

УДК 621.436

НАПРАВЛЕНИЯ 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 им. профессора В.И. Крутова рассмотрены основные направления совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. При этом представлены преимущественно системы управления и регулирования поршневых двигателей внутреннего сгорания. Показано, что все более широкое применение в двигателях находят электронные системы управления, построенные на базе современной микропроцессорной техники. Рассмотрено влияние указанных систем на мощностные и динамические показатели двигателей, показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов. Результаты проведенного анализа позволяют оценить современный уровень развития этих систем, сделать вывод о перспективах дальнейших исследований систем автоматического управления и регулирования, а также определить основные направления исследований в области топливоподающей аппаратуры дизельных двигателей, рабочего процесса двигателей, адаптации двигателей к работе на различных альтернативных топливах, включая газообразные топлива, в ряде других областей двигателестроения.

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

TENDENCIES OF SYSTEM EVOLUTION FOR AUTOMATIC-CONTROL AND REGULATION OF HEAT AND POWER PLANTS

V.A. Markov, V.I. Shatrov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: markov@power.bmstu.ru

Tendencies of system evolution for automatic-control and regulation of heat and power plants were considered based on the analysis of conference proceedings of All-Russian Research and Technology Workshop n.a. Prof. V.I. Krutov "VNTC im. prof. V.I. Krutova". Thus are presented mainly control and regulation systems for reciprocating internal combustion engine. It was shown that electronic control systems which are based on modern microprocessor technologies come into use in engines. The influence of these systems on power and dynamic characteristics of engines, indicators of fuel efficiency and exhaust toxicity was considered. The results of the analysis give an opportunity to evaluate the modern development level of these systems and to draw a conclusion about prospects of further research systems of automatic control and regulation. Besides that, it allows to define main tendencies of research in the field of fuel-injection equipment of diesel engines, engines working process, engine adjustment to usage with various alternative fuels, including gaseous fuels in a number of other spheres of engine-building.

Keywords: heat and power plants, combustion engines, diesel engines, automatic-control systems, automatic-regulation systems.

Системы автоматического управления и регулирования давно стали неотъемлемой частью теплоэнергетических установок. Их совершенствование позволяет удовлетворить все возрастающие требования к мощностным и динамическим показателям этих установок, топливной экономичности установок и экологическим характеристикам — выбросам вредных веществ с отработавшими газами (ОГ). При этом современные системы автоматического регулирования и системы автоматического управления (САР и САУ) являются комплексными системами, обеспечивающими взаимосвязанное управление параметрами различных элементов теплоэнергетической установки, в частности, двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Как правило, современные САР и САУ построены на базе микропроцессорной техники, что обеспечивает гибкое адаптивное управление указанными параметрами.

Председательствующий д-р техн. наук, профессор А.Г. Кузнецов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в своем выступлении отметил все возрастающую роль теплоэнергетических установок и важность дальнейших исследований, направленных на создание и совершенствование электронных САР и САУ. В связи с кончиной постоянных участников семинара — профессоров В.И. Толщина и В.Н. Шапрана, доцента Л.Л. Михальского председательствующий еще раз отметил их значительный вклад в становление семинара и активное участие в работе ВНТС.

В докладе А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонов, А.А. Латочкина, В.С. Скибо (МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Моделирование процессов управления транспортной установкой с дизелем и электрической трансмиссией” представлена модель энергетической установки с дизелем и электрической трансмиссией для транспортного средства. Верификация модели, проведенная по результатам испытаний дизель-генератора, подтвердила работоспособность разработанной модели. Проведено моделирование переходных процессов изменения параметров транспортной установки при различных способах управления, в том числе, предусматривающих работу дизеля на режимах с наилучшей топливной экономичностью.

А.Г. Кузнецов, Д.С. Ворнычев, С.В. Харитонов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад “К вопросу использования нейронных сетей при разработке систем управления двигателями”. Рассмотрены возможные направления использования нейронных сетей при проектировании двигателей и их систем. Представлены результаты использования нейронных сетей при описании функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса комбинированного двигателя, решении дифференциальных уравнений модели двигателя и разработке регулятора частоты вращения вала двигателя. Сформулированы проблемы, возникающие при использовании нейронных сетей при проектировании двигателей.

Д.А. Епанешников, Ю.Е. Хрящев (Ярославский государственный технический университет) в докладе “Регулятор минимальной частоты вращения холостого хода с функциями автоподстройки при помощи искусственной нейронной сети” решили задачу обеспечения устойчивой работы дизельного двигателя на режимах минимального холостого хода в течение всего срока эксплуатации путем применения адаптивного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Для этого были проведены анализ наиболее известных методик определения коэффи-

циентов ПИД-регулятора, оценка возможности их применения для регулятора частоты вращения холостого хода автомобильного дизеля. Предложена методика синтеза искусственной нейронной сети для распознавания состояния системы управления. На основе полученных результатов предложен адаптивный регулятор минимальной частоты вращения холостого хода с возможностью автоматической подстройки структуры его параметров. Предлагаемый в работе алгоритм регулятора, вследствие своей универсальности, может быть использован в составе электронных систем управления двигателями с различными типами топливной аппаратуры.

