецизионных узлах при их работе на керосине ТС-1.

М.Г. Шатров, А.Ю. Дунин, Нгуен Тхинь Куинь, С.М. Калинина, П.И. Беляев (ФГБОУ ВО «МАДИ») исследовали особенности реализации рабочего процесса дизеля при давлении впрыскивания 300 МПа. Эксперименты проведены на одноцилиндровой установке 1ЧН12/13, оборудован-

ной регулируемым наддувом и системой индицирования. Результаты экспериментального и расчетного исследования влияния давления впрыскивания подтвердили принципиальную возможность снижения выбросов токсичных составляющих до уровня 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 выбросы оксидов азота уменьшились на 23,2 %, но этого недостаточно для достижения требований Euro 6 — предельный выброс равен 0,4 г/(кВт · ч). Для удовлетворения этих требований дополнительно применена рециркуляция ОГ со степенью рециркуляции, равной 27 %. Однако это привело к снижению индикаторной мощности на 4,3 % и увеличению удельного эффективного расхода топлива на 4,9 %.

М.Г. Шатров, В.В. Синявский, А.В. Гонтюрев, А.В. Кригульский, В.В. Кремнев (ФГБОУ ВО «МАДИ») провели анализ путей организации высокого наддува среднеоборотного дизеля. Спрогнозированы показатели среднеоборотного дизеля 6ЧН20/28, форсированного до среднего эффективного давления, равного 2,7 МПа, при использовании одно- и двухступенчатого наддува. При оснащении исследуемого дизеля обеими системами наддува получены близкие показатели его работы. В частности, на номинальном режиме удельный эффективный расход топлива оказался равен 183,0...184,5 г/(кВт · ч). Близкими оказались и показатели тепловой и механической напряженности, безопасные для дизеля и турбокомпрессоров (ТК). При использовании ТК, выбранных для двухступенчатой системы наддува, имеются резервы для дальнейшего форсирования дизеля до среднего эффективного давления порядка 3,2 МПа.

П.В. Сафронов, А.В. Кудинова (ФГБОУ ВО «МАДИ») предложили использовать показатели неравномерности частоты вращения коленчатого вала для оценки крутящего момента в системе управления ДВС. Отмечено, что определение функциональной зависимости между частотой вращения и параметрами тепловыделения в каждом цилиндре позволит решить различные задачи, связанные с адаптивным управлением силовой установкой по измеренному значению давления газов в цилиндре. Показано, что между гармоническими составляющими мгновенной частоты вращения и индикаторными показателями двигателя существует взаимосвязь. Отмечено наличие линейной взаимосвязи между средним крутящим моментом и амплитудой главной гармоники низшего порядка. Период изменения этой гармоники равен периоду изменения крутящего момента двигателя.

А.Ю. Дунин, П.В. Душкин, С.С. Ховренко, В.В. Кремнёв (ФГБОУ ВО «МАДИ») провели исследование теплового состояния двигателя как управляемого фактора. Проанализированы возможности управления температурой охлаждающей жидкости для улучшения топливной экономичности и снижения вредных выбросов с ОГ бензинового двигателя. Приведены результаты моторных испытаний двигателя ВАЗ 21124. Они свидетельствуют о том, что увеличение температуры охлаждающей воды с 72 до 86 °С на режиме с частичной нагрузкой позволило снизить удельный эффективный расход топлива на 0,7 %.

А.Л. Яковенко, М.Г. Шатров, А.О. Глазков, С.М. Кузнецов, А.А. Предеин (ФГБОУ ВО «МАДИ») провели исследование влияния режима работы на уровень структурного шума ДВС. Рассмотрены физическая модель и методика моделирования структурного шума ДВС на разных этапах его проектирования. Представлены результаты расчета рабочего процесса и структурного шума дизеля 6ЧН10,7/12,4 на стационарных режимах внешней скоростной характеристики. При увеличении частоты вращения от 1000 до 2300 мин<sup>-1</sup> уровень звуковой мощности вырос на 10 дБ. Определенный научный интерес представляет оценка показателей двигателя на переходных режимах. Сформулированы и проанализированы отличия в протекании рабочих процессов дизеля в переходном процессе разгона от соответствующих процессов для установившегося режима. Приведена методика и программные средства для расчета рабочего цикла и структурного шума двигателя в переходном процессе разгона.

Ю.Е. Драган (Владимирский государственный гуманитарный университет) сравнил отечественный и китайский подходы к исследованиям влияния деформирования деталей электрогидравлических форсунок (ЭГФ) аккумуляторной топливной системы Common Rail на их работу. В ряде публикаций китайских ученых исследования деформации деталей ЭГФ и подъема иглы распылителя выполнены изолированно друг от друга. В результате не рассмотрено влияние этих деформаций на процесс впрыскивания топлива. Поэтому предлагаемый подход предусматривает испытание ЭГФ в составе системы Common Rail. Исследования показали, что деформирование деталей ЭГФ приводит к усложнению структуры цикла подачи топлива в этой топливной системе дизеля. В соответствии с этой структурой в переднем фронте цикла этапу подъема иглы распылителя предшествует этап разгрузки деформированных деталей ЭГФ. После этапа посадки иглы возникает этап деформирования деталей ЭГФ до выравнивания давления топлива в камере управления и аккумуляторе. Осциллограммы перемещения иглы

свидетельствуют о том, что деформирование деталей ЭГФ влияет на все этапы процесса впрыскивания.

Ю.Е. Драган (Владимирский государственный гуманитарный университет) провел моделирование процессов подачи топлива ЭГФ. Передний фронт цикла подачи состоит из этапов разгрузки и подъема иглы распылителя. Моделирование этапа разгрузки деформированных деталей ЭГФ базируется на балансе топлива в камере управления при открытом выходном жиклере. Решение дифференциальных уравнений, отражающих зависимости снижения давления топлива в этой камере от времени, позволяет определить время начала подъема иглы по равенству запирающей и подъемной сил. При давлении топлива в аккумуляторе 60 МПа расчетное время подъема иглы до упора составило 149 мкс. Экспериментальные значения этого параметра по 22 осциллограммам, записанным при давлениях в аккумуляторе от 60 до 80 МПа, находятся в интервале от 140 до 260 мкс при среднем значении 219,1 мкс.

