

УДК 621.436

## АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**В.А. Марков, В.И. Шатров**

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

e-mail: markov@power.bmstu.ru

*На основе анализа материалов Всероссийского научно-технического семинара имени В.И. Крутова рассмотрены основные тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок, что позволяет оценить современный уровень их развития, сделать выводы о перспективах дальнейших исследований систем автоматического регулирования и управления, а также сформулировать направления исследований в области топливоподающей аппаратуры двигателей, работающих на альтернативных топливах, и в ряде смежных областей.*

**Ключевые слова:** теплоэнергетические установки, двигатели внутреннего сгорания, системы автоматического управления, системы автоматического регулирования.

## ANALYSIS OF TENDENCIES FOR IMPROVING THE SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION OF HEAT-AND-POWER PLANTS

**V.A. Markov, V.I. Shatrov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Federation

e-mail: markov@power.bmstu.ru

*Based on the analysis of materials of the All-Russia Scientific and Technical Seminar n. a. V.I. Krutov, main tendencies for improving the systems of automatic control and regulation of heat-and-power plants are considered, which makes it possible to estimate the contemporary level of their development, to draw conclusions on prospects of further studies of systems of automatic regulation and control, and also to formulate trends of investigations in the field of fuel supply apparatus of the engines, working on alternative fuels, and in some neighboring fields.*

**Keywords:** heat-and-power plants, internal combustion engines, automatic control systems, systems of automatic regulation.

В настоящее время одной из фундаментальных проблем энергомашиностроения является использование альтернативных топлив в теплоэнергетических установках, чему, в частности, посвящен ряд докладов Всероссийского научно-технического семинара по совершенствованию систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок.

В докладе профессора В.А. Маркова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрены проблемы, возникающие при использовании альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. Проанализированы особенности рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, работающих на альтернативных топливах и возможности совершенствования этих процессов.

Отмечено, что эффективным средством совершенствования этих процессов является управление параметрами двигателя, в первую очередь — параметрами топливоподачи. Представлены результаты экспериментальных исследований двигателей при использовании альтернативных топлив. Проведено сравнение мощностных, экономических и экологических показателей двигателей, работающих на нефтяных и альтернативных топливах. Приведены примеры широкого использования различных альтернативных топлив в ряде развитых зарубежных стран, в которых альтернативные топлива производятся в промышленных масштабах и применяются в транспортных средствах и сельскохозяйственной технике.

Н.А. Иващенко, А.Г. Кузнецов, А.С. Кулешов, С.В. Харитонов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) выступили с докладом “Составление математической модели дизеля методом реконструкции параметров рабочего процесса”. Отмечено, что при создании математических моделей комбинированных двигателей первостепенную роль играет вопрос получения исходной информации. Для описания динамических режимов работы требуются характеристики двигателя, которые не могут быть получены при обычных стендовых испытаниях. Получение необходимых для создания модели материалов может осуществляться методом реконструкции исходных данных путем расчета характеристик двигателя с помощью компьютерных программ, моделирующих рабочий процесс комбинированного двигателя. Приведены результаты реконструкции исходных данных с использованием программного комплекса “ДИЗЕЛЬ-РК” при создании математической модели дизеля LIEBHERR 8VD508, который планируется использовать как источник энергии для транспортной установки. Результаты моделирования показали хорошее совпадение результатов моделирования динамических режимов дизеля с экспериментальными данными, что подтвердило правомочность использования предложенного метода реконструкции исходных данных при создании математических динамических моделей комбинированных двигателей.

В докладе А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонова, А.А. Латочкина (МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Моделирование процессов управления транспортной установкой с электрической трансмиссией” представлена математическая динамическая модель дизеля LIEBHERR 8VD508 в составе энергетического агрегата транспортной установки с электрической трансмиссией, включающей тяговые генератор и электродвигатели. Комбинированный двигатель рассматривается как совокупность основных элементов: поршневой части, турбокомпрессора и др. Для разработанной математической модели составлена компьютерная программа в вычислительной среде MATLAB/Simulink. Приведены результаты моделирования переходных процессов изменения основных параметров дизеля, приводящего в действие тяговый генератор, при изменении нагрузки на тяговый генератор и настройки частоты вращения вала дизеля. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными переходными процессами показало, что разработанная математическая модель дизеля адекватно описывает статические и динамические режимы

работы дизеля и может быть использована для отработки алгоритмов управления дизелем в составе энергетического агрегата транспортной установки.

Доклад А.Г. Кузнецова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Особенности управления транспортной установкой с электрической трансмиссией” посвящен анализу характеристик энергетических установок комбинированного типа как объектов управления. Энергетические установки комбинированного типа, содержащие двигатель внутреннего сгорания и электрическую трансмиссию, обладают большой гибкостью по сочетанию режимов работы отдельных элементов, так как отсутствует жесткая механическая связь между валом двигателя и колесами. В таких комбинированных установках открываются более широкие возможности по управлению, включая оптимизацию режимов работы установки по выбранным критериям. Управляющие сигналы системы управления могут подаваться на составляющие элементы энергетической установки таким образом, чтобы они выходили на требуемые или оптимальные режимы работы. Рассмотрены типовая функциональная схема энергетической установки комбинированного типа с системой автоматического управления и возможные стратегии управления, основанные на доминирующей роли либо дизеля как источника энергии, либо тяговых электродвигателей как движителей транспортной установки. Показаны возможности оптимизации режимов работы дизеля по критерию экономичности (минимизации расхода топлива).

Л.В. Грехов, Чжао Цзяньхуэй (МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад “Метод расчета и оптимизация быстродействующего электромагнитного привода в топливной аппаратуре с электронным управлением”. Отмечено, что топливоподающая аппаратура (ТПА) с электронно-управляемыми клапанами позволяет гибко управлять процессом топливоподачи — изменять по требуемым законам угол опережения впрыскивания топлива (УОВТ), формировать внешнюю скоростную характеристику, управлять давлением и характеристикой впрыскивания. Снижение времени срабатывания исполнительного механизма — быстродействующего электромагнитного привода (ЭМП) управляющего клапана — повышает точность дозирования и фазирования топливоподачи, позволяет организовывать многоразовое впрыскивание, обеспечить минимум образования крупных капель топлива при впрыскивании. Разработана математическая модель процесса топливоподачи для решения сопряженных задач гидродинамики и нестационарных электромагнитных процессов. С использованием разработанной математической модели проведены расчетные исследования влияния конструктивных параметров электромагнита, магнитных свойств сердечника, закона управления напряжением питания ЭМП на показатели и характеристики процесса топливоподачи. Совместное использование разработанной математической модели с программным комплексом “Дизель РК”, разработанным д-р техн. наук проф. А.С. Кулешовым, позволяет исследовать зависимость показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) от параметров и характеристики процесса топливоподачи.

