

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**В.А. Марков**

vladimir.markov58@yandex.ru

**В.И. Шатров**

shatrov@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. Эти установки широко используются в различных отраслях экономики — в энергетике, на транспорте, в сельском хозяйстве. Проведена оценка современного уровня развития этих систем, сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок с поршневыми двигателями. Основные направления их совершенствования связаны с необходимостью дальнейшего улучшения показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов теплоэнергетических установок, повышения динамических качеств двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены основные направления исследований в области топливоподающей аппаратуры дизелей, рабочего процесса двигателей, их адаптации к работе на различных альтернативных видах топлива

### Ключевые слова

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

Поступила 27.03.2019

© Автор(ы), 2019

---

*Статья подготовлена по материалам докладов ВНТК имени профессора В.И. Крутова (30.01.2019)*

Теплоэнергетические установки с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) остаются основным типом энергетических установок в энергетике, на транспорте, в сельском хозяйстве [1]. При этом к этим установкам предъявляется ряд достаточно жестких требований по топливной экономичности, токсичности отработавших газов (ОГ), их динамическим

характеристикам [2]. Удовлетворение этих требований возможно лишь при их оснащении современными системами автоматического управления и регулирования (САР и САУ) [3]. Такие системы обеспечивают согласование характеристик отдельных элементов комбинированных поршневых двигателей — поршневой части двигателя, системы газотурбинного наддува, систем топливоподачи, газораспределения, охлаждения, рециркуляции и др. Таким образом улучшаются показатели работы теплоэнергетических установок [3–5].

Наряду с исследованиями, посвященными дальнейшему совершенствованию САР и САУ поршневых двигателей, изучаются проблемы совершенствования указанных систем ДВС, а также такие важнейшие проблемы двигателестроения, как улучшение 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 [6–11]. Приведенные работы отражают современное состояние и перспективы развития САР и САУ теплоэнергетических установок различного назначения.

Во вступительном слове руководитель ВНТК профессор В.А. Марков (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отметил актуальность исследований САР и САУ теплоэнергетических установок с ДВС. Наряду с проблемами, возникающими при создании и совершенствовании САР и САУ, необходимо решить широкий круг задач разработки современных поршневых ДВС.

В работе А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонов, Лю Ин (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Особенности рабочего процесса дизеля при отключении цилиндров» получены результаты расчетного исследования рабочего процесса и характеристик тепловозного двигателя. Объектом являлся шестнадцатичилиндровый дизельный двигатель типа Д49 (16ЧН 26/26) производства ОАО «Коломенский завод», в котором организовано отключение части цилиндров. Расчетное исследование проводилось с использованием компьютерной модели двигателя в программном комплексе GT Power. При моделировании осуществлялся расчет рабочего процесса на режимах при трех частотах вращения вала двигателя и работе на частичных нагрузках. Особое внимание было уделено исследованию различных вариантов функционирования системы газораспределения в отключенных цилиндрах. Для определения факторов, влияющих на параметры двигателя при отключении части цилиндров, проведен анализ энергетического

баланса при различных вариантах работы системы газораспределения. Исследовано влияние числа отключаемых цилиндров на удельный эффективный расход топлива.

Ю.Е. Хрящёв и О.Н. Соколов (ЯГТУ, г. Ярославль) испытали авиационный дизель, предназначенный для малой авиации и работающий на реактивном топливе ТС-1. В соответствии с предъявляемыми требованиями этот дизель должен эффективно работать не только на реактивных топливах и авиационных керосинах, но и на дизельном топливе (ДТ). В результате анализа рабочего процесса такого дизеля и комплекса мероприятий по исследованию рабочего процесса создана модель, с помощью которой получена карта углов опережения впрыскивания топлива, целесообразных для различных режимов работы. Проведено исследование индикаторных диаграмм двигателя, показавшее удовлетворительное совпадение параметров, полученных на модели, с экспериментальными данными. Показатели динамики процесса сгорания находятся в допустимых пределах. Наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных данных получено на режиме максимального крутящего момента и составило 8 %.

В.А. Марков, В.В. Фурман и С.В. Плахов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) провели экспериментальное исследование САР частоты вращения дизеля с регуляторами различных типов. При этом была поставлена задача выбора оптимальной структуры электронного регулятора частоты вращения тепловозного дизеля типа Д50 (6ЧН 31,8/33) производства ОАО «Пензадизельмаш». Представлена разработанная в «ППП Дизельавтоматика» система электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 для тепловозных дизелей. Для оценки влияния структуры и параметров этой системы на динамические качества двигателя проведены его экспериментальные исследования. Объектом стендовых испытаний являлась дизель-генераторная установка типа 1-ПДГ4Д с дизелем 6ЧН 31,8/33. При испытаниях получены зависимости продолжительности переходного процесса, заброса частоты вращения в переходном процессе и периода собственных колебаний от параметров пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Подтверждена необходимость оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования и их изменения в соответствии с режимом работы двигателя.

В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков, В.В. Фурман, С.В. Плахов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «Форант-Сервис», г. Ногинск, «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) провели моделирование САР частоты вращения дизеля с регуляторами различных типов. Рассмотрены принципы регулиро-

вания частоты вращения, реализуемые в ДВС. Показаны преимущества пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона регулирования. Приведена математическая модель САР дизеля с регуляторами различных типов. Выполнены расчетные исследования влияния структуры ПИД-регулятора на динамические показатели САР частоты вращения дизеля. Объектом исследований являлся двигатель типа КамАЗ-740 дизель-генераторной установки мощностью 100 кВт. Исследованы переходные процессы разгона-торможения и наброса-сброса нагрузки. Получены переходные процессы системы регулирования при различных значениях коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования. Проведена оценка влияния этих коэффициентов на показатели качества процесса регулирования. Показано, что наличие дифференциальной составляющей ПИД-закона регулирования заметно улучшает качество переходных процессов разгона-торможения и наброса-сброса нагрузки — уменьшает продолжительность этих переходных процессов и колебательность САР.