Доклад Л.Л. Иванова, П.В. Волощенко, Ю.Е. Хрящева (Ярославский государственный технический университет) “Форсунка ударного типа для аккумуляторных топливоподающих систем” посвящен разработке форсунок нового типа. Высокое давление топлива в этих форсунках создается вследствие удара сердечника электромагнита, применяемого в них в качестве исполнительного механизма. Цикловая подача регламентируется эффективным проходным сечением зазора между корпусом распылителя и стержня клапана, а также давлением топлива в камере распылителя в процессе впрыскивания. Эффективное проходное сечение распылителя в существенной степени зависит от определяемого экспериментально коэффициента расхода. Разработана математическая модель и изготовлен опытный образец форсунки ударного типа для аккумуляторных топливоподающих систем. При сравнении гидравлических характеристик имитатора распылителя форсунки ударного типа и серийно выпускаемого распылителя разделенного типа отмечается высокая гидравлическая эффективность первого из них. Форсунка ударного типа позволяет обеспечить высокое качество распыливания топлива независимо от режима работы ДВС при минимальных энергетических затратах.

В докладе М.В. Тихомирова, С.В. Овчинникова, Ю.Е. Хрящева (Ярославский государственный технический университет) “Разработка алгоритмов диагностики и самодиагностики современных электронных систем управления (ЭСУ) автомобильных ДВС” отмечено, что разработчики электронных систем управления при внедрении их в серийное производство сталкиваются с рядом проблем сопровождения продукции как на стадии настройки, так и при эксплуатации объектов, оснащенных этими ЭСУ. Задача разработки и реализации алгоритмов автоматизированного контроля качества и настройки параметров ДВС, а также алгоритмов диагностики и самодиагностики современных ЭСУ автомобильных ДВС в целях обеспечения всего их жизненного цикла является актуальной задачей. Авторы предлагают варианты разработанных ими алгоритмов и конкретные технические средства их реализации для контроля качества ДВС и для диагностики в условиях сервисных станций технического обслуживания.

Сообщение Д.А. Епанешникова, Д.А. Кузина (Ярославский государственный технический университет, ООО “Роберт Бош”) посвящено возможностям быстрого прототипирования САУ при помощи программного обеспечения ETAS ASCET. Данный программный продукт позволяет проводить разработку прикладного программного обеспечения для различных микроконтроллеров и автоматическую генерацию исходных кодов на базе моделей, представляемых в виде блок-схем и диаграмм состояний, с возможностями применением ESDL и прямого редактирования исходных кодов на языке программирования C. В данном программном пакете возможна симуляция

разрабатываемых алгоритмов на локальном компьютере. Использование системы измерения и симуляции ETAS ES1000 позволяет проводить испытание прототипа системы управления на реальном объекте. Описанный подход позволяет сократить затраты средств и времени на разработку САУ.

Доклад В.П. Антипина, Е.Н. Власова, М.Я. Дурманова, А.Ю. Епифановой “Энергозатраты и ресурс поршневого двигателя при неустановившихся режимах нагружения” (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет) посвящен исследованиям дизеля ЯМЗ-238НД5 при неустановившихся режимах нагружения на специальном тормозном стенде, защищенном авторскими свидетельствами. В результате получены частотные характеристики (ЧХ) часового расхода топлива и скорости изнашивания пар трения, а также амплитудно-частотные характеристики частоты вращения коленчатого вала, давления масла в главной масляной магистрали, момента механических потерь в парах трения двигателя. Определена собственная (резонансная) частота колебаний по вышеперечисленным показателям, равная $5,0 \text{ с}^{-1}$ (0,8 Гц). Разработана математическая модель подрессоренной массы машинно-тракторного агрегата (МТА) на базе трактора К-744Р-05 с двигателем ЯМЗ-238НД5 в транспортном режиме. В результате установлено, что подрессоренная масса МТА имеет две резонансных частоты — $7,5 \text{ с}^{-1}$ (1,19 Гц) и $14,8 \text{ с}^{-1}$ (2,36 Гц), близких к собственной частоте двигателя ($5,0 \text{ с}^{-1}$). Выполнены расчеты ЧХ часового расхода топлива и скорости изнашивания пар трения двигателя с учетом нагружения от колебаний МТА в продольно-вертикальной плоскости. В результате установлено, что на всех трех собственных частотах двигателя — $5,0 \text{ с}^{-1}$, $7,5 \text{ с}^{-1}$ и $14,8 \text{ с}^{-1}$ — подрессоренной массы МТА наблюдается существенное увеличение часового расхода топлива и скорости изнашивания пар трения двигателя. Дано объяснение природы аномальных явлений и предложены пути их снижения.