В докладе Е.Ф. Позднякова и В.А. Маркова (ОАО “Форант-Сервис”, г. Ногинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Метод улучшения качества процесса регулирования частоты вращения дизельного двигателя в составе дизель-генератора” рассмотрены особенности структуры электронной системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения вала дизель-электрического агрегата АД-60 с дизельным двигателем типа Д-245.9. Двигатель оснащен топливным насосом высокого давления (ТНВД) типа 4УТНИ-1111010, на дозирующую рейку которого воздействует поворотный исполнительный механизм (электромагнит) ЭМП01-30, управляемый от электронного блока управления производства ОАО “Форант-Сервис”. Система содержит датчик положения исполнительного механизма. Отличительной особенностью представленной САР является охват местной обратной связью ЭМП дозирующей рейки. Проведены испытания дизель-электрического агрегата АД-60 с дизельным двигателем типа Д-245.9. Точность поддержания частоты вращения на установившемся режиме с полной нагрузкой 50 кВт (нестабильность частоты вращения) составила 0,1 %. Степень неравномерности (наклон) регуляторной характеристики двигателя равна 1 %. Провал и заброс частоты генератора (50 Гц) при набросе и сбросе полной нагрузки (50 кВт) составили не более  $\pm 0,25$  Гц ( $\pm 0,5$  % заданного значения). Длительность переходных процессов наброса и сброса полной нагрузки не превышала 0,1 с. Точность поддержания частоты генератора на режимах с неполной нагрузкой (от 10 до 40 кВт) и параметры переходных процессов при набросе и сбросе меньших нагрузок оказались не хуже, чем при полной нагрузке. Таким образом, параметры разработанной САР частоты вращения значительно превосходят параметры САР 1-го класса точности по ГОСТ 10511–83 (нестабильность частоты вращения на режиме полной нагрузки — 0,6 %, заброс частоты вращения в переходном процессе сброса нагрузки — не более 5 %, длительность такого переходного процесса — не более 2 с).

В докладе Ю.Е. Хрящева и К.В. Дойникова (ЯГТУ, г. Ярославль) “Способ оптимизации крутящего момента силового агрегата большегрузного автомобиля” предложен способ управления крутящим моментом дизельного силового агрегата, основанный на автоматизированном управлении механической коробкой передач с помощью адаптивной электронной системы. Способ управления объединяет в себе две электронные системы управления транспортным средством и позволяет синхронизировать работу коробки передач и дизеля. Спроектированы алгоритмы управления силовым агрегатом для различных режимов движения. Создан макетный образец электронной системы управления механической коробкой передач “ТМЗ-14.180”.

Ю.Е. Хрящев и Е.А. Епанешников (ЯГТУ, г. Ярославль) представили доклад “Применение искусственных нейронных сетей для построения адаптивных регуляторов”. В работе рассматривается возможность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения адаптивных алгорит-

мов управления параметрами двигателей внутреннего сгорания. ИНС применяется для оценки качества переходного процесса, обеспечиваемого ПИД-регулятором. На основе данной оценки производится подстройка параметров регулятора с целью обеспечения оптимального регулирования. Предлагаемая в работе схема регулятора вследствие своей универсальности может быть использована для управления позиционированием заслонки системы рециркуляции ОГ или давлением впрыскивания аккумуляторной системы топливоподачи.

Доклад Ю.Е. Хрящева и Д.Ф. Воробьева (ЯГТУ, г. Ярославль) посвящен разработке математической модели газового двигателя. При этом газовый двигатель рассматривался как объект управления, характеризующийся совокупностью управляемых параметров. Математическая модель включает дифференциальные уравнения, полученные для основных параметров двигателя. Данная модель описывает последовательность преобразования входных сигналов (угла поворота дроссельной заслонки, количества подаваемого топлива) в средние значения регулируемых переменных (крутящий момент и соотношение “воздух-топливо”) без учета изменения этих величин в каждом цикле, и отражает взаимосвязи параметров двигателя и их влияние на работу всей системы в целом.

В докладе Н.Н. Патрахальцева, И.С. Мельникова, Ю.С. Вишнякова (РУДН) “Регулирование дизеля изменением его рабочего объема” рассмотрен метод повышения экономичности режимов малых нагрузок дизелей изменением их рабочих объемов отключением – включением части цилиндров. С использованием универсальных характеристик дизеля ЯМЗ-238, перестроенных в координаты “удельная работа двигателя–частота вращения”, проведен анализ ожидаемого выигрыша в расходе топлива при работе дизеля по тринадцатиступенчатому испытательному циклу. Рассмотрен случай, когда на малых нагрузках в одном варианте дизель работает на четырех цилиндрах, а в другом – число активных цилиндров меняется в соответствии с нагрузкой. Таким образом, дизель работает на двух, трех-четырёх, пяти-шести и семи цилиндрах. Показано, что при реализации тринадцатиступенчатого испытательного цикла снижение часового расхода топлива в первом варианте составляет около 3 %, а во втором – порядка 5 %.

Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников (РУДН) представили доклад “Корректирование внешней скоростной характеристики четырехтактного двигателя”. Проведен расчетный анализ возможности повышения крутящего момента в области низких частот вращения четырехтактного двигателя со свободным газотурбонагнетателем переводом двигателя на работу по двухтактному циклу. Проанализированы конструктивные схемы решения этой проблемы и варианты организации процессов продувки-наполнения при четырехклапанной головке цилиндра и специально сформированной камере в поршне. Показана возможность форсирования двигателя по крутящему моменту в области низких частот в 1,6–1,8 раза в сравнении с вариантом штатного исполнения.

