

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ТЕНДЕНЦИИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В.А. Марков

vladimir.markov58@yandex.ru

В.И. Шатров

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

Аннотация

Обоснована актуальность исследований, направленных на совершенствование систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. На основе анализа материалов Всероссийской научно-технической конференции имени профессора В.И. Крутова (заседание № 91, 27.01.2016) рассмотрены тенденции совершенствования этих систем. Основным объектом исследования являлись системы управления и регулирования поршневых двигателей внутреннего сгорания. Показаны преимущества электронных систем управления, построенных на базе современной микропроцессорной техники. Рассмотрено влияние функциональных возможностей указанных систем на мощностные и динамические показатели двигателей, показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов. На основании анализа представленных докладов проведена оценка современного уровня развития этих систем, сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок. Рассмотрены также основные направления исследований в области топливоподающей аппаратуры дизельных двигателей, рабочего процесса двигателей, адаптации двигателей к работе на различных альтернативных топливах, включая биотоплива

Ключевые слова

Теплоэнергетические установки, двигатели внутреннего сгорания, дизельные двигатели, системы автоматического управления, системы автоматического регулирования

Поступила в редакцию 13.05.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Эффективная работа теплоэнергетических установок различного назначения возможна лишь при их оснащении современными системами автоматического управления (САУ) и системами автоматического регулирования (САР), расширении их функциональных возможностей [1]. Совершенствование указанных систем позволяет удовлетворить все возрастающие требования к мощностным и динамическим показателям этих установок, топливной экономичности и экологическим характеристикам — выбросам вредных веществ с отработавшими газами (ОГ). При этом современные САР и САУ являются сложными системами, обеспечивающими взаимосвязанное управление целым комплексом параметров

комбинированных теплоэнергетических установок и их элементов. Такими комбинированными установками являются, в частности, и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [2, 3]. Как правило, современные САР и САУ построены на базе микропроцессорной техники, что обеспечивает гибкое адаптивное управление параметрами этих систем.

Председательствующий д-р техн. наук, профессор А.Г. Кузнецов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в своем выступлении отметил все возрастающую роль САР и САУ теплоэнергетических установок в достижении их наибольшей эффективности и важность дальнейших исследований, направленных на расширение функциональных возможностей этих систем.

В докладе А.Г. Кузнецова, С.В. Харитонов, Д.С. Ворнычева, В.А. Рыжова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Коломенский завод») «Полунатурные испытания системы управления дизельным двигателем» представлены результаты полунатурного моделирования работы системы управления перспективным дизелем Коломенского завода. Для проведения полунатурного моделирования создан специальный стенд, в составе которого электронный блок системы управления взаимодействует с компьютерной моделью дизеля в реальном масштабе времени. Разработана математическая динамическая модель дизеля с турбонаддувом, структура которой обеспечивает определение параметров рабочего процесса двигателя с высоким быстродействием, достаточным для обмена информацией с электронным блоком с периодом его срабатывания. Для связи натурной и компьютерной частей стенда разработано устройство сопряжения на базе оборудования фирмы *National Instruments*. Программные средства стенда, включая компьютерную модель дизеля и блоки функционирования устройства сопряжения, написаны в программной среде *LabVIEW*. Приведены результаты полунатурного моделирования системы управления в разомкнутом режиме для отладки каналов датчиков и исполнительных устройств и в замкнутом режиме регулирования частоты вращения дизеля при изменении сигнала управления и момента сопротивления.

А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов, Д.С. Ворнычев, А.А. Сотников, В.А. Рыжов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Коломенский завод») выступили с докладом «Некоторые результаты экспериментального исследования системы управления перспективным дизелем». Исследована система управления перспективным дизелем Д500 тепловозного назначения. Представлены результаты экспериментального исследования работы электронного блока, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана, и системы управления в целом. На безмоторном стенде и одноцилиндровом отсеке дизеля проведены сравнительные испытания электронных блоков МГТУ и *Heinzmann*. В процессе испытаний получены характеристики процесса подачи топлива и параметры рабочего процесса на основных режимах работы дизеля, включая показатели токсичности ОГ. Получены также характеристики стабильности частоты вращения вала двигателя на установившихся режимах и переходных процессах изменения частоты вращения при из-

менении сигнала управления. Данные экспериментального исследования показали, что электронный блок системы управления разработки МГТУ обеспечивает необходимые характеристики дизеля по всем параметрам рабочего процесса.

Д.А. Епанешников, Ю.Е. Хрящев (ООО «Роберт Бош», г. Тольятти; ЯГТУ) выступили с докладом «Регулятор частоты вращения дизеля с автоподстройкой с помощью искусственной нейронной сети». Авторами решена задача синтеза алгоритма автоматической настройки ПИД-регулятора частоты вращения автомобильного дизеля. Предложена методика применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для анализа переходных процессов в системе управления частотой вращения дизеля. Приведен пример синтеза ИНС по данным, полученным с использованием математической модели. На основе результатов предложен адаптивный регулятор минимальной частоты вращения холостого хода с возможностью автоматической подстройки структуры его параметров. Описана методика программно-аппаратного моделирования для отладки и проверки эффективности предлагаемого алгоритма работы.

В докладе О.Н. Соколова, С.В. Овчинникова, С.Н. Тихомирова, Ю.Е. Хрящева (ООО «Электронная автоматика», г. Ярославль; ЯГТУ) «Система аварийного управления транспортным дизелем» отмечено, что одним из направлений совершенствования систем управления является предотвращение аварийных ситуаций путем дублирования электронного управления резервной системой управления. Система аварийного управления предложена с целью обеспечения работоспособности транспортных дизелей. Она сохраняет функциональное резервирование управления, т.е. возможность работы транспортного дизеля при отказе штатной электронной системы управления в экстремальных условиях. В одном из вариантов системы в качестве способа восстановления функциональности системы управления дизелем применяется управляющее воздействие из кабины водителя по переводу топливоподающей системы на управление от механического регулятора, в другом — от электронного аналогового. Электронные блоки управления, составленные на основе аналоговых логических компонентов, обладают более высокой электромагнитной совместимостью.

М.В. Тихомиров, С.Н. Тихомиров, С.В. Овчинников, В.В. Крутов, Ю.Е. Хрящев (ООО «Электронная автоматика»; ЯГТУ) представили доклад «Диагностический комплекс ДК-5». Разработан диагностический комплекс ДК-5, позволяющий диагностировать не только двигатель, но и другие системы автомобиля. Он включает в себя кабель-адаптер для подключения персонального компьютера (ПК) по USB-интерфейсу к диагностической колодке OBD II двигателя или автомобиля и программное обеспечение для работы с адаптером на ПК. Основными функциями комплекса ДК-5 являются сквозная передача данных между интерфейсом USB ПК и шинами K-Line или CAN; выбор необходимого интерфейса для работы (CAN, K-Line) по USB; задание скорости работы интерфейсов; аппаратная реализация режима «быстрой инициализации» электронного блока управления (ЭБУ); возможность перезапуска ЭБУ; возможность обновления

прошивки. Комплекс ДК-5 внедрен в серийное производство с 2009 г. в ООО «Электронная автоматика» (г. Ярославль) и в настоящее время используется сервисными службами.

Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков, Ф.Б. Барченко, А.С. Кулешов, Н.С. Маластовский (МГТУ им. Н.Э. Баумана) сделали доклад «Разработка конструкций аккумуляторной топливной аппаратуры с оптимизированными характеристиками впрыскивания». Отмечено, что аккумуляторные топливные системы обладают несомненными преимуществами перед традиционной топливной аппаратурой разделенного типа. Среди них — повышенные возможности по управляемости давлением впрыскивания, характеристикой подачи и углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) с учетом режима работы двигателя. В связи с этим появляется возможность глубокой оптимизации рабочего процесса дизеля. Представлены результаты исследований по созданию аккумуляторных топливных систем с оптимально сформированными характеристиками впрыскивания. В результате цикла оптимизационных исследований с использованием программы ДИЗЕЛЬ-РК по трем новейшим отечественным среднеоборотным дизелям Д200, Д185, М150 выработаны требования к топливной аппаратуре, обеспечивающей нормативы по выбросам вредных веществ уровня *EU Stage IIIb* и *Tier IV*. Показана целесообразность формирования характеристики однократного впрыскивания с ломаным или ступенчатым передним фронтом с найденными параметрами в основном диапазоне регулирования мощности. Для реализации этой характеристики разработаны проекты шести вариантов электрогидравлических форсунок. Проведен конструктивный анализ лучших технических решений.

В докладе Л.Н. Голубкова, А.Ю. Дунина, П.В. Душкина, В.Н. Митяновой (ГТУ «МАДИ») «Гидродинамические эффекты в аккумуляторной топливной системе типа *Common Rail (CR)*» были представлены результаты экспериментального исследования влияния различных факторов на колебания давления на входе в электрогидравлическую форсунку (ЭГФ) при однократном и двукратном впрыскиваниях. В качестве влияющих факторов рассмотрены давление топлива, величина цикловой подачи, интервал между подачами при двукратном впрыскивании, физические свойства топлива и конструктивные особенности форсунки. Проведены исследования двух вариантов ЭГФ: первый — без встроенного аккумулятора с нагруженным управляющим клапаном, второй — с топливным аккумулятором, встроенным в корпус ЭГФ и разгруженным управляющим клапаном. Исследованы процессы топливоподачи нефтяного дизельного топлива (ДТ) и подсолнечного масла (ПМ). Применение ДТ и ПМ позволило оценить влияние физических свойств топлива на волновые явления в ЭГФ. Показана возможность гашения колебаний давления в топливной системе типа *CR*, но в этом не всегда есть необходимость, так как гидродинамические эффекты можно использовать для управления формой характеристики впрыскивания.

Ю.Е. Драган (Владимирский государственный гуманитарный университет) представил доклад «Влияние параметров жиклеров камеры управления ЭГФ на процессы подъема и посадки иглы распылителя». Процессы подачи топлива в дизельных топливных системах типа *CR* существенно зависят от проходных сечений входных и выходных жиклеров камеры управления ЭГФ. Требования, предъявляемые к этим параметрам, связаны с необходимостью обеспечения требуемого быстродействия перемещения иглы. В качестве критериев быстродействия приняты интервалы времени до начала подъема иглы и до начала ее посадки. Первый интервал времени отсчитывается от момента открытия выходного жиклера электромагнитным клапаном (ЭМК), второй — от момента закрытия ЭМК. Расчетный анализ указанных процессов проведен для ЭГФ конструкции НИКТИД, в которой значения эффективных проходных сечений входного и выходного жиклеров составляли 0,0268 и 0,1400 мм². Уменьшение проходного сечения входного жиклера увеличивает быстродействие подъема иглы, но уменьшает его при посадке иглы. Зависимость времени до начала подъема иглы от проходного сечения входного жиклера (в диапазоне от 0,0200 до 0,0600 мм² при проходном сечении выходного жиклера 0,1400 мм² и давлении в аккумуляторе системы *CR* 70 МПа) практически линейна. С соответствием с этой зависимостью, при проходном сечении входного жиклера 0,0200 мм² расчетное время до начала подъема иглы составляет 115 мкс, при 0,0268 мм² — 120 мкс, при 0,0600 мм² — 162 мкс. При других значениях выходных жиклеров линейный характер указанной зависимости сохраняется. Для быстрого завершения впрыскивания необходима резкая посадка иглы, а она в значительной степени зависит от проходного сечения входного жиклера (выходной жиклер закрыт клапаном и не влияет на процесс посадки). При этом почти двукратное увеличение проходного сечения входного жиклера (от 0,0268 до 0,0500 мм² при давлении в аккумуляторе системы *CR* 70 МПа) приводит к снижению времени до начала посадки иглы в 1,87 раза. Таким образом, увеличение эффективного проходного сечения входного жиклера для ускорения завершения впрыскивания топлива следует считать предпочтительным, поскольку его отрицательное влияние на динамику подъема иглы можно компенсировать увеличением проходного сечения выходного жиклера.

В докладе Н.Н. Патрахальцева, Габриэла Борреро Гарсия Пилар (РУДН) «Возможности повышения эксплуатационной топливной экономичности судового дизеля» отмечено, что в условиях патрулирования, движения в узких проливах, маневрирования в ограниченной акватории судовые энергетические установки (СЭУ) длительное время работают на режимах с малыми нагрузками. На этих режимах ухудшается качество рабочего процесса, и, как следствие, возрастают удельные расходы топлива, ухудшаются показатели токсичности ОГ. Одним из способов улучшения показателей работы СЭУ на таких режимах является реализация метода отключения цилиндров дизеля (иногда называемого методом изменения рабочего объема двигателя). Разработанная в РУДН методика оценки эффективности такого метода основана на численном анализе уни-

версальных характеристик дизеля, перестроенных в координатах «удельная работа–частота вращения коленчатого вала». Для судового дизеля, винтовая характеристика которого однозначно связывает мощность с частотой вращения коленчатого вала, показатель удельной работы может быть заменен литровой мощностью, которая изменяется с изменением числа активных (невыключенных) цилиндров. Эффективность метода отключения цилиндров существенно повышается, если в системе регулирования дизеля предусмотрены соответствующие оптимальные регулировки как при работе полноразмерного дизеля, так и дизеля с заданным количеством отключенных цилиндров. Расчетно-экспериментальным путем показано, что при отключении шести цилиндров на режиме с частотой вращения 1000 мин^{-1} топливная экономичность дизеля типа *MTU 12V2000 V50B* (номинальная частота вращения коленчатого вала 2400 мин^{-1}) возрастает примерно на 7 %, а при оптимальных для этого случая регулировках топливоподачи — до 13 %.

