

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ И РЕГУЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ИМ. В.И. КРУТОВА

В МГТУ им. Н.Э. Баумана 2 февраля 2005 г. состоялось юбилейное, 80-е заседание Всероссийского научно-технического семинара (ВНТС) по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок, основанного В.И. Крутовым в 1970 г.

Председательствующий д-р техн. наук, проф. В.А. Марков (МГТУ им. Н.Э. Баумана) во вступительном слове отметил важность исследований, направленных на адаптацию двигателей внутреннего сгорания (ДВС) к работе на альтернативных видах топлива. Это обусловлено истощением мировых запасов нефти и повышением цен на моторное топливо. Еще одним фактором, вызывающим необходимость замены традиционного дизельного топлива альтернативными топливами, является резко ухудшающаяся экологическая обстановка и постоянно ужесточаемые требования к токсичности отработавших газов (ОГ) ДВС, ограничивающие предельные выбросы вредных веществ в атмосферу. Особую значимость в настоящее время приобретает законодательное ограничение выбросов углекислого газа в окружающую среду. Это объясняется заметным повышением его концентрации в атмосфере, вызванным быстрым ростом промышленного производства и резким увеличением количества транспортных средств. Углекислый газ не оказывает токсического действия на организм человека, но при его повышенном содержании в атмосфере создается парниковый эффект, приводящий к так называемому “тепловому загрязнению”. Вследствие этого явления повышается температура воздуха в нижних слоях атмосферы, происходит глобальное потепление, особенно заметное в крупных городах, наблюдаются различные климатические аномалии. Эти факторы также вынуждают двигателестроителей искать замену традиционным нефтяным моторным топливам. Еще одной актуальной проблемой является разработка систем диагностики дизелей, которые пока не нашли широкого распространения в отечественных автомобильных и тракторных дизелях. Однако при установке на ДВС электронных систем управления появляется возможность диагностики и самодиагностики различных систем дизелей и выявления их основных неисправностей. Таким образом, системы диагностики становятся неотъемлемой частью комплексных систем управления ДВС.

Далее в соответствии с планом работы семинара был заслушан 21 доклад.

С докладом “К вопросу о требованиях к контроллеру управления подачей топлива в дизельном двигателе” выступили Н.В. Путеев, В.А. Павлов (ОАО “НЗТА”) и В.А. Марков (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Специалистами НЗТА ведутся работы по созданию электронной системы управления (ЭСУ) дизелями на базе моноблочного насоса (столбикового, насос-форсунки) с управлением подачей клапанами-дозаторами, с напряжением питания 12, 24, 42 В. В состав ЭСУ входят датчики информации о состоянии двигателя, контроллер, исполнительные устройства, а также устройства тестирования, калибровки и визуального контроля информации. Контроллер является

самым сложным узлом ЭСУ и предназначен для управления клапанами-дозаторами в целях формирования требуемых характеристик момента начала и длительности подачи, исходя из текущих значений параметров двигателя и настроек ЭСУ. Также должна обеспечиваться диагностика внутренних и внешних цепей системы. Контроллер работает на основе информации от датчиков частоты вращения и угла поворота коленчатого вала, температуры и давления воздуха, температуры охлаждающей жидкости и топлива, давления наддувочного воздуха, положения педали управления и др. Обработав информацию от датчиков, контроллер обеспечивает управление клапанами-дозаторами, реле питания, блокировкой стартера, устройством облегчения пуска, аварийным отключением подачи топлива и другими устройствами. Состав ЭСУ и выполняемые системой функции определяются назначением мобильной машины. Требования по температурным, вибрационным, электрическим и другим режимам определяются также стандартами на изделие, на котором установлен двигатель. Поскольку контроллер является электронно-программируемым узлом, разработке подлежит и программное обеспечение. Алгоритм и программа работы контроллера должны быть доступны в равной степени изготовителю контроллера, изготовителям топливной системы и двигателя. При диагностике и сервисном обслуживании запоминающее устройство (ЗУ) должно допускать обновление программного обеспечения и калибровочных таблиц.

Конструкция контроллера включает в себя: узел предварительной обработки информации от датчиков; вычислительное устройство с ЗУ; преобразователь напряжения для обеспечения энергией клапанов-дозаторов топлива; узлы управления работой клапанов-дозаторов топлива и вспомогательных исполнительных устройств; таймер и барометрический датчик; последовательный канал связи с устройствами диагностики по стандарту ISO; последовательный канал связи CAN; стабилизационный источник питания и др. Режим работы топливной системы в составе дизеля выявил несколько серьезных проблем. Одна из них – работоспособность силовых ключей, особенно при низкотемпературном пуске двигателя. В этих условиях при электромагнитном приводе дозирующих клапанов должны обеспечиваться токи форсировки около 30 А, а токи удержания – 10...15 А. Также необходимо дублирование функций, нарушение которых ведет к аварии ДВС. Все указанные требования должны быть выполнены при важнейшем ограничительном условии – приемлемой рыночной цене топливной системы с ЭСУ.