В докладе В.И. Ерохова и М.П. Макаровой (Московский государственный машиностроительный университет “МАМИ”) “Система впрыска сжиженного нефтяного газа” рассмотрена электронно-управляемая система с электромагнитными форсунками (ЭМФ), имеющими плоский якорь. Система питания двигателя сжиженным нефтяным газом (СНГ) включает электрический топливный насос, мультиклапан, заправочное устройство, подающий и сливной трубопроводы, топливный аккумулятор с регулятором давления и ЭМФ. Особенностью системы питания является оборудование распылителей форсунок системой подогрева, которая обеспечивает подогрев форсунок при пуске и прогреве двигателя электроподогревающим устройством, а на рабочих режимах подогрев осуществляется от охлаждающей жидкости двигателя. ЭМФ снабжены системой температурного контроля состояния форсунок, а также устройством подогрева распылителей при переключении системы питания с летнего типа топлива на зимний. Переключение видов топлива с бензина на газ происходит при достижении температуры прогрева  $45^{\circ}\text{C}$ . При работе на газовом топливе уменьшается концентрация окислов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ в связи с более низкой температурой рабочего цикла. Это позволяет в основных эксплуатационных режимах обеднять горючую смесь до коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,3$ . Применение СНГ позволяет расширить предел устойчивой работы на бедных смесях до величины  $\alpha = 1,58$  против  $\alpha = 1,37$  при работе на бензине. Поэтому применение газового топлива обеспечивает существенное снижение выброса вредных веществ ( $\text{CO}$  — в 2–4 раза,  $\text{NO}_x$  — в 1,2–2,0 раза и  $\text{CH}_x$  — в 1,1–1,4 раза). При работе двигателя ВАЗ-2103 на бензине на режимах внешней характеристики средняя неравномерность распределения смеси по цилиндрам составила 12 %, а при работе на СНГ — 6 %. При работе на бензовоздушной смеси содержание  $\text{CH}_x$  в ОГ равно около 1000 ppm, а на газовоздушной смеси — 500 ppm. Ресурс работы ЭМФ соответствует 100 тыс. км пробега автомобиля, или 500 млн циклов. Основные технические характеристики ЭМФ: производительность 19 г/с, время запаздывания открытия клапана 1,5 мс, время запаздывания закрытия клапана 1,0 мс, продолжительность открытия клапана — 2...5 мс в зависимости от количества подаваемого топлива, рабочее давление 0,1 МПа, напряжение питания ЭМФ от бортовой сети 8...16 В, потребляемый ток 4 А, частота срабатывания — не менее 250 Гц, диапазон рабочих температур — 40...100  $^{\circ}\text{C}$ , ток открытия клапана 1,8 А, ток удержания 1 А, потребляемая мощность при удержании 12 Вт, максимальная потребляемая электрическая мощность — не более 150 Вт.

В.И. Ерохов, С. Белл и И.В. Одинокова (Московский государственный машиностроительный университет “МАМИ”, МАДГТУ “МАДИ”) представили доклад “Экологическая эффективность нанотехнологий в каталитическом нейтрализаторе”. Разработана модель нейтрализации ОГ и определены скорости химической реакции диффузии в порах каталитического нейтрализатора (КН). Разработана концепция нейтрализации ОГ на основе нанотехнологии. Частицы размером 100 нм придают материалам и веществам принци-

пиально новые свойства. Наиболее перспективны блочные носители катализатора с сотовой структурой, выполненной на основе термостойкой металлической фольги с нанесением на нее с обеих сторон высокопористого слоя из оксидной керамики. Для решения проблемы увеличения жаростойкости металлического носителя при сохранении высокой адгезии пористого керамического слоя предложено использование метода детонационного напыления. Покрытие наносят детонационной пушкой, ствол которой заполняют взрывчатой газовой смесью, в нее впрыскивают напыляемый порошок и электрической искрой возбуждают детонацию. Данное покрытие защищает металл от окисления при высоких температурах и деградации металлической основы из-за длительного пребывания при высоких температурах, способствует высокой адгезии пористого керамического слоя. В порах высокопористого слоя из  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  содержится родий Rh. Удельная поверхность покрытия  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  составляет  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ . При термическом воздействии наночастицы сплавляются между собой и закрепляются на подложке из  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , образуя прочную гексагональную наноструктуру. Данная структура имеет поры, средний диаметр которых превышает 10 нм, что делает ее легко проницаемой. Эффективный путь повышения температуры ОГ на входе в нейтрализатор — подвод к нейтрализатору электрической энергии от дополнительного источника. Для достижения требуемого изменения температуры ОГ за подогревателем (эта температура должна быть не менее  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  уже в первые 10...20 с после пуска) разработана система электрического разогрева нейтрализатора. Нагревательный блок выполняется из фехральной ленты толщиной 50 мк, на которую детонационным напылением наносят электроизоляционное покрытие. Детонационное покрытие служит одновременно изолятором электронагревателя и носителем катализатора. Время нагрева до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  градусов составляет 17 с. Высокопористые проницаемые ячеистые металлы, применяемые в качестве носителей катализаторов, по сравнению с керамическими обладают рядом преимуществ. Благодаря низкой теплоемкости они обеспечивают быстрый разогрев каталитической системы, что позволяет оперативно изменять рабочий режим процесса, а их высокая теплопроводность исключает местные перегревы, что предотвращает дезактивацию каталитического слоя. Катализаторы достаточно активны уже при невысоких температурах (при испытаниях ОГ имели температуру в пределах  $80\text{--}170 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и обеспечивали очистку выхлопов от монооксида углерода в среднем на 66 %.

