

В. И. Ш а т р о в, В. А. М а р к о в

**ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

На основе материалов Всероссийского научно-технического семинара¹ рассмотрены тенденции совершенствования систем автоматического регулирования и управления теплоэнергетических установок.

E-mail: markov@power.bmstu.ru

Ключевые слова: теплоэнергетические установки, системы управления, системы регулирования.

В работе В.И. Толшина и Д.А. Попова (МГАВТ) “Оценка содержания оксидов азота в отработавших газах (ОГ) судового дизеля 6Ч15/18 и влияния на него различных факторов” рассмотрен метод оценки эмиссии оксидов азота судового дизеля, который основан на использовании прямой цепной реакции по механизму Зельдовича. Разработана программа расчета оксидов азота для дизель-генератора при изменении нагрузки и выполнен расчетный анализ влияния на выбросы оксидов азота температуры перед впускными клапанами, степени сжатия, угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ), рециркуляции ОГ и впрыскивания воды в цилиндр. Разработаны способы снижения выброса оксидов азота путем рециркуляции ОГ и применения регулируемых гидрозатворных форсунок, проведены теоретические и экспериментальные исследования судового дизеля. В настоящее время ведутся исследования по оценке эффективности снижения выброса оксидов азота путем увлажнения заряда в цилиндре.

А.Б. Бутнев, Е.А. Першутин, А.В. Сентюров (ООО “НПП Элкар”, Москва, МАДГТУ “МАДИ”) в работе “Совершенствование моментного управления ДВС” представили модель для определения крутящего момента двигателя непосредственно в процессе эксплуатации автомобиля. При определении крутящего момента двигателя используется информация от датчиков, фиксирующих количество подаваемых топлива, воздуха и смеси заданного состава. Эффективный крутящий момент двигателя рассматривается как сумма индикаторного крутящего момента и момента механических потерь. Полученная с помощью этой модели информация о текущем моменте двигателя используется для управления электронным дросселем, углом опережения зажигания, составом смеси, отключением подачи топлива. Представлены структуры управления двигателем без и с применением моментного управления. Преимуществами моментного управления являются улучшение топливной экономичности, снижение токсичности ОГ, повышение комфортабельности

¹Всероссийский научно-технический семинар (ВНТС) по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок основан профессором В.И. Крутовым в 1970 г.

и безопасности управления автомобилем, возможность реализации функций автоматического управления скоростью автомобиля и совместной работой двигателя и автоматической трансмиссии.

П.В. Абрамов (ООО “НПП Элкар”, Москва) в работе “Концепция управления одноцилиндровым двигателем с принудительным воспламенением по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала” отметил сложности прямого измерения нагрузки. Предложено в качестве параметра, характеризующего нагрузку (эффективный крутящий момент), использовать внутрицикловую вариацию угловой скорости коленчатого вала. Для гармонического анализа вариации угловой скорости коленчатого вала использовано разложение в ряд Фурье. Получена зависимость эффективного крутящего момента от амплитуды первой гармоники квадрата угловой скорости вращения вала. Проведено сравнение переходных процессов наброса нагрузки на двигатель, оснащенный пропорционально-интегральным регулятором частоты вращения, а также комбинированным регулятором с импульсом по нагрузке — с прямым измерением нагрузки и определением нагрузки по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала.

В.А. Марков, С.Н. Десянин, А.В. Стремяков (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) в работе “Использование смесей дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей” на основе проведенных экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) подтвердили возможности использования смеси нефтяного дизельного топлива (ДТ) и метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ) в качестве моторного топлива. Дизель исследован на моторном стенде АМО “ЗиЛ” на режимах внешней скоростной характеристики и режимах 13-ступенчатого испытательного цикла с установочным УОВТ, равным 13° п.к.в. до ВМТ, и неизменным положением упора максимальной подачи топлива. Исследовались ДТ и его смесь с МЭПМ в пропорции 95:5. Исследования дизеля Д-245.12С на чистом ДТ и на смеси 95 % ДТ и 5 % МЭПМ на режимах внешней скоростной характеристики показали, что при использовании смесового биотоплива удельный эффективный расход топлива оказался несколько выше, чем при работе на ДТ. Вместе с тем изменение эффективного КПД дизеля на этих режимах не превышало 0,6–0,8 %, что сопоставимо с точностью измерения расхода топлива. При испытаниях дизеля на смесовом биотопливе на режимах внешней скоростной характеристики отмечено заметное уменьшение дымности ОГ. Работа дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла на смесовом биотопливе сопровождалась некоторым увеличением концентрации в ОГ оксидов азота. При использовании смесового биотоплива отмечена тенденция к снижению содержания в ОГ монооксида углерода.

Наибольшее положительное влияние состав топлива оказывает на концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов. Приведенные данные подтверждают возможность улучшения экологических показателей дизеля Д-245.12С при его переводе с ДТ на смесь 95 % ДТ и 5 % МЭПМ. Так, при подаче в камеру сгорания (КС) дизеля исследуемого смесового биотоплива на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента дымность ОГ снизилась примерно на 40 % по сравнению с использованием нефтяного ДТ. Удельный массовый выброс несгоревших углеводородов на

режимах 13-ступенчатого цикла уменьшился с 0,719 до 0,668 г/(кВт·ч), т.е. на 7,1 %; удельный массовый выброс монооксида углерода снизился с 2,654 до 2,525 г/(кВт·ч), т.е. на 4,9 %. При этом удельный массовый выброс оксидов азота возрос с 6,862 до 7,464 г/(кВт·ч), т.е. на 8,8 %, а условный эффективный КПД дизеля $\eta_{\text{еул}}$ остался практически неизменным ($\eta_{\text{еул}} \approx 0,341$).