“Способ формирования управляющих воздействий для базовых программ управления дизелями, оснащенными системами Common-Rail” – тема выступления Л.В. Грехова и А.С. Кулешова (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Авторами предложена технология замены дорогостоящей и трудоемкой операции калибровки при создании программ оптимального управления на формирование базовой программы управления с использованием результатов компьютерной оптимизации рабочих процессов (РП). Углубленная технологическая цепочка работ по созданию программ управления содержит: 1 – формирование ТЗ на систему управления (СУ); 2 – идентификацию математической модели; 3 – оптимизацию РП на каждом режиме нормируемого цикла; 4 – вычисление функции цели по всем режимам; 5 – проверка на соответствие экологическим нормам (в отрицательном случае – оптимизация РП по конструктивным параметрам и возврат к п. 3); 6 – формирование полей управляющих воздействий; 7 – натурное калибрование по нескольким контрольным точкам (проверка и уточнение) и специфическим режимам (пуск, холостой ход, переходные режимы). Отработка программ управления может иметь продолжение – самообучение на объекте. Тогда снижаются требования к точности моделей и программ, но повышается эффективность СУ. Ключевые этапы 2–6 выполняются с использованием математического моделирования РП. В работе используется апробированный на десятках дизелей программный комплекс

“Дизель-РК”, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В рассмотренном примере оптимизация параметров управления велась в поле частот и нагрузок дизеля для ограниченного числа контрольных точек нормативов ЕЭК ООН по минимуму целевой функции, отражающей величину удельных выбросов твердых частиц и оксидов азота относительно нормируемых. При выборе расчетных точек принимались во внимание ограничения по максимальному давлению сгорания и давлениям впрыскивания топлива, а также дополнительный критерий — удельный расход топлива. Получены поля оптимальных давлений впрыскивания, момента начала и продолжительности подачи.

Ю. Е. Хрящёв, Е.Ф. Скурыгин и М.В. Тихомиров (ЯГТУ) представили доклад “Об устойчивости алгоритмов регулирования частоты вращения коленчатого вала автомобильного дизеля”. При помощи математической модели системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) коленчатого вала автомобильного дизеля, оснащенного цифровым (дискретным) регулятором и электромагнитным исполнительным устройством, управляемым с помощью цифрового ПИД-регулятора, исследованы причины неустойчивой работы и проведен параметрический анализ влияния внутренних факторов. Запас устойчивости системы существенно зависит от суммарного времени запаздывания двигателя и исполнительного механизма. Приведены оценки критического времени запаздывания для различных параметров регулятора частоты вращения коленчатого вала. Путем прямого численного моделирования переходных процессов показано преимущество модифицированного ПИД-регулятора.

Методика оценки расхода топлива и токсичности ОГ дизеля на неустановившихся режимах рассмотрена в докладе А.Г. Кузнецова, В.А. Маркова, В.И. Шатрова, Е.Е. Полухина, М.И. Шленова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и В.В. Фурмана (ППП “Дизельавтоматика”, г. Саратов). В наиболее характерных переходных процессах транспортных дизелей турбокомпрессор системы турбонаддува не успевает своевременно увеличить подачу воздуха в соответствии с быстрым увеличением подачи топлива. Это вызывает кратковременное снижение коэффициента избытка воздуха α , неполное сгорание топлива, ухудшение экономических, экологических и динамических качеств дизеля. Методики расчета переходных процессов транспортных дизелей достаточно полно разработаны в трудах отечественных ученых: Г.Г. Калиша, В.И. Крутова, А.М. Каца, Н.Н. Настенко, М.И. Левина, В.И. Толщина, И.И. Кринецкого, А.А. Грунауэра и ряда других исследователей. Они позволяют оценить изменение параметров дизеля в переходных процессах и его динамические качества. Но, как правило, в этих методиках остаются неопределенными удельный расход топлива и выбросы токсичных компонентов ОГ. Для оценки указанных параметров в переходных процессах предлагается методика, базирующаяся на анализе характеристик расхода топлива и содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов (оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , легких углеводородов C_nH_x , а также сажи), полученных на установившихся режимах работы в условиях моторного стенда, и на их корректировке с учетом отличий значений коэффициента избытка воздуха α на установившихся и неустановившихся режимах работы дизеля. Проведенные расчетные исследования показателей топливной экономичности и токсичности ОГ транспортного дизеля типа КамАЗ-740 подтвердили эффективность предложенной методики и возможность ее использования для практических расчетов экономических и экологических показателей в наиболее характерных для транспортных дизелей переходных процессах.