В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов (ЮУрГУ, г. Челябинск) представили доклад “Анализ возможности использования природного газа в современных ДВС с компьютерными системами управления фирмы *Bosch*”. Для эффективного использования природного газа в ДВС фирма *Bosch* предлагает два варианта газовых систем: однотопливную и двухтопливную — газодизельную. Обе системы выполнены на модульной основе с компьютерным регулированием режимов работы. В однотопливной системе природный газ или биометан впрыскиваются под низким давлением во впускную систему и воспламеняются в цилиндре свечой зажигания. Состав смеси поддержи-

вается либо стехиометрическим, либо обедненным до коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,5$ . При питании двигателя природным газом в сочетании с трехкомпонентным катализатором возможно выполнение требований стандарта *EURO-6*. В газодизельной системе применяется распределенный впрыск природного газа или биометана во впускную систему и сохраняется штатная система *Common Rail*. Воспламенение рабочей смеси происходит за счет запальной дозы дизельного топлива от сжатия. В этом режиме замещение дизельного топлива газом составляет до 90%. Компьютерное управление подачей дизельного топлива и газа осуществляется двумя отдельными контроллерами. При необходимости можно перейти на работу на одном дизельном топливе. В обеих системах компоненты и программное обеспечение совместимы с природным газом и биометаном и отвечают современным требованиям к организации процесса сгорания с малым образованием токсических компонентов. Это позволяет использовать их на современных ДВС с компьютерными системами управления фирмы *Bosch*.

В докладе В.Г. Камалтдинова, Г.Д. Драгунова, С.С. Никифорова (ЮУрГУ, г. Челябинск) “Теоретическая оценка возможности повышения скорости сгорания бедных газовых смесей увеличением объема и энергии зажигания” представлены результаты расчетных исследований скорости сгорания гомогенных воздушных смесей метана, пропана и диметилового эфира (ДМЭ) в камере сгорания постоянного объема при плазменно-факельном зажигании с удельной объемной энергией плазменного факела  $q_{пл.ф}$  от 0,5 до 3,5 Дж/см<sup>3</sup>, начальном давлении 0,1 МПа и температуре 300...800 К. Увеличение  $q_{пл.ф}$  приводит к повышению температуры смеси в объеме, охваченном плазменным факелом, на 500...2900 К, в результате чего увеличивается скорость сгорания топлива во фронте пламени. Однако рост толщины фронта пламени для нормальных воздушных смесей ДМЭ начинается при  $q_{пл.ф}$  более 1,2 Дж/см<sup>3</sup>, пропана — более 1,9 Дж/см<sup>3</sup>, метана — более 2,2 Дж/см<sup>3</sup>. При постоянной  $q_{пл.ф}$  и повышении начальной температуры смесей в диапазоне от 300 до 800 К увеличение степени подогрева фронта пламени способствует ускорению его развития. При повышении коэффициента избытка воздуха гомогенных смесей от 1 до 5 единиц степень подогрева фронта пламени увеличивается незначительно, поэтому для ускорения его развития требуется изменить  $q_{пл.ф}$  более чем в 1,4 раза. Увеличение объема первоначального плазменного факела приводит к соответствующему росту толщины фронта пламени и скорости его движения. Таким образом, увеличение энергии и объема плазменного факела ускоряет развитие первоначального очага и сгорание бедных газовых смесей.

Доклад В.Г. Камалтдинова, Г.Д. Драгунова, В.А. Маркова (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Влияние инертных компонентов горючей смеси на показатели процесса сгорания диметилового эфира” посвящен расчетным исследованиям процессов самовоспламенения и сгорания гомогенной газозвушной смеси при использовании в качестве топлива ДМЭ. Рассмотрена камера сгорания постоянного объема при начальном давлении

1,5 МПа и температуре 700 К. При увеличении коэффициента остаточных газов  $\gamma_{\text{ост}}$  от 0 до 0,5 и исключении влияния инертных компонентов на условную продолжительность реакции окисления ДМЭ максимальные значения скорости сгорания и моменты их достижения изменялись незначительно. Учет влияния инертных компонентов производился с помощью коэффициента реакционной активности кислорода  $K_1$ , начальное значение которого уменьшалось от 0,765 (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0$ ) до 0,496 (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$ ), т.е. в 1,54 раза. В процессе сгорания происходило дополнительное снижение коэффициента  $K_1$  от 1,5 до 5 раз. В результате выявлено существенное замедление процесса сгорания: расчетная максимальная скорость сгорания уменьшилась в 1,59 раза (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0$ ) и в 4,22 раза (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$ ) по сравнению с расчетами при  $K_1 = 1$ , а время ее достижения увеличилось в 1,37 раза (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0$ ) и в 2,56 раза (при  $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$ ). Это замедление вызвано увеличением в 1,5–2,5 раза условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ в фазе активного сгорания. В то же время количество активных молекул ДМЭ при учете влияния инертных компонентов уменьшалось незначительно. Таким образом, применение коэффициента реакционной активности кислорода  $K_1$  позволяет адекватно моделировать показатели процесса сгорания при балансировке окислителя инертными компонентами.

Доклад А.Ю. Дунина и А.А. Езжева (МАДГТУ “МАДИ”) посвящен анализу влияния массового состава биотоплива на показатели рабочего процесса дизеля. В Проблемной лаборатории транспортных двигателей МАДИ ведутся исследования по поиску способов повышения эффективности работы дизелей, питаемых биотопливами при обеспечении заданного уровня мощностных и экологических показателей. Представлены результаты оценки совместного влияния массового состава биотоплива и угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) на рабочие показатели дизеля 2 Ч 10,5/12. В качестве топлив применялись дизельное топливо, метиловый эфир рапсового масла и смеси топлив различных массовых составов: 80 % дизельного топлива (ДТ) и 20 % рапсового масла (РМ); 20 % ДТ и 80 % РМ; 67 % РМ и 33 % этанола. Испытания проведены при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин<sup>-1</sup> и установочных УОВТ, равных 13, 25, 32 градусов поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (град. п.к.в. до ВМТ). Показана возможность совместного улучшения экономических и экологических показателей дизеля на заданном режиме подбором состава биотоплива и установочного УОВТ.