А.Ю. Балакин, А.Ю. Тартыгин и Д.С. Бардин (СамГУПС, г. Самара) исследовали влияние переходных процессов тепловоза ЧМЭЗ на параметры дизеля при выполнении маневровой работы. Отмечено, что в реальных условиях эксплуатации тепловозные дизели значительную часть времени работают на неустановившихся режимах. За одну смену работы маневрового тепловоза контроллер переключается от 900 до 1200 раз, отмечено до 3 пусков и столько же остановок дизеля. Число троганий и циклов передвижений тепловоза доходит до 150. На неустановившихся режимах наблюдаются рассогласование работы систем топливо- и воздухоподачи, ухудшение качества смесеобразования и последующего процесса сгорания топлива, снижение эффективности и надежности работы дизеля. Характеристики переходных процессов в дизелях с газотурбинным наддувом во многом зависят от работы турбокомпрессора. По результатам исследований намечены мероприятия, направленные на совершенствование системы воздухообеспечения дизеля тепловоза ЧМЭЗ. В их числе — тщательное согласование характеристик поршневой части двигателя и турбокомпрессора, оснащение двигателя системой регулирования турбонаддува.

В.П. Антипин, М.Я. Дурманов, В.Н. Куликов (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет) проанализировали данные по расходу масла на угар тракторных дизелей при неустановившихся режимах функционирования. Отмечено, что в условиях функционирования машинно-тракторного агрегата (МТА) присутствуют динамические режимы нагружения, являющиеся основной причиной несоответствия

показателям, гарантированным заводом-изготовителем. В работе исследовано влияние динамических режимов нагружения сельскохозяйственного МТА на расход масла дизеля с использованием математического аппарата передаточных функций и частотных характеристик. В качестве эксплуатационного параметра выбрана скорость движения МТА, а в качестве конструктивного — жесткость подвеса. Исследовалась модель функционирования в транспортном режиме работы трактора «Кировец» К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40. При скорости движения МТА, равной 2,01 м/с, и штатной жесткости подвеса 1500 кН/м для транспортного режима определен расход масла на угар дизеля в зависимости от динамических нагрузок. Он зависит от изменения амплитуды и фазы запаздывания приращения давления масла в главной масляной магистрали (ГММ) дизеля (доля расхода масла на угар составляет 70 г/ч), от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости (50 г/ч) и механических потерь в парах трения двигателя (14 г/ч). Фактический расход масла на угар дизеля ЯМЗ-238НД5 составил 287 г/ч. При повышении скорости движения МТА до 5,20 м/с расход масла на угар по указанным компонентам увеличивается в 1,3...3,0 раза, а фактический расход масла на угар достигает 629 г/ч. Регулярная составляющая расхода масла на угар при этом возрастает от 153 до 397 г/ч. Со снижением жесткости подвеса на 40 % (от 1500 до 900 кН/м) уменьшаются не только расход масла на угар, но и собственные частоты колебаний МТА в продольно-вертикальной плоскости, приближаясь к энергозатратной (резонансной) частоте колебаний вращения коленчатого вала дизеля  $5 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, несмотря на малую продолжительность транспортного режима МТА, он является сравнительно энергозатратным и характеризуется высокими затратами мощности, часового расхода топлива и масла на угар. Выявлено, что наиболее эффективным методом снижения расхода масла на угар является оснащение дизеля корректирующими устройствами — гасителем колебаний рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) и последовательно установленными в ГММ двумя пневмогидроаккумуляторами и управляемым дросселем.

Н.Н. Патрахальцев, П.П. Ощепков, А.А. Савастенко (РУДН) провели анализ возможностей регулирования ДВС отключением цилиндров или циклов. Отмечено, что современные ДВС, особенно транспортного назначения, длительное время работают на режимах малых нагрузок и холостых ходов, что сопровождается снижением удельных показателей экономичности и экологичности. Одним из методов регулирования мощности, повышения экономичности и снижения токсичности ОГ на режимах пониженных нагрузок является метод отключения цилиндров или отдельных

циклов работы двигателя. Для оценки эффективности этого метода может применяться расчетно-экспериментальная методика, основанная на использовании многопараметровых характеристик двигателя. При этом традиционные ординаты эффективного крутящего момента или среднего эффективного давления соответствующим пересчетом заменяются ординатой — удельной эффективной работой двигателя с соответствующим числом работающих цилиндров. Такая замена не нарушает физического смысла применяемых характеристик, но повышает удобство работы с расчетными операциями или операциями анализа. В этих случаях вместо традиционных конструктивных и эксплуатационных параметров, таких как рабочий объем, среднее эффективное давление двигателя и других, появляются новые параметры — активный рабочий объем, удельная работа двигателя с отключением цилиндров или циклов.

Н.Н. Патрахальцев, П.П. Ощепков и М.В. Азанов (РУДН) оценили возможности улучшения эксплуатационных экологических характеристик бензинового двигателя с системой отключения части цилиндров при работе на режимах с неполной нагрузкой. В условиях реальной эксплуатации современные автомобильные двигатели работают с низкими нагрузками, достигающими до 22...25 %. В этих условиях ухудшаются их экологические и топливно-экономические эксплуатационные показатели. Для улучшения этих показателей ряд зарубежных фирм применяют метод отключения части цилиндров, т. е. изменения активного рабочего объема двигателя. Примером могут служить фирма General Motors, реализующая этот метод в автомобилях Cadillac Eldorado V-8-6-4; фирма Daimler-Chrysler, устанавливающая систему «Active Cylinder Control» (ACC) на двигателях V8 и V12 автомобилей Mercedes-Benz; фирма Honda, применяющая на бензиновом двигателе V6 систему «Variable Cylinder Management». Расчетно-экспериментальные исследования этого метода показали возможности снижения выбросов оксидов азота на 5 %, выбросов несгоревших углеводородов и монооксида углерода до 40 % при повышении топливной экономичности на 10 %.