В работе В.А. Маркова, В.В. Фурмана, С.В. Плахова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) «Управление углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в тепловозном дизеле» приведена система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 для тепловозного дизеля Д50 (6ЧН31,8/33), в котором управление топливоподачей осуществляется электромагнитным клапаном, установленным в штуцере топливного насоса высокого давления (ТНВД). Проведены испытания дизель-генераторной установки (ДГУ) 1-ПДГ4Д с дизелем Д50 и тяговым генератором МПТ-84/39. Предложена оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления УОВТ на режимах тепловозной характеристики. Она предусматривает уменьшение УОВТ от 16,8 до 3,6 град поворота коленчатого вала (п.к.в.) до верхней мертвой точки (ВМТ) при переводе контроллера машиниста с восьмой позиции на первую. При замене серийной системы топливоподачи на опытную ЭСУВТ.01 снижение интегрального эксплуатационного расхода топлива дизеля Д50 составило 2,94 г/(кВт · ч), т. е. 1,3 %. Дополнительное уменьшение расхода топлива достигается оптимизацией закона топливоподачи и более равномерным дозированием топлива по цилиндрам.

В работе Н.Н. Патрахальцева, А.А. Савастенко, Э.А. Савастенко, В.А. Маркова, В.Л. Трифонова (РУДН, ФГБОУ ВО «МАДИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Форсирование четырехтактного двигателя в области низких частот вращения переводом на работу по двухтактному циклу» отмечено, что двухтактные ДВС применяются в мелкой бытовой технике (бензопилы, газонокосилки, мотоблоки и др.) и крупных силовых уста-

новках (судовых и стационарных). Худшие показатели топливной экономичности двухтактных двигателей отчасти компенсируются лучшими показателями их удельной мощности. Для перевода ДВС с четырехтактного на двухтактный цикл использован двигатель 2/4SIGHT компании Ricardo (Великобритания). Этот базовый дизельный двигатель схемы V6 с рабочим объемом 2,1 л в шестицилиндровой конфигурации обеспечил показатели, характерные для бензиновых двигателей схемы V8 с рабочим объемом 3–4 л. Для реализации двухтактной работы применены двухступенчатый наддув с промежуточным охлаждением воздуха и система переключения клапанов газораспределения. Испытания показали, что в двухтактном цикле крутящий момент двигателя составил  $450 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , что соизмеримо с крутящим моментом четырехтактного двигателя без наддува с рабочим объемом 4,5 л.

П.Р. Вальехо Мальдонадо, С.Н. Девянин, В.А. Марков, С.А. Зыков (РУДН, МГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели сравнительный анализ характеристик впрыскивания нефтяного дизельного топлива (ДТ) и рапсового масла (РМ). Отмечено, что параметры топливоподачи зависят от свойств топлива. При проведении испытаний высокооборотного дизеля типа МД-6 (1Ч8,0/7,5) с непосредственным впрыском топлива МД-6 проведено индицирование давления топлива у штуцера форсунки (давления впрыскивания). Испытания показали, что при впрыскивании РМ это давление в среднем на 2 МПа больше, чем при впрыскивании ДТ. На номинальном режиме с частотой вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и цикловой подачей  $16 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  оно составило соответственно 29,9 и 27,7 МПа. При небольших цикловых подачах эти давления практически одинаковы. Угол достижения максимального давления топлива у штуцера форсунки практически не изменялся при переходе от ДТ к РМ. На номинальном режиме продолжительность топливоподачи РМ и ДТ составила 7,2 и 6,5 град п.к.в. В целом при впрыскивании ДТ и РМ разница в параметрах топливоподачи оказалась несущественной.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, Р.Р. Яруллин, А.С. Васютин (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели исследование влияния геометрии распыливающих отверстий дизельной форсунки на динамику развития топливных струй. На установке «Впрыск», созданной в ЮУрГУ, исследован впрыск топлива электромагнитной форсункой с восемью распыливающими отверстиями одинакового диаметра (распылитель № 1) и различного диаметра (распылитель № 2). Давление в топливной рампе регулировалось в диапазоне от 100 до 165 МПа, продолжи-



тельность управляющего импульса составляла 1,5 мс. Давление сжатого воздуха в камере постоянного объема поддерживалось на уровне 30 бар. Установлено, что у распылителя № 1 наибольшую длину имеют струи из отверстий № 4 и № 5 (с меньшим углом отклонения от оси форсунки). Разность с длинами струй из других отверстий достигала 10...15 мм и сохранялась до касания со стенкой камеры, а у распылителя № 2 струи развивались более равномерно — наибольшее различие длин струй из отверстий № 4 и № 5 от других не превышало 3...5 мм. При давлении впрыска, равном 100 МПа, средняя скорость развития струй у распылителя № 2 на 10 % меньше, чем у распылителя № 1 (43 и 47 м/с). При повышении давления впрыска до 165 МПа скорости выравниваются и составляют ~ 52 м/с. С увеличением давления топлива в рампе от 100 до 165 МПа углы конусов струй у распылителя №1 уменьшаются от 20...22° до 18...18,5° (в среднем на 13,6 %). Углы конусов струй у распылителя № 2 сокращаются от 20...24° до 19...22,5° (в среднем на 5,7 %). С увеличением давления в рампе от 100 до 165 МПа цикловая подача топлива распылителя № 1 увеличивается на 31 %, а распылителя № 2 — на 38,4 %.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, А.Е. Попов (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели моделирование процесса сгорания в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания (КС) и аккумуляторной системой топливоподачи. Приведено описание разработанной модели процесса смесеобразования и сгорания и программы для расчета рабочего цикла дизеля с заданным законом смесеобразования. Модель смесеобразования представлена в виде системы уравнений и описывает скорость смешения молекул топлива с воздухом, изменение объема всех топливных струй и долю, которую они занимают в КС дизеля. Эта доля, в которой топливо распределено равномерно по объему КС, определяется как при условиях свободного развития струй, так и при развитии струй в периферийной зоне КС. Процесс сгорания описывается системой уравнений и рассматривается как совокупность последовательных реакций окисления групп активных молекул топлива, протекающих по закону Аррениуса. Условная продолжительность окисления групп активных молекул топлива определяется в зависимости от объема струй, количества молекул кислорода и инертных компонентов в этом объеме. Теплота, выделяющаяся при окислении каждой группы активных молекул топлива, расходуется на повышение давления в цилиндре и температуры смеси в объеме, занимаемом струями, а также на процесс диссоциации диоксида углерода.