Н.В. Гулия, В.Г. Клоков, О.В. Ткаченко (МГИУ) представили доклад “Газодизель с внутренним смесеобразованием, работающий на сжиженном пропан-бутане”. Использование сжиженного нефтяного газа в качестве топлива для дизелей обосновано как экономическими, так и экологическими факторами. В большинстве известных решений газ используется в паровой фазе при внешнем смесеобразовании, а дизельное топливо выполняет роль запального. Организация такого процесса достаточно сложна конструктивно, особенно при попытках модернизационного решения. Применение смешанного газо-дизельного топлива сложно как в части организации подготовки

и хранения топлива, так и подачи его штатной топливной аппаратурой. На дизеле типа Д-240 применено решение отдельной подачи сжиженного газа в линию высокого давления топлива через специальные клапаны, разработанные в МГТУ им. Баумана и РУДН. Дизельное топливо подается обычным порядком. При таком техническом решении достигнуто повышение мощности двигателя без превышения предела дымления.

Ю.Е. Драган (Владимирский государственный университет) выступил с докладом “Влияние конструктивных и кинематических параметров электрогидравлических форсунок на гидродинамические процессы в форсунках”. Функционирование электрогидравлических форсунок (ЭГФ) аккумуляторных топливных систем типа *Common Rail* существенно зависит от параметров камеры управления форсунки. К этим параметрам относятся эффективные проходные сечения входного  $\mu F_{\text{вх}}$  и выходного  $\mu F_{\text{вых}}$  жиклеров. При математическом моделировании гидродинамических процессов в камере управления для фиксированного значения указанного параметра выходного жиклера, соответствующего фактическому значению этого параметра экспериментальной форсунки конструкции НИКТИД и равного  $\mu F_{\text{вых}} = 0,14 \text{ мм}^2$ , рассмотрен диапазон значений отношений параметров  $\mu F_{\text{вх}}/\mu F_{\text{вых}}$  от 0,04 до 0,5. В результате расчетов установлено, что в этом диапазоне обеспечивается работоспособность ЭГФ. Оптимальное значение этого отношения по критерию быстродействия форсунки составило 0,07, а оптимальное значение эффективного проходного сечения входного жиклера оказалось равным 0,01  $\text{мм}^2$ . В качестве критерия быстродействия принята минимальная задержка подъема иглы распылителя ЭГФ после включения электромагнитного клапана форсунки. Характерно, что для максимальной величины рассмотренного диапазона отношений параметров  $\mu F_{\text{вх}}/\mu F_{\text{вых}}$  уровень быстродействия оказался вдвое ниже оптимального уровня. Математическое моделирование выявило, что процесс подъема иглы распылителя совместно со штангой и плунжером-мультипликатором записывания в результате уменьшения объема камеры управления приводит к замедлению процесса падения давления в этой камере. Следовательно, кинематика иглы и других подвижных частей ЭГФ влияет на скорость иглы и на долю цикловой подачи в моменты ее движения. В частности, при давлении в аккумуляторе, равном 70 МПа, выявлено пятикратное замедление процесса падения давления. В докладе приведены результаты моделирования гидродинамических процессов в форсунках.

В докладе В.А. Маркова, Л.Л. Михальского, С.Н. Девянина, В.И. Шатрова, О.Н. Слепцова, А.В. Стремякова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горючкина) “Анализ комплексной системы автоматического регулирования частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости дизельного двигателя” представлены результаты математического моделирования этой САР. В рассматриваемой САР для улучшения статических и динамических показателей процесса регулирования использован импульс по нагрузке на дизель. За счет введения этого импульса в закон регулирования удалось обеспечить инвариантность обоих контуров регулирования. При этом в контуре регулирования температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора

входными координатами являются перемещение регулирующего органа, изменяющего количество воды, поступающей во второй контур радиатора, и изменение количества теплоты, отдаваемой двигателем охлаждающей воде. При моделировании САР рассмотрен дизель без наддува типа Д-240 (4 Ч 11/12,5), работающий в составе дизель-генераторной установки (ДГУ). Элементы рассматриваемой комплексной САР (дизель как регулируемый объект, электронные регуляторы частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости) описаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для определения параметров САР проведены расчетные исследования с использованием программного комплекса “Моделирование в технических устройствах”, разработанного под руководством канд. техн. наук, доцента О.С. Козлова. При расчетах исследованы переходные процессы наброса нагрузки на дизель ДГУ. Результаты расчетов канала регулирования частоты вращения коленчатого вала свидетельствуют о том, что исходная САР с чисто пропорциональным регулятором обеспечивает степень неравномерности (наклон) регуляторной характеристики  $\delta = 7\%$ . При этом провал частоты вращения в переходном процессе наброса полной нагрузки составил  $7,2\%$ . Наилучшее качество процесса регулирования достигается при коэффициенте усиления регулятора по нагрузке  $k_n = 0,79$ . В этом случае обеспечивается нулевая степень неравномерности регуляторной характеристики ( $\delta = 0$ ) и реализуется астатическая САР. При этом провал частоты вращения в переходном процессе наброса полной нагрузки дизеля типа Д-240 составил  $\Delta\omega_d = 2,2\%$ , а продолжительность переходного процесса  $t_n$  — около  $0,3$  с. Эти показатели качества процесса регулирования значительно лучше аналогичных показателей, допустимых для САР первого класса точности. Результаты расчетных исследований контура регулирования температуры охлаждающей жидкости показывают, что в связи с большей инерционностью этого контура переходные процессы в нем отличаются отсутствием провалов (забросов) регулируемого параметра. При коэффициенте усиления регулятора по нагрузке  $k_n = 0,99$  практически обеспечивается инвариантность подсистемы регулирования температуры охлаждающей жидкости, т.е. ее независимость от внешнего воздействия. В этом случае статическое изменение температуры охлаждающей жидкости (степень неравномерности регуляторной характеристики  $\delta$ ) дизеля типа Д-240 практически равно нулю. Проведенный комплекс расчетных исследований подтвердил возможность построения комплексной астатической системы автоматического регулирования частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости путем введения импульса по нагрузке в закон регулирования двух указанных параметров.