Н.Н. Патрахальцев, П.П. Ощепков, М.В. Азанов (РУДН) разработали метод физико-химического регулирования ДВС. Отмечено, что в ближайшей перспективе трудно ожидать повсеместного перевода ДВС на альтернативные топлива (кроме, возможно, природного газа). В то же время с точки зрения уменьшения выбросов токсичных компонентов ОГ может оказаться целесообразным применение ряда альтернативных топлив как добавок к основному нефтяному топливу. При этом возникает проблема оптимизации состава таких смесевых топлив. В ряде случаев

целесообразно изменение состава смесевых топлив непосредственно в процессе работы двигателя. Таким образом, реализуется метод регулирования рабочего процесса двигателя автоматическим изменением состава смесевых топлив, сопровождающийся изменением физико-химических и моторных свойств применяемого топлива. На примере оперативного регулирования состава нефтяного топлива с добавкой легковоспламеняющейся жидкости (в частности, жидкости на основе эфиров) показаны возможности повышения эффективности режимов пусков-разгонов «холодного» дизеля.

А.Ю. Дунин, В.Е. Горбачевский, П.В. Душкин (ФГБОУ ВО «МАДИ») провели оценку влияния подачи предварительной порции топлива на процесс впрыскивания. Показано, что при многократном впрыскивании топлива в дизеле подача предварительной порции топлива вызывает колебания давления в топливопроводах системы топливоподачи. Основная причина возникновения колебательных процессов на входе в электрогидравлическую форсунку (ЭГФ) — резкая остановка движущегося в топливопроводе топлива, происходящая при закрытии иглы распылителя ЭГФ. Влияние таких волновых явлений на процесс топливоподачи может быть весьма существенным. Они приводят к изменению основной порции подаваемого топлива при варьировании продолжительности задержки между предварительным и последующим впрыскиванием. Помимо изменения массовой величины последующей подачи продолжительность указанной задержки оказывает влияние и на форму характеристики впрыскивания. Проведена оценка влияния состава смесевых топлив на волновые явления на входе в ЭГФ. Рассмотрен процесс подачи смесевых топлив — смеси нефтяного топлива и подсолнечного масла (ПМ). Анализ результатов исследования показывал существенное влияние увеличения доли ПМ в смесевом топливе на колебания давления топлива, что объясняется увеличением плотности и вязкости смеси. Необходимо отметить уменьшение амплитуды колебаний давления при увеличении доли ПМ в смесевом топливе.

Э.А. Савастенко, А.А. Савастенко, В.А. Марков (РУДН, ФГБОУ ВО «МАДИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана) провели оценку возможностей реализации многократного впрыскивания топлива в целях улучшения экономических и экологических показателей транспортных дизелей. Отмечено, что одним из наиболее эффективных методов снижения расхода топлива и выбросов с ОГ токсичных компонентов в ДВС является формирование оптимального закона подачи топлива. Представлены материалы экспериментальных исследований, проведенных на моторной установке с од-

ноцилиндровым дизелем. Такая одноцилиндровая установка создана на базе дизельного двигателя серии К9К фирмы Renault (Франция). Это семейство рядных четырехцилиндровых дизельных двигателей с шестнадцатью клапанами (по четыре на каждый цилиндр) с общим рабочим объемом ~ 1,4 л, используемых на таких моделях автомобилей, как Renault Logan и др. Установка оснащена топливной аппаратурой аккумуляторного типа Common-Rail. В ходе исследований проведены испытания различных способов подачи топлива в камеру сгорания дизеля. Показано, что реализация многократного впрыскивания улучшает показатели токсичности ОГ дизеля. Определены интервалы между пилотным и основным впрыскиванием, обеспечивающие оптимальные показатели дизельного двигателя по показателям токсичности ОГ и шумности работы дизеля.

П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Марков, В.Л. Трифонов (РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана) проанализировали характеристики подачи топлива в дизелях и разработали систему двухфазной подачи топлива дизеля. Показана целесообразность формирования характеристик многократного впрыскивания. Отмечено влияние такой характеристики топливоподачи на показатели токсичности ОГ дизеля. Предложена система двухфазной подачи топлива для дизеля типа Д-120 (2Ч10,5/12) производства Владимирского тракторного завода. Эта система топливоподачи обеспечивает впрыскивание основной дозы топлива на такте сжатия при нахождении поршня вблизи верхней мертвой точки (ВМТ). Дополнительные порции топлива впрыскиваются в конце такта выпуска и начале такта впуска. Такая организация рабочего процесса приводит к улучшению экономических, энергетических, динамических и экологических показателей. Предложенная конструкция системы топливоподачи может быть применена в двухцилиндровом автотракторном двигателе или в дизеле, содержащем четное число цилиндров, и позволяет обеспечить подачу в цилиндры дизеля не только нефтяного, но и биотоплива.

Ю.Е. Драган (ВлГУ) оценил влияние деформирования деталей ЭГФ на кинематику подъема и посадки иглы распылителя. По результатам работ по созданию отечественной аккумуляторной топливной системы типа Common Rail отмечено, что влиянием деформирования деталей в аккумуляторных топливных системах пренебрегать нельзя, так как максимальные давления топлива в современных системах топливоподачи превышают 200 МПа. Исследование этого влияния осуществлено двумя путями. Во-первых, разработаны математические модели, в которых дополнительно учтено изменение объема камеры управления и перемещение плунжерного мультипликатора при сжатии и разгрузке деталей ЭГФ. Во-вторых,