В.А. Марков, А.С. Кулешов, А.Д. Денисов, А.Н. Зенкин, А.С. Землемерова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели расчетные исследования способов подачи воды в цилиндры дизеля. Рассмотрены возможности подачи воды в цилиндры для снижения выбросов токсичных компонентов ОГ дизелей. Проведены расчетные исследования дизеля типа Д-245 (4ЧН11/12,5), в котором организована подача воды во впускной трубопровод до и после компрессора, во впускной патрубке вблизи впускного клапана и при непосредственном впрыскивании воды в цилиндр дизеля. Наибольший эффект по снижению токсичности ОГ дизеля достигнут при непосредственном впрыскивании воды в цилиндр дизеля. При работе дизеля на режиме максимальной мощности 85,5 кВт при 2400 мин<sup>-1</sup> с цикловой подачей топлива, равной 63,5 мг, и подачей воды непосредственно в цилиндр в количестве 19 мг (30 % масс.) приводит к снижению выброса оксидов азота от 3,049 до 2,012 г/(кВт · ч), т. е. на 34 %, к уменьшению выброса твердых частиц от 0,352 до 0,321 г/(кВт · ч), т. е. на 8,8 %. При этом удельный эффективный расход топлива увеличился от 214 до 225 г/(кВт · ч), т. е. на 5,6 % по сравнению с чисто дизельным циклом (без подачи воды).

В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков, В.В. Фурман, В.Г. Камалтдинов, Са Бовэнь, В.А. Неверов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов, ЮУрГУ, г. Челябинск) исследовали возможность использования углеродных нанотрубок в качестве экологической добавки к смесевому биотопливу. Отмечено, что одним из современных направлений достижения требуемых экологических показателей дизелей является добавление в нефтяное ДТ различных экологических добавок. Проведены испытания дизеля, работающего на ДТ с добавками подсолнечного масла (ПМ) и углеродных нанотрубок (УНТ). На первом этапе исследован дизель типа Д-243, работающий на нефтяном ДТ при добавлении в него 125, 250 и 500 мг/л УНТ. Смешивание ДТ с нанотрубками проводилось с использованием ультразвуковой установки. Показана возможность улучшения экологических показателей дизеля при добавлении в нефтяное ДТ нанотрубок. Так, на режиме с полной нагрузкой работы дизеля добавка в ДТ нанотрубок в количестве 500 мг/л позволила сократить дымность ОГ с 26 до 11,2 % по шкале Хартриджа. На втором этапе исследован этот же дизель на смесях ДТ, ПМ и УНТ. На режиме с полной нагрузкой при использовании в качестве топлива смеси 90 % об. ДТ, 10 % об. ПМ и УНТ в количестве 500 мг/л привело к снижению дымности ОГ до 9 % по шкале Хартриджа.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Камалтдинов, В.А. Неверов, Са Бовэнь (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, ЮУрГУ, г. Челябинск) провели расчетное исследование параметров распыливания биотоплив в КС дизеля. Проанализированы проблемы использования РМ в качестве топлива для дизелей. Показано, что различия свойств нефтяного ДТ и РМ приводят к трансформации процессов топливоподачи и распыливания топлива. С использованием ПК Fluent проведено расчетное исследование влияния кинетической энергии турбулентности потока топлива на выходе из распыливающего отверстия форсунки на показатели распыливания. В качестве этих показателей рассмотрены средние диаметры капель и угол раскрытия струй топлива. Исследована взаимосвязь кинетической энергии турбулентности потока топлива на выходе из распыливающих отверстий и указанных показателей распыливания. Предложен комплекс, определяемый в виде отношения кинетической энергии турбулентности потока к квадратному корню из вязкости топлива. Предложены корреляционные зависимости исследуемых показателей распыливания топлива от предложенного комплекса.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Камалтдинов, Са Бовэнь, В.А. Неверов, А.А. Нормуродов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, ЮУрГУ, г. Челябинск) проанализировали показатели токсичности ОГ дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками растительных масел. Исследованы следующие виды растительных масел: рапсовое, пальмовое, соевое, кукурузное, льняное, горчичное, рыжиковое. Проведены испытания дизеля типа Д-245.12 (1ЧН11/12,5), работающего на смесях нефтяного ДТ с добавками каждого из этих масел в количестве 10 % (об.). Указанная добавка масел в нефтяное ДТ позволила снизить эмиссию всех нормируемых компонентов ОГ. На режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента содержание в ОГ оксидов азота снизилось на 0,7...8,3 %, дымность ОГ — на 7,5...37,5 %, концентрации в ОГ монооксида углерода — на 3...20 % и легких несгоревших углеводородов — на 8,3...27,9 %. При испытаниях дизеля на исследуемых смесях изменения эффективного КПД двигателя не превышали 3 %.