В.А. Марков, А.В. Стремяков, Е.Ф. Поздняков, С.Н. Девянин, В.С. Акимов, В.А. Шумовский (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО “Форант.Сервис”, г. Ногинск, МГАУ им. В.П. Горячкина) представили работу “Исследование процесса топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями с различной геометрией проточной части”. Для совершенствования процесса смесеобразования предлагается турбулизовать поток топлива в проточной части распылителя форсунки за счет выполнения дополнительных гидравлических сопротивлений на носке иглы распылителя форсунки. Наилучшие результаты дало применение распылителей, в которых часть хвостовика иглы серийного распылителя, расположенная ниже посадочного диаметра $d_{\text{п}} = 2,8$ мм, была подрезана под углом конуса 90° . Кроме того, конусная часть хвостовика иглы с углом конуса 45° сточена на 0,1 мм (по диаметру) выше диаметра $d = 3,2$ мм с таким же углом конуса (45°). В качестве базового варианта топливной аппаратуры (ТА) использована серийная аппаратура дизеля типа Д-245.12С, включающая в себя форсунку ФДМ-22 с распылителем типа 145.1112110-11 производства Ногинского завода топливной аппаратуры. Для оценки эффективности использования опытных распылителей проведены испытания дизеля типа Д-245.12С на моторном стенде АМО “ЗиЛ” на режимах внешней скоростной характеристики и режимах 13-ступенчатого цикла с установочным УОВТ $\theta = 13^\circ$ п.к.в. до ВМТ и неизменным положением упора дозирующей рейки. Дизель работал на смеси 93 % ДТ и 7 % метилового эфира рапсового масла (МЭРМ). Рассчитанные с использованием полученных экспериментальных данных условные (средние на режимах 13-ступенчатого цикла) показатели топливной экономичности и удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ на режимах этого цикла подтвердили эффективность использования опытных распылителей в дизеле, работающем на смеси 93 % ДТ и 7 % МЭРМ. Так, при замене серийных распылителей на опытные удельный массовый выброс монооксида углерода снизился с 3,027 до 2,522 г/(кВт·ч), т.е. на 16,7 %, а удельный массовый выброс углеводородов уменьшился с 1,409 до 1,083 г/(кВт·ч), т.е. на 23,1 %. И лишь выброс оксидов азота возрос с 6,470 до 7,121 г/(кВт·ч), т.е. на 10,1 %. При этом показатели топливной экономичности дизеля остались практически неизменными.

В работе Ю.Е. Хрящева, Д.А. Воробьева (ЯГТУ) “Управление газопоршневым двигателем” представлены результаты исследований управления частотой вращения коленчатого вала газопоршневого двигателя. При исследованиях использована математическая модель, отражающая динамические свойства двигателя в пространстве состояний. Проведен параметрический анализ в целях оптимизации качества переходных процессов.

Ю.Е. Хрящев, К.В. Дойников (ЯГТУ) подготовили доклад “Управление скоростью дизельного автомобиля с целью оптимизации крутящего момента трансмиссии”. Исследован дизель ЯМЗ 6581.10 с коробкой передач ТМЗ-14.180. Разработана электронная система управления переключением

передач трансмиссии, включающая в себя исполнительные механизмы и датчики режимных параметров. Предложенный способ управления объединяет в себе две электронные системы управления транспортным средством и позволяет синхронизировать работу коробки передач и дизеля при помощи электронной системы “Газ–регулятор”. Созданы алгоритмы управления силовым агрегатом для различных режимов движения.

В работе Ю.Е. Хрящева, А.А. Третьякова, С.В. Овчинникова, М.В. Тихомирова, С.Н. Тихомирова, А.П. Кузнецова (ЯГТУ) рассмотрен комплекс аппаратуры для сопровождения настройки ТНВД типа “Компакт-40” с электронной системой управления ЭСУ-1А двигателей типа ЯМЗ. Разработанный комплекс аппаратуры предназначен для настройки ТНВД, дизелей и автомобилей, а также самодиагностики систем ЭСУ-1А, ЭСУ-1М, ЭСУ-1АА в производстве и сервисном обслуживании автомобилей типа МАЗ, АЗ “Урал”, КраЗ, ЛиАЗ. Комплекс включает в себя блок настройки ТНВД (БНН); блок настройки двигателя (БНД); диагностический комплекс; сервисный блок настройки; пульт управления; блок обкатки ТНВД (БНО). Комплекс аппаратуры унифицирован как в аппаратной части, так и в программном обеспечении; БНД, БНН и БНО встроены в технологические процессы сборки, настройки и испытаний серийных ТНВД и двигателей. Разработан критерий контроля устойчивости режима холостого хода двигателя по косвенным признакам во время обкатки ТНВД. Представлена оригинальная система контроля качества сборки и настройки ТА по косвенным признакам отклонений от теоретически обоснованного критерия подвижности рейки ТНВД и топливоподачи.