доработана методика анализа осциллограмм в целях учета деформирования не только деталей, но и их отдельных частей в показаниях емкостного датчика. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей проведена по одной точке на переднем фронте осциллограммы — по точке перегиба, соответствующей началу подъема иглы распылителя. Расчетом установлено, что при подъеме якоря электромагнитного клапана на 0,05 мм проходное сечение лимитируется не выходным жиклером, а щелью между шариком и седлом клапана. Раскрыта причина видного на осциллограмме замедления подъема иглы распылителя вблизи упора в проставку — это следствие разгрузки хвостовика иглы, в результате чего увеличивается зазор между обкладками датчика. Подобные явления учтены при исследовании кинематики иглы, штанги и плунжерного мультипликатора на переднем и заднем фронтах осциллограмм. Уточнено ранее установленное среднее значение времени до начала подъема иглы распылителя. Теперь оно составляет 242 мкс вместо 305 мкс. Для сравнения расчетное время, в котором учтено деформирование деталей ЭГФ, равно 136 мкс.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов и К.С. Леонов (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) исследовали влияние продолжительности электрического импульса управления форсункой на цикловую подачу топлива на установке «Впрыск» с камерой постоянного объема. Представлены результаты измерения цикловой подачи трех дизельных форсунок системы Common Rail с восемью распыливающими отверстиями диаметром 300 мкм и с десятью распыливающими отверстиями диаметром 270 и 280 мкм. Давление в топливном аккумуляторе регулировалось в диапазоне от 100 до 165 МПа, продолжительность управляющего импульса задавалась от 0,5 до 3,0 мс. Давление сжатого воздуха в камере постоянного объема поддерживалось равным 30 бар. Установлено, что при увеличении давления в топливном аккумуляторе от 100 до 165 МПа цикловая подача увеличивается на 25...28 % при продолжительностях электрического импульса управления форсункой от 1 до 3 мс. При продолжительности электрического импульса управления форсункой 3 мс наибольшая цикловая подача, равная 0,867 мл, получена у форсунки с десятью распыливающими отверстиями диаметром 280 мкм, наименьшая цикловая подача 0,783 мл получена у форсунки с десятью распыливающими отверстиями диаметром 270 мкм. При увеличении давления в топливном аккумуляторе от 100 до 130 МПа и продолжительности электрического импульса от 0,5 до 1,5 мс цикловая подача возросла заметно больше, чем при увеличении этой продолжительности от 1,5 до 3,0 мс. При давлениях в топливном аккумуляторе от 130 до 165 МПа цикловая

подача возрастала практически линейно в диапазоне изменения продолжительности электрического импульса от 1 до 3 мс.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, В.А. Трофимычев, И.О. Лысов, К.С. Леонов (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) определили показатели работы газопоршневого двигателя 12ГЧН16/19 Perkins 4012TESI на эксплуатационных режимах при постоянной частоте вращения коленчатого вала  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . В ходе экспериментальных исследований, проведенных в энергоцентре ЮУрГУ без препарирования двигателя и его систем, использована аппаратура «Нейва 10000». С ее помощью регистрировалось давление в цилиндре при различных нагрузках: от режима холостого хода до режимов с нагрузками, равными 300, 400, 500 и 600 кВт. Установлено, что на всех исследованных режимах процесс сгорания состоит из основной фазы активного тепловыделения, продолжительностью 40...50 град п.к.в. и фазы догорания продолжительностью 50...80 град п.к.в. Расчетно-теоретические исследования проводились с использованием программного комплекса (ПК) Double-Wiebe function. Определены показатели характера сгорания и количества сгорающего топлива в каждой фазе. Программный комплекс Double-Wiebe function позволил адекватно моделировать рабочий процесс газового поршневого двигателя при работе на гомогенных смесях. Различия значений расчетных и экспериментальных параметров составили: по удельному индикаторному расходу топлива не более 1 %, индикаторному КПД не более 0,5 % и по максимальному давлению сгорания не более 1 %.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, А.Е. Попов и К.С. Леонов (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) исследовали влияние энергии зажигания на процесс сгорания метано-воздушной смеси в условиях камеры постоянного объема на установке «Впрыск». Приведены результаты экспериментов по процессу сгорания метано-воздушной смеси в камере постоянного объема с фронтальным оптическим окном из кварцевого стекла. Проведена визуализация этого процесса с использованием скоростной видеокамеры. Состав смеси регулировался в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от 0,96 до 1,2. Зажигание смеси проводилось с помощью свечи NGK, энергия разряда системы зажигания изменялась от 5 до 75 мДж с возможностью ее увеличения в 2 и 4 раза. Установлено, что наибольший эффект от увеличения энергии разряда достигался при зажигании обедненной смеси с  $\alpha = 1,2$ . При зажигании смеси с  $\alpha = 1,04$  скорость распространения фронта голубого пламени несущественно зависела от энергии разряда, но с увеличением энергии разряда белое пламя появлялось значительно раньше. При зажигании обогащен-

ной смеси с  $\alpha = 0,96$  увеличение энергии зажигания практически не влияло на скорость развития фронта голубого пламени.

В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, К.П. Рязанов, Л.Е. Коссова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск, АО «ВНИИЖТ», г. Москва) оценили влияние фаз топливоподачи на показатели транспортного дизеля. Отмечено, что важнейшим параметром топливоподачи является угол опережения впрыскивания топлива (УОВТ). Проведены расчетные исследования влияния УОВТ на показатели топливной экономичности, динамики процесса сгорания и токсичности ОГ дизелей. Исследованы дизели типа Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) и типа КамАЗ размерности 12/12. Предложены базовые характеристики регулирования УОВТ для этих дизелей, оптимизированные по топливной экономичности. Реализация такой характеристики в дизеле Д-245.12С предусматривает уменьшение статического УОВТ от 13 до 7 град п.к.в. до ВМТ при переводе двигателя с режима максимальной мощности на режим холостого хода при минимальной частоте вращения. При переводе этих дизелей на альтернативные топлива, отличающиеся худшей воспламеняемостью в условиях камеры сгорания дизеля (пониженным цетановым числом), УОВТ необходимо увеличивать. Так, при работе дизеля типа Д-245.12С на режиме максимальной мощности и его переводе с нефтяного топлива на смесь 80 % (по объему) нефтяного ДТ и 20 % рапсового масла (РМ) оптимальный по топливной экономичности статический УОВТ изменяется от 13 до 19 град п.к.в. до ВМТ.