Н.Н. Патрахальцев, Р.О. Камышников (РУДН) представили доклад «Комплексный метод снижения токсичности выбросов дизеля путем сочетания отключения цилиндров и нейтрализации ОГ на режимах малых нагрузок». Предложенный метод заключается в том, что дизель в штатном исполнении по выбросам СО укладывается в допустимый норматив только при средних нагрузках (порядка 40...70 % полной), а на режимах с более высокими нагрузками включается система нейтрализации ОГ, которая эффективно работает при высоких температурах ОГ и достаточном содержании в них кислорода. Вместе с тем коэффициент загрузки дизеля погрузочно-доставочной машины в условиях значительной протяженности горной выработки составляет лишь 30...40 % полной. В результате на режимах малых нагрузок и холостых ходов с низкими температурами ОГ система их нейтрализации практически не работает и суммарные выбросы СО оказываются выше допустимых. На этих режимах выбросы СО можно снизить применением системы отключения цилиндров или циклов (СОЦЦ). При отключении части цилиндров благодаря повышенной нагрузке активных цилиндров повышается эффективность каталитической нейтрализации ОГ, если к нейтрализатору подаются ОГ только активных. В результате комплексного применения СОЦЦ и системы нейтрализации ОГ выбросы СО укладываются в допустимый норматив. Количественные результаты получены при расчетно-экспериментальном анализе работы дизеля типа КАМАЗ.

В докладе Н.Н. Патрахальцева, Э.А. Савастенко (РУДН) «Выбор алгоритма регулирования бензинового двигателя типа *BMW* изменением числа работающих цилиндров» отмечено, что этот метод повышения эксплуатационной топливной экономичности автомобильных двигателей эффективен для двигателей, значительную часть времени работающих на режимах малых нагрузок и холостых ходов. Обычно на практике применяют систему «отключения–включения» всегда одних и тех же цилиндров и одного и того же их количества. В современных двигателях, оснащенных САР и САУ, становятся возможными изменения

не только количества отключаемых цилиндров, но и алгоритма «отключения — включения» цилиндров. Расчетно-экспериментальным методом исследованы возможности повышения экономичности восьмицилиндрового двигателя типа BMW, когда в зависимости от текущей нагрузки меняется число активных (оставшихся в работе) цилиндров (серийный двигатель оснащен системой отключения четырех цилиндров). Исследованы режимы работы двигателя при движении автомобиля на четвертой передаче с частотами вращения вала от 1000 до 5500 мин⁻¹, т.е. с возрастающими, но постоянными скоростями движения. При малых частотах вращения и, соответственно, низких нагрузках возможна работа двигателя на двух цилиндрах. По мере роста нагрузки в работу включаются и другие цилиндры. Анализ, проведенный при допущении равновероятности всех нагрузочных режимов, показал, что при различных алгоритмах отключения цилиндров в этих условиях экономия топлива изменяется от 6,6 до 13,5 %.

С.В. Гусаков, М.В. Азанов, А.А. Савастенко (РУДН) представили доклад «Дистанционное управление составом горючей смеси малоразмерного бензогенератора при его стендовых испытаниях». При проведении экспериментальных исследований двигателя с искровым зажиганием часто требуется снятие регулировочных характеристик по составу смеси. Эти характеристики представляют собой зависимости параметров такого двигателя (эффективной мощности, удельного эффективного расхода топлива, концентраций вредных веществ в ОГ и др.) от коэффициента избытка воздуха при постоянной частоте вращения коленчатого вала и фиксированном положении дроссельной заслонки. Отмечено, что системы топливоподачи с традиционными карбюраторами до настоящего времени используются в малоразмерных двигателях, применяющихся на средствах малой механизации и в маломощных бензоэлектроагрегатах. Среди различных типов карбюраторов довольно редко встречаются конструкции, в которых имеется возможность изменения состава горючей смеси (коэффициента избытка воздуха) на режимах, отличных от режимов холостого хода. Приведена схема отечественного карбюратора К-22П, имеющего такую возможность. Для реализации этой возможности балансировочный канал карбюратора разобщается с приемным патрубком, а в поплавковой камере создается разрежение или избыточное давление от стороннего источника давления (разрежения), например от центробежной воздуходувки. Проведена оценка необходимого управляющего давления (разрежения) в поплавковой камере для обеспечения регулирования состава смеси в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,8 \dots 1,2$. Приведены результаты численного анализа, показывающие, что предложенная система дистанционного регулирования горючей смеси в малоразмерном стационарном двигателе с искровым зажиганием при его стендовых испытаниях работоспособна и способна обеспечить изменение состава смеси во всем диапазоне изменения нагрузки.

А.А. Савастенко, П.П. Ощепков, Р. Чум-Барима (РУДН) представили доклад «Снижение дымности отработавших газов дизелей применением неорганических (водорастворимых) присадок к топливу». До настоящего времени недостаточно исследованными являются дешевые металлонеорганические соединения, которые хорошо растворяются в воде и могут быть использованы в качестве добавок к нефтяному ДТ. Радикалы (катионы) металлов, содержащиеся в этих соединениях в небольших количествах (до 0,5 % масс.), не представляют опасности для организма человека (например, в сравнении с лекарственными препаратами, содержащими Ba). Выход этих радикалов с ОГ двигателя и попадание их в сажевый фильтр и каталитический нейтрализатор может способствовать процессам дожигания сажи и несгоревших углеводородов топлива. Особенно это актуально для современных двигателей с системами топливоподачи типа CR, в которых дополнительные впрыскивания топлива после верхней мертвой точки (ВМТ) осуществляются с целью регенерации сажевых фильтров. В работе рассмотрено несколько видов водных растворов металлонеорганических добавок к ДТ на основе металлов Ba, Ca, Mg, Cu, Mn и их влияние на дымность ОГ дизеля типа IЧ 8,5/11. Представлены нагрузочные характеристики этого дизеля — зависимости дымности ОГ от концентрации присадки в топливе. На номинальном режиме работы дизеля использование этих присадок позволило снизить выбросы сажи на 40...70 %.

В докладе В.М. Фомина (МАМИ) «Повышение эффективности использования энергии альтернативного топлива» изложен подход к решению проблемы эффективного применения энергии альтернативных моторных топлив на основе их термохимической регенерации с использованием теплоты ОГ. По результатам предварительного расчетного анализа предложена концепция нового способа применения указанных топлив, заключающаяся в том, что на первой стадии исходное топливо подвергается эндотермическому преобразованию (конверсии) с использованием для этой цели теплоты, отводимой из рабочего цикла двигателя. На второй стадии преобразованное топливо сжигается, при этом высвобождается дополнительная тепловая энергия, накопленная в процессе конверсии. В качестве перспективного альтернативного топлива рассмотрен метиловый спирт (метанол), продуктами конверсии которого являются водород (примерно 65 % по объему) и оксид углерода. При этом теплота сгорания метанола равна 19 670 кДж/кг, а теплота сгорания газообразных продуктов конверсии метанола — 23 870 кДж/кг, т.е. появляется возможность получения дополнительной тепловой энергии, накопленной в процессе конверсии спиртового топлива и равной 4200 кДж/кг. Реализация предложенной концепции в дизеле позволила на номинальном режиме повысить на 8 % его КПД по сравнению с его исходным вариантом (работа без конверсии). Повышение эффективности исследуемого дизеля обусловлено совокупным влиянием двух факторов: повышением энергетических характеристик конверсированного топлива и улучшением кинетических показателей процесса сгорания, в основном благодаря акти-

