

УДК 621.436

В. А. Марков, В. И. Шатров

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК\*

*На основе анализа материалов Всероссийского научно-технического семинара имени профессора В.И. Крутова рассмотрены тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок.*

**E-mail: markov@power.bmstu.ru**

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

2012 год — год 90-летия со дня рождения выдающегося ученого, педагога и государственного деятеля профессора В.И. Крутова (1922–1994).

Во вступительном слове председательствующего д-ра техн. наук, профессора А.Г. Кузнецова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) отмечены значительные заслуги основателя Всероссийского научно-технического семинара (ВНТС) по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок В.И. Крутова в организации и становлении этого семинара. ВНТС возник в 1970 г. как постоянно действующий орган, объединяющий специалистов двигателестроителей. Со временем рамки семинара расширились как по исследуемым задачам, так и по представительству на семинаре и географии участников. Постоянными участниками семинара являются такие известные ученые, как Л.Н. Голубков, Л.В. Грехов, С.В. Гусаков, С.Н. Девянин, В.И. Ерохов, Н.Н. Патрахальцев, Ю.Е. Хрящев. Растет число аспирантов, докладывающих свои кандидатские диссертации на заседаниях ВНТС, и число уже сложившихся ученых, “обкатывающих” свои докторские работы. В настоящее время работой семинара поочередно руководят ученики и соратники В.И. Крутова — сопредседатели В.И. Толшин, В.А. Марков, А.Г. Кузнецов и неизменный ученый секретарь семинара В.И. Шатров. В последние годы на семинаре ежегодно бывает представлено 25–30 докладов. Тезисы этих докладов ежегодно публикуются в журнале “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение”.

В.И. Хвесюк (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в своем докладе отметил выдающуюся роль Виталия Ивановича Крутова в развитии кафедры “Теплофизика” (сначала она называлась “Термодинамика и теплопередача”, затем — “Теоретические основы теплотехники”), которой он руководил более тридцати лет (1961–1994 гг.). Безусловно, это был выдающийся человек, одновременно сочетавший в себе педагога, ученого и крупного руководителя. В условиях быстрого развития науки в стране благодаря усилиям В.И. Крутова и всего возглавляемого им коллектива кафедра в корне изменила свой облик. Кафедра успешно развивалась в следующих направлениях: создание коллектива педагогов и научных работников высокой квалификации; создание

---

\*По материалам Всероссийского научно-технического семинара имени профессора В.И. Крутова.

комплекса учебников и учебных пособий, охватывающих все стороны подготовки в области термодинамики и теории тепло- и массообмена; создание лабораторной базы для проведения практических работ непосредственно на теплофизических стендах; организация научных исследований в области автоматического управления и автоматизации энергетических установок, а также направления подготовки по управлению техническими системами для ряда кафедр факультета “Энергомашиностроение”; создание и всемерная поддержка развития научных школ в различных направлениях исследований тепло- и массообмена. В результате активной деятельности всего коллектива, возглавляемого В.И. Крутовым, кафедра вышла на совершенно новый уровень. Исключительно важным событием была организация им в 1970 г. ВНТС по автоматическому регулированию и управлению теплоэнергетических установок. Был признан общегосударственный статус этого семинара, что подчеркивает признание высокого уровня работ, выполненных под руководством В.И. Крутова. Семинар играет важную роль в развитии фундаментальных и прикладных исследований, их координации в РФ и странах СНГ. Семинар достойно носит имя его основателя и бессменного руководителя.

Доклад В.А. Маркова, В.И. Шатрова, А.Г. Кузнецова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Виталий Иванович Крутов — ученый, педагог, патриот” посвящен презентации одноименной книги, подготовленной коллективом авторов к 90-летию В.И. Крутова (книга вышла в 2012 г. в издательстве ООО НИЦ “Инженер” (Союз НИО) ООО “Онико-М”, авторы А.А. Архаров, В.Н. Афанасьев, Ф.М. Данилов, Н.А. Иващенко, Н.П. Козлов, А.Г. Кузнецов, В.А. Марков, А.В. Спиридонов, В.И. Хвесюк, В.И. Шатров). Отмечена выдающаяся роль В.И. Крутова как видного государственного и общественного деятеля, крупного ученого в области автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок, замечательного педагога, проработавшего около 50 лет в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в том числе 34 года в должности заведующего кафедрой “Теоретические основы теплотехники”. С 1964 по 1986 г. работу в МВТУ им. Н.Э. Баумана Виталий Иванович совмещал с работой в Министерстве высшего и среднего специального образования СССР на посту председателя научно-технического совета министерства, члена коллегии, где в полной мере проявились его незаурядные организаторские способности. Эрудиция и широкий кругозор позволяли ему быстро и верно ориентироваться в научной проблематике, активно поддерживать инициативу ученых высшей школы в развитии новых научных направлений, создании в вузах научно-исследовательских институтов и центров, проблемных научных лабораторий на кафедрах и факультетах, добиваться финансовой поддержки университетских библиотек, музеев, обсерваторий, ботанических садов. Плодотворный труд В.И. Крутова неоднократно отмечался высокими наградами Родины. Он был заслуженным деятелем науки и техники России, лауреатом Государственной премии СССР. В книгу включен дневник, который вел Виталий Иванович на протяжении ряда лет. Представлены основные направления его научной и педагогической деятельности, история создания и развития ВНТС по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок, учебники и монографии по развитию исследований в области автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания, воспоминания и размышления коллег и учеников о Виталии Ивановиче Крутове.