Е.В. Чистяков, П.В. Летягин, В.Н. Панченко (СамГУПС, г. Самара) проанализировали влияние УОВТ на параметры дизеля К6S310DR. Отмечено, что наиболее эффективным способом повышения эксплуатационных показателей тепловозных дизелей является оптимизация значений УОВТ с учетом режимов их эксплуатации. Проведен теоретический анализ эффективности эксплуатационной работы маневрового тепловоза ЧМЭЗ с указанным дизелем при шести вариантах настройки дизеля с помощью имитационной модели, реализованной в ПК AC ENGINE. Исследования подтвердили, что путем варьирования УОВТ можно изменять максимальную температуру сгорания и период задержки воспламенения. Это позволяет найти оптимальное по показателям топливной экономичности и токсичности ОГ значение УОВТ. Позднее впрыскивание снижает концентрацию оксидов азота в ОГ, но при этом несколько увеличиваются выбросы монооксида углерода, что связано со снижением максимальной температуры цикла. Сравнительный анализ вариантов настройки показал, что исследуемый дизель целесообразно настраивать на УОВТ, равный 18 град п.к.в. до ВМТ. Это значение УОВТ обеспечивает благоприят-

ный компромисс между выбросами оксидов азота и удельным эффективным расходом топлива.

В.А. Марков, Ф.Б. Барченко, К.П. Рязанов, А.Н. Зенкин (МГТУ им. Н.Э. Баумана) исследовали влияние фаз газораспределения на показатели транспортного дизеля. Отмечено, что фазы газораспределения, оптимальные для номинального режима, не всегда являются оптимальными для других скоростных и нагрузочных режимов. В связи с этим разработаны и уже применяются в ДВС различные конструкции механизмов изменения фаз газораспределения. Даны рекомендации по выбору этих механизмов для двигателей транспортного назначения. Следует отметить, что, несмотря на некоторые преимущества механических систем, наибольшие функциональные возможности и точность регулирования имеют электрические и электрогидравлические системы регулирования, способные реализовывать сложные законы регулирования фаз газораспределения. Представлены некоторые законы регулирования фазы закрытия впускного клапана для транспортных дизелей. Проведены расчетные исследования влияния фазы закрытия впускного клапана на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ транспортного дизеля. Показана возможность улучшения названных показателей при регулировании фазы закрытия впускного клапана дизеля. Приведены результаты расчетных исследований дизеля Д-245.12С с изменяемым моментом закрытия впускных клапанов. Оптимальным с точки зрения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ является угол закрытия впускных клапанов, равный  $\sim 40$  град п.к.в. после нижней мертвой точки (НМТ). При таком значении этого угла достигается минимум удельного эффективного расхода топлива и выбросов твердых частиц и сажи. Более позднее закрытие впускных клапанов приводит к некоторому росту объемного содержания в ОГ оксидов азота. При значении этого угла, равном  $40$  град п.к.в. после НМТ, их объемное содержание сравнительно невелико и составляет  $\sim 570$  ppm.

А.В. Муратов, С.А. Петухов и Л.С. Курманова (СамГУПС, г. Самара) рассмотрели пути повышения экологической безопасности дизелей тепловозов путем использования альтернативных топлив. Отмечено, что состав ОГ дизелей тепловозов в значительной степени зависит от свойств используемого топлива. Снижение токсичности ОГ может быть достигнуто и при использовании различных нетрадиционных видов топлив — облегченных нефтяных и альтернативных топлив, газовых топлив, а также ряда альтернативных топлив — спиртов, эфиров, ряда газообразных топлив. Проведен анализ современных тенденций применения в тепловозных дизелях различных альтернативных моторных топлив.

К перспективным видам топлива можно отнести сжиженный и компримированный природный газ (СПГ и КПП), сжиженный нефтяной газ (СНГ). Показана возможность реализации в тепловозных дизелях эффективных и малотоксичных рабочих процессов при использовании в качестве топлива водорода. В качестве перспективных альтернативных топлив для транспорта рассматриваются метиловый и этиловый спирты, относящиеся к группе кислородсодержащих топлив. Для анализа целесообразности применения в качестве моторного топлива смеси дизельного топлива (ДТ) и этанола были проведены расчетно-экспериментальные исследования работы тепловоза на этой смеси. Двухкомпонентное топливо состояло из 95 % ДТ и 5 % этанола. Исследованы выбросы токсичных компонентов ОГ дизеля тепловоза ЧМЭЗ, работающего в широком диапазоне нагрузочных режимов. Показано, что при переводе дизеля с ДТ на указанную смесь выбросы оксида азота снижаются на 10...18 %, а дымность ОГ на 15...25 %. Но при этом отмечен рост выбросов монооксида углерода на 5...9 % и негоревших углеводородов на 8...10 %. Отмечен также рост удельного эффективного расхода топлива, но он обусловлен в основном меньшей теплотворной способностью исследуемой смеси.

В.М. Фомин, Д.В. Апельинский (Московский политехнический университет) представили стратегию управления энергосберегающей технологией на основе термохимической регенерации отводимой тепловой энергии транспортных двигателей. Предложена и исследована энерготехнологическая схема, основанная на организации термохимического преобразования (конверсии) исходного углеводородного топлива с использованием отводимой теплоты в новый вид синтезированного топлива с более высокими показателями теплоты сгорания. Механизм проявления данного эффекта еще не нашел своего детального рассмотрения в современной теории и практике энергетического машиностроения. В его основе лежит закон сохранения энергии, который в термохимии интерпретируется как закон Гесса и его следствия.

В.И. Ерохов (Московский политехнический университет) оценил безопасность и эффективность эксплуатации автомобиля, работающего на КПП. Отмечено, что КПП является одним из наиболее перспективных энергоносителей для транспорта. Приведены показатели двигателя производства ПАО «КамАЗ», работающего на КПП с принудительным воспламенением рабочей смеси от свечи зажигания. Приведены результаты анализа сравнительной технологической безопасности использования альтернативных видов топлива в ДВС, в соответствии с которыми природный газ (метан) относится к наиболее безопасным альтернативным топливам.

