

## **Всероссийский научно-технический семинар по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок имени профессора В.И. Крутова**

В январе 2003 г. в МГТУ имени Н.Э. Баумана состоялся очередной (78-й) Всероссийский научно-технический семинар (ВНТС) по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок, который был основан В.И. Крутовым в 1970 г.

Со вступительным словом выступил д-р техн. наук, профессор И.В. Леонов (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Докладчик отметил, что в МГТУ им. Н.Э. Баумана был проведен цикл работ по выявлению возможностей непосредственного впрыскивания в цилиндр дизеля смеси дизельного топлива и сжиженных пропан-бутановых газов, подаваемой в надплунжерную полость топливного насоса высокого давления (ТНВД). Однако топливная система дизельного топлива требует значительных конструктивных изменений для предотвращения повышенного износа плунжерных пар и нагнетательных клапанов, необходимо предусмотреть отвод газов во впускной трубопровод двигателя. При смешивании сжиженного газа в магистралях питания на линии низкого давления системы питания дизельным топливом возможно образование паровых пробок, появление которых можно предотвратить, охлаждая смесь непосредственно перед ТНВД и повышая давление подкачки дизельного топлива и сжиженного газа до значений, превышающих значения давления насыщенных паров сжиженного газа не менее, чем на  $0,15 \dots 0,2$  МПа. Однако недостаток такой системы смешивания топлива и газа — это ее повышенная пожарная опасность.

Таких недостатков лишены системы топливоподачи, в которых сжиженный газ вводится в линию высокого давления топливной системы с последующим впрыскиванием смеси сжиженного газа с дизельным топливом в камеру сгорания дизеля. Таким образом, изменения в конструкции самого дизеля и ТНВД отсутствуют, а переделка дизеля на работу со сжиженным газом может быть произведена даже при эксплуатации. В результате исследований, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, было спроектировано и изготовлено дозирующее сжиженный газ устройство — динамический смеситель топлива, для оценки работоспособности которого были проведены экспериментальные исследования на безмоторном стенде Motorpal NC-108, предназначенном для испытания топливных насосов. Испытания

подтвердили надежность работы смесительного устройства на стенде и целесообразность дальнейшего совершенствования системы непосредственного впрыскивания смеси топлива в цилиндр дизеля.

Преимущества подобной системы непосредственного впрыскивания в цилиндр дизеля смесей жидкого топлива и сжиженного газа состоят в минимизации изменений систем питания топливами, удобстве установки, обслуживания и низкой стоимости оборудования, а также, как показывают испытания, проведенные другими организациями, в значительном улучшении процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре и снижении токсичности отработавших газов (ОГ). Улучшение рабочего процесса дизеля и снижение токсичности ОГ объясняются тем, что при непосредственном впрыскивании в цилиндр дизеля смесей жидкого топлива и сжиженного газа имеет место более мелкое и однородное распыливание благодаря мгновенному испарению из смеси топлива сжиженного газа. При этом снижение температуры в факеле в начальный момент сгорания в результате использования теплоты парообразования сжиженных газов дает дополнительный эффект, задерживающий образование оксидов азота на первой стадии сгорания.

В будущем ожидается более широкое распространение транспортных дизелей, способных работать на сжиженных газах и других нетрадиционных топливах, обеспечивающих при этом более высокие эксплуатационные показатели.

С докладом “Использование опыта Норвегии в создании судовых энергетических установок, работающих на сжиженном природном газе”, выступил В.И. Толшин (МГАВТ). Он отметил, что имеется две правомерные тенденции в создании двигателей, работающих на природном газе: применение газовых двигателей с искровым зажиганием и газовых дизелей. В обоих случаях достигается высокий КПД (51...52%). На пароме GLUTRA применен газовый дизель с форкамерой. Разработанная фирмой MARINTEK и заводом Вяртсилля конструкция форсунки позволяет уменьшить порцию запального дизельного топлива газового дизеля до 1,0...1,5% и соответственно снизить его расход. Системы автоматики, пожаро- и взрывобезопасности, хранения и подачи газа потребовали повышения квалификации обслуживающего персонала, количество которого не увеличилось.