В.И. Ерохов, И.В. Одиноква (МГТУ “МАМИ”, МАДГТУ “МАДИ”) представили работу “Система подачи сжиженного нефтяного газа (СНГ) в цилиндры двигателя с принудительным воспламенением”, в которой рассмотрена принципиальная схема системы распределенного последовательного (фазированного) впрыска жидкого газа с электромагнитными форсунками. Основой разработанной системы топливоподачи является система управления шаговым двигателем, обеспечивающим подачу жидкого газового топлива во впускной трубопровод. Теоретической основой высокого технического уровня газовой аппаратуры нового поколения является адаптивно-цифровая система управления. Разработана математическая модель системы впрыска сжиженного газа. При оптимизации параметров системы использована обобщенная целевая функция выброса вредных веществ, расхода топлива и КПД двигателя. Использование предложенной системы подачи сжиженного газового топлива в ДВС позволяет повысить экономичность, улучшить пусковые и расходные характеристики транспортного средства и улучшить его экологические параметры. Выбросы СО снижаются в 1,5–2 раза; ОГ не содержат серы и частиц сажи, что особенно важно в городских условиях эксплуатации автомобилей. Приведенная суммарная токсичность ОГ при работе на СНГ снижается на 40 % по сравнению с бензиновым двигателем. Содержание парниковых газов (СО₂, NO_x) снижается на 20 %. Срок окупаемости системы впрыскивания СНГ и материальных затрат на переоборудование в зависимости от условий эксплуатации и региональных особенностей составляет 8–12 мес. Обобщенный показатель эффективности СНГ составляет 1,5 руб. на 1 км пробега газобаллонного автомобиля.

П.В. Курманов, В.А. Марков (ЯГТУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в работе “Управление давлением топлива в аккумуляторной ТС” отметили, что требуемое давление топлива в аккумуляторе определяется в соответствии с частотой вращения двигателя и нагрузкой. При описании аккумуляторных ТС типа Common Rail основное внимание уделяется их электрогидравлическим форсункам, тогда как информация по ТНВД ограничена. В большинстве случаев указывается параметр, характеризующий ТНВД — максимальное рабочее давление, хотя существуют и другие не менее важные показатели, такие как максимальная подача или быстродействие устройства управления подачей. Наиболее эффективным решением при управлении подачей топлива ТНВД является электромагнитный дозирующий клапан, от характеристик которого зависят такие показатели, как точность поддержания давления в аккумуляторе и быстродействие контура управления давлением. Наиболее рациональная конструкция электроуправляемого дозатора ТНВД Common Rail предложена фирмой Delphi. Аналогичная конструкция электромагнитного дозирующего клапана разработана (патент RU 2379543) для ТНВД аккумуляторной ТС, предложенной ОАО “ЯЗДА”. Полученные тяговые характеристики электромагнитного привода и характеристики производительности ТНВД модели Э20 с дозатором Э20.1111 280, управляемым электрическим сигналом, свидетельствуют о том, что в диапазоне напряжений от 0 до 9 В подача ТНВД практически не зависит от напряжения и находится на максимальном уровне. В диапазоне напряжений от 9 до 15 В подача ТНВД уменьшается с ростом напряжения, причем указанное уменьшение имеет линейный характер. При напряжении более 15 В происходит прекращение подачи ТНВД. В процессе испытаний было отмечено различие (гистерезис) характеристик производительности ТНВД модели Э20 в зависимости от направления изменения напряжения управляющего сигнала, подаваемого на дозатор. Максимальное значение гистерезиса было зафиксировано при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{\text{ак}} = 300 \text{ кгс/см}^2$ и составило 23 % максимальной подачи ТНВД. Путем установки дополнительной пружины от дозатора Delphi в дозатор Э20.1111 280 гистерезис был снижен до 5 % максимальной подачи ТНВД.

Ю.М. Крохотин (Воронежская гос. лес. акад.) в работе “Возможности улучшения условий окончания впрыскивания с помощью электрогидравлических форсунок с комбинированным запирающим и перепускным клапаном” отметил, что одним из основных требований к характеристике впрыскивания дизельного топлива является максимально быстрое завершение процесса топливоподачи при высоком давлении под иглой. Топливная система с ЭГФ, имеющими комбинированное запирающее и перепускное клапаны, позволяет существенно улучшить характеристики процесса топливоподачи. Проведенное исследование показало, что увеличить давление начала опускания иглы можно за счет трех факторов: увеличения усилия пружины форсунки, увеличения эффективности гидравлического запирающего и уменьшение прецизионного диаметра иглы при неизменном посадочном диаметре. Проведен сопоставительный анализ влияния этих факторов на характеристики процесса топливоподачи.

В работе Ю.Е. Драгана (Владимирский гос. гуманитарный ун-т) “Поэлементный подход к исследованию топливоподачи электрогидравлической форсунки” обобщены результаты расчетно-экспериментального исследования топ-

ливоподачи аккумуляторной ТА с ЭГФ, конструкция которой была разработана в НИКТИД для дизеля Заволжского моторного завода. В математической модели учтены сжимаемость топлива в функции давления в камере управления, деформации подвижных частей (мультипликатора запираания, штанги и иглы распылителя) и других элементов конструкции ЭГФ и их влияние на изменение объема камеры управления, а также эффективные проходные сечения распылителя в зависимости от подъема иглы. Первая и последняя зависимости получены экспериментально. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Так, цикловая подача для режима максимальной мощности составила $56,7 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. Фактическая длительность этого процесса топливоподачи, определенная по осциллограмме подъема иглы, составляет $\sim 1,5 \text{ мс}$. Расчетная суммарная цикловая подача при времени нахождения иглы на упоре в течение $1,5 \text{ мс}$ и времени подъема и посадки иглы $0,2 \text{ мс}$ составляет $61,8 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. Методики могут быть полезны на стадии проектирования и доводки конструкций ЭГФ.