Тема доклада А.Б. Смирнова (ГТУ “МАДИ”) — “Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) в задачах идентификации двигателя как объекта управления”. Задача управления — поддержание стехиометрического состава смеси бензинового двигателя, оснащенного электронной системой распределенного впрыскивания

топлива, с точностью в 2% на динамических режимах его работы. Способ управления — посредством влияния на продолжительность открытия форсунки с помощью программно реализованного динамического корректора топливоподачи (ДКТ). В докладе проведен анализ уже разработанных подходов к решению задачи идентификации параметров ДКТ на одном динамическом режиме работы двигателя, который характеризуется постоянной амплитудой перемещения дроссельной заслонки: непосредственная настройка параметров стандартного ДКТ на двигателе, настройка параметров стандартного ДКТ по одной записи переходного процесса. Рассматривается возможность использования ИНС для подбора параметров стандартного ДКТ, а также ее использование непосредственно в качестве ДКТ на одном (произвольном) динамическом режиме работы двигателя. Проверены на расчетном эксперименте различные методики подбора структуры и обучения ДКТ на основе ИНС в процессе работы двигателя. Предложены пути дальнейшего решения задачи получения структуры нейронного ДКТ и его обучения для всего поля режимов работы двигателя.

Частотно-импульсному регулированию промышленных дизельных двигателей методом отключения циклов цилиндров было посвящено выступление Б.Е. Поликера, Л.Л. Михальского (ЗАО “Дизель-КАР”), С.А. Аникина (РусПромАвто), В.А. Котенко, В.А. Микляева, В.Л. Максимова (ВНК МО РФ), В.С. Сутормина, И.А. Емельянова (15 ЦНИИИ МО РФ), Д.Н. Шевченко (ВИУ МО РФ), В.А. Самсонова (МГАУ им. В.П. Горячкина). Авторы представили способ и устройство дискретно-частотно-импульсного регулирования эффективной мощности силового агрегата, состоящего из дизеля и генератора переменного тока. С помощью разработанных способа и устройства осуществляют частотно-импульсное управление процессом впрыскивания топлива в цилиндры на основе оптимизированной цикловой подачи, согласованной с расходом воздуха, определяемым скоростным режимом. Частота впрыскивания топлива определяется внешней электрической нагрузкой электроагрегата. При снижении требуемой мощности, соответствующей текущему режиму внешней нагрузки, в результате регулирования топливоподачи увеличивается частота пропусков тактов впрыскивания топлива в цилиндры двигателя. Таким образом, закон регулирования обеспечивает: неизменность (постоянство) частоты вращения коленчатого вала, цикловой подачи топлива в цилиндры дизеля, оптимального коэффициента избытка воздуха в работающем цилиндре по выбранному критерию. В результате появляется возможность повысить эффективность работы дизеля совместно с электрогенератором путем обеспечения повышенной точности и надежности регулирования параметров топливоподачи на всех режимах и снизить токсичность ОГ.

В докладе Е.Ф. Позднякова и А.П. Бурова (ОАО “Форант-Сервис”, г. Ногинск) представлены результаты разработки и исследования регулятора частоты вращения дизельэлектрического агрегата АД-40, обеспечивающего показатели, заведомо удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к регуляторам 1-го класса точности. Так максимальный заброс частоты генератора при изменении нагрузки на 100% при использовании разработанного регулятора составил менее 3% (по ГОСТ 10511-83 — не более 5%); время переходного процесса наброса нагрузки — менее 0,5 с (по ГОСТ 10511-83 — не более 5 с); максимальная нестабильность частоты вращения — менее 0,2% (по ГОСТ 10511-83 — не более 0,6%). Обеспечение таких технических характеристик стало возможным благодаря применению разработанных электрогидравлического исполнительного механизма и оригинального дифференцирующего усилителя. На основе математических моделей элементов была разработана программа, позволяющая рассчитывать динамические характеристики основных элементов САРЧ, а также анализировать их динамические свойства и характер взаимодействия в реальном масштабе времени. Разработанная программа позволяет значительно сократить сроки проектирования подобных регуляторов и для других типов дизельных электроагрегатов.