Испытания, проведенные фирмой MARINTEK, показали, что благодаря высокой однородности смеси в камере сгорания достигается уменьшение выбросов основного токсичного компонента — оксидов азота — до уровня 1 г/(кВт·ч), что отвечает современным требованиям к токсичности ОГ. КПД двигателя при этом не снижается по сравнению с дизелем.

Расчеты, проведенные для судов типа “Волга-Нефть” водоизмещением 5000 т, показали, что окупаемость при переводе энергоустановок этих судов на сжиженный газ достигается за четыре-пять лет. При этом двигатели, работающие по газовому или газодизельному циклам, позволяют снизить токсичные выбросы ОГ до уровня, соответствующего требованиям 2005–2006 гг.

Безаппаратным методам контроля выбросов оксидов азота среднеоборотных судовых дизелей посвящено выступление В.И. Толшина и Д.Б. Амбросова (МГАВТ). Ввиду дороговизны приборов и средств оценки вредных выбросов традиционными методиками, на морском флоте уже выполнены работы по безаппаратным методам контроля на основе определения давления сжатия, максимального давления сгорания и угла опережения впрыскивания топлива. Исследования, проведенные в МГАВТ на двигателях 6Ч18/22 и 6Л160PNS, показывают, что для среднеоборотных дизелей важным показателем является величина, равная частному от деления количества теплоты, подводимой в период быстрого сгорания, к общему количеству теплоты, выделившейся при сгорании цикловой подачи топлива.

В МГАВТ была разработана математическая модель совместной работы дизеля 6Л160PNS с турбокомпрессором без охлаждения наддувочного воздуха с расчетом температуры в локальной зоне. Методика учитывает расходные и экономические характеристики турбины и компрессора при проверке правильности выбора эксплуатационных характеристик.

Определению оптимальных параметров электрогидравлической форсунки (ЭГФ) с обратными связями в управлении посвящен доклад Ф.И. Пинского и К.В. Ефимова (МГТУ “МАМИ”). С целью повышения быстродействия ЭГФ, снижения потерь энергии на управление, а также применения ЭГФ, обеспечивающих современные экологические требования в дизельных двигателях, была разработана конструкция с двухзатворным управляющим клапаном, электромагнитным приводом двойного действия и обратными связями в управлении.

Для поиска оптимальных конструктивных параметров ЭГФ была составлена математическая модель для форсунки с двухзатворным клапаном и двумя электромагнитами. На основании полученных при компьютерном моделировании данных можно сделать следующие выводы:

- время перемещения иглы, измеренное по переднему и заднему фронтам характеристики движения, составляет не более 0,1 мс;
- допустимые значения длины хвостовика поршня форсунки, при которых обеспечивается устойчивое впрыскивание топлива в цилиндр двигателя, лежат в пределах от 4,50 до 4,54 мм;
- при длительности импульса от 0,06 до 0,1 мс характеристика

цикловой подачи топлива имеет всплеск (экстремум) в районе 0,08 мс. Появление отрицательной производной на характеристике цикловой подачи вызвано влиянием инерционных сил при малой длительности управляющего импульса. Уменьшая массу управляющего клапана с 15 до 7 г и увеличивая электромагнитную силу с 200 до 400 Н, подобный негативный эффект удастся полностью устранить.

В докладе Л.В. Грехова, В.В. Фонова и Д.Н. Калинина (МГТУ им. Н.Э. Баумана) приведены результаты расчета параметров электроуправляемых форсунок для аккумуляторных систем Common-Rail.

Электромеханические форсунки с разгружающим плунжером просты в изготовлении, не имеют потерь на управление, однако имеют неудовлетворительную характеристику подачи (участок с отрицательной производной) и узкий диапазон работоспособности.