А.П. Перепелин (ЯГТУ) в работе “О возможности управления характеристикой впрыскивания топлива в дизеле путем применения топливных систем комбинированного (гибридного) типа” на основе качественного анализа и математического моделирования рассмотрел способы воздействия на протекание характеристики впрыскивания топлива путем использования ТС, выполненных по комбинированным схемам, сочетающим элементы ТС непосредственного действия и ТС аккумуляторного типа. Приведены результаты сравнительного численного исследования ТС, основанных на применении механического и гидравлического приводов нагнетающего элемента (при наличии и при отсутствии аккумулятора топлива). Рассмотрены возможности ТС с электроуправляемой секцией топливного насоса и электроуправляемой форсункой, ТС с электроуправляемой насос-форсункой и аккумулятором, ТС с гидравлическим усилением давления и другие варианты ТС. Показаны возможности и ограничения по управлению формой характеристики впрыскивания и скоростью нарастания давления топлива при осуществлении основной фазы впрыскивания. Намечены пути дальнейшего совершенствования характеристик впрыскивания.

Н.Н. Патрахальцев, Д.Е. Соловьев, И.С. Мельник, Б.А. Корнев (РУДН) в работе “Применение метода отключения цилиндров для регулирования работы дизеля, работающего на спиртовых топливах” показали, что повышение экономических, экологических и эффективных показателей работы дизелей можно достичь, используя различные смеси дизельного топлива с альтернативными. Желательный состав смесового топлива должен быть связан с режимами работы двигателя, так как, например, работа дизеля на чистом этиловом спирте в режимах малых нагрузок и холостых ходов затрудняется из-за низких цетановых чисел этого топлива. Для повышения доли этилового спирта в смесовом топливе возможно применять “безречное” управление дизелем, в частности, отключением – включением цилиндров или циклов. Тогда оставшиеся в работе цилиндры работают с полной нагрузкой и, следовательно, с повышенным тепловым состоянием. Это обеспечивает возможность подачи в работающие цилиндры повышенного количества альтернативных топлив с пониженными цетановыми числами.

Н.Н. Патрахальцев, Д.Е. Соловьев, И.С. Мельник, Б.А. Корнев (РУДН) в работе “Экономия нефтяного дизельного топлива частичным замещением его

альтернативным топливом” показали, что регулирование дизеля изменением числа работающих цилиндров позволяет превратить его в “однорежимный” по нагрузке работающих цилиндров. Благодаря этому возможно повышение доли альтернативного топлива в смесевом, например, спирто-дизельном топливе. Это не только увеличивает экономию ДТ, но снижает выбросы сажи, повышает удельную топливную экономичность, улучшает динамические качества двигателя. Так, поддержание режима с частотой вращения коленчатого вала $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузкой (крутящим моментом) $M_e = 76,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при работе дизеля 4 Ч11/12,5 на смесевом топливе достигается чередованием работы на двух или одном цилиндре (разгонами — выбегами). При этом расход ДТ составляет 3,06 кг/ч, а спирта — 0,76 кг/ч. При поддержании этого же режима полноразмерным дизелем на ДТ расход ДТ составляет 3,59 кг/ч. Выброс сажи при работе дизеля на смесевом топливе на этом режиме снижается в 1,5 раза.

В работе М.Г. Крупского, Э.В. Широких, В.Е. Кузина, С.П. Новичкова, И.С. Зайцева (КИ (ф) МГОУ, г. Коломна) рассмотрены новые способы управления топливоподачей среднеоборотных дизелей на основе быстродействующего пьезоэлектрического привода (ПЭП) — одного из перспективных направлений совершенствования микроэлектронных ТС. В одной из предлагаемых ТС использованы два перепускных клапана для управления характеристиками впрыскивания топлива в КС дизеля, из которых один — полнорасходный перепускной клапан с электромагнитным приводом — работает в релейном режиме и управляет фазами топливоподачи в соответствии с режимными параметрами двигателя, а другой — дополнительный малорасходный перепускной клапан с ПЭП, установленный в нагнетательной магистрали последовательно с полнорасходным перепускным клапаном и работающий в режиме регулируемого дросселя, служит для управления амплитудой давления и законами переднего и заднего фронтов характеристики впрыскивания топлива. Требуемое значение проходного эффективного сечения дополнительного перепускного клапана, определяемое значение остаточного между его затвором и седлом зазора обеспечивают дифференциальной характеристикой управляющего электрического сигнала, подаваемого на ПЭП его затвора, в зависимости от режимных параметров двигателя. Во второй из предлагаемых ТС управление дифференциальной характеристикой топливоподачи, в том числе и амплитудой давления впрыскивания топлива в КС дизеля, осуществляется с помощью ПЭП, воздействующего на гидравлически разгруженный затвор форсунки, работающий в режиме регулируемого дросселя. Это позволяет существенно улучшить переходные процессы в дизелях с аккумуляторными ТС.