вирующим свойствам водорода, содержащегося в этом топливе. При реализации предложенной концепции отмечено снижение содержания сажи и оксидов азота в ОГ во всем диапазоне изменения нагрузочных режимов дизеля. На режиме, соответствующем номинальному, присутствие в горючей смеси химически преобразованного топлива способствует снижению содержания сажи в ОГ на 45 %, оксидов азота — на 15 %. Метод осуществим на любом типе серийно производимого двигателя без изменения его базовой конструкции. Основной компонент системы химического энергопреобразования топлива — термokatалитический реактор — представляет собой простейшую конструкцию теплообменного аппарата, массовые и габаритные характеристики которого (в объеме обычного глушителя) обеспечивают удобство его установки в выпускной системе двигателя.

В докладе В.И. Ерохова, И.В. Одиноквой (МАМИ, ГТУ «МАДИ») «Совершенствование экологических качеств транспортных дизелей с использованием методов восстановления оксидов азота» приведены функциональные и конструктивные особенности разработанной системы нейтрализации ОГ для отечественных дизелей. Она содержит селективный каталитический преобразователь SCR (*Selective Catalytic Reduction*), состоящий из нейтрализатора-фильтра и системы каталитического восстановления оксидов азота (DeNO_x). Принцип работы нейтрализатора-фильтра основан на задержке частиц сажи с последующим их сжиганием. Поверхность фильтрующего элемента в виде сотовой структуры покрыта тонким слоем катализатора. Толщина стенок между ее каналами составляет около 0,4 мм. Матрица сажевого фильтра задерживает до 80 % частиц размером 0,02...0,10 мкм. При скоплении в фильтре достаточного количества сажи запускается процесс его регенерации, протекающей по командам системы управления двигателем. Выжигание сажи осуществляется путем впрыскивания небольшой дозы топлива при повороте коленчатого вала на п.к.в. после ВМТ. Принцип действия системы DeNO_x состоит в химической реакции взаимодействия аммиака NH_3 с оксидом азота NO с образованием азота и водяного пара. Применение аммиака в чистом виде затруднено. Концерном *Total* создан безопасный заменитель аммиака на водной основе. Аналогичный заменитель разработан и в России. Эта жидкость, используемая для восстановления NO , не имеющая цвета и запаха, получила название *AdBlue*. Она содержит 32,5 % мочевины и 65,5 % воды. Температура ее замерзания ниже -11 °С. Эффективность каталитической нейтрализации при ее применении достигает 90 %. Использование каталитического преобразователя SCR в отечественном двигателестроении обеспечивает достижение норм *EURO-5* на токсичности ОГ.

В.В. Фурман («ППП Дизельавтоматика», г. Саратов) выступил с докладом «Совершенствование электронных систем управления и законов регулирования дизель-генераторов тепловозов». Представлены дизельные топливные системы с электронными САУ топливоподачей, разработанные «ППП Дизельавтоматика». Созданы различные варианты таких систем для ряда тепловозных дизелей.

Показано, что наиболее перспективной является электронная система типа ЭСУВТ.01 с импульсным индивидуальным управлением с помощью клапанов, применяемая на тепловозных дизелях типа Д50 (6ЧН 31,8/33) производства ОАО «Пензадизельмаш». В этой топливной системе установленный в надплунжерной полости топливного насоса высокого давления (ТНВД) электронно-управляемый клапан в момент начала подачи разобщает эту полость с линией низкого давления ТНВД, а в момент окончания подачи их объединяет. В результате можно изменять фазы топливоподачи в соответствии с режимом работы дизеля. Это обеспечивает возможность регулирования угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в функции частоты вращения коленчатого вала дизеля. Другими факторами улучшения показателей топливной экономичности, токсичности ОГ, статических и динамических характеристик дизеля типа Д50 при его оснащении системой управления типа ЭСУВТ.01 являются повышение статической и динамической точности регулирования частоты вращения и уменьшение минимальной устойчивой частоты вращения холостого хода от 300 до 220–250 мин⁻¹. Проведены эксплуатационные испытания тепловозов типа ЧМЭЗ, оснащенных штатной системой топливоподачи и опытной системой топливоподачи типа ЭСУВТ.01. Улучшение топливной экономичности тепловоза с опытной системой топливоподачи типа по сравнению с тепловозами со штатной системой при идентичных условиях эксплуатации и различных подходах и методах ее оценки составило от 8,24 до 11,49 %. При этом отмечено снижение дымности ОГ и незначительный рост эмиссии оксидов азота, который, однако, компенсируется путем оптимизации УОВТ.

В.А. Марков, В.В. Фурман, Е.В. Бебенин (МГТУ им. Н.Э. Баумана, «ППП Дизельавтоматика», Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова) выступили с докладом «Совершенствование системы регулирования частоты вращения дизельного и газодизельного двигателя». Рассмотрены принципы регулирования частоты вращения коленчатого вала, реализуемые в ДВС. Показаны преимущества реализации ПИД-закона регулирования. Проведены расчетные исследования влияния структуры ПИД-регулятора на динамические показатели САР дизеля. Оптимизация САР проведена по комплексному критерию, определяемому в виде произведения продолжительности переходного процесса и максимального отклонения регулируемого параметра в переходном процессе. Минимальное значение этого комплексного критерия качества получено при следующих значениях коэффициентов ПИД-закона регулирования: пропорциональный — 14, интегральный — 20, дифференциальный — 1,5. Обоснована необходимость конвертации этого двигателя на природный газ. Показана целесообразность оснащения газодизельного двигателя системой распределенной подачи газообразного топлива, выполненной по эжекционному принципу. Проведены испытания трактора МТЗ-82.1 с газодизельным двигателем типа Д-240 (4Ч 11/12,5) производства Минского моторного завода (ММЗ) в условиях реальной эксплуатации. Получены зависимости неустойчивости частоты вращения этого двига-

теля от структуры ПИД-регулятора. Показано, что указанные выше значения коэффициентов ПИД-закона регулирования, полученные для чисто дизельного цикла, не являются оптимальными с точки зрения неустойчивости частоты вращения вала газодизельного двигателя. При значениях указанных коэффициентов соответственно 14, 20 и 1,5 получена неустойчивость частоты вращения, равная 38 мин^{-1} , а при сочетании коэффициентов 20, 20 и 1,5 — 20 мин^{-1} .