У форсунок с управлением подачей топлива в распылитель основным недостатком является установка управляющего элемента в канале питания распылителя, по которому проходит большой сквозной расход топлива, что снижает давление впрыскивания.

Среди ЭГФ наилучшие показатели имеют форсунки с отрицательными обратными связями, наличие которых позволяет при минимальном усложнении конструкции получить более высокие технические показатели, включая давление впрыскивания, быстроту срабатывания. Исследование показало, что при использовании обратной связи расход топлива на управление составляет 8,4 мг, а без нее — 10,33 мг при давлении впрыскивания 107 МПа. Весьма перспективны ЭГФ с двухзатворными клапанами, которым присущи достоинства трехпозиционных золотников, а также отсутствие утечек через управляющий орган, практически линейная характеристика подачи и малая минимальная цикловая подача топлива. Экспериментальному исследованию ЭГФ посвящено выступление Ю.Е. Драгана (ФГУП «НИКТИД», г. Владимир). Докладчик отметил, что продолжается работа по созданию аккумуляторной топливной системы для дизеля ЗМЗ 514.10. Особое внимание уделяется разработке силовой электроники для электромагнитного управляющего клапана (ЭМК) электрогидравлической форсунки. Разработана электрическая схема, изготовлен и введен в эксплуатацию макетный образец блока силовой электроники, включающий блок питания высокого напряжения, блок высоковольтных транзисторных ключей и низковольтный формирователь сигналов управления (ФСУ) с оптической развязкой. Разработаны и осуществлены меры защиты низко- и высоковольтных электрических цепей. Блок силовой электроники реализует форсирующие, удерживающие и размагничивающие импульсы управления ЭМК ЭГФ. В перспективе функции ФСУ будет выполнять микроконтроллер.

В результате проведенных на безмоторном стенде исследований макетного образца ЭГФ, оснащенного датчиками перемещений якоря ЭМК и иглы распылителя, определены показатели быстродействия форсунок. Наименьшая длительность подъема якоря ЭМК на 0,1 мм в топливе составила 0,35 мс. Наименьшая длительность подъема иглы распылителя на 0,1 мм при давлении топлива в аккумуляторе 60 МПа не превысила 0,3 мс, а посадки — 0,25 мс. При повышении давления эти длительности будут сокращаться. Ограничения давления вызваны низкой надежностью толкателей ТНВД. В настоящее время завершается подготовка ТНВД с принципиально новой конструкцией толкателей. Это позволит снять ограничения на давление топлива в аккумуляторе.

Исследования подтвердили, что без функции размагничивания невозможно эффективно управлять процессом топливоподачи и осуществлять многофазное впрыскивание, в частном случае, предварительное впрыскивание топлива.

Выбору расположения электромагнитного перепускного клапана в магистрали высокого давления топливной системы двигателя ЧН 26/26 на основе аналитического исследования посвящен доклад С.А. Капитонова (ОАО “Коломенский завод”). На Коломенском заводе ведутся работы по созданию электронной системы топливоподачи с управлением перепуском для двигателей ряда Д49 на базе штатной топливной системы. Одной из важнейших задач на начальном этапе проектирования является определение влияния места расположения перепускного клапана в магистрали высокого давления на параметры топливоподачи и на основе этого выбор общей компоновки топливной системы. На основе математической модели Ю.Я. Фомина, описывающей работу гидромеханической топливной системы, разработана модель топливной системы с управлением перепуском. Расчеты показали, что при смещении перепускного клапана в сторону форсунки могут возникнуть условия для появления гидравлического удара, что может привести к понижению максимального и среднего давления впрыскивания. Однако при расположении электромагнитного клапана на расстоянии до 215 мм от надплунжерной полости отрицательного влияния волновых явлений на топливоподачу при моделировании установлено не было.