В докладе С.В. Гусакова, В.А. Новикова (Российский университет дружбы народов) “О возможностях восстановления давления в цилиндре во время рабочего хода по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя”) отмечено, что при диагностировании современных автомобильных ДВС предпочтение отдается безразборным методам диагностики. Такие методы позволяют снизить временные и материальные затраты на поиск неисправностей двигателя. Число источников информации при таком методе ограничено и на первое место выходят алгоритмы анализа получаемой информации и оценка достоверности результатов обработки этой информации. Рассматривается возможность восстановления давления в цилиндре во время рабочего хода, основанная на анализе колебаний мгновенной частоты вращения коленчатого вала поршневого ДВС. Для исследования влияния различных факторов и алгоритмов анализа на точность оценки эффективности протекания рабочего процесса в каждом из цилиндров двигателя, была разработана математическая модель, состоящая из двух независимых блоков: первого — эмулирующего работу многоцилиндрового ДВС и второго — программного обеспечения, обрабатывающего информацию, поступающую из первого блока. Рассмотренный программный комплекс позволяет еще на стадии проектирования исследовать в различных эксплуатационных ситуациях работоспособность метода и точность алгоритмов обработки диагностической информации. Исследованная методика подтверждает возможность восстановления давления в цилиндре во время рабочего хода по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя.

Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко, Р.О. Камышников, Т.С. Аношина (Российский университет дружбы народов) представили доклад “Система регулирования дизеля изменением его рабочего объема”. В условиях эксплуатации современные дизели транспортных средств, тракторов и мобильных сельскохозяйственных машин длительное время работают на режимах малых нагрузок и холостых ходов. При этом удельные, а также путевые расходы топлива существенно возрастают в сравнении с расходами, свойственными режимам средних и повышенных нагрузок. Одним из методов повышения экономичности таких режимов является регулирование нагрузки дизеля изменением его рабочего объема. В простейшем случае такое регулирование достигается путем отключения–включения части цилиндров или рабочих циклов. Одной из систем, реализующих такое регулирование, является система топливоподачи с регулированием начального давления (РНД) топлива в линиях высокого давления и электромагнитного управления клапанами РНД. Особенностью системы является возможность использования низковольтного напряжения, свойственного электрооборудованию транспортных средств (12–36 вольт), так как клапан РНД работает с использованием волновых процессов в линиях высокого давления топливных систем. Таким образом, открытие клапана РНД происходит за счет перепада давления на нем, возникающем при отсечке подачи топлива штатным топливным насосом высокого давления (ТНВД), а удержание клапана в открытом состоянии для пропуска подачи топлива в дизель в очередном цикле топливоподачи происходит с помощью электромагнитной катушки. Экспериментальные исследования такого выключателя подачи топлива подтвердили возможность отключения подачи на время, сравнимое со временем одного цикла.

Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Э.А. Савастенко, Т.С. Аношина (Российский университет дружбы народов) представили доклад “Возможности снижения путевого расхода топлива двигателем транспортного средства, длительное время работающим на режимах малых нагрузок”. В современных условиях эксплуатации двигателя транспортных средств длительное время работают при малых нагрузках, что приводит к повышенному расходу топлива. Известен метод повышения экономичности таких режимов путем отключения части цилиндров или циклов. Оценить возможности экономии топлива в таких условиях можно, используя паспортные универсальные (многопараметровые) характеристики двигателя, на которых нанесены параметрические кривые постоянных удельных расходов топлива. Однако если этот двигатель регулируется изменением рабочего объема (например, отключением цилиндров или циклов), то эти характеристики необходимо снабдить ординатой удельной работы двигателя, так как двигатель в этом случае регулируется не изменением положения рейки ТНВД, а изменением его рабочего объема. Таким образом, если двигатель полноразмерный и такой же, но с частью отключенных цилиндров, выполняют на данном режиме одинаковую полную работу, то выполняемая ими удельная работа, как отношение полной к рабочему объему работающих (активных) цилиндров, будет разной. Повышение нагрузки активных цилиндров приводит к росту экономичности режима.

В докладе Л.Н. Голубкова, Н.А. Соленова, Д.А. Михальченко, П.В. Душкина (МАДГТУ “МАДИ”) рассмотрен комплекс математических моделей и программ расчета топливоподачи и рабочих процессов дизеля, дополненный математической моделью и программой гидродинамического расчета аккумуля-

муляторной системы с пьезофорсунками фирмы Bosch. В аккумуляторной системе третьего поколения эта фирма стала применять электрогидравлические форсунки (ЭГФ) с пьезоприводом. В этих форсунках использован гидравлический принцип открытия управляющего клапана. Соединительная колба и клапанная колба образуют модуль сопряжения, который действует как гидравлический цилиндр. Он преобразовывает линейное расширение пьезопривода и приводит к “мягкому” открытию управляющего клапана, за счет этого происходит точное управление впрыском топлива. При моделировании процессов в топливопроводе принято условие постоянства давления в аккумуляторе и используется уравнение Даламбера. Процессы в объемах описаны уравнениями объемных балансов. Движение верхнего поршня гидротолкателя определяется перемещением пьезоэлемента. Нижний поршень гидротолкателя совместно с двумя частями управляющего клапана и частично с двумя пружинами рассматривается как единая масса, и ее движение описано уравнением динамического равновесия. Модель включает также уравнение динамического равновесия, описывающее движение иглы форсунки. Численное интегрирование системы уравнений проведено методом Эйлера. При идентификации модели использованы экспериментальные данные, полученные в проблемной лаборатории МАДИ. Для управления ТНВД и форсункой были созданы алгоритмы и блоки управления на базе микроконтроллера Atmega.