В.И. Толшин (МГАВТ) выступил с докладом “Приближенная оценка содержания оксидов азота в отработавших газах (ОГ) судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в условиях эксплуатации”. Для приближенного метода оценки эмиссии оксидов азота используется известная концепция образования  $[NO_x]$  в локальных зонах камеры сгорания, где в период кинетического сгорания образуется область с высокой температурой. Образование  $[NO_x]$  происходит по двум реакциям классического механизма Зельдовича. Поскольку прямая реакция идет значительно интенсивнее, чем обратная, то применительно к условиям эксплуатации для упрощения расчетов рассматривается только прямая реакция. Предварительно с помощью датчиков

определяются часовой расход топлива, концентрация кислорода в ОГ, температура газов перед турбиной и воздуха после охладителя воздуха, максимальное давление сгорания. Далее рассчитываются температура конца сжатия и максимальная температура цикла, цикловая подача топлива и суммарный коэффициент избытка воздуха. Принято, что скорость образования  $[\text{NO}_x]$  является функцией температуры (кинетической энергии столкновений молекул) и числа столкновений молекул в локальной зоне. Это число столкновений зависит от массы локальной зоны (которая определяется по относительному количеству теплоты, выделившейся в кинетической зоне сгорания), от числа столкновений молекул в локальной зоне (пропорционального скорости движения молекул) и от концентраций кислорода и азота в этой зоне. Температура в локальной зоне определяется путем решения системы уравнений в предположении, что энергия сгорания в первой фазе кинетического сгорания (при достаточном количестве кислорода) передается локальной зоне. При приближенной оценке определяется лишь относительное изменение  $[\text{NO}_x]$ , т.е. отношение  $[\text{NO}_x]$  на текущем режиме, на котором определяются упомянутые параметры, к результатам, полученным ранее на эталонном режиме (на котором были известны эти параметры и величина  $[\text{NO}_x]$ ). На основе приведенной методики получена зависимость относительного изменения эмиссии  $[\text{NO}_x]$  в локальной зоне от относительного изменения произведения массы локальной зоны на функцию температуры в ней (теплосодержание локальной зоны) и от произведения концентраций кислорода и азота. Предложенный метод является полуэмпирическим и может быть использован применительно к условиям эксплуатации для мониторинга и оперативной оценки эмиссии оксидов азота без применения средств измерения концентрации оксидов азота в ОГ.

В докладе С.В. Гусакова, Д.В. Михрячева, В.А. Маркова (РУДН, МГТУ им. Н.Э. Баумана) “Оценка соответствия испытательного цикла NEDC современным условиям эксплуатации автомобилей с бензиновыми ДВС” отмечено, что для оценки токсичности ОГ двигателей транспортных средств разработаны различные испытательные стационарные и ездые циклы, отражающие распределение режимов работы двигателей в реальных условиях их эксплуатации. Но в последнее время в связи с бурным ростом числа транспортных средств и изменившейся ситуацией в условиях городской езды эти испытательные циклы уже не в полной мере отражают современные условия движения автомобилей в мегаполисах. В частности, Европейский испытательный цикл NEDC (Правила 83 ЕЭК ООН) не в полной мере учитывает распределение режимов движения транспортных средств в условиях современного мегаполиса, а следовательно, и режимов работы силовой установки автомобиля — ДВС, что может исказить оценки эмиссии вредных веществ и путевого расхода топлива при его использовании. Это затрудняет оценку показателей токсичности ОГ, а также топливной экономичности двигателей транспортных средств. Предложена расчетно-экспериментальная методика корректировки ездого цикла для фазы движения транспортного средства в городских условиях, учитывающая движение автомобилей в условиях современного мегаполиса. Модернизация фазы городского движения испытательного цикла NEDC позволяет проводить расчетно-экспериментальные работы по оценке топливно-экономических и экологических показателей ДВС транспортных средств, результаты которых в большей мере соответствуют действительности.

С.В. Гусаков (РУДН) представил доклад “Теоретический анализ возможностей повышения КПД ДВС применением присадок к топливу”. Для улучшения эксплуатационных показателей используются добавки к топливу, улучшающие процесс горения, снижающие потребление топлива и выбросы токсичных компонентов с ОГ. Такой добавкой является, в частности, присадка Green Level Fuel фирмы Green Wick. Необходимое количество этой присадки составляет 17–20 мл на  $1 \text{ м}^3$  топлива.

Для оценки возможностей улучшения эксплуатационных показателей при использовании этой присадки проведены расчетные исследования с использованием математической модели, учитывающей особенности процессов самовоспламенения и сгорания топлива в дизеле. Процесс сгорания топлива описывается комплексом из двух аппроксимирующих функций, причем их интерпретация позволяет определять необходимые параметры, исходя из физико-химических представлений о распыливании топлива, смесеобразовании и сгорании смеси. В качестве объекта исследований выбран дизель с турбонаддувом типа Д-245 ММЗ. Исследованы режимы с номинальной частотой вращения и нагрузками 100, 50 и 10 % номинальной. При расчетах в качестве независимых факторов были выбраны угол начала активного тепловыделения и продолжительность сгорания от начала впрыскивания топлива. В качестве функций отклика анализировались эффективная мощность, удельный эффективный расход топлива, температура рабочего тела в конце рабочего хода, доли теплоты, пошедшей на совершение полезной работы, и теплоты, потерянной вследствие теплоотдачи от рабочего тела и унесенной с ОГ, и др. Расчеты показали, что при сокращении продолжительности сгорания от 60 до 20° п.к.в. топливная экономичность может быть улучшена на 5 % на режимах со средними и высокими нагрузками и на 25 % — на режимах с малыми нагрузками. Однако физико-химических предпосылок для столь существенного сокращения продолжительности тепловыделения при применении “модернизаторов” горения типа Green Level Fuel нет, поэтому заявляемые производителем положительные эффекты по улучшению топливно-экономических и экологических показателей дизелей при использовании таких присадок к топливу недостаточно обоснованы.