Результатом работы стали рекомендации по расположению электромагнитного клапана в магистрали высокого давления топливной системы двигателя Д49 и величине перепускного отверстия.

В докладе “Задачи и алгоритмы работы обучающихся контуров МСУ ДВС”, представленном Б.Я. Черняком, И.А. Лещенко, К.А. Амановым, С.В. Вошанкиным, А.Ю. Сковорода-Лузиным и А.Б. Смирновым (ГТУ “МАДИ”) рассмотрены возможные пути построения само-

настраиваемых систем управления автомобильными двигателями. Приведены результаты экспериментального исследования и моделирования при построении систем с самообучающимися матрицами для управления на статических режимах и с обучающимися динамическими моделями для коррекции управления в переходных процессах.

В докладе К.А. Аманова (ГТУ "МАДИ") рассмотрена новая методика калибровки базовых матриц микропроцессорных систем управления ДВС при шести-семи связанных управляющих воздействиях. Представлены обоснование, аппарат и последовательность решения задачи, а также результаты проверки нового метода калибровки на модели двигателя с многопараметрическим управлением.

В докладе "Смесеобразование в дизеле — процесс, определяющий эффективность его работы" С.Н. Девянина, Е.Г. Пономарева (НПП "Агродизель"), В.А. Маркова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрены особенности различных типов смесеобразования, реализуемые в дизелях транспортного и автотракторного назначения. Качество организации и протекания процесса смесеобразования определяет процесс последующего выгорания топлива и, следовательно, эффективность рабочего процесса дизеля. В качестве такого комплексного параметра оценки процесса смесеобразования предлагается выбрать коэффициент избытка воздуха с учетом ограничений по дымности ОГ и длительности рабочего такта. При этом коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  на номинальном режиме работы двигателя изменяется от значений  $\alpha = 1,1 \dots 1,3$  у дизелей с предкамерным и вихрекамерным смесеобразованием до значений  $\alpha = 1,6 \dots 2,0$  у дизелей с объемным смесеобразованием. В первом случае удельный индикаторный расход топлива достигает  $200 \dots 260$  г/(кВт·ч), а во втором случае снижается до значения  $160 \dots 175$  г/(кВт·ч).

Применение отдельных камер сгорания (КС) обычно приводит к уменьшению токсичных компонентов. Вместе с тем, у дизелей с объемным смесеобразованием большие значения коэффициента избытка воздуха обуславливают значительное содержание кислорода в их ОГ (до  $10 \dots 18$  %), что создает предпосылки для эффективной очистки ОГ от токсичных компонентов.

Перспективными с точки зрения топливной экономичности являются дизели с полуразделенными и неразделенными КС и преобладанием объемного смесеобразования, в которых обеспечивается меньшая поверхность КС и лучшее теплоиспользование.

Интенсификация процесса топливоподачи и управление им рассматриваются в качестве неперемных условий получения высоких экономических и экологических показателей дизелей с объемным смесеобразованием. Максимальные давления впрыскивания топлива уже пе-

решили рубеж 100 МПа, и планируется выпуск топливной аппаратуры с давлением впрыскивания порядка 200 МПа. Основная цель повышения давления впрыскивания — улучшение мелкости распыливания.

Отмечено, что в транспортных и автотракторных дизелях с полуразделенными и неразделенными КС необходимо управление параметрами и характеристиками процессов топливоподачи и смесеобразования. При этом нужно обеспечить формирование оптимизированных характеристик цикловой подачи топлива, управление УОВТ, корректирование закона подачи и характеристик струй распыляемого топлива. В заключение представлен обзор конструкций дизельных форсунок, обеспечивающих указанные функции. Рассмотрены некоторые конструкции форсунок, предложенных авторами доклада.