Ю.Е. Драган (Владимирский государственный университет) представил доклад “Обобщение результатов экспериментальных исследований электрогидравлических форсунок аккумуляторной топливной системы”. Стендовые испытания ЭГФ конструкции НИКТИД показали, что для обеспечения предварительного и основного впрыскиваний топлива достаточна длительность форсирующего и размагничивающих импульсов порядка 0,15 мс при форсирующем напряжении 80 В на обмотке электромагнитного клапана типа ЭМК-70. При этом напряжение удержания на обмотке ЭМК для обеспечения цикловой подачи топлива составляет примерно половину величины форсирующего импульса. Значение цикловой подачи зависит от длительности управляющего импульса и от давления топлива в аккумуляторе. При таких режимах тепловое состояние ЭМК сохраняется в допустимых пределах. В ходе экспериментов установлены зависимости цикловых подач от давления в аккумуляторе и длительности удерживающего импульса в пределах от 0,1 до 1,6 мс. Применение разработанных в НИКТИД емкостных датчиков перемещения якоря ЭМК и иглы распылителя ЭГФ позволили экспериментально исследовать процессы, протекающие в гидравлических трактах ЭГФ, и осуществить доводку форсунки. Синхронные осциллографические записи перемещений якоря ЭМК и иглы распылителя ЭГФ в режиме реального времени позволили выявить влияние упругой деформации штанги на задержку начала подъема иглы распылителя. Для уменьшения отрицательного влияния деформации штанги на кинематику иглы распылителя и задержку топливоподачи целесообразно создавать безштанговые конструкции ЭГФ для аккумуляторных топливных систем или повышать жесткость штанги. В ходе исследований ЭГФ определено влияние числа витков обмотки электромагнитных клапанов на задержки подъема якоря, иглы распылителя и другие параметры топливоподачи. При удвоенном сокращении числа витков в ЭМК в среднем в полтора раза снижаются задержки подъема якоря и иглы распылителя.

В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, г. Челябинск) выступили с докладом “Регулирование температуры свежего заряда как основной инструмент управления процессом сгорания в НССИ двигателе”. Результаты расчетных исследований рабочего цикла НССИ (Homogeneous Charge Compression Ignition) двигателя типа Ч13/15 при степени сжатия 16 единиц, постоянной частоте вращения коленчатого вала 2100 мин^{-1} , работающего на смесевом топливе (природном газе с диметиловым эфиром), показали, что параметры рабочего цикла в диапазоне температур на впуске от 340 до 385 К в большой степени зависят от температуры рабочего тела в начале такта сжатия. Наилучшие расчетные показатели достигаются в рабочих циклах с температурой начала сжатия около 350 К. При этом индикаторный КПД был равен 0,462, среднее индикаторное давление — 0,615 МПа и удельный индикаторный расход смесевого топлива — 176,3 г/(кВт·ч). При уменьшении и увеличении температуры рабочего тела в начале сжатия наблюдается ухудшение индикаторных показателей. Если при повышенных температурах увеличивается отрицательная работа сжатия, то при пониженных уменьшается положительная работа расширения. Таким образом, основным инструментом управления процессом сгорания в НССИ двигателе является регулирование температуры свежего заряда.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, С.С. Никифоров, Д.О. Чалых (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад “Способы повышения эффективности процесса сгорания в двигателе с воспламенением от сжатия гомогенной топливно-воздушной смеси”. Результаты расчетных исследований рабочего цикла НССИ двигателя размерностью ЧН13/15, работающего на смеси природного газа с диметиловым эфиром (ДМЭ), позволили обосновать шесть основных способов повышения эффективности его процесса сгорания за счет регулирования параметров свежего заряда и изменения условий сжатия. Первый способ заключается в регулировании температуры рабочего тела в начале сжатия. Для оперативной компенсации отклонений этой температуры от оптимальной величины целесообразно регулировать цикловую подачу ДМЭ посредством электронного блока управления (второй способ). Третий способ заключается в поддержании температуры огневой поверхности цилиндра на уровне не менее 460 К, что обеспечивает стабилизацию процесса воспламенения. Четвертый способ, состоящий в регулировании геометрической степени сжатия (в диапазоне от 12 до 17 единиц) в зависимости от нагрузки, несмотря на свою эффективность, в настоящее время трудно реализуем из-за отсутствия конструктивных технических решений. Частично этот пробел можно восполнить регулированием угла запаздывания закрытия впускных клапанов в диапазоне от 30 до 75 градусов поворота коленчатого вала после нижней мертвой точки (п.к.в. после НМТ) (пятый способ), которое позволяет изменять реальную степень сжатия и температуру рабочего тела в цилиндре, а также ограничивать максимальное давление в цилиндре. Шестой способ заключается в применении плазменно-факельного зажигания, которое работает в тех случаях, когда приведенные выше способы не обеспечивают своевременного сгорания топлива.