М.Г. Крупский, В.Е. Кузин, С.А. Ахтырский (КИ (ф) МГОУ, г. Коломна) в работе “Результаты исследования возможности создания бесплунжерных ТНВД с используемой регулируемой объемной деформацией пьезокерамических материалов” привели принципиально новую конструкцию бесплунжерного ТНВД (патенты РФ № 2263224, № 2298683). В нем цикловая подача топлива достигается объемным расширением пьезоактюатора (ПА) при подаче на него управляющего электрического сигнала. Создана специальная установка, на которой образцы из различных пьезокерамических материалов нагружались давлением топлива (масла) с одновременной регистрацией сни-

маемых с них электрических параметров. Экспериментально было подтверждено, что при исследовании всех пьезокерамических материалов наблюдалась линейная зависимость снимаемого с образцов напряжения от давления топлива, вплоть до 200 МПа. Этот эксперимент показал, что, во-первых, ДТ является хорошим диэлектриком и, во-вторых, диапазон предельных давлений, до которых не происходит деполяризация пьезоэлементов, у погружных ПА значительно выше, чем у ПА осевого перемещения. Проведенные исследования подтвердили возможность создания бесплунжерных ТНВД на базе погруженных в дизельное топливо ПА, имеющих предельно простую конструкцию, предельно широкие возможности управления процессом топливоподачи, что обеспечивает такие характеристики впрыскивания топлива, которые могут быть реализованы всеми известными ТС.

В работе В.Е. Кузина, С.А. Ахтырского (КИ (ф) МГОУ, г. Коломна) приведена конструкция и характеристики измерительного преобразователя сигнала с емкостного датчика перемещения затвора топливной форсунки. Для исследования динамических качеств электромагнитных и пьезоэлектрических клапанов, дозирующих как жидкое, так и газообразное топливо в цилиндры опытных дизелей, необходима осциллограмма перемещения исполнительного элемента. Для измерения перемещения можно использовать и индуктивные, и емкостные датчики, однако применение емкостных датчиков оказывается предпочтительнее, так как они менее подвержены влиянию электромагнитных полей и просты в установке и эксплуатации. Чувствительный элемент емкостного преобразователя, работающего на несущей частоте порядка 1 МГц, представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, у которого при воздействии измеряемого параметра изменяется расстояние между пластинами или площадь пластин. Поскольку изменение емкости и, соответственно, электрического сигнала с такого датчика ничтожно мало, то для его наблюдения и регистрации необходим усилитель с высоким коэффициентом усиления полезного сигнала и достаточным ослаблением частоты несущего сигнала. Простота конструкции, высокая стабильность мостовой схемы и широкая полоса пропускания (не менее 20 кГц) определяют основные достоинства устройства для измерения перемещения затвора форсунки или газового клапана, которое позволяет регистрировать быстропротекающие процессы с минимально необходимой длительностью подачи топлива. Без каких-либо изменений устройство используется и для регистрации перемещения исполнительного элемента пьезоэлектрических дозаторов топлива.

В.Ю. Рудаковым (КИ (ф) МГОУ, г. Коломна) в работе “Методика определения величины аэродинамического сопротивления воздушного заряда движению топливной струи” на основе диаграмм дальнобойности путем дифференцирования определена скорость струи на всех этапах ее движения. Тем же способом соответственно определено ускорение струи. По среднеинтегральному значению давления впрыскивания с учетом значений времени передачи количества движения элементарных масс от сопла до вершины рассчитана масса образовавшего струю топлива. Далее по второму закону Ньютона или уравнению Мещерского определено аэродинамическое сопротивление движению струи. Таким образом, на основе обработки и анализа экспериментального материала по динамике развития топливной струи получена обобщенная зависимость аэродинамического сопротивления от давле-

ния впрыскивания, плотности воздушного заряда, диаметра распыливающих отверстий и времени развития струи.

Л.Л. Михальский, С.Н. Девянин, О.Н. Слепцов, А.П. Хромов, В.А. Марков (МГАУ им. В.П. Горячкин, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в работе “Динамическая модель каналов регулирования автотракторных дизельных двигателей” рассмотрели структуру системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения дизеля с газотурбинным наддувом, дополненную контуром регулирования теплового состояния двигателя. Приведено математическое описание отдельных элементов САР — поршневой части, турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов, системы охлаждения. Проведен анализ статических и динамических характеристик этих элементов в целях определения констант их передаточных функций. Предварительные расчетные исследования влияния различных параметров системы жидкостного охлаждения на динамические качества комбинированного двигателя подтвердили эффективность использования разработанной математической модели для расчетных исследований комбинированных двигателей, в том числе — для синтеза САР.

А.Ю. Минаев (МГАВТ) в работе “Система диагностики судовой энергетической установки” изложил метод диагностики дизельного двигателя судна, эксплуатируемого в условиях река–море, который в 7–10 раз дешевле применяемого метода диагностики судовых энергетических установок морских судов. При этом разработанная система диагностики не менее информативна, чем известные системы. Технические решения, используемые в разработанной системе, защищены двумя патентами — российским (авторы В.И. Толшин и А.Ю. Минаев) и немецким (соавтор В.И. Толшин). При испытаниях судна при спокойной воде и исправном состоянии двигателя определены зависимости для ряда параметров двигателя — для коэффициента избытка воздуха, индикаторного КПД, запаса по помпажу, сопротивления выпускного тракта, температуре, дымности и токсичности ОГ. Введение неисправностей в математическую модель позволило разработать относительно простой алгоритм диагностики системы в условиях эксплуатации. Система позволяет определять неисправности в ТС, системе наддува, выбросы токсичных компонентов, запас по помпажу, загрязнение компрессора и выпускного тракта.