П.В. Вальехо Мальдонадо, С.В. Гусаков, С.Н. Девянин, В.А. Марков, Е.Г. Пономарев, В.В. Бирюков (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), РУДН, МГАУ им. В.П. Горячкина, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ППП “Агродизель”) выступили с докладом “Исследование самовоспламенения биотоплив в ДВС”. Отмечено, что для эффективного

использования альтернативных топлив растительного происхождения необходимо совершенствование внутрицилиндровых процессов. Разработаны расчетные методы и программные продукты, в которых необходимо правильное задание исходных характеристик исследуемых топлив. Среди таких характеристик — цетановое число, характеризующее способность топлива к самовоспламенению через длительность периода задержки воспламенения (ПЗВ). При определении ПЗВ важно правильно выбрать постоянные коэффициенты, входящие в уравнение для определения этого периода. Многие работы по исследованию воспламеняемости жидких топлив для определения их кинетических констант проводились в бомбах, протекание рабочего процесса в которых (статическое состояние заряда в момент впрыскивания топлива, постоянство объема камеры сгорания и др.) сильно отличается от протекания рабочего процесса дизелей. Значения кинетических констант для рапсового масла и его смесей с этиловым спиртом в литературе не приводятся. Нахождение значений этих кинетических констант для различных топлив возможно при их экспериментальном исследовании в различных условиях воспламенения. Для таких исследований использована установка ИДТ-69, предназначенная для оценки воспламеняемости топлив методом совпадения вспышек. Установка представляет собой стенд с одноцилиндровым вихрекамерным дизелем, приводимым электродвигателем. Исследование топлив, содержащих рапсовое масло и этиловый спирт, потребовало создания специального смесителя для получения устойчивой смеси. Использование смесителя позволяло в процессе эксперимента получать смесь (эмульсию) рапсового масла и спирта без добавления эмульгатора, присутствие которого могло повлиять на продолжительность ПЗВ. Смеситель (эмульгирующее устройство) был смонтирован на установке ИДТ-69. Его производительность регулировалась изменением частоты вращения электропривода. При эксперименте исследовались четыре вида топлив: дизельное топливо (ДТ), рапсовое масло (РМ), смесь (эмульсия) РМ и этилового спирта (ЭС) в соотношении 90:10, смесь (эмульсия) РМ и ЭС в соотношении 70:30. Наибольшее цетановое число имеют ДТ — 45...49, затем РМ — 35...38 и ЭС — 6...9. Испытания топлив проводились при одинаковом коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 2,2$ . При испытаниях УОВТ варьировался в диапазоне от 10 до 26 град. п.к.в. до ВМТ, а степень сжатия  $\varepsilon$  — в диапазоне от 12 до 22 град. п.к.в. При степенях сжатия  $\varepsilon < 14$ , УОВТ  $\theta = 13$  град. п.к.в. до ВМТ и использовании РМ и его смесей с ЭС воспламенение топлива не наблюдалось. Для определения кинетических констант уравнения для ПЗВ результаты испытаний были обработаны с учетом температуры и давления в цилиндре в момент начала впрыскивания топлива. Анализ полученных данных показывает, что снижение цетановых чисел приводит к увеличению энергии активации для этих топлив. Отмечена значительная зависимость ПЗВ от температуры рабочей смеси, что ухудшает эксплуатационные качества этих топлив. Условная энергия активации для топлива из рапсового масла с 30 %-ным содержанием спирта на 60 % выше, чем для ДТ.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.С. Акимов, В.А. Шумовский, Л.И. Быковская, В.В. Маркова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) представили доклад “Оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив для сельскохозяйственной техники”. Отмечено, что смешивание различных компонентов многокомпонентных смесевых биотоплив позволяет обеспечить наибольшее приближение свойств этих топлив к свойствам нефтяного ДТ, но необходима оптимизация состава этих топлив. При оптимизации состава таких смесевых биотоплив для дизелей сельхозмашин необходимо учитывать реальное распределение режимов их работы в условиях эксплуатации. Причем, при выполнении сельхозмашинами основных технологических операций распределение режимов работы их двигателей существенно отличается от распределения режимов работы дизелей транспортных средств. На основании анализа реальных распределений режимов дизелей сельхозмашин предложен четырехрежимный испытательный цикл, включающий четыре нагрузочных режима при номинальной частоте вращения. Эти режимы соответствуют 100 %-ной, 75 %-ной, 50 %-ной и 25 %-ной нагрузкам, а их весовые коэффициенты равны соответственно 10, 40, 40 и 10 %. Этот испытательный цикл использован при оптимизации состава многокомпонентных смесевых биотоплив. Для проведения указанной оптимизации разработана методика, базирующаяся на составлении обобщенного комплексного критерия оптимальности. Эта методика предусматривает формирование обобщенного критерия оптимальности  $J_0$  в виде суммы частных критериев, характеризующих основные показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. При этом проведено уточнение этих частных критериев. В качестве частных критериев оптимальности предложено использовать эффективный КПД дизеля и концентрации в ОГ оксидов азота, монооксида углерода и углеводородов, полученные при работе на данном виде топлива и отнесенные к соответствующим показателям, полученным при работе на нефтяном ДТ. Предложена следующая методика выбора весовых коэффициентов: весовой коэффициент, характеризующий эффективный КПД дизеля, принят равным единице, а весовые коэффициенты, характеризующие выброс токсичных компонентов ОГ, определялись в виде отношений их действительной эмиссии для дизеля, работающего на ДТ, к предельным величинам эмиссии, определяемым нормами на токсичность ОГ *EURO-4*. Оптимизационные расчеты проведены с использованием экспериментальных данных по дизелю Д-245.12С, работающему на смесях нефтяного ДТ, РМ и бензина АИ-80. Расчеты показали, что относительный обобщенный критерий оптимальности примерно одинаков для всех исследуемых топлив: его наименьшее значение ( $J_{0, \text{отн}} = 1,000$ ) получено для нефтяного ДТ, а наибольшее значение ( $J_{0, \text{отн}} = 1,089$ ) — для смеси 80 % ДТ, 10 % РМ и 10 % бензина АИ-80. Среди смесевых топлив наилучшее сочетание параметров топливной экономичности и токсичности ОГ обеспечивает смесь 85 % ДТ, 5 % РМ и 10 % бензина АИ-80. При работе дизеля на этой смеси обобщенный критерий оптимальности имеет наименьшее значение ( $J_{0, \text{отн}} = 1,004$ )

по сравнению с другими смесевыми топливами. В этом случае выброс оксидов азота снизился на 7,6 %, выброс монооксида углерода увеличился на 7,1 %, выброс углеводородов возрос на 4,3 %, эффективный КПД снизился на 0,6 %.