“Система управления транспортным двигателем с лазерно-искровой системой зажигания” — тема доклада В.И.Ерохова и А.М.Ревонченкова (МГТУ “МАМИ”). Повышение топливной экономичности и снижение вредных выбросов транспортно-го двигателя имеет важное научно-техническое и социально-экономическое значение. Одно из основных направлений решения сложных взаимосвязанных вопросов состоит в применении альтернативных видов топлива, максимально возможного обеднения горючей смеси и надежного ее воспламенения. В работе рассмотрены микропроцессорная система управления двигателем с лазерно-искровой системой зажигания, а также технические средства контроля параметров лазерно-искровой системы зажигания на стадии ее разработки и испытаний. Технической особенностью приведенной системы зажигания горючей смеси является лазерно-искровая свеча с полупроводниковым лазером, содержащая известные оптические компоненты отечественного производства. Достижимый эффект связан с улучшением подготовки химических реакций в межэлектродном зазоре лазерно-искровой свечи зажигания. Система управления включает в себя микропроцессорную систему зажигания типа МС 4004, объединяющую функции контроллера и коммутатора. Через согласующее устройство к микроконтроллеру подключено устройство управления полупроводниковым лазером. Устройство состоит из формирователя тока управления лазером, выполненного на микросхемах, и выходного каскада на мощных составных транзисторах. Для управления импульсами полупроводникового лазера в соответствии с режимом работы ДВС на вход микроконтроллера подается сигнал с датчика положения коленчатого вала двигателя (КВ). С выхода микроконтроллера сигнал поступает на устройство формирования импульсов лазерного подогрева (УФИЛП). Также на УФИЛП подается сигнал с фотоприемника устройства регистрации факта воспламенения. В зависимости от силы сигнала воспламенения, импульсы лазерного подогрева изменяются по длительности и временному сдвигу по отношению к моменту искрообразования. Сформированные таким образом импульсы подаются на лазерную свечу. Расчетным путем проведена оценка динамических параметров процесса воспламенения в зависимости от конструкторско-технологических параметров лазеров с различными мощностями и составом горючей смеси. Расход газового топлива автомобиля с экспериментальной системой при работе в соответствии с ездовым циклом составил 12,1 л на 100 км (6,5 кг на 100 км), что на 12...15% меньше по сравнению с традиционными системами. В работе также сформулирована методология проектирования и расчета базовых компонентов системы управления лазерно-искровой системы зажигания современных двигателей с электронным впрыскиванием газового топлива и бензина.

С докладом “Разработка и создание электронных терморегуляторов для системы охлаждения ДВС” выступил В.Н.Тимофеев (Чувашский ГУ). Основным вопросом при создании термостатов является повышение их надежности, безопасности и экономичности. Современный уровень развития микроэлектроники позволяет обеспечить малые габаритные размеры, массу и высокую надежность электронных блоков управления, датчиков и исполнительных механизмов в сложных условиях эксплуатации, например, в судовых дизелях. Основными элементами электронных термостатов являются электрический исполнительный механизм, электрические датчики температуры и нагрузки, задачник, блок сравнения и электронный блок управления. В качестве электрического исполнительного механизма, установленного вне охлаждающей среды, используются электронагреватель, термоэлектрический элемент и серводвигатель. Основной задачей быстродействующего исполнительного механизма является выполнение алгоритма регулирования по открытию и закрытию клапанов термостата. При этом электронагреватель и термоэлектрический элемент воздействуют на шток с клапанами через твердый наполнитель, а серводвигатель через редуктор непосредственно связан со штоком терморегулятора. В зависимости

от требований к тепловому режиму дизеля задатчик, связанный с блоком сравнения, устанавливается на заданные температурные режимы. Сигнал от датчика температуры подается в блок сравнения. Одновременно импульс от датчика нагрузки подается на задатчик, где в соответствии с заданным законом формируется сигнал, поступающий на блок сравнения. При сопоставлении сигналов, поступающих от датчика температуры и задатчика, в блоке сравнения происходит вычисление регулирующего сигнала, который поступает в электронный блок управления. Таким образом, сигнал, формирующийся на выходе блока управления, зависит от отклонений как регулируемой температуры, так и текущего значения нагрузки (мощности). Это позволяет использовать комбинированное регулирование, уменьшить время запаздывания и повысить показатели качества регулирования электрического терморегулятора на всех режимах работы дизеля. Так, на режимах холостого хода и частичных нагрузок можно поддерживать более высокую температуру охлаждающей жидкости. При номинальной нагрузке с помощью термостата с электронным управлением целенаправленно устанавливается более низкая температура охлаждающей жидкости. Применение термоэлектрических установок в качестве отопительных агрегатов не требует каких-либо громоздких специальных устройств, переход с режима охлаждения на режим нагрева осуществляется путем изменения полярности напряжения. В процессе разработки терморегуляторов проведена опытная эксплуатация релейно-импульсного терморегулятора на судовом дизеле 6NVD 26 А-3 и испытания на стендовом дизеле 8 ЧН 16,5/18,5. При этом получены оптимальные статические и динамические характеристики.