В.Г. Камалтдинов, А.Е. Попов, И.О. Лысов, А.О. Яшенькин (ЮУрГУ, г. Челябинск) представили доклад “Влияние температуры свежего заряда на эффективные показатели газового двигателя с искровым зажиганием”. Экспериментальные исследования газового двигателя ВАЗ-21124 с искровым зажиганием, степенью сжатия 12, постоянной частотой вращения ко-

ленчатого вала 1500 мин^{-1} , работающего на природном газе проводились при повышении температуры на впуске в диапазоне от 302 до 407 К. Для исключения возникновения детонации одновременно уменьшался угол опережения зажигания (от 35,5 до 22 град. п.к.в.). В указанном диапазоне температур на впуске измеренный расход воздуха уменьшался на 13,6%, что привело к снижению среднего эффективного давления от 0,549 до 0,515 МПа, коэффициента избытка воздуха — от 1,38 до 1,17, максимального давления сгорания — от 4,95 до 3,76 МПа и увеличению температуры выпускных газов от 702 до 738 К. Наименьшие удельные индикаторный и эффективный расходы природного газа составили 183,7 г/(кВт·ч) и 221,2 г/(кВт·ч) соответственно и наибольший индикаторной КПД, равный 0,399, получены при температуре около 311 К. При более высоких температурах на впуске ухудшение показателей происходит в результате необходимости уменьшения угла опережения зажигания менее обедненной смеси. Таким образом, увеличивать температуру на впуске на исследованных режимах свыше 313 К нецелесообразно.

С.Д. Духовлинов, П.П. Петров, А.М. Савенков (ООО “Экип”, Москва) сделали доклад “Особенности синтеза свободнопоршневого дизеля с линейным электрогенератором”. Отмечено, что кардинальным решением проблем экономической эффективности и экологической безопасности транспорта является его перевод с нефтяного дизельного топлива на природный газ (ПГ). Развитие биогазовых технологий, освоение месторождений сланцевого газа и шахтного метана расширяет ресурсную базу и стабилизирует рынок газомоторных топлив. Для более широкого применения ПГ как моторного топлива необходимо решить следующие задачи: создать инфраструктуру заправки газом, разместить на транспортном средстве достаточный запас ПГ, конвертировать двигатели на ПГ с максимальным КПД. При этом желательно снижение эксплуатационного расхода топлива в 1,5-2 раза, а объема силовой установки (СУ) — в 2-5 раз, что возможно в гибридной СУ с нетрадиционным двигателем. В качестве такового рассматривается свободнопоршневой дизель (СПД), имеющий удельную массовую и габаритную мощность в 4-9 раз большую, чем у традиционных дизелей. Представлены сравнительные характеристики индикаторного и адиабатного КПД различных типов двигателей. Показаны схемы СПД с линейными генераторами (ЛГ) и их характеристики. Приведены нагрузочные характеристики СПД с ЛГ и даны условия устойчивости автоколебаний поршня СПД с ЛГ, а также осциллограммы работы ЛД.

В докладе В.И. Ерохова, И.В. Одиноквой (Московский государственный машиностроительный университет “МАМИ”, МАДГТУ “МАДИ”) “Пути повышения эффективности применения диметилового эфира на автомобильном транспорте” показана возможность применения различных эфиров в качестве моторных топлив. На современном этапе развития двигателестроения наибольший интерес вызывает использование в качестве топлива для дизелей диметилового эфира (ДМЭ). Мировое производство ДМЭ не превышает 150 тыс. т в год. Он производится, в основном, из природного газа, но возможно его синтезирование и из возобновляемых источников энергии (биомассы и др.). Представлены системы топливоподачи и системы управления дизелей, адаптированных к работе на ДМЭ. Разработана двухтопливная система питания газодизеля (газовое топливо и запальное дизельное топливо) с соответствующей системой управления и проведены испытания этого

двигателя. Приведены скоростные характеристики газодизеля, работающего на сжиженном нефтяном газе (пропан-бутановая смесь) и на ДМЭ, а также зависимости показателей газодизеля, работающего на ДМЭ, от нагрузочного режима работы газодизеля. Подтверждена работоспособность созданной двухтопливной системы питания газодизеля.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.Ф. Поздняков, В.И. Шатров, С.П. Шимченко (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина, ЗАО “Форант-Сервис”, г. Ногинск) представили доклад “Автономный энергетический комплекс для выработки электроэнергии с дизельным двигателем, работающим на биогазе”. Отмечено, что биогаз является перспективным альтернативным моторным топливом и может быть получен из различного сырья — твердых бытовых отходов, городских сточных вод, отходов деревообрабатывающей промышленности, отходов растениеводства и животноводства. Наиболее привлекательным представляется использование для производства биогаза навоза крупного рогатого скота. Это объясняется возможностью комплексного использования отходов сельскохозяйственного производства — из навоза в биореакторах можно получить биогаз и одновременно ценные органические удобрения, позволяющие заметно повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Приведены физико-химические свойства биогаза и их сравнение с аналогичными свойствами природного газа и нефтяного дизельного топлива. Рассмотрены технологии получения биогаза из отходов сельскохозяйственного производства. Показана зависимость содержания метана в биогазе от вида сырья, применяемого для его производства. Представлена схема автономного энергетического комплекса для выработки электроэнергии энергетическим комплексом, работающим на биогазе.