Г.Г. Антюхин, В.И. Горин, А.В. Горин (ОАО «ВНИИЖТ») выступили с докладом «Современная диагностика теплотехнического состояния охлаждающего устройства тепловоза». Отмечено, что охлаждающее устройство (ОУ) дизеля тепловоза предназначено для охлаждения воды или низкотемпературной жидкости, охлаждающей теплонапряженные участки цилиндропоршневой группы, а также масло и наддувочный воздух. ОУ включает в себя поверхностные теплообменники, представляющие собой секционированные блоки радиаторов, вентиляторные установки, воздухопроводы, трубопроводы, жалюзи с механизмами ручного и автоматического привода, трубопровод для удаления воздуха из системы и пр. Процесс диагностики состояния ОУ включает в себя три фазы: регистрацию параметров и передачу их оператору, фильтрацию потока данных и обработку их по разработанному методу. В ОАО «ВНИИЖТ» разработан метод оценки теплорассеивающей способности охлаждающего устройства тепловозов с использованием существующих бортовых микропроцессорных систем управления в режиме реального времени. Этот метод позволяет осуществлять контроль качества проведения восстановительных работ ОУ; контроль технического состояния ОУ тепловозов методом удаленного доступа в режиме реального времени; оценивать скорость снижения этого параметра в зависимости от времени эксплуатации тепловоза.

В.П. Антипин, В.Д. Валяжонков, М.Я. Дурманов (СпбГЛТУ) выступили с докладом «Оценка эффективности касательной силы тяги трактора «Кировец» при неустановившихся режимах». На основании разработанной математической модели, состоящей из системы дифференциальных уравнений, описывающих колебания машинно-тракторного агрегата (МТА) в продольно-вертикальной плоскости, и передаточных функций этого агрегата выполнены расчеты количества энергии, затрачиваемой для реализации касательной силы МТА на базе колесного трактора К-744Р-05 с плугом ПУН-8-40 в транспортном режиме. Выполнены аналитические и экспериментальные исследования влияния жесткости подвеса МТА на динамическую нагруженность в силовой передаче, а также гасителей колебаний рейки ТНВД и пневмогидроаккумулятора (ПГА) главной масляной магистрали двигателя. Установлено, что с увеличением скорости движения МТА от 1,0 до 5,20 м/с амплитуды динамических составляющих касательной силы снижаются, а количество энергии, затрачиваемой на их реализацию, увеличивается. Снижение жесткости подвеса МТА на 40 % и установка гасителей колебаний рейки ТНВД и ПГА главной масляной магистрали двигателя способствуют понижению амплитуды динамических составляющих касательной силы и количества

энергии, затрачиваемой на их реализацию, способствуя увеличению эффективно используемой регулярной касательной силы тяги.

В докладе В.Г. Камалтдинова, В.А. Маркова, И.О. Лысова, С.С. Никифорова (ЮУрГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Моделирование процесса сгорания в форсированном транспортном дизеле с учетом смесеобразования» приведено описание разработанной модели процесса сгорания и программы для расчета рабочего цикла высокофорсированного дизеля с заданным законом смесеобразования. В модели принимается, что впрыснутое ДТ равномерно распределяется только в части текущего объема цилиндра. Величина этого объема и закон его изменения задаются на основании экспериментальных данных по результатам безмоторных испытаний смесеобразования. Процесс сгорания описывается системой уравнений, включающей выражения для определения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива и их количества. Полученные расчетные диаграммы давления в цилиндре и законы тепловыделения, а также закономерности влияния температуры свежего заряда после охладителя наддувочного воздуха на показатели рабочего цикла форсированного дизеля типа ЧН 15/16 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В докладе В.Г. Камалтдинова, И.О. Лысова, А.Е. Попова, В.И. Дайбова, Д.Р. Бакиева (ЮУрГУ) «Методика экспериментальных исследований процессов впрыскивания топлива и смесеобразования в камере постоянного объема» описаны особенности выбора диапазонов режимов впрыскивания топлива электромагнитной форсункой (давление топлива в аккумуляторе — от 100 до 165 МПа, продолжительности электрического импульса управления форсункой — от 0,5 до 3,0 мс) и параметров сжатого воздуха в камере постоянного объема (плотность 35,5 кг/м³, давление 30 бар) для безмоторных испытаний топливной аппаратуры форсированных дизелей типа ЧН 15/16. Выбранные параметры заведомо перекрывают весь диапазон изменения реальных цикловых подач топлива, включая режимы частичных нагрузок и номинальной мощности. В программе испытаний предусмотрено определение динамики изменения длины и угла конуса распыленных топливных струй, а также продолжительности задержек начала и окончания впрыскивания и продолжительности всего процесса впрыскивания топлива при различных давлениях в аккумуляторе и продолжительности электрического импульса управления форсункой. Планируется проведение экспериментальной оценки влияния закрутки воздуха в камере постоянного объема на дальнобойность распыленных топливных струй и смещение их осей от прямолинейного движения.

В докладе В.Г. Камалтдинова, И.О. Лысова, В.И. Дайбова, Д.Р. Бакиева (ЮУрГУ) «Расчетная оптимизация рабочего цикла дизеля с моделированием процесса сгорания двойной функцией Вибе» приведено описание разработанной модели процесса сгорания и программы расчета рабочего цикла с двумя законами сгорания топлива, описанными функцией И.И. Вибе. Новизной модели является введение нового параметра — доли топлива, участвующего в сгора-

нии в начальном его периоде, от общей цикловой подачи, а также не связанные между собой начала и продолжительности начального и основного периодов сгорания. Выполненные расчеты транспортного дизеля с системой топливоподачи аккумуляторного типа показали, что значение показателя характера сгорания в его начальный период практически не влияет на индикаторные показатели дизеля и максимальное давление в цилиндре. При этом значение показателя характера сгорания в его основной период, напротив, существенно влияет на индикаторные показатели дизеля и максимальное давление в цилиндре. В результате расчетных исследований был определен оптимальный закон тепловыделения, позволяющий снизить максимальное давление в цилиндре и улучшить индикаторные показатели форсированного дизеля типа ЧН 15/16.

В докладе В.А. Маркова, Е.Ф. Позднякова, В.И. Шатрова, А.А. Жердева, Е.М. Стриженова, А.А. Подчуфарова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Экспериментальные исследования газодизельного двигателя с адсорбционной системой хранения природного газа» отмечено, что традиционные системы хранения компримированного природного газа имеют существенные недостатки — малую энергоемкость и недостаточно высокую безопасность хранения. Показаны преимущества использования адсорбционных систем аккумулирования природного газа для ДВС. Описана дизель-генераторная установка, работающая на природном газе с запальной дозой нефтяного ДТ. Проведены экспериментальные исследования этой дизель-генераторной установки. При переводе исследуемого двигателя с дизельного цикла на газодизельный цикл отмечено улучшение его экологических показателей. Реализация газодизельного цикла позволила заметно снизить дымность его ОГ. На режиме с полной нагрузкой в дизельном цикле дымность ОГ составила 57,3 % по шкале Хартриджа, а в газодизельном цикле — лишь 8,7 %. Отмечена тенденция меньшего содержания оксидов азота в ОГ в газодизельном цикле по сравнению с дизельным циклом, связанная с лучшим качеством процесса смесеобразования. При реализации газодизельного цикла имел место рост выбросов монооксида углерода и легких несгоревших углеводородов, однако повышенная эмиссия этих двух токсичных компонентов ОГ легко устраняется при установке в выпускной системе двигателя каталитического нейтрализатора.