В.А. Марков, О.В. Ключ, Са Бовэнь, В.Г. Камалтдинов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Морская академия, г. Щецин, Польша, ЮУрГУ, г. Челябинск) провели моделирование течения дизельного топлива в распылителях со спиральными канавками. Предложена конструкция распылителя форсунки, на цилиндрической поверхности иглы которой выполнены спиральные канавки. В качестве базовой выбрана форсунка дизеля типа Д-245.12 (1ЧН11/12,5). С использованием ПК Fluent проведены расчет-

ные исследования течения топлива в таких форсунках. Отмечено, что наличие указанных спиральных канавок снижает скорость течения потока топлива и турбулизует поток в цилиндрическом пространстве распылителя форсунки. Увеличение ширины и уменьшение шага спиральных канавок приводят к повышению турбулентности потока. Определены значения ширины и шага спиральных канавок, обеспечивающие наибольшую турбулизацию потока топлива в проточной части распылителя. Наибольшая средняя по пяти распыливающим отверстиям кинетическая энергия турбулентности потока топлива на выходе из распыливающих отверстий получена в опытных распылителях № 2 и 7. Замена штатного распылителя опытным распылителем № 2 приводит к увеличению средней по всем распыливающим отверстиям кинетической энергии турбулентности потока на выходе из этих отверстий от 2402 до 2464 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, т. е. на 2,59 %. Использование опытных распылителей № 7 приводит к росту указанной средней кинетической энергии турбулентности от 2402 до 2470 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, т. е. на 2,84 %.

В.И. Ерохов (Московский политехнический университет) проанализировал экологические параметры современных наземных транспортных средств с дизелями. Отмечено, что удовлетворение современных жестких требований к токсичности ОГ дизелей возможно только при реализации целого комплекса мероприятий, предотвращающих образование вредных веществ в цилиндрах и обеспечивающих их нейтрализацию в выпускной системе двигателя. Ко второй группе мероприятий относятся установка на двигатель современных нейтрализаторов ОГ и системы подачи мочевины в цилиндры. Нейтрализацию продуктов неполного сгорания и выброс сажи обеспечивает селективный каталитический преобразователь (SCR). Обработка ОГ дизелей в этом нейтрализаторе при температуре более 250 °С обеспечивает снижение эмиссии монооксида углерода до 85...90 %, а выброс углеводородов — на 75...80 %. Для снижения выбросов оксидов азота применяют нейтрализатор адсорбционно-каталитического типа Denox, в котором в качестве катализатора применяют медь и цеолит (эффективны при температуре более 350 °С), а также платину (эффективна при температуре более 200 °С). Приведена конструктивная схема модуля подачи мочевины. Средний расход аммиачной жидкости составляет 5 % подачи ДТ. Максимальная вместимость бака с мочевиной составляет 100 л, что обеспечивает пробег магистрального автопоезда, равный 5000 км.

В.М. Фомин, Д.В. Апельинский (Московский политехнический университет) исследовали роль водорода как химического реагента при образова-

нии и выгорании углеродной фракции твердых частиц. Отмечено, что дисперсные частицы, образующиеся при сгорании нефтяного топлива, содержат следующие фракции: углеродную и органические, сульфатов и нитратов, неорганическую. Основной является углеродная фракция (сажа). Известен ряд присадок к топливу, способствующих снижению содержания сажи в ОГ, но наиболее эффективной представляется добавка водорода. В низкотемпературной фазе процесса горения водород противодействует актам образования зародышей углерода (эффект «водородного торможения»), а в последующей высокотемпературной фазе он катализирует процесс их ускоренного выгорания. Для опытной апробации этих положений проведены испытания дизеля типа Д-144 (4С10,5/12). Для генерирования водородсодержащего продукта был использован термокаталитический реактор конверсии метанола. Результаты испытаний подтвердили прогнозируемые анализом положения о характере влияния водорода на процессы эмиссии сажи при сгорании нефтяного ДТ. При добавке водорода в количестве 1,25 % (по энергоемкости) потребляемого дизелем нефтяного ДТ снижение содержания сажи в ОГ наблюдалось во всем диапазоне изменения нагрузочных режимов. На номинальном режиме содержание сажи в ОГ снизилось от 3,2 до 1,8 единиц по шкале Bosch (на 45 %).

Н.Н. Бирюков, Д.Н. Мудрецов, В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков, Ф.С. Карпец, М.Н. Чернецов (ООО «ТЕХНО-ХИЛЛ КЛАБ», г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск) представили установку для удаления нагара в ДВС с помощью водородно-воздушной смеси. Установка, разработанная в ООО «ТЕХНО-ХИЛЛ КЛАБ», содержит электролизер, генерирующий водородно-воздушную смесь за счет постоянного электрического тока от аккумулятора двигателя. Производительность установки до 6 л газа в минуту, вес установки 29 кг, габаритные размеры 32 × 320 × 800 см. Подтверждена эффективность этой установки при очистке деталей двигателей от нагара и кокса. Проведены замеры мощностных показателей дизельных двигателей автомобилей BMW X1 2.0td и Land Rover Discovery 3.0 td до проведения процедуры очистки деталей КС этих двигателей с использованием установки Leader-4M и после проведения этой процедуры. После проведения очистки деталей указанных двигателей от нагара с использованием разработанной установки максимальная мощность двигателей увеличилась на 2...2,1 %, максимальный крутящий момент этих двигателей возрос на 0,2...1,8 %.

Ф.Б. Барченко, Ш.Р. Лотфуллин, В.А. Марков, Н.Н. Патрахальцев, П.П. Ощепков, М.В. Азанов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН) рассмотрели

особенности регулирования газового монотопливного двигателя изменением его активного рабочего объема. Этот метод регулирования заключается в отключении части цилиндров или отдельных циклов на режимах холостого хода и малых нагрузок, т. е. в уменьшении активного рабочего объема. Предложен экспресс-анализ эффективности этого метода улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ, заключающийся в расчетном исследовании многопараметровых характеристик полноразмерного двигателя. Предложены алгоритмы отключения части цилиндров на режимах с неполной нагрузкой, обеспечивающие улучшение экономических и ряда экологических показателей газового монотопливного двигателя.