В.Н. Тимофеев (Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова) выступил с докладом “Утилизация теплоты отработавших газов в судовых дизелях”. Отмечено, что в главных судовых дизелях в механическую энергию превращается менее 50 % теплоты сгорания топлива. Утилизация теплоты — наиболее действенный метод повышения эффективности теплоиспользования в судовых энергетических установках (СЭУ). Для речного флота необходимы новые методы глубокой утилизации, обеспечивающие потребности в электроэнергии, паре и горячей воде при относительно невысоком уровне сложности установки и простоте ее обслуживания. Одним из решений данной задачи является использование термоэлектрического генератора (ТЭГ) на основе энергии теплоты ОГ судовых дизелей. Разработан ТЭГ для судового дизеля, который содержит устройство поддержания заданной разности температур на спаях термоэлектрических модулей (ТЭГМ) и конструкцию для получения требуемого контакта ТЭГМ с поверхностью выхлопной трубы, а также аккумуляторы. В этом случае предусмотрена возможность применения накопленной электроэнергии на стоянках. ТЭГ привлекает отсутствием подвижных частей, полной автоматизацией, простотой монтажа и обслуживания, бесшумностью, большим сроком службы. Недостатком ТЭГ является сравнительно низкий КПД преобразования энергии (3...5 %). Однако этот метод преобразования энергии в настоящее время получает все более широкое распространение в энергетических установках, благодаря успехам технологии изготовления новых термоэлектрических материалов. В настоящее время РОСНАНО организует производство термоэлектрических систем (ТЭС) нового поколения для охлаждения и генерации электричества на основе прорывной российской технологии *CERATOM*. Реализация проекта позволит вывести на рынок термоэлектричества принципиально новый продукт, лишенный недостатков керамических термоэлектрических систем, что позволит существенно расширить потенциальные области применения, в том числе — в судовых ТЭГ. Другим способом утилизации теплоты ОГ является использование на судне абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. Холод, полученный за счет теплоты ОГ, может быть использован для охлаждения рабочих систем главного судового дизеля и других потребителей. Система имеет ряд преимуществ: отсутствие движущихся частей; бесшумность работы; возможность работы машины за счет утилизации теплоты дизеля; экономия топливно-энергетических ресурсов, при этом энергия расходуется только на работу насосов. Эти устройства могут эффективно работать только при установке регулятора, в частности, регулятора с твердым наполнителем и термоэлектрическим модулем, использование которых позволяет увеличить быстродействие регулятора. Это необходимо, например, в устройстве для обеспечения наддувочного воздуха требуемой температурой при переменных нагрузках на дизель.

Д.А. Попов (МГАВТ) представил доклад “Опрокидывающий момент судового дизеля при резонансе крутильных колебаний судового валопровода”. При работе двигателя на критических частотах коленчатого вала резонирующая главная гармоника крутильных колебаний оказывает влияние на работу кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и, следовательно, на опрокидывающий момент. Это влияние можно оценить по диаграмме сил, действующих в одноцилиндровом отсеке двигателя. Амплитуда колебаний в одном рабочем цикле (в процессе газообмена) должна понижаться, так как энергия от газовых сил, затраченная на рабочем такте на развитие колебаний, частично расходуется на дополнительную нагрузку шатуна. Поэтому опрокидывающий момент от крутильных колебаний дополнительно воздействует на опрокидывающий момент от суммарных газовых и инерционных сил. Проведенные расчеты показали, в какой мере крутильные колебания валопровода оказывают влияние на опрокидывающий момент. В связи со спецификой работы КШМ возможно влияние резонансных крутильных колебаний на колебания двигателя от опрокидывающего момента с низшими частотами. На кафедре “Судовые энергетические установки и автоматика” МГАВТ измерены вибрации дизель-генератора ДГР-100/750 с дизелем 6 Ч 18/22. Двигатель установлен на общую с генератором раму, покоящуюся на амортизаторах типа АКСС. Анализ вибраций производился посредством виброанализатора ВИБРАН 3.0. От датчиков виброскорости, расположенных на лапах в передней части дизеля, аналоговый электрический сигнал поступает в электронный блок виброанализатора. В электронном блоке производится запись и последующая обработка сигналов. Порядковый анализ показал, что при резонансе крутильных колебаний возрастает виброактивность двигателя. Так, при резонансе девятой гармоники крутильных колебаний одноузловой формы наблюдается увеличение амплитуд третьей и шестой гармоник опрокидывающего момента.

А.В. Микитенко и М.И. Шленов (ЗАО “Легион-Автодата”, г. Москва) выступили с докладом “Тенденции развития диагностики автомобилей. Онлайн диагностика *MotorData*. Представлена интерактивная справочно-информационная система по диагностике и ремонту автомобилей. Проведен обзор основных элементов и модулей системы диагностики и дано описание способов и результатов проверок реле, датчиков, выключателей, клапанов и форсунок. Система осуществляет быстрые переходы между связанными модулями. Дано подробное пошаговое описание процедур инициализаций, действий после замены электронных блоков, отсоединения аккумуляторных батарей, проверок давления масла, частоты вращения коленчатого вала и других процедур. Система осуществляет считывание текущих данных по более чем 150 параметрам двигателя и автомобиля. Приведена расшифровка кодов неисправностей, включая возможные причины и условия их появления, а также описание характерных неисправностей и способов их устранения. Система диагностики обеспечивает быстрый поиск по коду неисправности. Система диагностики позволяет осуществить подключение

к автомобилю через стандартный разъем *OBD-II* с помощью недорогих адаптеров на основе *ELM327*.