С точки зрения токсичности ОГ поршневых двигателей природный газ более экологичен, чем пропан-бутановые смеси, бензин и ДТ. Для такой оценки экологичности указанных топлив использован индекс величины пожарного риска, зависящий от верхнего и нижнего концентрационных пределов воспламенения газозооушной смеси. Даны технические решения обеспечения безопасности конструкции газобаллонных автомобилей. Приведена принципиальная схема системы питания газобаллонного автомобиля КПП. Рассмотрены особенности ее безопасной эксплуатации.

В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, А.Д. Денисов и Л.И. Быковская (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск) рассмотрели возможности улучшения экологических показателей дизелей путем применения эмульгированных топлив. Отмечено, что к перспективным методам снижения выбросов токсичных компонентов с ОГ дизелей относится использование в качестве топлив эмульсий растительных масел и воды. Широкому внедрению этих топлив на транспорте препятствуют различия физико-химических свойств таких эмульгированных топлив. Этот недостаток может быть устранен при использовании многокомпонентных эмульгированных биотоплив — эмульсий нефтяного дизельного топлива, РМ и воды. Проведенные экспериментальные исследования показали, что адаптация дизеля типа Д-245.12С к работе на этих эмульсиях позволила повысить эффективный КПД и улучшить экологические показатели двигателя. В частности, отмечено снижение выбросов наиболее значимых токсичных компонентов ОГ — оксидов азота и дымности ОГ. Причем вода, содержащаяся в многокомпонентном эмульгированном биотопливе, оказывает на эмиссию оксидов азота существенно большее влияние, чем наличие в нем РМ. Влияние содержания в исследованных эмульсиях РМ и воды на дымность ОГ оказалось соизмеримым. Отмечено, что использование этих топлив не только обеспечило улучшение показателей токсичности ОГ двигателя, но и позволило приблизить свойства биотоплив к свойствам традиционного нефтяного ДТ. В частности, добавка воды в смесь нефтяного ДТ и РМ снижает вязкость такой смеси. Это, в свою очередь, облегчает организацию процессов топливоподачи, распыливания топлива, смесеобразования и последующего сгорания.

В.А. Марков, Бовэнь Са, С.Н. Девянин, С.А. Зыков, В.А. Неверов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) исследовали течение РМ в проточной части распылителя дизельной форсунки. Приведены результаты моделирования течения потока нефтяного ДТ и РМ в распылителе дизельной форсунки с использованием ПК Fluent. Исследована форсунка типа ФДМ-22 производства Ногинского завода топливной

аппаратуры с распылителем типа 171.07.00 Алтайского завода прецизионных изделий. При моделировании определены распределения значений основных параметров потока топлива, среди которых давление топлива, скорость течения, объемная концентрация паров топлива, средняя турбулентная кинематическая энергия потока. Подробно исследованы распределения этих параметров в распыливающем отверстии форсунки. Определены средние по выходному сечению распыливающего отверстия значения указанных параметров. Отмечено, что скорости течения РМ значительно меньше, чем у нефтяного ДТ. В то же время средняя турбулентная кинематическая энергия потока топлива на выходе из распыливающего отверстия при использовании этих двух видов топлива отличается незначительно. Подтверждена возможность улучшения характеристик впрыскивания РМ при его нагревании или смешивании с нефтяным ДТ.

В.С. Епифанов, Д.А. Попов (МГАВТ — филиал ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова») провели оценку энергоэффективности дизеля при резонансе крутильных колебаний валопровода. Отмечено, что Международная морская организация (ИМО) приняла руководящие принципы для «Управления энергоэффективностью судна», что обеспечивает основу судовой деятельности по энергосбережению. Одними из основных мер повышения энергоэффективности является контроль за работой ДВС. В силовой установке основным источником энергии для развития резонансных амплитуд крутильных колебаний коленчатого вала является энергия газов в цилиндрах двигателя. При сильном резонансе увеличение амплитуд колебаний и преодоление сил трения, а также передача энергии системе может сопровождаться значительными затратами энергии газов. Как показали расчеты, работа опрокидывающего момента от крутильных колебаний за полный цикл равна нулю, но его работа на отдельном участке периода момента от резонирующей гармонике не равна нулю. Именно она возникает при развитии крутильных колебаний валопровода. При таком опрокидывающем моменте двигателя от крутильных колебаний затраченная мощность на их развитие может составлять 1 % и более эффективной мощности двигателя, а напряжения в валопроводе при этом могут быть незначительными. Поэтому в целях оптимизации расхода топлива целесообразно применение гасителей для снижения резонансных амплитуд крутильных колебаний, не приводящих к возникновению опасных напряжений, или мер для смещения резонансных режимов из рабочего диапазона.

А.Е. Рассохин, М.А. Савельев и А.Ю. Заяц (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань) провели теоретическое обоснование и рассмотрели способы реализации электронного управления циркуляцией теплоносителя систем

охлаждения ДВС автомобилей многоцелевого назначения для особых условий эксплуатации. Тепловой режим ДВС в значительной степени определяет значения его эффективных показателей. Применяемые способы управления циркуляцией теплоносителя с жестким приводом вала жидкостного насоса (ЖН) от коленчатого вала, как правило, не обеспечивают оптимальное тепловое состояние ДВС. Вследствие этого могут возникать тепловые явления, снижающие надежность, ресурс, пусковые качества, скорость выхода на режим принятия нагрузки и эффективные показатели двигателя. Анализ алгоритмов управления тепловым состоянием ДВС автомобилей многоцелевого назначения показал, что для большинства двигателей оптимальная температура охлаждающей жидкости на выходе из рубашки охлаждения находится в пределах от +70 до +95 °С. Для обеспечения оптимального теплового состояния ДВС во всем диапазоне эксплуатационных режимов необходима разработка энергоэффективных систем и устройств автоматического управления тепловым состоянием ДВС и выбор рациональных критериев регулирования. Это может быть реализовано применением ЖН с приводом от электродвигателя, причем частота вращения ротора электродвигателя дифференцированно изменяется электронным блоком в зависимости от показателей температурного датчика, размещенного в наиболее теплонагруженной зоне ДВС. Анализ показал, что за критерий теплового состояния двигателя целесообразно принять температуру гильзы в верхнем поясе напротив первого поршневого кольца. Предложены следующие конструктивные варианты реализации предлагаемого способа: установка электродвигателя с ременным приводом ЖН, непосредственный привод ЖН от электродвигателя, привод ЖН от электродвигателя через угловой редуктор. Во всех случаях предусмотрено резервирование привода ЖН от коленчатого вала двигателя в случае отказа или повреждения электропривода.