Н.Н. Патрахальцев, М.В. Эммиль, Д.К. Гришин, Б.А. Корнев (РУДН, МГТУ “МАМИ”) выступили с докладом “Регулирование дизеля изменением его рабочего объема”. Известен метод повышения экономичности режимов малых нагрузок и холостых ходов дизеля путем отключения части цилиндров (его называют также методом изменения рабочего объема, методом деактивации части цилиндров и т.д.). Метод наиболее эффективен при использовании как отключения подач топлива, так и изменения фаз газообмена в деактивированных цилиндрах. Большинство систем отключения подач топлива позволяют отключать всегда одно и то же число одних и тех же цилиндров. Разработанная в РУДН система отключения цилиндров и циклов (СОЦЦ) позволяет отключать-включать цилиндры на время одного цикла с изменением номеров деактивируемых цилиндров. Благодаря этому появляется возможность безреечного регулирования дизеля, повышаются его экономические и динамические качества.

В докладе Н.Н. Патрахальцева, М.В. Эммиль, П.Р. Вальехо Мальдонадо, И.С. Мельника (РУДН, МГТУ “МАМИ”) “Методика оценки эффективности регулирования дизеля отключением цилиндров или циклов” отмечено, что предварительная оценка возможностей повышения топливной экономичности многоцилиндрового дизеля путем изменения его рабочего объема основана на использовании его универсальной (многопараметрической) характеристики по показателям удельного расхода топлива. Методика основана на допущении равенства удельных (на литр рабочего объема) работ, выполняемых на данном режиме как полноразмерным дизелем с речным регулированием, так и дизелем, регулируемым отключением-включением части цилиндров или циклов. Полученные таким путем расчетные результаты должны быть скорректированы с учетом необходимости поддержания допустимой неравномерности вращения вала, нецелесообразности использования СОЦЦ на низшей передаче автомобиля, необходимости создания гистерезиса в системе отключения-включения цилиндров.

В докладе Ю.Е. Хрящева, Д.А. Воробьева, М.Ю. Соколова, А.В. Жарова, В.С. Фавстова (ЯГТУ, г. Ярославль) “Управление когенерационной установкой на основе газопоршневого двигателя” представлен вариант конвертации дизеля в

газовый ДВС с искровым зажиганием, работающий на газовом топливе любой калорийности. Разработана когенерационная установка в целях максимального использования энергии топлива. КПД установки с учетом утилизованной теплоты достигает 92%. Электронная система управления, представляющая собой программно-аппаратный комплекс на основе 32-разрядного микроконтроллера, рассчитана на обеспечение первого класса точности по ГОСТ-10511 и наивысшего класса автоматизации.

Л.В. Грехов, В.А. Марков, В.С. Акимов, В.В. Фурман (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО “ППП Дизельавтоматика”, г. Саратов) выступили с докладом “Расчетные исследования электронной системы управления топливоподачей дизеля”. Представлена разработанная в “ППП Дизельавтоматика” конструкция электронной системы управления топливоподачей тепловозного дизеля типа Д50, работающего в составе дизель-генераторной установки 1-ПДГ4Д. Система включает в себя насосную секцию топливного насоса высокого давления (ТНВД), в надплунжерной полости которой установлен электромагнитный клапан, сообщающий эту полость с линией низкого давления ТНВД. Использование электронно-управляемого клапана для регулирования фаз начала и окончания подачи топлива позволяет гибко управлять топливоподачей. В частности, при этом появляется возможность реализации сложных законов регулирования угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в соответствии с изменениями скоростного и нагрузочного режимов работы. Расчетные исследования проведены с использованием программного комплекса “Впрыск”, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Этот программный комплекс предназначен для расчетного анализа процесса топливоподачи и оптимизации топливных систем различных схем. Результаты расчетных исследований системы топливоподачи с электронным управлением на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ), в частности, на режиме максимальной мощности, подтвердили возможность оптимизации конструктивных параметров этой системы в целях улучшения показателей токсичности ОГ.

Л.Н. Голубков, Н.А. Соленов, Д.А. Михальченко, П.В. Душкин (МАДГТУ “МАДИ”) выступили с докладом “Разработка элементов системы управления и исследование аккумуляторной топливной системы с электрогидравлическими форсунками”. Работа посвящена созданию элементов системы управления аккумуляторной топливной системой фирмы R. Bosch с электрогидравлическими форсунками (ЭГФ) на безмоторном стенде и ее экспериментальному исследованию. На данный момент разработаны алгоритм и программа управления ТНВД по обратной связи от датчика давления в аккумуляторе. Также разработаны алгоритмы и программы для обработки сигналов с различных датчиков аккумуляторной системы типа Common Rail: датчика давления в аккумуляторе, датчика положения электронной педали газа, датчика частоты вращения. Для управления ЭГФ на безмоторном стенде были созданы программы и электронные блоки управления четырьмя ЭГФ с электромагнитным клапаном (ЭМК) и пьезоприводом. Разработанные элементы системы управления позволили провести некоторые экспериментальные исследования, в частности, по влиянию напряжения форсирующего импульса на процесс подачи топлива ЭГФ с ЭМК, по определению стабильности и минимальных интервалов предварительных впрысков и т.д. Также в работе были определены характеристики топливоподачи форсунок и сила электромагнитов.