“Моделирование разрушения капли жидкости, движущейся в потоке газа” — тема выступления А.Ю. Абалева (ВлГУ). В современных математических моделях, предназначенных для расчетов в трехмерной постановке процессов смесеобразования и сгорания в дизелях, используются достаточно сложные модели разрушения капли топлива под воздействием набегающего потока газа, а именно, моделирование разрушения капли на основе распространения сферических волн Кельвина–Гельмгольца и представление капли как двухмассовой колебательной системы. Предлагаемая модель разрушения капли жидкости отличается достаточной простотой и низкими требованиями к вычислительным ресурсам. Это позволяет увеличить скорость расчета процессов смесеобразования и сгорания в трехмерной постановке с сохранением требуемой точности.

Доклад Г.В. Еремина и Ю.Е. Хрящева посвящен направлениям модернизации традиционной топливной аппаратуры ОАО “ЯЗДА”. Приведен комплекс научно-технических мероприятий по модернизации топливоподающей аппаратуры с целью выполнения Правил ЕЭК ООН № 49-02В (EURO-2) и ЕЭК ООН № 49-03 (EURO-3) по ограничению вредных выбросов в атмосферу. Такая модернизация, направленная на повышение давления впрыскивания топлива, точности регулирования и дозирования топливоподачи, осуществляется путем изменения конструкции, подбора новых материалов, термообработки деталей и внедрения электронного управления нагрузочно-скоростными режимами и моментом начала впрыскивания.

В докладе Ю.Е. Хрящева и О.А. Гусева (ОАО “ЯЗДА”) рассматривается улучшение эксплуатационной топливной экономичности автомобильных дизелей благодаря оптимизации переходных процессов с помощью микропроцессорных систем управления (МПСУ) и традиционной топливной аппаратуры. Для определения параметров алгоритма управления создана математическая модель дизеля как объекта управ-

ления, которая состоит из известных уравнений двигателя, топливной аппаратуры и уравнений электромагнитного привода. С целью уточнения расчетов переходных процессов использовалась математическая модель процесса сгорания, за основу которой была принята математическая модель профессора Н.Ф. Разлейцева, уточненная для дизелей типа ЯМЗ и КамАЗ.

Базовые характеристики разработанного алгоритма обеспечивают однозначную связь “педаль акселератора–частота вращения”. Управление переходными процессами производится по ПИД-алгоритму. Для определения значений коэффициентов алгоритма проведена оптимизация.

Для определения эффекта снижения эксплуатационного расхода топлива была разработана специальная методика, позволяющая сравнивать расходы топлива в переходном процессе. Для дизелей размерности 1,3...2,2 л расход топлива в условиях городского движения снизился на 8 % по сравнению с всережимным регулятором.

Разработанные алгоритмы управления нагрузочно-скоростными режимами автомобильного дизеля могут быть осуществлены только с помощью электронных систем управления. Для настройки и доводки электронных систем управления создан ряд отладочных комплексов, позволяющих производить эти работы на разных стадиях. Проведенные испытания на ОАО “ЯЗДА” и ОАО “КамАЗ” подтвердили преимущества электронной системы перед механической и показали возможность внедрения электронных систем в практику.

“Разработка электромагнитных исполнительных механизмов для систем автоматического регулирования (САР) и других электронных систем управления автомобильных дизелей” — тема выступления Ю.Е. Хрящева, С.В. Овчинникова, Р.О. Антошина (ЯГТУ). Авторами предложена методика проектирования электромагнитных исполнительных механизмов электронных систем управления топливоподачей, построенная на основе использования метода конечных элементов. Разработанная методика позволяет оптимизировать конструкцию любого электромагнита, используемого в электронных системах управления частотой вращения дизеля.