М.А. Савельев, В.А. Марков (РВВДКУ им. В.Ф. Маргелова, г. Рязань, МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрели возможности разработки автономного энергетического модуля обеспечения технической готовности автомобилей в условиях низких температур. Отмечено, что техническая готовность транспортного средства структурно включает в себя готовность двигателя, системы электроснабжения, тормозной системы и ряда других систем. Для каждого структурного элемента технической готовности разработано множество конструктивных решений и способов ее обеспечения. К средствам обеспечения технической готовности двигателей можно отнести использование автономных бортовых источников энергии от дополнительного малогабаритного ДВС, а также применение средств форсированного предпус-



кового подогрева. Наиболее известным техническим решением является установка автоматического жидкостного подогревателя АПЖ-30Д-24 или его модификаций. В качестве альтернативы предложен разработанный комплекс технических решений, объединенный электронным блоком управления (ЭБУ) в автономный энергетический модуль обеспечения технической готовности автомобилей, который позволяет автоматически обеспечить техническую готовность транспортного средства в любых условиях эксплуатации. Алгоритм работы ЭБУ позволяет настраивать предельные значения падений показателей технической готовности в условиях низких температур, контролировать их по показаниям датчиков и распределять вырабатываемую при работе АПЖ энергию. Кроме того, в разработанной системе предлагается применение смазочной системы с сухим картером, что позволит размещать бак с маслом выше двигателя и после предпускового подогрева самотеком подавать разогретое масло к подшипникам коленчатого вала. Предусмотрено применение единого ЖН для подогревателя и системы охлаждения двигателя с приводом от электродвигателя и управлением от ЭБУ.

С.А. Петухов, А.Ю. Балакин, Л.С. Курманова, А.В. Муратов (СамГУПС, г. Самара) разработали тепловой аккумулятор масляной системы тепловозного дизеля. Отмечено, что на долю ОАО «РЖД» приходится более 6 % потребляемого в стране нефтяного ДТ. Часть потребляемого тепловозами топлива расходуется на «самопрогрев» дизель-генераторной установки в период простоя тепловоза в холодный период года. При организации прогрева тепловозов должно обеспечиваться поддержание температуры в системе охлаждения и масляной системе в пределах от 40...85 °С путем периодических запусков и остановок дизеля. Для этой цели возможно применение аккумуляторов теплоты. В настоящее время на железнодорожном транспорте накоплен опыт создания систем предпусковой подготовки ДВС с тепловыми аккумуляторами фазового перехода (ТАФП). Накопление в ТАФП теплоты происходит за счет плавления фазопереходного теплоаккумулирующего материала (ТАМ) от теплоты протекающего по трубному теплообменнику моторного масла. Интенсивному отводу теплоты от ТАМ в окружающую среду препятствует слой тепловой изоляции. Предложенная конструкция ТАПФ поддерживает температуру рабочих жидкостей на уровне не ниже 20 °С в течение не менее 24 ч при температуре окружающей среды до -30 °С. Время зарядки ТАПФ составляет 8 ч, что обеспечивает полную зарядку, достаточную для 12-часовой рабочей смены. Использование предлагаемой конструкции ТАПФ позволяет снизить на 30...40 % износ дизеля в момент пуска, избежать возможности запуска ди-

зеля в режиме сухого трения, масляного голодания и недопустимого перепада давления на фильтрах масляной системы.

А.В. Микитенко и Б.В. Осокин («Легион-Автодата», г. Москва) представили информационно-аналитическую систему для мониторинга технических параметров и диагностики транспортных средств». Отмечено, что основная тенденция в обслуживании автомобилей — это постоянный мониторинг эксплуатационных параметров автомобиля. Разработанные крупными автомобильными фирмами системы осуществляют такой мониторинг параметров электронных систем автомобиля в режиме реального времени при эксплуатации автомобиля и передают полученные данные на сервер производителя. При возникновении неисправности эти данные доступны официальным сервисным службам, которые связываются с автовладельцем и дают рекомендации по их устранению. Такие системы будут развиваться и далее, что позволит реализовать систему планового технического обслуживания, которая значительно сократит время обслуживания автомобиля и стоимость обслуживания. При использовании системы предиктивной диагностики можно предугадать выход из строя как конкретных компонентов систем управления двигателем, так и других значимых систем управления автомобилем. Мониторинг текущих данных автомобиля и двигателя позволит в будущем создать систему удаленной диагностики, и ремонт можно будет делать удаленно. При содействии Фонда поддержки инноваций компания «Легион-Автодата» создает отечественную систему предиктивной диагностики. Она базируется на комплексе разработанных мобильных приложений Motordata OBD и Doctor Hybrid с функционалом чтения кодов неисправности и диагностикой в режиме реального времени. Для такой диагностики необходим подключенный к автомобилю адаптер ELM327 и приложение. В отличие от большинства существующих приложений приложение компании «Легион-Автодата» позволяет проводить диагностику не только по стандартам EOBD и OBD, но и по расширенным протоколам, что позволяет диагностировать значительное количество электронных систем автомобиля. Преимуществом разрабатываемой системы диагностики является возможность чтения большего числа текущих данных при эксплуатации автомобиля. Так, в режиме реального времени можно наблюдать за изменениями таких параметров двигателя, как частота вращения коленчатого вала, температура охлаждающей жидкости, напряжение кислородных датчиков, коэффициент избытка воздуха, время открытия форсунок и т. д.