В докладе С.П. Шимченко, В.А. Маркова, С.Н. Девянина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) “Работа дизельного двигателя на биогазе с запальной дозой биодизельного топлива” рассматривается возможность применения в качестве основного моторного топлива биогазовой смеси, которая в объеме цилиндра воспламеняется запальной дозой, состоящей из дизельного топлива 80 % (ДТ) и 20 % метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Приведен анализ показателей работы газовых двигателей с принудительным искровым воспламенением рабочего тела, адаптированных для работы на биогазе, и двигателей с двухтопливным (газодизельным) процессом при аналогичной адаптации. Показано влияние особенностей протекания процесса сгорания на экологические показатели и характеристики тепловыделения при работе дизеля на альтернативном топливе. Проведены расчеты расходов биогаза и смеси ДТ и МЭРМ, суммарной теплоты сгорания указанных топлив, коэффициента избытка воздуха двухтопливного (газодизельного) процесса. Установлено влияние на выбросы вредных веществ с ОГ нагрузочного режима работы дизельного двигателя, питаемого биогазом с запальной дозой 80 % ДТ и 20 % МЭРМ.

С.М. Крутиев, В.С. Епифанов (МГАВТ) сделали доклад “О диагностировании топливной аппаратуры двигателя путем анализа отработавших газов по светопрозрачности и спектру поглощения”. Отмечено, что на судах речного флота необходимы системы диагностики, позволяющие предупредить поломки и отказы двигателя. В настоящее время решение этих задач отводится планово-предупредительному ремонту, в результате которого не всегда обеспечивается безотказность двигателя в условиях эксплуатации. Системы диагностики в целом не позволяют определить саму неисправность, а лишь

сигнализируют о том, что контролируемый диагностический параметр вышел за допустимые пределы. Многие неисправности имеют схожие диагностические параметры, вследствие чего возможны длительный поиск неисправности, лишние работы по замене еще годных деталей на новые. Цель проведенного исследования заключалась в разработке методов диагностики топливной аппаратуры дизельного двигателя речного судна в условиях эксплуатации. Наиболее значимые параметры дизеля выбирались путем анализа статистики причин отказов. Были определены основные диагностические параметры и их изменение при наиболее часто встречающихся неисправностях. В качестве уточняющих параметров предложена дымность и цвет ОГ. Исходя из того, что человек по цвету ОГ даже невооруженным глазом может определить неисправность, используя небольшой дополнительный ряд диагностических параметров, можно сделать заключение, что цвет (спектр видимых излучений) является важным диагностическим параметром, характеризующим химический состав газов. В результате создана матрица неисправностей с использованием диагностических приборов двигателя и дымомера. Кроме того, предложен новый вариант прибора, способного анализировать не только светопрозрачность, но и видимый спектр ОГ.

В.С. Акимов, А.С. Кулешов, В.А. Марков, А.Ю. Яковчук, Т. Янхунен (Т. Janhunen) (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦИАМ им. П.И. Баранова, фирма AumetOy, Финляндия) представили доклад “Численные исследования впрыскивания и распыливания топлива форсункой штифтового типа в двигателе с HCCI-процессом”. Отмечено, что одним из методов решения задач повышения топливной экономичности и снижения выбросов вредных веществ с ОГ является развитие новых способов организации рабочего процесса поршневых ДВС, к которым относится и организация сгорания гомогенной топливовоздушной смеси. Такой рабочий процесс, называемый HCCI-процессом, дает существенное снижение удельного расхода топлива и обеспечивает радикальное уменьшение выброса в атмосферу оксидов азота из-за снижения локальных температур в зоне горения, а также обеспечивает снижение эмиссии твердых частиц из-за полного испарения капель. Проблема заключается в том, чтобы удержать заряд от преждевременного самовоспламенения и обеспечить начало сгорания в нужный момент, для чего рассматриваются несколько технологий, включая концепцию *z-engine*. Для подготовки гомогенной смеси топливо должно быть впрыснуто в среду с малым давлением. В этих условиях большая дальнобойность струи обычной дизельной форсунки приводит к попаданию топлива на стенки цилиндра, поэтому для HCCI процесса целесообразно применять форсунку штифтового типа, формирующую компактную, конусообразную струю топлива. Объем цилиндра, охваченный этой струей, во многом зависит от давления впрыскивания и геометрии распылителя. Процессы формирования и развития струи топлива штифтовой форсунки недостаточно изучены. При численных исследованиях этих процессов изучено влияние различных факторов на развитие струй топлива внутри цилиндра. Для этого смоделирован процесс впрыскивания штифтовой форсункой, условно разделенный на два этапа: течение топлива в каналах распылителя форсунки и развитие струй топлива внутри цилиндра. В качестве граничного условия на входе в расчетную область была задана зависимость давления впрыскивания от времени. Параметры газа в цилиндре во время впрыскивания взяты из результатов расчета рабочего процесса *z-engine*. Получены показатели динамики развития струи и мелкости

распыливания капель, предложены способы ограничения дальнобойности и увеличения интенсивности испарения топлива.