В.Е. Лазарев, Г.В. Ломакин, Е.А. Лазарев (ЮУрГУ г. Челябинск) исследовали показатели тракторного дизеля при изменении конструкции распылителя форсунки. Конструкция укороченного распылителя форсунки модифицирована за счет изменения направляющей части иглы и элементов гидравлического тракта корпуса. Партия модифицированных распылителей, изготовленная в ООО “ЧТЗ-Уралтрак”, прошла сравнительные испытания на развернутом дизеле 4ЧН15/20,5. В ходе испытаний определены внешняя скоростная и нагрузочные (при $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 900 \text{ мин}^{-1}$) характеристики — регулировочная (по УОВТ) и с оптимальным УОВТ. Использование модифицированных распылителей в дизеле 4ЧН15/20,5 позволило уменьшить удельный эффективный расход топлива от 2 до 6 г/кВт·ч и температуру ОГ — от 30 до 50 °С (в зависимости от режима нагружения). Полученные результаты объясняются комплексным влиянием геометрических параметров направляющей иглы, каналов и полостей, составляющих проточную часть

гидравлического тракта, влиянием уменьшения массы и хода иглы и некоторого повышения давления впрыскивания в модифицированном распылителе на процессы смесеобразования и сгорания топлива.

В.А. Марков, Е.А. Сиротин, С.А. Хрипунов, В.И. Шатров, В.Г. Камалдинов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Холдинг “РусПромАвто”, ЮУрГУ, г. Челябинск) в работе “Управление рециркуляцией ОГ в транспортных дизелях” предложили методику оптимизации количества рециркулируемых ОГ, основанную на анализе зависимости интенсивности изменения наиболее “критичного” показателя — выброса монооксида углерода e_{CO} (производной $\partial e_{CO} / \partial \rho_p$) — от увеличения степени рециркуляции ρ_p на каждом из исследуемых режимов. В процессе оптимизации степень рециркуляции увеличивается с шагом $\Delta \rho_p$ на каждом исследуемом режиме. При достижении $\Delta e_{CO\Sigma} = 0$ фиксировалось значение ρ_p на этом режиме. Аналогичным образом проведена оптимизация и в оставшихся узловых точках. В качестве “критичного” параметра, рост которого нежелателен в процессе оптимизации, может быть выбран и расход топлива дизеля. При оптимизации использованы экспериментальные данные по дизелю типа Д-240. Полученная базовая характеристика управления ρ_p , оптимизированная по показателям токсичности ОГ, предусматривает увеличение ρ_p от 0 (на режиме максимальной мощности при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$) до 60 % (на режиме холостого хода при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$). Следует также отметить, что в связи с невысоким уровнем форсирования дизеля Д-240 имеется возможность рециркуляции небольшого количества ОГ на режимах с полной нагрузкой: на режиме максимального крутящего момента при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ оптимальной является степень рециркуляции $\rho_p = 10 \%$, а на режиме с полной подачей топлива при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ — $\rho_p = 5 \%$. Реализация полученной базовой характеристики в дизеле Д-240, работающем на режимах 13-ступенчатого цикла, обеспечивает уменьшение выброса оксидов азота с 17,8 (в двигателе без рециркуляции ОГ) до 12,0 г/(кВт·ч), т.е. на 32,6%. Эмиссия несгоревших углеводородов e_{CH_x} уменьшается при этом от 3,44 до 2,20 г/(кВт·ч), т.е. на 32,6%. Значение выброса монооксида углерода e_{CO} оставалось неизменным и равным 5,15 г/(кВт·ч). Условный (средний на режимах 13-ступенчатого цикла) удельный эффективный расход топлива увеличился при этом на 5%. Сравнительно высокие значения эмиссии токсичных компонентов ОГ исследуемого дизеля обусловлены отсутствием в нем системы газотурбинного наддува, его регулировками, обеспечивающими минимальные значения удельного эффективного расхода топлива g_e , а также отсутствием устройств и систем снижения токсичности ОГ, которыми оснащаются современные двигатели. Для удовлетворения жестких требований к эмиссии названных токсичных компонентов управление рециркуляцией ОГ необходимо сочетать с другими методами снижения токсичности ОГ.

В работе В.В. Фурмана, В.А. Маркова, К.С. Мизева (ППП “Дизельавтоматика”, г. Саратов, МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Система топливоподачи с электронным управлением тепловозного дизеля” приведены результаты экспериментальных исследования топливоподающей системы, разработанной для тепловозного дизеля типа Д-50. Система включает в себя электронно-управляемый клапан, установленный в линии высокого давления (в надплунжерной полости ТНВД). С помощью этого клапана осуществляется

управление началом и окончанием подачи топлива в каждом цикле процесса топливоподачи. Преимуществами применения разработанной системы топливоподачи является возможность более гибкого управления фазами топливоподачи, включая УОВТ. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенной системы и возможность формирования требуемых характеристик топливоподачи. Замена серийной ТС, не обеспечивающей управление УОВТ, на разработанную позволила снизить расход топлива с 3,5 до 17 % при работе на позициях контроллера 0...3 и на 0,9 % при работе на позициях контроллера 4 и 5. Указанное улучшение топливной экономичности дизеля достигнуто за счет формирования оптимизированных характеристик управления УОВТ.

В работе И.А. Барского, В.А. Маркова, П.Р. Вальехо Мальдонадо (РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ “МАМИ”) “Расширение диапазона устойчивой работы центробежного компрессора для наддува автомобильного дизеля” рассмотрена возможность сохранения постоянного давления наддувочного воздуха в широком диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя, что позволяет повысить коэффициент его приспособляемости и приемистость. Проанализированы характеристики экспериментального компрессора с безлопаточным и лопаточным диффузорами. Последний имеет поворотные лопатки, которые обеспечивают получение широкого диапазона устойчивой работы по расходу. Компрессор с поворотными лопатками имеет практически постоянное значение степени повышения давления и КПД почти во всем диапазоне рабочих режимов. Кроме того, устройство для поворота лопаток с датчиком в виде двухдырчатого насадка позволяет устанавливать лопатки на угол, обеспечивающий максимальные КПД и давление на всех режимах работы.