В докладе П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Маркова, В.Л. Трифонова (МАМИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Сравнение жесткости сгорания тракторных двигателей, работающих по дизельному и газодизельному процессу» рассмотрены предпосылки адаптации ДВС к работе на природном газе. Показаны преимущества сжигания природного газа в дизельных двигателях. Проведен анализ способов воспламенения смеси природного газа с воздухом в газовых двигателях. Отмечено, что эффективным способом воспламенения газозвушной смеси является реализация газодизельного цикла, в котором ее воспламенение происходит от запальной дозы нефтяного ДТ. Рассмотрены показатели динамики процесса сгорания дизельного и газодизельного двигателей. Предложены формулы для расчета этих показателей. Даны рекомендации для снижения

динамики процесса сгорания в газодизельном двигателе. Показано, что наиболее эффективным средством снижения динамики сгорания топлива является регулирование УОВТ. Для снижения исследованных показателей динамики процесса сгорания до уровня, характерного для обычного дизельного процесса, в газодизельном двигателе необходимо реализовать более позднее (на 5–10 градусов п.к.в.) впрыскивание запальной дозы ДТ.

В докладе П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Маркова, В.В. Бирюкова (МАМИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Исследования воспламеняемости эмульсий рапсового масла и этанола» рассмотрены проблемы, возникающие при адаптации дизелей к работе на биотопливах. Отмечено, что одной из наиболее сложных проблем является обеспечение самовоспламенения низкоцетановых топлив в условиях камеры сгорания дизеля. Для аналитического определения продолжительности периода задержки воспламенения использована формула, отражающая взаимосвязь этого периода с начальными температурой и давлением. Предложены зависимости для определения кинетических констант, входящих в эту формулу. Создана установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования периода задержки воспламенения различных топлив для дизелей в условиях моторного стенда. Проведено экспериментальное определение кинетических констант воспламенения нефтяного ДТ и различных биотоплив — этилового спирта, рапсового масла и их смесей.

В докладе И.К. Шаталова, К.Г. Дубенцова, К.В. Елисейевой (РУДН) «Утилизация вторичных энергетических ресурсов дизеля совместно с тепловым насосом (ТН)» отмечено, что одним из путей повышения эффективности тепловых двигателей является создание на их базе когенерационных установок (КУ). В этих установках одновременно вырабатывается электрическая (механическая) энергия и теплота за счет использования энергии ОГ, охлаждающих жидкостей и масла. В этом отношении перспективным является объединение в одной схеме дизеля и теплового насоса, позволяющее достигнуть двух целей — с помощью ТН утилизируется теплота низкопотенциальных источников (воздуха, воды, грунта и др.), а также используются вторичные энергоресурсы дизеля. Приведены результаты расчетной оценки энергоэффективности схемы КУ, включающей в себя ТН компрессионного типа с приводом его компрессора от дизеля и теплообменники для утилизации теплоты ОГ и охлаждающих жидкостей ДВС. Вырабатываемая теплота идет на подогрев сетевой воды. В качестве примера приведены расчеты для двух случаев — для КУ на базе дизеля без ТН и для КУ с дизелем и ТН, где вся вырабатываемая механическая мощность идет на привод компрессора ТН. При расчетах исследован дизель мощностью 1700 кВт с КПД, равным 0,37. Расход топлива через двигатель составлял 381 кг/ч, расход воздуха 3,16 кг/с, температура окружающей среды 20 °С, температура ОГ 540 °С; температура уходящих газов (после ТН) — 120 °С. Показано, что включение ТН в схему утилизации вторичных энергетических ресурсов дизеля увеличивает эффективность использования КУ в 1,86 раза по сравнению с дизелем без системы утилизации теплоты.

Ю.А. Антипов, И.И. Шаталова, И.В. Игнаткин (РУДН) представили доклад «Энергообеспечение тепличного комплекса на базе теплового насоса с приводом от теплового двигателя». Затраты энергии на отопление напрямую влияют на конечную цену выращенного в теплице продукта. Одним из эффективных и экономичных методов энергообеспечения тепличного комплекса является применение ТН с приводом от ДВС. В работе приводятся результаты расчетного анализа эффективности применения различных способов энергообеспечения теплицы. Исходные данные: площадь теплицы 10 000 м², потребности в энергии для обогрева 50 Вт/м² и на дополнительное освещение 10 Вт/м². Для энергообеспечения теплицы был выбран газопоршневой двигатель модульного исполнения фирмы «Звезда-энергетика» с электрической и тепловой мощностью 315 и 415 кВт соответственно и ТН канадской фирмы *Menergy*. Основные параметры ТН: источник низкопотенциальной теплоты — грунт, тип рабочего агента — *R134a*, тепловая мощность 523 кВт, коэффициент преобразования теплового насоса 4,2. Сравнение различных систем энергообеспечения теплицы проводилось не в стоимостных показателях затрат (они переменны), а по удельному расходу условного топлива, необходимому для выработки единицы тепловой или электрической энергии. Показано, что экономия энергоресурсов по сравнению с традиционной системой энергообеспечения (газовый котел) теплицы составляет: при использовании только ТН 25 %, при использовании только газопоршневого ДВС с утилизацией тепла 32 %, при совместной работе газопоршневого ДВС и ТН — 60 %.

В докладе Л.В. Виноградова, А.П. Алексеева (РУДН) «Автоматизированное построение решетки турбинных профилей кривыми *Bezier*» отмечено, что при разработке лопаточных машин приходится решать задачи построения решетки профилей. Методов проектирования профилей достаточно много — одни решают задачу с известными профилями, другие — задачу нового проектирования. Одним из способов является проектирование профиля по заранее заданным (в атласе профилей) геометрическим параметрам. Известно, что исходные данные для такого построения не обеспечивают однозначного решения задачи, поскольку, как правило, не определены точки сопряжения окружностей входной и выходной кромок с обводами спинки и корытца профиля, не определен вид кривых, описывающих обводы профиля и т.д. В работе предложен и реализован на примере сопловой лопатки типа С9015 «скользящий» интерактивный метод аппроксимации профиля лопатки турбины полиномами *Bezier* 2-го порядка в интегрированной среде MathCAD. Этот метод позволяет описать обводы профиля серией кривых *Bezier* в аналитической форме с коэффициентом корреляции 0,999. Для лучшего приближения (коэффициент корреляции более 0,9999) следует увеличить количество участков аппроксимации. Получено обобщенное аналитическое уравнение обводов профиля. Предложенный и реализованный метод позволяет работать практически с любыми массивами экспериментальных точек.