Ю.Е. Драган (ВГУ, г. Владимир) представил доклад “Методика исследования скорости иглы и других подвижных частей при математическом моделировании электрогидравлических форсунок”. При разработке методов математического моделирования гидродинамических процессов в ЭГФ особое место занимает определение скоростей подъема и посадки иглы распылителя и связанных с ней других подвижных частей (штанги, плунжера-мультипликатора). От этих скоростей зависят значения подач топлива в цилиндры дизеля в моменты движения иглы. В связи с

тем, что все подвижные части форсунки все время прижаты друг к другу силами давления топлива и движутся как единое тело, их движение рассматривалось как движение иглы. При подъеме иглы ее скорость зависит от положительной разности сил давления топлива снизу на иглу в подыгольной камере и сверху на торец плунжера-мультипликатора в камере управления. При движении иглы указанная разность сил постоянно изменяется, так как падает давление в камере управления при практически постоянном давлении в подыгольной камере, близком к давлению топлива в аккумуляторе в момент подачи топлива в цилиндр дизеля. Ускорение подъема иглы ЭГФ с учетом силы затяжки пружины и ее жесткости определялось по второму закону Ньютона. Из трудов И.В. Астахова и других ученых известно, что при открытии электромагнитного клапана мгновенный баланс топлива в камере управления ЭГФ описывается дифференциальным уравнением, устанавливающим взаимосвязь расходов топлива и перепада давлений. Это дифференциальное уравнение позволяет численным методом получить зависимость падения давления в камере управления от положения иглы распылителя. Проблема с решением этого уравнения возникает при малых подъемах иглы. Для решения этой проблемы подъем иглы следует выразить в виде функции давления. При этом целесообразно применить метод последовательных приближений. Критерием завершения расчета может служить стабилизация времени подъема иглы до упора, например, при разности результатов расчета не более 5...10%. В докладе методика проиллюстрирована результатами расчетов.

В докладе Ю.М. Крохотина (ВГЛТА, г. Воронеж) “Новый взгляд на утечки топлива в форсунках топливных систем дизелей” отмечено, что в современных конструкциях дизельные форсунки имеют перепускной клапан (ПК) для перепуска топлива из гидрозарпорной камеры в подыгольную полость. Перед впрыскиванием топлива клапан открыт, подыгольная и гидрозарпорная камеры составляют единый объем. При определенном давлении в подыгольной полости форсунки, заложенном в память электронного блока управления, ПК закрывается. Давление под иглой продолжает увеличиваться за счет подачи топлива секцией ТНВД, давление в гидрозарпорной камере повышается за счет утечек топлива через прецизионный зазор и через условное проходное сечение, образованное в результате возможной негерметичности перепускного клапана. Составлена программа, позволяющая провести численный эксперимент в целях выявления влияния утечек на процесс впрыскивания. Расчет показал, что утечки способствуют увеличению давления в гидрозарпорной камере в то время, когда перепускной клапан закрыт. Если игла поднимается до упора в корпус форсунки, утечки способствуют формированию ступенчатой характеристики впрыскивания в начале подачи и не сказываются на окончании подачи даже при увеличении давления в полости пружины до давления под иглой. В то же время при подобных утечках на режиме холостого хода форсунки неработоспособны. В начале подъема иглы давление в камере перед запирающим конусом иглы уменьшается, а давление в гидрозарпорной камере увеличивается. Это приводит к неуправляемой посадке иглы до момента открытия перепускного клапана и до начала отсечки в ТНВД. Проанализированы возможности управляемого процесса впрыскивания топлива на режиме холостого хода за счет момента открытия перепускного клапана по сигналу электронного блока управления.

В докладе А.П. Перепелина (ЯГТУ, г. Ярославль) “Об управлении формой характеристики впрыскивания топлива в дизелях” на основе качественного анализа и математического моделирования рассмотрена задача управления формой характеристики основной фазы впрыскивания топливной системы с многофазной подачей топлива. Приведены результаты численного исследования возможности управления как наклоном характеристики впрыскивания, так и ее начальной (ступенчатой) частью в топливных системах, выполненных по гибридным схемам, т.е. включающих в себя элементы топливных систем аккумулятора типа и непосредственного действия.

Показаны возможности и ограничения по реализации оптимальных характеристик впрыскивания на различных режимах работы дизеля с помощью топливных систем с электроуправляемой секцией насоса и электроуправляемой форсункой, систем типа Common-Rail с электроуправляемой насос-форсункой и аккумулятором, топливных систем с гидравлическим усилением давления в форсунке и других вариантов топливоподающей аппаратуры для дизелей.