“Системы мониторинга дизеля дорожно-строительной машины” — тема доклада П.В. Федорова, Э.Н. Федоровой (РГАЗУ), С.В. Трофимова, С.Н. Вознюка, И.Л. Савченко, П.И. Шерешова (ВТУ). Авторами разработана математическая модель движения колесного бульдозера при взаимодействии его рабочего органа с грунтом, установлены основные функциональные связи в динамической системе “машина–среда (грунт, почва)–дизель”. Доказано, что эффективность работы землеройно-транспортной машины (ЗТМ) может быть значительно по-



вышена за счет преимущественного использования дизеля в зоне наименьших регулярных и случайных динамических потерь при выполнении заданных режимов работы. Обоснован новый способ мониторинга эффективной мощности дизеля ЗТМ при непрерывной регистрации затраченной дизелем работы. Разработаны и испытаны принципиально новые устройства на основе современной электронной базы, которые могут быть применены для измерения энергетических параметров дизелей ЗТМ спектра тяговых классов от 25 до 250 кН.

Другой доклад тех же авторов посвящен исследованиям и разработке бортовых автоматических систем диагностики (БАСД) дизелей землеройно-транспортных машин. В результате исследований было создано многофункциональное устройство для непрерывного мониторинга состояния моторно-трансмиссионной установки ЗТМ с целью обеспечения ее высокой надежности, оптимальной производительности и аварийной защиты агрегатов.

Для решения поставленной задачи обоснованы параметры автоматического контроля технического состояния ЗТМ. Проанализировано более 50 различных устройств БАСД зарубежных и отечественных тракторо- и автомобилестроительных фирм.

В результате была обоснована целесообразность и достаточность автоматического контроля 30 параметров технического состояния ЗТМ, обеспечивающих ее высокую эксплуатационную надежность. Разработаны блок-схема 100-шагового алгоритма автоматического контроля, программа для бортовой ЭВМ, реализующая данный алгоритм, и комплекс технических устройств, обеспечивающих функционирование всей системы БАСД.

В результате предварительных испытаний упрощенного макетного образца БАСД были разработаны технические требования к системам контроля и мониторинга технического состояния современных дорожно-строительных машин.

Обзорным материалам по безопасности судна при работе главных двигателей на сжиженном природном газе посвящено выступление В.С. Епифанова (МГАВТ). Отмечено, что для безопасности судов, работающих на сжиженном природном газе, в местах возможных утечек газа и нарушения нормальной работы механизмов используются первичные преобразователи в виде сигнализаторов присутствия метана, датчиков давления и температуры и др. Приборы и автоматика, системы управления и текущего надзора основаны на использовании компьютера.

Исследованию электрогидравлических исполнительных механизмов с электромеханическим преобразователем (ЭМП) электромагнитного типа и подвижной катушкой посвящено выступление Б.П. Коло-

сова (ОАО “ДиМикроС”, Коломна). Отмечается, что в практике ОАО “ДиМикроС” до недавнего времени применялся поворотный электромагнит, использовавшийся в электрогидравлических исполнительных механизмах (ЭГИМ) с силовой обратной связью, в которых сила, примерно пропорциональная управляющему току (получаемая с использованием функционального преобразователя для выпрямления тяговой характеристики), уравнивается силой пружин обратной связи. В этих ЭГИМ реализовано двухкаскадное усиление. Опыт эксплуатации таких ЭГИМ на тепловозах показал, что, несмотря на длительную доводочную работу, избежать отказов, вызванных нарушением настройки, не удалось. Тем не менее, учитывая достаточно высокие динамические показатели, работы по ЭГИМ такого типа продолжают и до настоящего времени.

Начаты работы по разработке ЭГИМ с ЭМП с подвижной катушкой, позволяющей исключить первый каскад гидроусиления, что повышает надежность исполнительного механизма. Отработанный вариант ЭМП с ходом до 17 мм, работоспособностью 0,7 Дж пока не нашел применения, но возможно он будет использован в газовых дизелях.

В дискуссии по докладам активное участие приняли профессора Л.Н. Голубков, Л.В. Грехов, И.В. Леонов, В.А. Марков, Ф.И. Пинский, В.И. Толшин, Ю.Я. Хрящев, Б.Я. Черняк.

*Ученый секретарь ВНТС,  
канд. техн. наук В.И. Шатров*