Е.В. Бебенин (Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова) сделал доклад “Исследования экономических и экологических показателей трактора К-700А с дизелем 8 ЧН 13/14 при работе по газодизельному циклу”. Представлена схема разработанной система подачи газообразного топлива в газодизельном двигателе. Она представляет собой систему распределенной подачи газообразного топлива, работающую по эжекционному принципу. Система оборудована электронным блоком управления, который обрабатывает сигналы, получаемые с датчиков положения топливной рейки, частоты вращения коленчатого вала, температуры и давления газа. Электронный блок формирует сигналы для устройства управления циклами и устройств эжекционной подачи газообразного топлива в двигатель. В результате проведенных исследований сделан вывод о том, что экологическая эффективность разработанной системы с распределенной подачей газа по эжекционному принципу превышает экологическую эффективность системы с центральной подачей газа типа СЭРГ-500: по выбросам оксидов азота — на 50 %, эмиссии углеводородов C_nH_x — на 30 %, выбросам монооксида углерода CO — на 10 %, дымности ОГ — на 15 % за счет оптимизации процессов горения газообразного топлива. Данные значения показывают, что оснащение дизеля предложенной системой позволяет значительно улучшить показатели токсичности ОГ и приблизить их к предельным значениям, регламентируемым стандартом ЕВРО 4.

В.М. Фомин, Ф.А. Шустров (Московский государственный машиностроительный университет “МАМИ”) представили доклад “Особенности кинетики окисления азота в локальных зонах системы горения с послойным распределением смеси”. Отмечено, что местная кинетика процесса образования оксидов азота NO_x определяется локальной температурой в макроточке отдельной зоны камеры сгорания (КС). Расширяя макроточку до размеров зоны, можно считать, что температура внутри каждой зоны одинакова. Это позволяет решать задачу кинетики окисления азота для центральной точки каждой из выделенных зон и получить представление о распределении концентрации NO_x по объему КС и ее изменении. Количество теплоты, переданной через поверхность стенок КС рабочим телом одной из локальных зон, может быть определено традиционно численным интегрированием уравнения Ньютона–Рихмана. Для определения текущего коэффициента теплоотдачи α_w использована зависимость проф. Р.З. Кавтарадзе. Численное интегрирование позволяет определить значение локальной температуры рабочего тела для каждой выделенной зоны. По полученным данным произведен расчет локальной концентрации монооксида азота NO в составе продуктов сгорания каждой зоны. Применительно к двигателю AUX фирмы Volkswagen с непосредственным впрыском бензина проведена апробация данной методики расчета. Результаты расчетов показали, что к концу сгорания после перемешивания ($\tau > 1,7$ мс) концентрация оксидов азота NO_x достигает максимума и в дальнейшем при температурах ниже 2000–2200 К практически не изменяется, что дает основание предположить, что эта температура является температурой “замораживания” реакций образования NO_x на последующем участке такта расширения. Осредненное по объему КС расчетное содержание NO_x в продуктах сгорания после их перемешивания соответствует 710 ppm. Установлено, что расхождение результатов расчета концентрации NO_x в ОГ

с экспериментом не превышает 8 %, что подтверждает удовлетворительную адекватность расчетной методики.

П.Р. Вальехо Мальдонадо, И.В. Елифанов, В.А. Марков, И.М. Шендеровский (Московский государственный машиностроительный университет “МАМИ”, РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад “Эмпирическая зависимость для допустимой степени сжатия двигателей с искровым зажиганием и газотурбинным наддувом, работающих на природном газе”. В докладе анализируется возможность форсирования газового двигателя с искровым зажиганием применением турбонаддува и показана перспективность этого пути. На основе экспериментальных данных, в том числе и полученных на установке УИТ-85, предложена эмпирическая формула для выбора максимальной степени сжатия газового двигателя с наддувом, обеспечивающей его бездетонационную работу. Формула учитывает размерность двигателя, степень повышения давления в компрессоре, уровень охлаждения наддувочного воздуха и детонационную стойкости применяемого топлива.

В.С. Елифанов, Д.А. Попов (МГАВТ) сделали доклад “Вибрации судового двигателя при резонансе крутильных колебаний валопровода”. У судовых дизелей с размерностью $S/D > 1$, установленных на амортизаторы, центры масс двигателя и жесткости амортизаторов расположены в вертикальной плоскости, пересекающей ось коленчатого вала. Колебания крутильной системы с ДВС возбуждают вибрации и шум отдельных конструкций судна. В случае резонансных крутильных колебаний интенсивность вибрации и шума возрастает, так как на опрокидывающий момент двигателя накладывается момент от крутильных колебаний коленчатого вала, который возникает вследствие передачи энергии от кривошипа коленчатого вала шатуну и блоку цилиндров. Проведенные расчеты показывают, что при резонансе крутильных колебаний валопровода увеличивается размах опрокидывающего момента в целом для двигателя, при котором проявляются гармоники опрокидывающего момента других порядков. Произведены измерения вибраций судового дизель-генератора ДГРА 100/750, реализованного на базе дизеля 6Ч 18/22 и генератора типа ГСН, смонтированных на общей раме. Измерения и анализ вибраций проводился посредством вибронализатора ВИБРАН 3.0, к которому подводились сигналы от четырех вибродатчиков, расположенных на магнитном основании на лапе в передней части двигателя, на лапе у маховика, на крышке цилиндра и напротив коленчатого вала. В результате обработки результатов эксперимента путем спектрального и порядкового анализа получены зависимости, из которых можно определить порядки виброскорости, соответствующие главным и сильным гармоникам крутильных колебаний. Поэтому представляется возможной экспериментальная оценка развития опасных режимов работы двигателя без торсиографирования валопровода.