В работе Н.Н. Патрахальцева, П.П. Ощепкова, М.В. Азанова (РУДН) «Регулирование дизеля изменением физико-химических свойств топлива» показаны возможности совершенствования эксплуатационно-технических показателей дизеля путем подбора определенных топлив. Для улучшения показателей дизеля предложено в процессе его работы добавлять в традиционное нефтяное ДТ различные присадки (малые дозы) или добавки (дозы, сравнимые с цикловыми подачами) нетрадиционных топлив. Одними из средств реализации этого предложения являются системы топливоподачи с регулированием начального давления. Использование этих систем позволяет вводить в нефтяное ДТ присадки или добавки непосредственно перед впрыском его в цилиндры. В качестве таких добавок могут быть использованы сжиженные нефтяные газы (пропан-бутановые смеси), спирты, легковоспламеняющиеся жидкости. Приведены результаты экспериментальной реализации такого метода регулирования дизеля.

Ю.А. Антипов, К.В. Шкарин, И.И. Шаталова, К.О. Горшков (РУДН) исследовали возможность повышения эффективности когенерационной установки (КУ) на базе дизеля при неравномерном графике электрической нагрузки. В таких КУ, используемых для децентрализованного энергообеспечения, для снижения неравномерности нагрузки могут быть использованы тепловые насосы (ТН). В этом случае появляется возможность эксплуатации дизеля на экономичном режиме, а излишки электроэнергии в ночные часы используются для привода ТН. Исследуемая КУ включает в себя ДГУ, теплообменник охлаждающей жидкости, газовойодяной теплообменник, пиковый водогрейный котел. В КУ использован дизель Wartsila 12V32. Установка имеет следующие параметры: электрическая мощность 6000 кВт, часовой расход топлива 1080 кг/ч, тепловая мощность 5240 кВт, температура ОГ 485 °С, эффективный КПД 0,46. Исследовано два варианта КУ. В первом дизель вырабатывает электрическую мощность в соответствии с графиком

нагрузки и значительную часть времени работает на частичных нагрузочных режимах. Теплота ОГ используется для подогрева воды, идущей к потребителю. Недостающая тепловая мощность вырабатывается водогрейным котлом. Во втором варианте КУ включает в себя ТН для получения дополнительной тепловой мощности. В этом случае ДГУ все время работает на номинальном режиме с максимальным КПД, а избыток вырабатываемой КУ электроэнергии идет на привод его компрессора. Тепловая мощность ТН в виде горячей воды поступает в аккумулятор теплоты и потребляется в дневное время. Мощность, затрачиваемая на привод компрессора ТН на расчетном режиме 2640 кВт, рабочий агент R22, КПД компрессора ТН 0,8, температура воды на входе в ТН 30 °С; температура воды на выходе из ТН 50 °С. Включение ТН в схему КУ повышает среднесуточный коэффициент использования топлива на 16...20 %.

П.П. Ощепков, И.К. Шаталов, И.И. Шаталова, К.В. Шкарин (РУДН) провели исследования КУ на базе газового двигателя, работающей совместно с тепловым насосом в условиях холодного климата. В этой КУ содержится компрессионный ТН, использующий в качестве низкопотенциального источника теплоты атмосферный воздух. Недостатком такого ТН является снижение его коэффициента преобразования (отношение теплопроизводительности к потребляемой компрессором мощности) при отрицательных температурах. Одним из способов решения данной проблемы может быть использование воздушного ТН с приводом от газового двигателя, работающего по циклу Отто. Предлагаемая КУ на базе такого ДВС при работе с воздушным ТН обеспечивает надежное энергообеспечение в холодное время года за счет использования теплоты, отводимой от двигателя. Установка имеет следующие технические характеристики: электрическая и тепловая мощность 315 и 415 кВт. При работе с теплообменником коэффициент использования теплоты топлива равен 0,826, температура ОГ 150 °С. Основные параметры ТН: тепловая мощность 523 кВт, коэффициент преобразования теплового насоса 2 и 2,5 (при температуре воздуха на входе в испаритель ТН -20 °С и 0 соответственно), тип рабочего агента R410, источник низкопотенциальной теплоты воздух. При утилизации теплоты, отводимой от газового двигателя, работающего совместно с рассматриваемым ТН, даже при низких значениях коэффициента преобразования ТН, равном 2–2,5, можно достичь коэффициента использования теплоты (КИТ) топлива 1,02–1,05. Это превышает КИТ при работе установки в когенерационном режиме без ТН на 23...27 %.

С.В. Смирнов, Ю.А. Антипов, Хассан Халифе (РУДН) исследовали энергетическую установку на базе двигателя Стирлинга с автоматическим

регулированием теплового потока, отводимого охладителем. В качестве базовой принята бета-конструкция свободно-поршневого двигателя Стирлинга с линейным электрогенератором и на его основе разработана схема энергетической установки. Использована разработанная авторами конструкция охладителя, которая позволяет существенно уменьшить мертвый объем в двигателе и тем самым увеличить его удельную мощность. Охладитель представляет собой двухконтурную систему, первый контур — циркулирующее рабочее тело в двигателе, а второй — хладагент, циркулирующий в контуре излучателя. Предложена методика расчета теплового баланса охладителя. Выполнено расчетное исследование влияния основных конструктивных параметров установки и свойств хладагентов на тепловой поток, отводимый охладителем. Получены зависимости влияния на этот тепловой поток размеров охладителя, давления, скорости течения и свойств хладагента. Даны рекомендации по регулированию теплового потока в зависимости от температуры окружающей среды.

С.В. Смирнов, А.Р. Макаров, П.Р. Вальехо Мальдонадо, А.А. Воробьев (РУДН) разработали методику профилирования юбки составного поршня с учетом гидродинамического воздействия смазочного материала. Все большее распространение в форсированных дизелях получают составные поршни, которые включают три основных элемента — головку поршня, юбку и поршневой палец. При разработке математической модели учитывались основные факторы, влияющие на работу трибосопряжения юбка-гильза с учетом особенностей динамики движения составного поршня. Для верификации модели расчета напряженно-деформированного состояния юбки поршня разработан безмоторный стенд и проведены экспериментальные исследования. Разработанная математическая модель реализована с помощью численных методов и программного кода, который позволял осуществлять профилирование юбки с учетом конструктивных особенностей поршня и шатуна, значения монтажного зазора в сопряжении юбка-гильза. Учитывались изменение вязкостно-температурной характеристики смазки и влияние тепловых и механических нагрузок на элементы составного поршня.