В.И. Ерохов и И.В. Одиноква (МГТУ “МАМИ”, МАДГТУ “МАДИ”) сделали доклад “Электронная система управления газодизеля”. В качестве альтернативного топлива используется сжиженный углеводородный нефтяной газ (СУГ). Разработана концепция газодизеля, включающая создание современной газовой аппаратуры при работе на СУГ или компримированном природном газе (КПГ) и электронное управление системами и узлами базового двигателя. Электронный блок управления (ЭБУ) газодизеля рассчитывает дозу впрыскиваемого базового топлива и СУГ в соответствии с сигналами функциональных датчиков в зависимости от положения педали управления. Установлен оптимальный закон подачи запальной дозы дизельного топлива (ДТ). Общая его закономерность заключается в том, что впрыскивание запальной дозы следует осуществлять ступенчато или применять предварительное ее впрыскивание во время фазы задержки. Кроме того, в начале впрыскивания запальная доза должна быть минимальной. Разработанная электронная система управления топливоподачей способна выполнить подобные требования с необходимой точностью и быстродействием. Энергия запальной дозы топлива в  $10^2 - 10^4$  раз больше энергии искрообразования свечи зажигания. Снижение запальной дозы ниже минимального уровня неизбежно приводит к пропускам воспламенения или даже невозможности воспламенения газозооной смеси. При увеличении запальной дозы до 40 % выброс окислов азота снижается в 1,5–2 раза и углеводородов в 3–3,5 раза. При изменении запальной дозы концентрация [CO] в ОГ изменяется на всех режимах. Запальная доза, равная 10 %, не соответствует оптимальной, так как приводит к ухудшению топливной экономичности, росту эмиссии углеводородов, что обусловлено плохим воспламенением и сгоранием газозооной смеси. Газодизельная система питания содержит базовую систему топливоподачи и газовую с электронными компонентами. Газовая система для дизелей включает компоненты топливоподачи газового топлива и источник хранения газа, снабженный заправочным узлом с регулятором давления газа и отсечным электромагнитным клапаном газовой магистрали. Компоненты системы подачи газа включают блок управления, датчик давления газа, газовый фильтр, термопару для ОГ, аппаратуру впрыскивания газа, комплект жгутов, трубок и монтажных компонентов. Разработанное техническое решение обеспечивает повышение надежности, гибкости и экономичности работы системы питания ДВС газовым топливом, впрыскиваемым во впускной трубопровод в жидкой фазе. Система рециркуляции включает в себя клапан управления системой рециркуляции ОГ, а система снижения токсичности содержит нейтрализатор,  $\lambda$ -зонд и датчик температуры охлаждающей жидкости. Электрическая часть состоит из ЭБУ, исполнительного устройства и датчиков: регистрации начала впрыскивания, частоты вращения двигателя, расхода воздуха и газа, температуры охлаждающей жидкости и воздуха, положения педали управления и топливной рейки ТНВД, давления воздуха. Электромагнитные форсунки снабжены системой температурного контроля состояния форсунок, а также устройством установки мощности подогрева распылителей при переключении системы питания с летнего топлива на зимнее и наоборот. Датчик температуры установлен в корпусе распылителя форсунки. Использование двухкомпонентного состава топлива в виде жидкой и газовой фаз затрудняет оптимальную организацию смесеобразования и воспламенения рабочей смеси. Параметры запальной дозы ДТ, обеспечивающие воспламенение газодизельной смеси, а также работу двигателя в обычном дизельном режиме, в режиме газодизеля существенно отличаются от аналогичных параметров дизельного режима.

В основу выбора параметров запальной дозы ДТ положен разработанный закон подачи ДТ, обеспечивающий формирование необходимого нарастания (убывания) давления топлива. Реализация газодизеля обеспечивает замещение ДТ на 75...80%, улучшение топливной экономичности на 10...15% на режимах малых и средних нагрузок, снижение уровня дымности и токсичности ОГ, а также шума автомобиля. Пробег транспортного средства между заправками дизельным и газовым топливом в среднем увеличивается в 1,5–2 раза. При этом установлено значительное снижение токсичности ОГ: по твердым частицам — в 2 раза; [CO] — в 3 раза; [CO<sub>2</sub>] — в 1,2 раза; [NO<sub>x</sub>] — в 1,14 раза и [SO<sub>x</sub>] — в 5 раз. Мощность газодизеля увеличивается на 10...15%. Газодизель по сравнению с базовым двигателем имеет улучшенную форму ВСХ. Отмечено снижение выброса парникового газа [CO<sub>2</sub>].

П.П. Петров (НПФ “ЭКИП”, г. Москва) представил доклад “Особенности автоматического регулирования комбинированных (гибридных) энергоустановок”. В зависимости от состава и функционального назначения комбинированной (гибридной) энергетической установки (КЭУ) со свободнопоршневыми двигателями (СПД) могут применяться различные типовые схемы автоматического регулирования. Прежде всего, это система автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) выходного вала расширительной машины (РМ). Известно, что если в качестве РМ используется силовая турбина, то достаточно САРЧ с ПД-законом управления подачей топлива в СПД. Применение объемной расширительной машины (ОРМ) требует уже ПИД-закона управления подачей топлива в СПД и управления фазами открытия и закрытия впускных и выпускных клапанов ОРМ. Это обусловлено как существенно меньшей (в 5–20 раз) постоянной времени ОРМ по сравнению с силовой турбиной, так и необходимостью формирования тяговой характеристики ОРМ и КЭУ в целом. В случае гибридной энергоустановки с пневматическими накопителями энергии (НЭ) САРЧ должна иметь алгоритм подключения и отключения этих НЭ и коррекции подачи топлива в СПД в зависимости от состояния НЭ. Еще более усложняются задачи САРЧ при осуществлении рекуперативного торможения. Также обязательными для СПД являются системы автоматического регулирования степени сжатия (САРСС) и производительности (САРП). Последняя призвана обеспечить устойчивую работу СПД и не допустить изменение хода поршня СПД за пределы зоны саморегулирования. Практический интерес представляет система автоматического регулирования скважности процесса, обеспечивающая изменение частоты следования циклов и мощности СПД за счет задержки поршня в НМТ. Данная система не только снижает расход топлива на режиме холостого хода, но и отключает СПД от НЭ при их полной зарядке или рекуперативном торможении. Эти же функции может выполнять система автоматического останова-запуска СПД. При заполненных НЭ или на режиме холостого хода эта система останавливает СПД и устанавливает поршни в положение запуска, который осуществляется либо через определенное время, либо по другим управляющим сигналам. Эта же система обеспечивает последовательное включение отдельных модулей СПД, работающих на общую ОРМ. Таким образом, система управления КЭУ должна включать САРЧ, САРСС и другие системы в зависимости от требований к динамическим характеристикам КЭУ.