В.Н. Игин, В.А. Марков, В.В. Фурман (ОАО “РЖД”, МГТУ им. Н.Э. Баумана, проектно-производственное предприятие “Дизельавтоматика”, г. Саратов) представили доклад “Результаты эксплуатационных испытаний тепловоза с электронной системой управления топливоподачей дизеля”. Отмечено, что одним из основных показателей работы дизельных двигателей тепловозов является топливная экономичность, характеризующаяся расходом топлива или эффективным КПД двигателя. Сложность проблемы снижения эксплуатационного расхода топлива обусловлена многорежимностью двигателей маневровых тепловозов. Эта проблема может быть решена путем установки

на двигатель электронной системы управления топливopодачей. В докладе представлена опытная электронная система управления топливopодачей (ЭСУВТ) для тепловозного дизеля типа Д50 (6 ЧН 31,8/33). Приведены результаты эксплуатационных испытаний тепловозов ЧМЭЗ со штатной системой управления подачей топлива и с опытной системой топливopодачи ЭСУВТ. Показано, что установка системы ЭСУВТ на тепловозе ЧМЭЗ обеспечивает снижение эксплуатационного расхода топлива на 8...11%.

В.А. Марков, В.В. Бирюков, В.А. Шумовский, П.Р. Вальехо Мальдонадо (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный машиностроительный университет "МАМИ") представили доклад "Способы организации подачи спиртовых топлив в камеру сгорания дизеля". Отмечено, что спирты являются одними из наиболее реальных альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания. Среди них необходимо выделить этанол, который может быть получен из любого углеводородного сырья, в том числе из возобновляемых источников энергии (биомасса, отходы сельскохозяйственной и пищевой промышленности и др.). Наличие кислорода в составе молекул этанола позволяет значительно улучшить показатели дизельных двигателей, работающих на этом топливе. Подача этанола в дизель возможна несколькими способами: он может впрыскиваться в чистом виде или в смеси с дизельным топливом непосредственно в цилиндры, подаваться во впускной трубопровод в жидкой фазе или в виде пара. Непосредственное впрыскивание спирта в КС может осуществляться с помощью штатного ТНВД дизеля. Используется также непосредственная подача спирта в КС в виде эмульсии с дизельным топливом. Эффективными являются системы с отдельным впрыскиванием спирта и запальной дозы дизельного топлива в цилиндры дизеля. Представлены схемы возможных способов подачи этанола в КС. Приведены физико-химические свойства эмульсий этанола с нефтяным дизельным топливом, а также с рапсовым маслом. Исследована задержка воспламенения этих эмульсий в условиях КС дизеля.

М.А. Савельев, А.В. Селиванов (Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова) представили доклад "Направления развития систем управления двигателями спецтехники". Отмечено, что в настоящее время применяется две основных типа дизельных топливных систем: аккумуляторная топливная аппаратура (ТА) типа Common Rail и ТА разделенного типа. Преимуществами разделенной аппаратуры являются относительная дешевизна, простота технического обслуживания и ремонта, развитая сеть производства. Следует также отметить, что при воздействии электромагнитного излучения аккумуляторные системы с электронным управлением становятся временно или полностью неработоспособными. Лишена этого недостатка аппаратура разделенного типа с механическими регулирующими устройствами. Вместе с тем, для обеспечения высоких энергетических, экономических и экологических показателей дизелей с ТА разделенного типа необходима модернизация имеющихся двигателей. Одним из направлений улучшения показателей дизелей является их оснащение традиционной ТА разделенного типа с электронными системами управления. Это позволит реализовать принцип резервирования при воздействии электромагнитного излучения и приблизить эти дизели по своим показателям к дизелям с ТА аккумуляторного типа. В соответствии с этой концепцией разработана ТА разделенного типа с регулированием начального давления, которая оснащена гидроаккумулятором с электромагнитным

клапаном, нагнетательным клапаном двойного действия, блоком управления электромагнитным клапаном с датчиками. Принцип работы заключается в формировании в нагнетательной магистрали оптимального начального давления. Управление этим давлением осуществляется совместным электромагнитным клапаном и блоком управления в зависимости от показания датчиков. Оптимальное давление определяется из условий наиболее эффективного развития топливного факела, при этом на малых частотах и нагрузках начальное давление целесообразно повышать для увеличения дальности струи и мелкости распыливания. Заданное давление в гидроаккумуляторе устанавливается нагнетательными клапанами двойного действия, установленными в трубопроводах высокого давления. Для подпитки гидроаккумулятора используется прямой ход поршня топливоподкачивающего насоса двойного действия, для чего в топливоподкачивающий насос устанавливается дополнительно два клапана. Это позволило расширить диапазон регулирования давления в нагнетательной магистрали. При неисправности электроники электромагнитный клапан автоматически занимает среднее положение, обеспечивая повышенное начальное давление в нагнетательной магистрали. Это позволяет даже при неработающей или неисправной электронике иметь требуемые энергетические, экономические и экологические показатели двигателя.

Статья поступила в редакцию 22.04.2014

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области автоматического управления и регулирования ДВС, использования альтернативных моторных топлив. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

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

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

Шатров Виктор Иванович — 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 ДВС.

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

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

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

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сдано в набор 15.07.2014

Формат 70 × 108/16

Заказ

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 25.09.2014

Усл.-печ. л. 12,25

Уч.-изд. л. 13,1