В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, С.С. Никифоров (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в работе “Влияние температуры и состава свежего заряда на момент самовоспламенения, процесс сгорания и показатели рабочего цикла НССИ двигателя” выполнили анализ результатов расчетных исследований рабочего цикла НССИ двигателя, работающего на смесевом топливе — смеси природного газа с диметилловым эфиром (ДМЭ), и показали, что параметры процесса сгорания и рабочего цикла в большой степени зависят от температуры свежего заряда и цикловой подачи ДМЭ. Так, наилучшие расчетные показатели НССИ двигателя размерностью 13/15 при степени сжатия 16 единиц, постоянной частоте вращения коленчатого вала 2100 мин^{-1} , массовой доле ДМЭ в смесевом топливе 0,27 и суммарном коэффициенте избытка воздуха 2,0 достигаются в рабочих циклах с температурой начала сжатия $\sim 350 \text{ К}$: индикаторный КПД $\eta_i = 0,462$, среднее индикаторное давление $p_i = 0,615$ и индикаторный расход топлива $g_i = 176,3 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. Для компенсации отклонения от штатного значения температуры в начале сжатия в диапазоне от 15,2 К до +24 К с сохранением p_i на уровне 0,615 МПа достаточно увеличить подачу ДМЭ с $1,62 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$ до $2,16 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$, т.е. на 33 %. При этом индикаторный η_i снижается с 0,462 до 0,439, т.е. всего на 5 %.

В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов (ЮУрГУ, г. Челябинск) в работе “Модель горения топлива и движения фронта пламени под действием энергонасыщенного плазменного факела” рассмотрели модель, описывающую процессы выделения энергии электроразрядом в ограниченном объеме КС,

охваченном плазменным факелом; процессы нагрева топливовоздушной смеси в этом объеме до равновесной температуры сгорания топлива при этой температуре с выделением теплоты в прилегающий объем КС и процессы нагрева свежей топливовоздушной смеси в этом прилегающем объеме до той же равновесной температуры с последующим сгоранием. Таким образом, в модели предполагается, что энергия, выделяющаяся первоначально при электроразряде и далее при сгорании топлива, расходуется на нагревание до усредненной постоянной температуры свежей горючей смеси в прилегающем объеме. В зависимости от соотношения параметров топливовоздушной смеси (давления, температуры, концентрации топлива и т.д.) и энергонасыщенного плазменного факела (энергии электроразряда, объема) нагреваемый прилегающий объем свежей смеси либо увеличивается, либо уменьшается. Если усредненная температура достаточно высокая, то за шаг расчета сгорает большее количество топлива с большим тепловыделением и нагревается больший прилегающий объем свежей смеси, который рассматривается как объем фронта пламени. Это означает, что при фиксированной площади поперечного сечения толщина фронта пламени на шаге расчета и скорость его движения растут.

В.С. Морозова, В.С. Гун, В.Л. Поляцко (ЮУрГУ, г. Челябинск) исследовали возможности сокращения выброса вредных веществ с ОГ дизеля обработкой магнитным полем компонентов рабочего тела. Получено, что сокращение выброса вредных веществ с ОГ в значительной степени определяется процессом смесеобразования, характеризуемого коэффициентом избытка воздуха α . Сокращение выброса оксидов азота NO_x и других токсичных компонентов ОГ возможно при повышении коэффициента α путем воздействия разнополярным магнитным потоком на топливо и воздух. Исследования проведены в Сертификационном центре автотракторной техники при Государственном научно-исследовательском институте по промышленным тракторам на дизеле 4ЧН15/20,5, работающем на режимах 8-ступенчатого исследовательского цикла. Они показали возможность увеличения коэффициента α на 5,5 % и уменьшения выбросов NO_x на 4 %. При этом отмечено уменьшение температуры ОГ в среднем на 5 %, среднее уменьшение несгоревших углеводородов — на 4,5 %, а монооксида углерода — на 8,8 %. Результатом магнитной активации компонентов топлива является также снижение в среднем на 3 % часового расхода топлива.

А.В. Неговора, М.М. Габдрахимов (БГАУ, Уфа) выступили с докладом “Параметрическая идентификация колебаний давления в аккумуляторе топливной системы типа Common Rail”. Разработана методика диагностирования ТНВД аккумуляторных ТС типа Common Rail непосредственно на двигателе, основанная на принципе параметрической идентификации колебаний давления в топливном аккумуляторе. Проведен сопоставительный анализ диаграмм изменения давления в каждой секции ТС, по результатам которого можно наблюдать разность в техническом состоянии каждой отдельной плунжерной пары. По углу наклона передних фронтов характеристики впрыскивания можно охарактеризовать утечки в зазорах плунжерных пар: меньшая крутизна фронта соответствует большей утечке. Равный угол наклона переднего фронта для всех секций указывает на равномерный износ всех плунжерных пар. Различия в максимальных давлениях впрыскивания

указывают на разность утечек через впускные клапаны секций. Задний фронт характеристики впрыскивания определяется профилем эксцентрика. Углы наклона этих фронтов характеризуют утечки через обратные клапаны. При этом меньший угол наклона заднего фронта соответствует большей утечке. Таким образом, имея эталонную осциллограмму для исправного ТНВД, по колебаниям давления в топливном аккумуляторе можно судить о степени износа плунжерных пар, а также выявить неисправную секцию насоса.