И.К. Андрончев, А.Ю. Балакин, А.Д. Росляков (СамГУПС, г. Самара) разработали метод диагностирования толщины слоя отложений на теплопередающих поверхностях каналов охлаждения теплообменников ДВС. Отмечено, что наличие отложений на этих поверхностях вызывает увеличение гидравлического сопротивления отдельных участков и термического сопротивления стенок. Так, при образовании сплошного слоя отложений толщиной 0,3 мм время захолаживания стенки увеличивается примерно



в 2 раза. Предложен метод диагностирования толщины этих отложений, заключающийся в измерении температуры стенки в процессе эксплуатации и параллельном анализе результатов измерений. Измерения температуры выполняют в начале эксплуатации и далее по мере наработки через некоторые промежутки времени. По результатам измерения температуры в начале эксплуатации уточняют расчетную зависимость путем коррекции коэффициента теплоотдачи. Разработанный метод диагностирования позволяет выполнять оценку толщины отложений на внутренних поверхностях каналов теплообменника и принимать решение о возможности его дальнейшей эксплуатации без разборки оборудования.

Д.Я. Носырев, А.Ю. Балакин, А.А. Мишкин (СамГУПС, г. Самара) разработали генератор водорода на основе алюмоводородных технологий для транспортных ДВС. Отмечено, что подача небольшого количества водорода в КС дизеля позволяет существенно сократить вредные выбросы с ОГ. Одной из основных проблем широкомасштабного использования водорода в ДВС является проблема его получения и хранения на борту транспортного средства. Предложено и запатентовано техническое решение, относящееся к алюмоводородным технологиям, — это алюмоводородный генератор, принцип действия которого заключается в получении водорода методом гидролиза алюминия и подачи его в ДВС. Генератор оснащен регулятором-расходомером водорода, обеспечивающим изменение расхода на различных режимах работы ДВС. Причем на режимах холостого хода водород подавался в воздушный коллектор, а на нагрузочных режимах осуществлялось обогащение водородом нефтяного ДТ с помощью смесителя. Проведены испытания тракторного дизеля типа Д-242 (4Ч11/12,5), в воздушный ресивер которого подавался водород в количестве 0,5...3 % (по теплотворной способности) от расхода ДТ. При этом расход ДТ снижался на 1,52 ...9,27 %. Наиболее положительный эффект по экономии ДТ выявлен на режиме холостого хода. Одновременно снизились выбросы сажи на 30...50 % и оксидов азота на 30...40 %.

Д.Я. Носырев, А.Ю. Балакин, С.А. Петухов (СамГУПС, г. Самара) исследовали особенности контроля обводнения моторного масла в картере дизеля при эксплуатации. Отмечено, что при эксплуатации тепловозных дизелей содержание воды в моторных маслах может достигать 3...4 % при ее допустимом содержании 0,5 %. Проведены испытания тепловоза ТЭМ2 с дизелем ПД1М (6ЧН31,8/33), на первом этапе которых увеличивали нагрузку ДГУ с выдержкой 20 мин на каждой позиции контроллера. При таком увеличении нагрузки температура и влагосодержание картерных

газов увеличивались, а начиная с четвертой позиции, относительная влажность изменялась незначительно. На втором этапе при работе ДГУ на восьмой позиции контроллера в картер дизеля 3 раза последовательно добавляли воду в количестве 0,12, 2 и 3,5 л (0,03, 0,51, 0,95 % количества масла). При этом относительная влажность и влагосодержание картерных газов вначале росли, достигая своего максимума, после чего снижались в результате испарения воды и выноса паров воды при вентиляции картерного пространства. Превышение относительной влажности картерных газов свидетельствует о появлении избыточной воды в масле, но избыточная вода относительно быстро испаряется и выносится из картерного пространства. Для тепловоза ТЭМ2 максимальная скорость выноса воды составила 0,4...0,8 г/с. Отмечена целесообразность оборудования дизеля системой контроля обводнения моторного масла при эксплуатации.

А.К. Цориев, А.В. Александров (ФГБОУ ВО «МАДИ») разработали методики оценки состояния ДВС, основанные на информации контроллера электронной системы управления двигателем. Рассмотрены перспективы on-line диагностики силовых установок транспортных средств. Приведены базы данных по параметрам автомобиля, среди которых положение педали газа, цикловая подача топлива, давление воздуха в коллекторе, расход воздуха, угол опережения зажигания, частота вращения коленчатого вала, скорость автомобиля и др. Представлены графики изменения этих параметров во времени в процессе эксплуатации транспортного средства. Для реализации механизма создания таких баз данных разработан алгоритм учета режимов работы ДВС, а для достижения требуемой точности статистических данных разработан алгоритм интерполяции значений параметров. При исследовании динамических процессов для возможности анализа изменения параметров в функции времени адаптирована программа TestoConvert.

А.А. Строкин (МГТУ им. Н.Э. Баумана) провел работу по снижению шума быстроходных ДВС с использованием реверберационных полей «гулких» испытательных боксов. Исследования проведены в двух боксах, объем которых составлял 80 и 100 м<sup>3</sup>. Оба бокса дооборудованы в целях улучшения их собственных акустических характеристик и возможности проведения в них работ по снижению шума ДВС. Причем бокс № 1 меньшего объема полностью облицован звукоотражающей плиткой, а по его углам установлены звукоотражающие и рассеивающие звук щиты. Бокс № 2 облицован только до середины высоты стен без установки рассеивающих щитов. При этом слабо облицованный бокс № 2 с большим объемом имел худшие акустические характеристики (меньшее время реверберации

и, соответственно, большие значения коэффициентов звукопоглощения на высоких частотах). Боксы также дополнительно снабжены комплектами высокоэффективного шумопоглощающего стендового оборудования, которое позволяет разделять основные источники шума двигателя: шум выпуска, впуска и структурный шум собственно двигателя. Преимуществами использования этих боксов являются: малая трудоемкость необходимых акустических измерений, возможность проведения одновременных комплексных измерений, дешевизна «доводки» уже существующих заводских стендов, малая пожароопасность всего измерительного комплекса.