П.П. Петров, А.М. Савенков, А.И. Савицкий, С.П. Петров (НПФ “ЭКИП”, г. Москва) выступили с докладом “К выбору типа привода комбинированных (гибридных) энергоустановок, работающих на природном газе и удовлетворяющих заданным динамическим и тяговым требованиям”. Отмечено, что в составе КЭУ наиболее эффективны СПД (в силу своих функциональных особенностей). Они могут работать в двигательном, генераторном и комбинированном режимах. С точки зрения энергоэффективности и удельной мощности генераторный режим имеет существенные и неоспоримые преимущества перед двигательным при мощности КЭУ более 25...40 кВт. Это объясняется наличием серийных турбокомпрессоров, которые благотворно влияют на означенные параметры. При меньшей мощности пре-



имущества генераторного режима не столь очевидны. Кроме того, необходимо учитывать динамические, а для транспортных энергоустановок и тягово-динамические характеристики КЭУ. При генераторной схеме работы эти характеристики определяются параметрами агрегатов, входящих в КЭУ (СПД, ОРМ, турбокомпрессор и накопители энергии), а также диапазоном допустимого перераспределения мощности между поршневыми ступенями компрессора СПД и турбокомпрессором. При работе СПД в двигательном режиме все характеристики КЭУ определяются типом передачи энергии от поршня СПД потребителю. При гидropередаче используется свободнопоршневой дизель — гидронасос, который в сочетании с малой постоянной времени гидромотора и при заполненной гидросистеме обеспечивает время запуска и выхода на полную мощность не более 0,1 с. Однако наличие гидроаккумуляторов (находящихся под высоким давлением и заполненных азотом) ограничивает применение данной схемы. Термопневматическая передача свободна от этих недостатков, но требует для эффективного функционирования несколько теплообменников и имеет худшие динамические характеристики. В СПД с линейным электрогенератором перечисленные недостатки отсутствуют, но сигнал не синусоидальный, что обусловлено действием переменных газовых сил, в результате которых движение поршня для прямого и обратного хода отличается по длительности и максимальной скорости. Таким образом, для автономных источников, работающих на природном газе, наилучшие показатели имеют КЭУ с СПД, работающим в генераторном режиме. Применение других схем может быть оправдано особыми требованиями к динамическим характеристикам.

Г.Д. Драгунов, В.Г. Камалтдинов (ЮУрГУ, г. Челябинск) представили доклад “Применение гомогенизации горючей смеси в дизеле. Ожидаемые эффекты и проблемы”. Отмечается, что гомогенизация горючей смеси является одним из путей улучшения экологических показателей дизелей, в частности исключения выбросов твердых частиц и значительного снижения выбросов оксидов азота. Для реализации преимуществ рабочего цикла со сгоранием гомогенной смеси одновременно с применением современной системы топливоподачи типа Common Rail необходимо обеспечить высокоточную дозировку топливоподачи и контроль момента воспламенения топлива в цилиндре. Это позволит оперативно корректировать характеристики тепловыделения через регулировку топливоподачи, температуры свежего заряда и степени рециркуляции ОГ в зависимости от теплового состояния двигателя, скоростного и нагрузочного режимов его работы.

В докладе В.Г. Камалтдинова, Г.Д. Драгунова и В.А. Маркова (ЮУрГУ, г. Челябинск, МГТУ им. Н.Э. Баумана) “К вопросу образования оксидов азота при сгорании гомогенной топливно-воздушной смеси в ДВС” отмечена возможность существенного снижения эмиссии оксидов азота с ОГ при такой организации рабочего процесса. Анализ экспериментальных данных образования оксидов азота при сгорании воздушных смесей углеводородного топлива и сопоставление их с результатами расчетных экспериментов показали, что содержание оксидов азота в ОГ и степень диссоциации диоксида углерода имеют близкие зависимости от температуры сгорания. Пока максимальная температура в цилиндре не превышает 2000 К степень диссоциации диоксида углерода составляет менее 1 %, а содержание оксидов азота — менее 10...20 ppm. Повышение температуры сгорания до 2500 К приводит к увеличению степени диссоциации до 5–10 %, а содержания  $[NO_x]$  в ОГ — выше 5000 ppm. Отсюда вывод, что одной из причин такой зависимости может быть окисление азота атомарным кислородом, образующимся в результате диссоциации диоксида углерода при высокой температуре сгорания.

В.А. Марков, Л.Л. Михальский, С.Н. Девянин, П.В. Абрамов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) представили доклад “Расчетные исследования комплексной системы автоматического регулирования частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости дизельного двигателя”. Рассмотрена возможность

реализации системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости дизельного двигателя, в которой реализован принцип компенсации возмущений. Исследована комплексная САР, в которой контур регулирования температуры охлаждающей жидкости включает регулирующий орган, изменяющий расход воды через второй контур водяного радиатора системы охлаждения. Этот регулирующий орган — заслонка — перемещается по управляющему сигналу с электронного блока управления, который вырабатывается с учетом текущего значения частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель. Расчетные исследования комплексной САР проведены с использованием программного комплекса “Моделирование в технических устройствах (МВТУ)”, разработанного под руководством канд. техн. наук, доцента О.С. Козлова. Расчетные исследования показали, что введение импульса по нагрузке в закон регулирования температуры охлаждающей жидкости позволяет улучшить динамические характеристики САР и повысить точность поддержания температурного режима работы двигателя.