А.Е. Рассохин, М.А. Савельев, В.А. Марков (РВВДКУ им. ген. армии В.Ф. Маргелова, г. Рязань; МГТУ им. Н.Э. Баумана) выступили с докладом «Управление тепловым состоянием ДВС методом подачи воды в камеру сгорания (КС)». Исследования основаны на оптимизации теплового баланса двигателя, которая достигается максимальной рекуперацией теплоты ОГ, а также применением системы охлаждения проточного типа с использованием воды в роли промежуточного теплоносителя и адаптивно-управляемой ее подачи в КС. Такой способ организации работы системы охлаждения позволяет сделать тепловой режим способным к саморегулированию, что может позволить упростить конструкцию и повысить надежность. Это достигается снижением количества теплоты, отдаваемой в систему охлаждения при увеличении массы впрыскиваемой в КС воды, за счет энергии, затрачиваемой на парообразование и перегрев пара. В то же время увеличение удельного объема пара в рабочем теле увеличивает среднее индикаторное давление в цилиндре, что положительно сказывается на энергетических показателях работы двигателя. Обоснованы основные критерии объемной подачи воды и предлагаемые для реализации предложенного способа технические решения. Тепловую энергию ОГ предлагается использовать как для обеспечения ускоренного прогрева двигателя после пуска, так и для создания эргономичных условий работы водителя и экипажа.

М.А. Савельев, В.А. Марков (РВВДКУ им. ген. армии В.Ф. Маргелова, МГТУ им. Н.Э. Баумана) представили доклад на тему «Повышение эффективности вспомогательных тормозных систем автомобиля применением электронного управления». Отмечено, что использование торможения двигателем для снижения скорости транспортного средства особенно эффективно при движении по дорогам со слабой несущей способностью, с уклоном, с обледенелыми участками, при длительных спусках. Этот принцип работы двигателя как вспомогательной тормозной системы признан перспективным благодаря простоте, надежности и высокой унификации. Вместе с тем развиваемые тормозные усилия в этом случае незначительны и неуправляемы, отсутствует следящее действие при воздействии на кран управления. Предложен способ модернизации вспомогательной тормозной системы автомобиля использованием электронного управления системой газораспределения. В процессе торможения двигателем возможен его перевод в компрессорный режим, при котором в конце такта сжатия воздух через открывающийся электромагнитный клапан аккумулируется в штатном ресивере основной тормозной системы автомобиля. При повторном открытии электромагнитного клапана в конце такта впуска цилиндр наполняется сжатым воздухом из ресивера, что обеспечивает повышение энергии, затрачиваемой на сжатие, а, следовательно, увеличение тормозного момента, развиваемого двигателем. Рассмотрена также организация работы моторного замедлителя в режиме двухтактного компрессора установкой дополнительных заслонок во впускном коллекторе, что еще более повышает его эффективность. Проведенное расчетное исследование показало, что предлагаемая вспомогательная

тормозная система автомобиля с электронным управлением имеет ряд преимуществ перед штатной. Среди них — повышение тормозного момента в 2,5–3 раза при переводе двигателя в режим работы двухтактного компрессора и в 1,7–1,9 раза при переводе в режим четырехтактного компрессора. При этом конструкция тормозного крана обеспечивает следящее действие за счет изменения проходного сечения пневматической секции, что позволяет применять на большинстве режимов торможения предлагаемую систему, а штатную тормозную систему фрикционного типа использовать как резервную. Использование предлагаемой системы обеспечивает экономию топлива и снижение количества и токсичности ОГ, снижение затрат на замену тормозных накладок и барабанов. Применение электронного управления позволяет заложить перспективу для гибкого многопараметрового регулирования тормозного усилия двигателя.

В докладе С.Н. Девянина, А.В. Бижаева (РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) «Влияние способа подачи воды на воспламенение в ДВС» отмечено, что подача воды в цилиндры дизеля является эффективным средством снижения выброса основного газообразного токсичного компонента ОГ — оксидов азота, а также уменьшения дымности ОГ. Вместе с тем недостаточно изученной является проблема выбора наилучшего способа подачи воды в цилиндры. Рассмотрены два способа подачи воды в ДВС: с воздухом на впуске и с топливом в виде водотопливной эмульсии. Разработана математическая модель для оценки эффективности различных способов подачи воды. По разработанной модели проведены расчетные исследования и показано различие во влиянии способа подачи воды на температуру заряда в зоне воспламенения топлива в конце сжатия, что должно сказываться на условиях воспламенения и сгорания топлива. Показаны условия ограничения количества подаваемой воды различными способами, связанные с надежностью работы ДВС и воспламенением рабочей смеси.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Зыков, Са Бовэнь (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) выступили с докладом «Использование горчичного масла в качестве экологической присадки к нефтяному дизельному топливу». Рассмотрена возможность использования горчичного масла (ГМ) в качестве экологической добавки к топливу для дизелей. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12С (4Ч 11/12,5) производства ММЗ, работающего на нефтяном ДТ и смесях ДТ и ГМ. Показано, что при переводе дизеля с нефтяного ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % ГМ дымность ОГ снизилась от 17 до 12 % по шкале Хартриджа на режиме максимальной мощности и от 42 до 36 % по шкале Хартриджа на режиме максимального крутящего момента. При этом выбросы оксидов азота с ОГ дизеля, работающего на режимах 13-режимного цикла *ECE R49*, снились от 5,911 до 5,689 г/(кВт · ч), выбросы монооксида азота — от 2,184 до 2,068 г/(кВт · ч), выбросы несгоревших углеводородов — от 0,675 до 0,561 г/(кВт · ч). Предложена методика оптимизации состава исследуемых смесей. Определен обобщенный критерий оптимальности в виде суммы частных критериев, характеризующих концентрацию в ОГ окси-

дов азота и сажи — дымность ОГ. Проведены оптимизационные расчеты. Рассчитан оптимальный состав смесового биотоплива. Показано, что с увеличением содержания ГМ в смеси с нефтяным ДТ параметры токсичности ОГ дизеля улучшаются, но даже его небольшая добавка в нефтяное ДТ значительно улучшает эти параметры в исследуемом дизеле.

В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Зыков, Инь Мин (МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) представили доклад «Работа дизеля на смесях нефтяного дизельного топлива и рыжикового масла». Проведено расчетно-экспериментальное исследование дизеля типа Д-245.12С, работающего на нефтяном ДТ и его смесях с рыжиковым маслом (РМ). Проведен анализ физико-химических свойств нефтяного ДТ и его смесей с РМ различного состава. Перевод исследуемого дизеля с нефтяного ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % РМ сопровождался снижением дымности ОГ от 17 до 15 % по шкале Хартриджа на режиме максимальной мощности и от 42 до 36 % по шкале Хартриджа на режиме максимального крутящего момента. При этом выбросы оксидов азота с ОГ дизеля, работающего на 13-режимном цикле *ECE R49*, снизились от 5,911 до 5,341 г/(кВт · ч), выбросы монооксида азота — от 2,184 до 1,853 г/(кВт · ч), выбросы несгоревших углеводородов — от 0,675 до 0,585 г/(кВт · ч). Проведенные оптимизационные расчеты показали, что наилучшее сочетание показателей токсичности ОГ достигается при работе исследуемого дизеля на смеси 90 % ДТ и 10 % РМ.