В.П. Антипин, М.Я. Дурманов (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова) рассмотрели взаимозависимость расхода масла на угар и скорости изнашивания деталей дизеля ЯМЗ-238НД5 машинно-тракторного агрегата (МТА) на базе трактора К-744Р-05. Отмечено, что на динамических режимах, когда частота квазипериодических колебаний в парах трения совпадает с частотой колебаний нагрузки со стороны ведущих колес и трансмиссии, возникает автоколебательный процесс с резонансной частотой. По мере нарастания амплитуды нагрузки увеличивается напряженность между поверхностями пары трения, вследствие чего поверхности пары трения сближаются. В результате количество прокачиваемого масла и его расход на угар снижаются, возрастает скорость изнашивания пар трения. С увеличением скорости движения МТА значительно увеличивается количество прокачиваемого масла и его расход на угар, снижается скорость изнашивания пар трения. На частотах колебания нагрузки до и после резонансной частоты увеличивается скорость изнашивания пар трения, но существенно возрастает расход масла на угар, особенно с увеличением частоты колебания нагрузки.

В.А. Раковым (Вологодский государственный университет) выполнена оценка эксплуатационных свойств комбинированных энергетических установок автотранспортных средств на основе проведенных экспериментальных и аналитических исследований. Отмечена эффективность использования комбинированного (гибридного) электромеханического привода (КЭУ), обеспечивающего рекуперацию энергии в условиях частых разгонов и торможений транспортного средства. Исследования проведены на ходовом макете, созданном на базе автомобиля ВАЗ-1118 с КЭУ последовательной схемы, в котором ДВС включался автоматически и работал в оптимальном нагрузочном режиме. В этом случае КПД системы рекуперации достигал 35 % энергии движущегося автомобиля, а относительно энергии, затраченной на разгон, — 25 %. Несмотря на не-

достаточно высокую эффективность используемого ДВС и неоптимальную схему комбинированного привода, макет транспортного средства показал хорошую динамику разгона и экономичность. Приведены алгоритмы и математические модели, позволяющие в результате теоретического эксперимента проводить испытания автомобилей с различными типами энергоустановок, в том числе с тремя типами схем КЭУ в процессе движения по заданному циклу. Получены характеристики расхода топлива и выбросы токсичных компонентов ОГ автомобиля с разными типами энергоустановок при движении по циклу WLTC.

В.В. Якунчиков (МГАВТ-филиал ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова») рассмотрел проблему роботизации на водном транспорте. Отмечена необходимость расширения безэкипажного судоходства. В рамках инициативной НИОКР разработана система автономного управления речным судном, которая успешно испытана на пассажирском теплоходе на р. Волга. Судно в полностью автоматическом режиме прошло запланированный маршрут. Создан проект автономного катера для картографирования дна рек, способного перемещаться по заданному маршруту (по датчику GPS) и записывать на картоплоттер данные с эхолота. Проведено оснащение катера системой технического зрения для обхода препятствий и обеспечения безопасности движения. После сертификации такой системы, а также принятия ряда законодательных актов технология может быть предложена для серийного использования на внутренних водных путях в целях обеспечения безопасности судоходства.

А.М. Степанов (МГАВТ-филиал ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова») предложил новое решение задачи Колладона о расходе топлива при движении судна против течения реки. Известное решение задачи французского ученого Колладона о расходе топлива при движении судна против течения реки базируется на утверждении, что вес плавущего судна уравнивается выталкивающей силой воды. Показано, что при расчете эксплуатационного расхода топлива необходимо учитывать дополнительные затраты топлива, связанные с увеличением потенциальной энергии судна и составляющие ~ 1 % общего расхода топлива.

М.А. Савельев, Ю.А. Заяц, А.Е. Рассохин, В.П. Рыжкович (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань, ВНК ВДВ, Москва) предложили комплексную программу повышения технической готовности и эффективности применения двигателей в условиях низких температур. В соответствии с этой программой разработан ряд методик, с использованием которых проведена оценка распределения эксплуатационных и тепловых режимов ДВС при его работе в составе транспортного средства в условиях холод-

ного климата, выявлены общие взаимозависимости и характер их влияния на показатели работы двигателя. Подтверждена необходимость разработки эксплуатационных и конструктивных мер по повышению эффективности применения ДВС при отрицательных температурах окружающей среды. Реализация результатов исследований в комплексе позволяет провести теплоэнергетическую оптимизацию ДВС при его остывании, прогреве и работе во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, обеспечить автономность средств форсированного предпускового подогрева и поддержания технической готовности транспортного средства в условиях холодного климата.

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

Удовлетворение требований к параметрам и характеристикам современных теплоэнергетических установок невозможно без дальнейшего совершенствования их САР и САУ. Конструктивные особенности этих систем и их параметры предопределяют такие важнейшие показатели работы дизеля, как максимальные мощность и крутящий момент, динамические и пусковые качества, топливная экономичность и токсичность ОГ.

Основными направлениями совершенствования САР и САУ теплоэнергетических установок являются расширение функциональных возможностей этих систем, реализация комплексного адаптивного управления теплоэнергетической установкой и ее системами, использование в структуре регуляторов электронных микропроцессорных устройств, многопараметрическая оптимизация работы теплоэнергетической установки и ее элементов с учетом целого комплекса параметров этой установки.

При совершенствовании САР и САУ теплоэнергетических установок необходимо продолжение исследований по выбору оптимальной структуры и параметров регуляторов. Применительно к системам регулирования частоты вращения ДВС и двигателей других типов используются ПИД-регуляторы, а также их модификации — ПД-регуляторы, ПИ-регуляторы, регуляторы с последовательным включением корректирующих звеньев. Необходим обоснованный выбор типа такого регулятора и оптимизация его параметров.

Актуальной остается проблема разработки и внедрения систем управления и регулирования системами ДВС — топливоподачи, воздухообеспечения, газораспределения, рециркуляции ОГ, отключения цилиндров и циклов двигателей. Необходима и разработка САР и САУ для двигателей, конвертированных на различные альтернативные виды топлива, включая газообразные альтернативные топлива.