В докладе В.А. Маркова, С.Н. Девянина, А.В. Стремякова, К.С. Мизева, Л.И. Быковской и В.В. Марковой (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) “Кукурузное масло — экологическая добавка к дизельному топливу” представлены результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С (4ЧН 11/12,5) Минского моторного завода на смесях ДТ марки “Л” по ГОСТ 305–82 и кукурузного масла (КМ), содержащих 5 и 10 % по массе. Исследовалось кукурузное масло, производимое ОАО “ЭФКО” (г. Алексеевка, Белгородская обл.). Дизель испытывался на моторном стенде АМО “ЗиЛ” на режимах внешней скоростной характеристики и режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН с установочным углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ)  $\theta = 13^\circ$  п.к.в. до ВМТ и неизменным положением упора максимальной подачи топлива. Испытания показали, что наличие в молекулах жирных кислот КМ значительного количества атомов кислорода (10...12 %) благоприятно сказывается на показателях дизеля, работающего на КМ или его смесях с ДТ. В частности, подтверждена возможность заметного снижения дымности ОГ при использовании в качестве топлива смесей ДТ и КМ. При переводе исследуемого дизеля с ДТ на смесь 90 % ДТ и 10 % КМ удельный массовый выброс оксидов азота на режимах 13-ступенчатого цикла снизился от 6,549 до 6,337 г/(кВт·ч), т.е. на 3,2 %, выброс монооксида углерода уменьшился от 3,277 до 2,825 г/(кВт·ч), т.е. на 13,8 %, выброс несгоревших углеводородов снизился от 1,104 до 0,773 г/(кВт·ч), т.е. на 30 %. При этом условный средний на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла КПД практически не изменился (уменьшился от 0,347 до 0,346). Дымность ОГ на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  уменьшилась от 18 до 14 % по шкале Хартриджа, т.е. на 22,2 %. В целом, проведенный комплекс исследований подтвердил эффективность использования КМ в качестве экологической добавки к нефтяным ДТ для отечественных транспортных дизелей.

В докладе В.А. Маркова, С.Н. Девянина, В.А. Шумовского, С.А. Тарантина (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина) “Использование водотопливных эмульсий в качестве топлива для дизелей” отмечено, что эффективным средством снижения выбросов оксидов азота с ОГ ДВС является использование эмульгированных топлив. Для оценки возможности улучшения экологических показателей при использовании водотопливных эмульсий проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) на чистом ДТ и на эмульсиях ДТ и воды с содержанием последней от 0 до 15 % по объему. Для получения эмульсий ДТ и воды использовано эмульгирующее устройство, принцип работы которого основан на создании высокочастотных колебаний смеси воды и ДТ. Для получения стойких эмульсий этих компонентов применен эмульгатор — алкенилсукцинимид мочевины (СИМ), производимый по ТУ 38.1011039-85. Содержание эмульгатора в эмульгированных топливах не превышало 0,5 % по массе. При испытаниях дизеля Д-245.12С

на моторном стенде АМО “ЗиЛ” исследования проводились при неизменном положении упора дозирующей рейки ТНВД с постоянным штатным установочным УОВТ  $\theta = 13^\circ$  п.к.в. до ВМТ. Сначала испытания были проведены на режимах ВСХ, затем на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН. Испытания на режимах ВСХ показали, что пониженное содержание горючих компонентов в эмульсиях (их пониженная теплотворная способность) при питании двигателя эмульгированными топливами приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива. Однако при этом эффективность процесса сгорания, характеризующая эффективным КПД двигателя, на большинстве режимов даже повышается. Так, на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  переход с ДТ на эмульсии с содержанием воды 7,5 и 15 % привел к росту эффективного КПД от 0,386 до 0,402, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  эффективный КПД сначала повысился от 0,332 до 0,342, а затем снизился до 0,327. Использование эмульгированных топлив позволяет заметно снизить дымность ОГ. Так, при переходе от ДТ на эмульсию с содержанием воды 15 % на режиме максимального крутящего момента при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  дымность ОГ  $K_x$  снизилась от 28,0 до 18 % по шкале Хартриджа, а на режиме максимальной мощности при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$  — от 16,0 до 8,5 %. Испытания на режимах 13-ступенчатого цикла показали, что при переходе с ДТ на эмульсии с содержанием воды 7,5 и 15 % удельный массовый выброс оксидов азота уменьшился соответственно от 6,61 до 5,916 и до 4,849 г/(кВт·ч), т.е. в целом на 26,6 %. При этом эффективный КПД дизеля повысился от 0,341 соответственно до 0,36 и до 0,361, т.е. в целом на 5,9 %. Более сложная зависимость от содержания воды в эмульгированных топливах характерна для выбросов монооксида углерода и несгоревших углеводородов. При переходе с ДТ на эмульгированные топлива с содержанием воды 7,5 и 15 % интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла удельный массовый выброс монооксида углерода сначала уменьшился от 3,612 до 2,905 г/(кВт·ч), а затем возрос до 4,648 г/(кВт·ч). При этом выброс несгоревших углеводородов сначала возрос от 1,638 до 2,730 г/(кВт·ч), а затем снизился до 2,522 г/(кВт·ч). Следует отметить, что при использовании эмульсий с большим содержанием воды могут возникнуть проблемы с организацией эффективного процесса сгорания. В частности, при испытаниях дизеля Д-245.12С на эмульсии, содержащей 70 % ДТ и 30 % воды, не удалось организовать запуск холодного двигателя, что объясняется недостаточно высокой температурой конца сжатия. По этой причине полный цикл испытаний дизеля на этой эмульсии не был закончен. Для организации работы двигателя на эмульсиях с большим содержанием воды необходима реализация мероприятий по повышению температурного уровня деталей камеры сгорания и рабочей смеси.

В.А. Марков, С.Н. Десянин и А.А. Савастенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАУ им. В.П. Горячкина, РУДН) представили доклад “Развитие систем впрыскивания бензина ДВС с принудительным воспламенением рабочей смеси”. В докладе отмечены недостатки карбюраторных топливоподающих систем бензиновых двигателей и показаны преимущества систем топливоподачи с впрыскиванием бензина. Проведена классификация систем впрыскивания бензина. Выделены системы с центральным и распределенным (на каждый цилиндр) впрыскиванием во впускной трубопровод двигателя, системы с непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндры двигателя. Приведена история развития этих систем топливоподачи, схемы систем, разработанные ведущими зарубежными фирмами. Представлены подробные материалы по современным системам впрыскивания бензина в цилиндры двигателя. Рассмотрены основные элементы систем топливоподачи с впрыскиванием бензина и их систем управления: датчики режимных параметров, электронные блоки управления, электронно-управляемые форсунки. Проведен анализ перспектив дальнейшего совершенствования систем впрыскивания бензина.