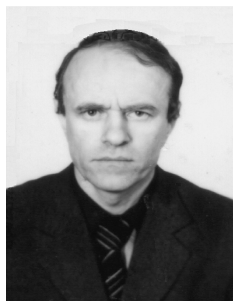
Р.В. Ягодин, А.Р. Валиев (БГАУ, г. Уфа) обосновали выбор параметров стенда для испытания топливной аппаратуры дизелей. Для снижения энергозатрат при испытании ТС автотракторных и комбайновых дизелей в Рязанском ЦОКБ при участии кафедры “Тракторы и автомобили” Башкирского ГАУ был разработан мобильный стенд с одним измерительным каналом. Потребляемая им мощность составляет не более 2,2 кВт (у прототипа — 15 кВт). В силу особенностей конструкции в линии высокого давления между ТНВД и форсункой установлено распределительное устройство, которое автоматически переключает секции ТНВД. При сертификации стенда для оценки влияния конструктивных мероприятий на закон топливоподачи испытуемого ТНВД потребовалось проведение исследований. На первом их этапе проводились теоретические исследования динамики привода ТНВД. Необходимость таких исследований связана с малыми крутильными массами стенда и его маломощным приводом. Поэтому появилась проблема обеспечения заданной тест-планом угловой скорости вращения кулачкового вала ТНВД для любого скоростного и нагрузочного режимов испытания. Показана целесообразность решения сопряженной задачи колебаний вала электродвигателя и привода ТНВД. Эта задача решена с использованием программы “Впрыск”. Определена максимальная неравномерность вращения кулачкового вала при варьировании моментом инерции маховика и жесткостью привода стенда, что позволило определить необходимые параметры привода ТНВД. В целях обеспечения нормативных характеристик топливоподачи для испытания ТНВД дизеля 4 BT 3.91ND на разработанном стенде были определены параметры маховика: момент инерции $J_m = 2,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и его масса $m = 28 \text{ кг}$, при этом неравномерность вращения привода ТНВД составила $\delta = 4\%$.

С.Н. Девянин, А.А. Савастенко, И.А. Никишин (МГАУ им. В.П. Горячкина, РУДН) исследовали неравномерность крутящего момента в ДВС и тяговые качества машины. Наиболее ощутима неравномерность крутящего момента у современных мотоциклов, имеющих мощные двигатели и малую инерционность движущихся масс. Даже на установившемся режиме работы этих двигателей мгновенное значение частоты вращения коленчатого вала может изменяться на 10% и более от среднего значения. Такие колебания частоты вращения отрицательно сказываются на равномерности движения машины, повышении динамических нагрузок в трансмиссии, снижении комфорта и др. Традиционные методы снижения неравномерности крутящего момента двигателя – увеличение числа цилиндров и обеспечение равномерного чередования вспышек в цилиндрах. Обеспечение требуемой неравномерности вращения частоты вращения достигается и путем выбора момента инерции маховика, доля которого в инерционности подвижных масс превышает 80%. Однако увеличение инерционности подвижных масс ухудшает динамические качества двигателя и машины, а для транспортного сред-

ства увеличивает расход топлива и выбросы токсичных компонентов при разгоне. Для исследования вопроса влияния чередования вспышек на равномерность крутящего момента были проведены расчетные исследования четырехтактного двухцилиндрового двигателя 2Ч 8,6/7,7. Расчеты выполнены для двигателя с номинальной мощностью 35 кВт при частоте вращения 5600 мин^{-1} . Проведенные расчеты показали, что равномерное чередование вспышек в многоцилиндровом двигателе не всегда является наилучшим вариантом для обеспечения равномерности крутящего момента двигателя. Для двигателей, в которых важно обеспечение небольшой степени неравномерности крутящего момента, необходимо проводить поиск оптимального чередования порядка работы цилиндров. Этот вариант, как правило, обеспечивает и наилучшую равномерность хода. Для рассмотренного двигателя отказ от равномерного чередования вспышек позволил уменьшить степень неравномерности крутящего момента в 1,8 раза и коэффициент неравномерности хода в 1,4 раза. Для реализации предлагаемого варианта рядного двигателя потребуется изготовление коленчатого вала с угловым расположением кривошипов 85° .

С.Н. Девянин, Л.И. Быковская, В.В. Маркова (МГАУ им. В.П. Горячкина) разработали метод оценки экологических показателей дизельных двигателей, работающих на различных топливах и предложили методику оценки показателей токсичности ОГ, основанную на анализе содержания в ОГ различных полициклических ароматических углеводородов и сравнительной оценке их предельно допустимых концентраций (ПДК) в воздухе рабочей зоны. С использованием предложенной методики проведен анализ результатов экспериментальных исследований одноцилиндрового дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива, работающем на нефтяном дизельном топливе и рафинированном подсолнечном масле. Подтверждены лучшие экологические показатели дизеля, работающего на растительном масле.

Статья поступила в редакцию 4.04.2011



Владимир Анатольевич Марков родился в 1958 г., окончил в 1981 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области автоматического управления и регулирования двигателей внутреннего сгорания.

V.A. Markov (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. D. Sc. (Eng.), professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of automatic control and adjustment of internal combustion engines.

Виктор Иванович Шатров родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Канд. техн. наук, начальник отдела 2.4. НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания.

V.I. Shatrov (b. 1937) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1960. Ph. D. (Eng.), Head of department of Power Engineering research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of automatic control of internal combustion engines.