Использование указанных систем управления и регулирования в теплоэнергетических установках с ДВС является непременным условием достижения современных показателей их топливной экономичности, токсичности ОГ, показателей качества процесса регулирования частоты вращения вала двигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архаров А.М., Афанасьев В.Н., ред. Теплотехника. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [2] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2013.
- [3] Охотников Б.Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2014.
- [4] Ерохов В.И. Токсичность современных автомобилей. Методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу. М., Форум, 2017.
- [5] Александров А.А., Марков В.А., ред. Нефтяные моторные топлива. Экологические аспекты применения. М., ООО «Инженер», ООО «Онико-М», 2014.
- [6] Медовщиков Ю.В. Основы тепловых двигателей внутреннего сгорания. М., Русайнс, 2018.
- [7] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М., Легион-Автодата, 2005.
- [8] Шатров М.Г., ред. Автомобильные двигатели. М., Академия, 2011.
- [9] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [10] Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 1989.
- [11] Bosch: Системы управления дизельными двигателями. М., За рулем, 2004.
- [12] Bosch: Системы управления бензиновыми двигателями. М., За рулем, 2005.
- [13] 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.
- [14] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М., Легион-Автодата, 2013.
- [15] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [16] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ, 2000.

**Марков Владимир Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели» 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. Теплоэнергетические установки и их системы автоматического управления и регулирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 106–130. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>

**HEAT AND POWER PLANTS AND THEIR AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION SYSTEMS**

V.A. Markov

markov58@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper emphasizes the relevance of research aimed at further improving the systems of automatic control and regulation of heat and power plants, mainly plants with reciprocating internal combustion engines. The study assessed the current level of the development of these systems, and analyzed the prospects of their use as mobile and stationary heat and power plants. These plants are widely used in various sectors of the economy — energy, transport, agriculture, so it appears important to describe the main directions of further improvement of these plants and their automatic control and regulation systems. The purpose of the research was to further increase the power indicators of heat and power plants, improve their fuel efficiency and exhaust gas toxicity, and enhance the dynamic qualities of internal combustion engines. In our study, we also examined the main directions of improving the fuel supply and air supply systems of engines, their work process, adaptation of engines to work on various alternative types of fuel. Findings of research show that it is necessary to expand the functional capabilities of control and regulation systems, implement integrated adaptive control of a heat and power plant and its systems, use electronic microprocessor devices in the structure of regulators, enhance the multi-parameter efficiency of the operation of a heat and power plant and its elements, taking into account the whole set of parameters of this plant

**Keywords**

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

Received 23.06.2020

Accepted 28.07.2020

© Author(s), 2020

*The paper was based on the materials of the reports of the all-Russian scientific and technical conference n.a. Professor V.I. Krutov (29.01.2020)*

## REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Afanas'yev V.N., eds. Teplotekhnika [Thermal technology]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.
- [2] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., eds. Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical engineering encyclopaedia. Vol. IV. Combustion engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013.
- [3] Okhotnikov B.L. Eksploatatsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Exploitation of combustion engines]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta Publ., 2014.
- [4] Erokhov V.I. Toksichnost' sovremennykh avtomobiley. Metody i sredstva snizheniya vrednykh vybrosov v atmosferu [Toxic level of modern vehicles. Methods and solutions for lowering atmospheric emission of pollutants]. Moscow, Forum Publ., 2017.
- [5] Aleksandrov A.A., Markov V.A., eds. Neftnyane motornye topliva: ekologicheskie aspekty primeneniya [Oil motor fuels. Ecological aspects of using]. Moscow, ООО "Inzhener" Publ., ООО "Oniko-M" Publ., 2014.
- [6] Medovshchikov Yu.V. Osnovy teplovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Fundamentals of thermal combustion engines]. Moscow, Rusayns Publ., 2018.
- [7] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley [Diesel fuel equipment and control systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005.
- [8] Shatrov M.G., ed. Avtomobil'nye dvigateli [Vehicle engines]. Moscow, Akademiya Publ., 2011.
- [9] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016.
- [10] Krutov V.I. Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigateley vnutrennego sgoraniya [Automated regulation and control on combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [11] Bosch: Sistemy upravleniya dizel'nymi dvigatelyami [Bosch: Control systems for diesel engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2004.
- [12] Bosch: Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami [Bosch: Control systems for petrol engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2005.
- [13] Shatrov M.G., Khachiyan A.S., Golubkov L.N., et al. Sovershenstvovanie rabochikh protsessov avtotraktornykh dizeley i ikh toplivnykh sistem, rabotayushchikh na al'ternativnykh toplivakh [Working processes development of motor-transport engine and its fuel systems working on alternative fuel]. Moscow, MADI Publ., 2012.
- [14] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis toplivopodayushchikh sistem dizeley [Construction, calculation and technological service of diesel fuel injection systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013.
- [15] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxic level of diesel burnt gas]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002.



[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.

**Markov V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, 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. Heat and power plants and their automatic control and regulation systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 106–130 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышел в свет учебник  
под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева

**«Теплотехника»**



Рассмотрены основы термодинамики и теории теплообмена, топливо и его горение, схемы и элементы расчета котлов, промышленных печей, паро- и газотурбинных, когенерационных и микрогазотурбинных установок, газоперекачивающих станций магистральных газопроводов, поршневых двигателей внутреннего и внешнего сгорания, ракетных, ракетно-прямоточных и авиационных двигателей, холодильных установок, компрессоров и вакуумных насосов, атомных и плазменных энергоустановок. Приведены расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Включены разделы, касающиеся космических энергоустановок, теплообменных аппаратов, гидромашин, фотонных энергосистем, криогенных систем для ожижения газов, разделения воздуха, получения неона, криптона и ксенона, а также систем регулирования. Большое внимание в книге уделено вопросам экологии, защиты окружающей среды и возобновляемым источникам энергии.

**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>