В.С. Епифанов и Д.А. Попов (МГАВТ) выступили с докладом “Об оценке неравномерности вращения валопровода при пропусках вспышек в цилиндрах судового

газодизеля”. Отмечено, что пропуски вспышек в отдельных цилиндрах могут быть вызваны неисправностью топливоподающей аппаратуры, например секции ТНВД или форсунки, крутильными колебаниями валопровода и др. Оценка неравномерности вращения валопровода газодизеля проведена при следующих допущениях: вращающиеся и поступательно движущиеся массы кривошипно-шатунного механизма одинаковы для всех отсеков дизеля, а приведенные моменты инерции валопровода постоянны, рабочий процесс во всех цилиндрах газодизеля идентичен, моменты сил сопротивления и движущих сил зависят от угла п.к.в., моментами сопротивления в подшипниках двигателя можно пренебречь, при расчете выполняется преобразование Фурье, в результате которого подвергаются анализу гармоники крутящего момента до 12-го порядка. При идентичных рабочих процессах в цилиндрах неравномерность вращения коленчатого вала может быть вызвана резонирующими главными гармониками крутящего момента 3-, 6- и 9-го порядков. Показано, что при резонансе крутильных колебаний от гармоники возбуждающего момента 3-го порядка наблюдаются гармоники опрокидывающего момента в одноцилиндровом отсеке от 1-го до 7-го порядка. Для 6-цилиндрового рядного двигателя при симметричной схеме коленчатого вала наблюдается иная картина одноузловой формы крутильных колебаний. Амплитуда 5-й гармоники опрокидывающего момента увеличилась почти в 6 раз, а резонирующей 3-й гармоники сильно уменьшилась. Очевидно, что при расчете неравномерности вращения необходимо учесть влияние крутильных колебаний коленчатого вала и при пропусках вспышек в одном из цилиндров газодизеля использовать, например, зависимость, полученную авторами. Необходима экспериментальная проверка неравномерности вращения валопровода газодизеля при крутильных колебаниях в случае пропуска вспышек в отдельных цилиндрах.

В.В. Фурман (ООО “ППП Дизельавтоматика”, г. Саратов) выступил с докладом “Результаты эксплуатационных испытаний системы топливоподачи дизеля”. На протяжении нескольких лет на предприятии были разработаны системы электронного управления подачей как жидкого ДТ, так и газообразного (метан) топлива. В результате этого в 2011 г. были изготовлены такие системы для газового мотор-генератора на базе дизеля 12 ЧН 26/26 (для трактора К-700), работающего по газодизельному циклу, а также для дизеля Д50 тепловоза ТЭМ2. Системы электроуправляемой подачи ДТ и электронного управления подачей газообразного топлива дизеля Д50 успешно прошли эксплуатационные испытания в составе тепловоза ТЭМ2 и показали снижение среднеэксплуатационного расхода топлива не менее 20 % по сравнению со штатной системой топливоподачи. Снижены токсичность и дымность ОГ, уровень вибрации дизеля. В системе используются ТНВД, в которых изменение цикловой подачи топлива осуществляется с помощью электромагнитных клапанов. Газовый мотор-генератор с системой электронного управления газообразным топливом автоматически синхронизирован с городской электрической сетью и в настоящее время работает на городскую электросеть г. Радужного Владимирской обл., устойчиво обеспечивая требуемое качество электроэнергии. Система подачи газообразного топлива трактора К-700 наряду с электроуправляемой подачей газа с помощью электроуправляемых клапанов корректирует подачу запальной дозы ДТ с помощью установленного электронного регулятора частоты вращения в зависимости от режимов работы и автоматический переход с работы на ДТ на работу на газообразном топливе, и наоборот. Трактор с установленной системой успешно прошел испытания и передан заказчику для эксплуатации.

В докладе Б.П. Загородских, В.В. Володина, Е.В. Бебенина (СГАУ, г. Саратов) “Эжекционная система подачи газообразного топлива в автотракторные двигатели” отмечено, что в последнее время остро стоит проблема с поиском альтернативных видов топлива. Из рассмотренных видов топлива основным претендентом на массовое применение в автотракторной технике является природный газ (метан).

Представлены основные классы систем подачи газообразного топлива в двигатель, показаны их преимущества и недостатки. Рассмотрены проблемы образования качественной газозвушной смеси. Для решения этих проблем применен эффект эжекции, позволяющий осуществлять турбулентное смешение природного газа и воздуха. Разработан эжекционный смеситель, позволяющий повысить качество образования газозвушной смеси. Для использования принципа эжекции необходимо изменить способ подачи газообразного топлива. Газообразное топливо поступает в камеру сгорания не на протяжении всего такта всасывания при открытых впускных клапанах цилиндра, а кратковременным высокоэнергетическим импульсом в момент приближения поршня к своей нижней мертвой точке, что позволяет повысить коэффициент наполнения рабочей камеры цилиндра двигателя. Приведены результаты опытов, подтверждающие эффективность эжекционного смесителя. Представлена разработанная система распределенной (поцилиндровой) подачи газообразного топлива, оснащенная эжекционными смесителями и использующая импульсный принцип подачи газообразного топлива.

Статья поступила в редакцию 23.04.2012

Владимир Анатольевич Марков 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 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 окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания.

V.I. Shatrov 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.