В.А. Марков, Э.А. Савастенко, А.А. Савастенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН) представили доклад “Диагностика систем распределенного впрыскивания бензиновых двигателей”. Отмечено, что в настоящее время более 90% выпускаемых автомобильных бензиновых двигателей оборудуется системами распределенного впрыска топлива. При использовании таких систем неравномерность подачи топлива по цилиндрам снижается до 6–7%, и возможен переход от количественного к качественному регулированию. Рассмотрены основные причины неисправностей этих систем и пути их устранения. Показано, что наиболее характерной неисправностью является смолообразование и закоксовывание распылителей электромагнитных форсунок (ЭМФ). Поэтому возникает необходимость определения степени загрязненности (пропускной способности) ЭМФ без их демонтажа с двигателя путем проведения подтверждающего эксперимента. Предложено загрязненность ЭМФ определять по зависимости расхода топлива через форсунку от давления в топливной рампе. Показано, что с увеличением продолжительности импульса давления расход топлива через форсунку увеличивается, но для новых форсунок эта зависимость линейная, а у загрязненных форсунок – нелинейная. Эта закономерность подтверждена при экспериментальных исследованиях топливной системы с ЭМФ на автомобиле *Kia Sportage II*.

О.Н. Слепцов, Л.Л. Михальский (МГАУ им. В.П. Горячкина) выступили с докладом “Моделирование процесса топливоподачи в линии низкого давления топливной системы автотракторного дизеля, работающего на топливах повышенной вязкости”. Отмечено, что при использовании в серийных дизелях биотоплив, получаемых из семян рапса, как правило, возникают трудности, связанные с отличиями их физико-химических свойств от свойств нефтяного дизельного топлива. В первую очередь, это относится к вязкости указанных биотоплив. Задачей исследования являлось проведение анализа процессов топливоподачи рассматриваемых видов биотоплив в топливной системе низкого давления в целях выявления путей ее оптимальной модернизации при адаптации автотракторных дизелей к работе на этих видах топлива. Разработан подход к математическому моделированию линии низкого давления (ЛНД) системы топливоподачи с целью выявления параметров процесса топливоподачи, оказывающих наибольшее влияние на рабочий процесс ДВС. Разработана математическая модель ЛНД топливной системы, базирующаяся на уравнениях объемного расхода топлива через элементы этой системы. В качестве основных параметров ЛНД топливной системы рассматриваются давление на выходе из ЛНД и расход топлива через эту линию. Получено уравнение регрессии, по которому вычисляется рабочий диапазон давления и расхода топливной системой низкого давления. Получена характеристика топливоподачи в линии низкого давления. Давление топлива на выходе из линии низкого давления представлено в виде многопараметрового полинома, характеризующего зависимость этого давления от расхода топлива и скоростного режима работы топливной системы.

В докладе Е.В. Бебенина (Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова) “Результаты эксплуатационных испытаний сельскохозяйственных тракторов с дизелями, работающими по газодизельному циклу” отмечено, что в настоящее время природный газ рассматривается как экологически чистый вид моторного топлива. Проведены эксплуатационные испытания трех тракторов К-700А с дизелями 8 ЧН 13/14, оснащенными газовым оборудованием СЭРГ-500 производства ООО “ППП Дизельавтоматика”, и одного трактора, на котором установлена система эжекционного впрыска газового топлива, разработанная в Саратовском ГАУ им. Н.И. Вавилова. Испытания показали, что двигатель с системой распределенной подачи газообразного топлива, работающей по газодизельному циклу, способен развивать такую же мощность, как и при работе по дизельному циклу. Проведенные эксплуатационные исследования тракторных агрегатов подтвердили зависимость расхода топлива, мощностных показателей и дымности ОГ от способа подачи газообразного топлива. Использование системы распределенной подачи газообразного топлива по эжекционному принципу позволяет снизить запальную дозу дизельного топлива до 18 %, неравномерность подачи топлива по цилиндрам — до 5 %.

С.С. Клеников (филиал ГОУ “МГИУ”, г. Сергиев Посад) выступил с докладом “Волновые шаговые двигатели и волновые двигатели внутреннего сгорания”. Волновые шаговые двигатели (ВШД) предназначены для преобразования с помощью волнового зацепления энергии находящихся под давлением газа или жидкости, в энергию вращательного движения выходного вала. В модифицированном варианте при дополнительном устройстве отдельно или под подвижными поршнями-толкателями камер сгорания и систем подачи топлива, зажигания и охлаждения ВШД становится волновым двигателем внутреннего сгорания (ВДВС). Такой двигатель дополнительно преобразует энергию сжатого газа и энергию сгораемого в камерах топлива в энергию вращательного движения выходного вала. Выполняя функции традиционных ДВС волновой двигатель отличается тем, что в нем для преобразования тепловой энергии и энергии сжатого воздуха в механическую энергию выходного вала вместо рычажного КШМ используется волновой механизм в виде двухволнового или одноволнового ВШД с зубьями циклоидальной формы волнового зацепления и повышающего мультипликатора. Замена динамически не сбалансированных КШМ, центр масс которых движется по эллиптической траектории, динамически самоуравновешенными ВШД, центр масс которых все время остается на оси вращения, при прочих равных условиях позволяет: из-за использования более выигрышной силовой схемы и резкого уменьшения (в 10 и более раз) площадей взаимно скользящих деталей прижатых меньшими усилиями (поршень, цилиндр и т.п.) — повысить КПД ВДВС, снизить габаритные размеры и массу двигателя в 2–2,5 раза и более; использовать для производства деталей самоуравновешенных ВШД (кроме гибкого колеса) менее прочные и более дешевые материалы, в том числе пластмассы и керамику; снизить более чем в 2 раза объем необходимых смазочных средств. Поскольку ВШД сами являются вариаторами из-за возможного реверса и плавного изменения угловой скорости

вращения выходного вала они позволяют исключать из приводов транспортных средств коробки передач.

Статья поступила в редакцию 26.03.2013

Владимир Анатольевич Марков — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 300 научных работ в области автоматического управления и регулирования двигателей внутреннего сгорания.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Markov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 300 publications in the field of automatic control and regulation of internal combustion engines.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Виктор Иванович Шатров — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, Автор более 150 научных работ в области автоматического управления и регулирования двигателей внутреннего сгорания.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.I. Shatrov — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, head of department of Research Institute for Power Engineering of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of automatic control and regulation of internal combustion engines.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

---

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

---

Сдано в набор 15.12.2013

Формат 70 × 108/16

Заказ

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 25.01.2014

Усл.-печ. л. 11,2

Уч.-изд. л. 11,98