А.А. Строкин (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрел особенности расчета шумового климата на рабочих местах. Отмечена важность улучшения

экологических условий работы сотрудников промышленных предприятий. Рассмотрен способ экспресс-оценки ожидаемого шума на рабочих местах различных производств. При этом принято, что шумовые характеристики проектируемого оборудования известны. Предложены соответствующие расчетные формулы экспресс-оценки уровня шума, позволяющие находить приемлемые решения для обеспечения нормативных величин по шуму на проектируемых рабочих местах. Расчеты проведены при варьировании режимами работы оборудования и использовании характеристик различных защитных противозумных средств. Результаты расчетов показывают, что шум используемого оборудования оставался практически постоянным (т. е. изменялся не более чем на 5 дБ), а фоновые уровни значительно (более 10 дБ) ниже уровней шума оцениваемых источников. Таким образом, с помощью предлагаемого способа удобно проводить экспресс-оценку производственного шума на рабочих местах как на стадии проектирования, так и в условиях производства. В результате расчетов можно найти решения, удовлетворяющие санитарным нормам, при подборе оборудования по паспортным характеристикам, изменении режимов его работы и варьировании соответствующими средствами защиты от шума.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архаров А.М., Афанасьев В.Н., ред. Теплотехника. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [2] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-14. Двигатели внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2013.
- [3] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М., Легион-Автодата, 2005.
- [4] Bosch: Системы управления дизельными двигателями. М., ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004.
- [5] Bosch: Системы управления бензиновыми двигателями. М., ЗАО «КЖИ «За рулем», 2005.
- [6] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М., Легион-Автодата, 2013.
- [7] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [8] Александров А.А., Марков В.А., ред. Нефтяные моторные топлива: экологические аспекты применения. М., ООО НИЦ «Инженер», ООО «Оника-М», 2014.
- [9] Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск, Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009.

[10] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М., Изд-во МАДИ (ТУ), 2000.

[11] 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., МАДИ, 2012.

**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).

**Шатров Виктор Иванович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения 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., Шатров В.И. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. Современное состояние и перспективы развития. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 116–137.

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-116-137

**AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF THERMAL POWER PLANTS.  
STATE OF THE ART AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

V.A. Markov

vladimir.markov58@yandex.ru

V.I. Shatrov

shatrov@bmstu.ru

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

---

**Abstract**

The article considers the relevance of research aimed at improving the automatic control systems for thermal power plants, mainly with piston internal combustion engines, based on the analysis of the reports of the all-Russian scientific and technical conference named after Professor V.I. Krutov. These plants are widely used in various sectors of the economy — power engineering, transport, agriculture. The current level of development of such systems is assessed; the conclusions about the prospects for further development of automatic control systems for thermal power plants with piston engines are drawn. The main directions of their improvement are associated with the need for further improvement of fuel efficiency and reduction of toxicity of exhaust gases of thermal power plants, increasing the dynamic

**Keywords**

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

characteristics of internal combustion engines. The main directions of research in the field of fuel supply equipment of diesel engines, the working process of engines, and their adaptation for working on various alternative fuels are discussed

Received 27.03.2019

© Author(s), 2019

*The article is based on the reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference n.a. Professor V.I. Krutov (30.01.2019)*

## REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Afanas'yev V.N., ed. Teplotekhnika [Thermal engineering]. Moscow, BMSTU Publ., 2011.
- [2] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., ed. Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-14. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Machine engineering. Encyclopedia. Vol. IV-14. Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013.
- [3] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley [Fuel injection equipment and diesel control systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005.
- [4] Bosch: Sistemy upravleniya dizel'nymi dvigatelyami [Bosch: control systems for diesel engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2004.
- [5] Bosch: Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami [Bosch: control systems for gasoline engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2005.
- [6] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis toplivopodayushchikh sistem dizeley [Construction, calculation and technical service of diesel fuel injection equipment]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013.
- [7] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley [Toxicity of diesel burnt gas]. Moscow, BMSTU Publ., 2002.
- [8] Aleksandrov A.A., Markov V.A., ed. Neftnyane motornye topliva: ekologicheskie aspekty primeneniya [Oil motor fuels: ecological aspects of application]. Moscow, OOO NITs "Inzhener" Publ., OOO "Onika-M" Publ., 2014.
- [9] Vasil'yev I.P. Vliyaniye topliv rastitel'nogo proiskhozhdeniya na ekologicheskie i ekonomicheskie pokazateli dizelya [Impact of plant fuels on ecological and economical parameters of diesel]. Lugansk, Izd-vo VNU im. V. Dal'ya Publ., 2009.
- [10] Lotko V., Lukanin V.N., Khachiyan A.S. Primeneniye al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Using alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, Izd-vo MADI (TU) Publ., 2000.
- [11] Shatrov M.G., Khachiyan A.S., Golubkov L.N., et al. Sovershenstvovaniye rabochikh protsessov avtotraktornykh dizeley i ikh toplivnykh sistem, rabotayushchikh na al'ternativnykh toplivakh [Working process enhancement of car-and-tractor diesels and their fuel systems on alternative fuels]. Moscow, MADI Publ., 2012.


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

**Shatrov V.I.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Research Institute for Power Engineering, 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., Shatrov V.I. Automatic control systems of thermal power plants. State of the art and development prospects. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 6, pp. 116–137 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-6-116-137



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие автора  
**Ю.Г. Драгунова**

**«Обеспечение прочности и ресурса  
реакторных установок с водо-водяными  
энергетическими реакторами»**

Изложены подходы к обоснованию безопасности реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами, в частности прочности оборудования, с учетом нагрузок и изменений свойств материалов в условиях нормальной эксплуатации и при авариях. Рассмотрены вопросы управления ресурсом критических элементов оборудования реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами. Пособие адресовано студентам специальности «Ядерные реакторы и материалы», может быть полезно для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки «Ядерная энергетика и технологии», а также специалистов, работающих в области создания оборудования для ядерной индустрии.

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