В.С. Епифанов, Д.А. Попов (МГАВТ) сделали доклад «К расчету крутильных колебаний валопровода по вибрационным показателям двигателя». Разработана система диагностирования и мониторинга крутильных колебаний судовых ДВС с помощью виброанализатора, которую можно рассматривать как альтернативу применения традиционного торсиографа. Использование этой системы диагностирования позволяет определить исправность демпферов и antivибраторов крутильных колебаний валопровода, производить корректировку запретных зон его частот вращения, оценить работоспособность СЭУ в целом. Система диагностирования может быть предложена для использования на судах морского и речного флота в целях увеличения надежности СЭУ в условиях эксплуатации. Вместе с тем разработанная система имеет некоторые недостатки, которые могут осложнить ее применение. В этом случае проведение определенных вспомогательных расчетов позволяет снизить погрешности полученных результатов. Например, форма колебаний и резонирующая гармоника могут быть определены графическим способом. Величина возмущающего момента от крутильных колебаний, определенная как разница между суммарной составляющей опрокидывающего момента дизеля на резонансном режиме и составляющей опрокидывающего момента без учета крутильных колебаний, пропорциональна разнице виброскорости. Однако при возрастании частоты вращения двигателя в связи с изменением стойкости крутильной системы такая зависимость нарушается. Для выяснения причин этого явления необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

В докладе В.А. Маркова, Н.Д. Чайнова, А.В. Гуртового (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Системы регулирования степени сжатия ДВС» отмечено, что использование таких систем позволяет улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ поршневых двигателей. Рассмотрены предпосылки регулирования степени сжатия в поршневых ДВС — в бензиновых и дизельных двигателях. Дана классификация систем регулирования степени сжатия в поршневых двигателях. Рассмотрены конструкции разработанных систем регулирования степени сжатия. Отмечены их преимущества и недостатки. Даны рекомендации по выбору конструкции таких систем. Рассмотрена возможность реализации изменяемой степени сжатия в дизеле типа ЯМЗ-238. Проведен анализ характеристик этого двигателя и предложен алгоритм регулирования степени сжатия в соответствии с режимом его работы.

В докладе А.А. Строкина (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «К вопросу о моделировании шума впуска и выпуска двухтактного ДВС» отмечено, что шумы, генерируемые процессами впуска и выпуска, являются одними из основных источников общего шума ДВС. При этом шум незаглушенных источников является исходным параметром для разработки средств снижения шума. В настоящей работе соответствующие процессы рассматривались применительно к одноцилиндровому быстроходному двухтактному двигателю. В качестве исходной модели была использована акустическая «модель пульсирующей сферы» и в уточненном варианте — «модель пульсирующего поршня». То есть принималось, что на конце выпускного патрубка периодически возникает (а для впускного — исчезает) определенный объем газа, который и создает в атмосфере начальное волновое возмущение, которое затем, распространяясь, воспринимается нами как шум. Учитывая, что импульсы, вызывающие возмущение в атмосфере, имеют затухающий характер, для получения аналитических зависимостей наиболее интенсивная часть газового импульса моделировалась с помощью импульса затухающей синусоиды, который имел длительность и объем газов такие же, что и соответствующие параметры реального газового импульса. Расчеты звуковой мощности (и, соответственно, уровней звуковой мощности), излучаемой этими источниками, показали хорошее совпадение с экспериментом. При этом получена формула, отражающая зависимость звуковой мощности от частоты вращения вала двигателя в четвертой степени. Такая зависимость подтверждена экспериментом в основном скоростном диапазоне работы двигателя.

С.С. Кленников (МГТУ им. Н.Э. Баумана) выступил с докладом «О возможностях использования волновых передач в качестве исполнительных механизмов в тепловых двигателях». Рассмотрены волновые передачи, которые могут быть применены в различных энергетических установках, включая ДВС. Одна из возможных областей применения этих передач — использование их для преобразования поступательного движения поршней ДВС во вращательное движение вала двигателя. При таком использовании волновой передачи вместо рычажного кривошипно-шатунного механизма в двигателе устанавливается одно-

волновой или двухволновой механизм с зубьями циклоидальной формы волнового зацепления и повышающего мультипликатора. Отмечена возможность использования волновых передач в тепловых двигателях со свободными поршнями и в двигателях Стирлинга. Преимуществами такого передаточного механизма являются меньшие габаритные размеры и масса, возможность использования менее прочных и более дешевых материалов, в том числе пластмассы и керамики, возможность уменьшения объема необходимых смазочных средств. Основной недостаток такого применения волновой передачи — ограничения по частоте вращения вала двигателя и передаваемому крутящему моменту.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Теплотехника* / А.М. Архаров, А.Г. Кузнецов, В.И. Шатров и др.; под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 792 с.
2. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания* / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
3. *Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Системы топливоподачи и управления дизелей.* М.: Легион-Автодата, 2005. 344 с.

Марков Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Шатров Виктор Иванович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Шатров В.И. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и тенденции их совершенствования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №5. С. 96–116.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-96-116

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR HEAT AND POWER INSTALLATIONS AND WAYS TO IMPROVE THEM

V.A. Markov

vladimir.markov58@yandex.ru

V.I. Shatrov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article reviews the relevance of studies seeking to improve the current systems of automated management and control for heat and power installations. Based on the analysis of the materials of All-Russian Science and Engineering

Keywords

Heat and power installations, combustion engines, diesel engines, automatic management systems, automatic control systems

conference named after V.I.Krutovheld in January 2016 the authors offer the synopsis of the current trends in heat and power installation management and control systems. This paper first considers management and control systems for the conventional combustion engines. Electronic control systems created with the microprocessor technology demonstrate ample benefits. These systems have a significant impact on the power and dynamic characteristics of the engines, their fuel efficiency and exhaust toxicity characteristics. We analyzed the current state of management and control systems development and pointed out the areas for the future research projects. This article also reviews the major challenges for the studies of diesel engine fuel injection equipment, engine operating process and engine adaptation for alternative fuel types, including bio-fuel

REFERENCES

- [1] Arkharov A.M., Afanas'ev V.N., eds. *Teplotekhnika [Heat Engineering]*. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2011. 792 p.
- [2] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A., Aleksandrov A.A., Frolov K.V., eds. *Mashinostroenie. Entsiklopediya T. IV. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Vol. IV. Internal combustion engines]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 784 p.
- [3] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniya dizeley [Fuel system and engine control]*. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005. 344 p.

Markov V.A. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Thermal Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shatrov V.I. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of the Energy Engineering Research and Development Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Markov V.A., Shatrov V.I. Automatic Control Systems for Heat and Power Installations and Ways to IMPROVE Them. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana. Mashinostr.*[Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 5, pp. 96–116. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-96-116