Коллектив авторов — В.А. Марков, А.В. Микитенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана), С.Н. Девянин (МГАУ им. В.П. Горячкина), Е.А. Сиротин (ФГУП “НАМИ”), В.А. Павлов (ОАО “НЗТА”), А.В. Тихонов (АМО “ЗиЛ”) — представил доклад “Влияние конструкции проточной части распылителя форсунки на показатели транспортного дизеля”. Отмечается, что одним из наиболее значимых конструктивных параметров топливоподающей аппаратуры дизелей является длина l_p распыливающих отверстий форсунки или отношение l_p к диаметру d_p . Этот параметр выбирается с учетом формы камеры сгорания (КС) дизеля, расположения форсунки в головке цилиндров, числа и расположения распыливающих отверстий, уровня давления впрыскивания. Оценка влияния длины l_p на экономические и экологические показатели проведена при экспериментальных исследованиях дизеля Д-245 (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода. Дизель был оснащен топливоподающей системой, включающей в себя ТНВД фирмы Motorpal (Чехия) типа PP4M10U1f с диаметром плунжеров $d_{пл} = 10$ мм и их полным ходом $h_{пл} = 10$ мм и форсунки ФДМ-22 производства АО “Куроаппаратура” (Вильнюс), отрегулированные на давление начала впрыскивания $p_{фо} = 22,0$ МПа. При испытаниях исследовались серийные пятисопловые распылители типа 145 производства НЗТА и опытные распылители того же типа, дообработанные в целях оптимизации процесса топливоподачи. Серийные распылители имели длину распыливающих отверстий $l_p = 0,90$ мм при диаметре $d_p = 0,32$ мм и отношении $l_p/d_p = 2,81$. Целесообразность дообработки этих распылителей обусловлена тем, что исследуемый дизель имеет КС в поршне типа ЦНИДИ с диаметром горловины $d_r = 38$ мм, а форсунки установлены в головке цилиндров со смещением $e_\phi = 10$ мм. В дизеле организовано объемно-пленочное смесеобразование, при котором наблюдается частичное попадание топлива на боковые стенки КС, прилегающие к горловине. Следствием этого являются недостаточно высокие показатели двигателя. Уменьшение доли пленочного смесеобразования может быть достигнуто путем сокращения длины струй топлива, наиболее близких к стенкам КС. Ряд исследований показывает, что сокращение длины струй наблюдается при уменьшении длины l_p распыливающих отверстий. Поэтому для уменьшения доли пленочного смесеобразования целесообразно сформировать струи различной длины

L: желательнее иметь длинные струи топлива в направлении стенки КС, удаленной от распыливающего отверстия, и короткие струи — в направлении менее удаленной стенки. Для формирования струй с различной длиной была проведена дообработка носков распылителей серийных форсунок. Она заключалась в том, что два распыливающих отверстия, обращенные к удаленной стенке КС, оставлены без изменений ($l_p = 0,90$ мм, $l_p/d_p = 2,81$), носок распылителя вблизи распыливающего отверстия, обращенного к ближайшей стенке, был сошлифован до длины $l_p = 0,45$ мм ($l_p/d_p = 1,41$), носок распылителя вблизи двух оставшихся распыливающих отверстий был сошлифован до длины $l_p = 0,70$ мм ($l_p/d_p = 2,19$).

Экспериментальные исследования подтвердили улучшение показателей дизеля при замене серийных распылителей опытными, выполненными с распыливающими отверстиями различной длины l_p . Дымность отработавших газов K_x на номинальном режиме (при $n = 2400$ мин⁻¹) уменьшилась с 40 до 33 % по шкале Хартриджа, т.е. на 17,5 %, а на режиме максимального крутящего момента (при $n = 1500$ мин⁻¹) — с 49,5 до 48 %, т.е. на 3,0 %. Удельный массовый выброс оксидов азота NO_x при работе дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла (правила ЕЭК ООН № 49) сократился с 5,749 до 5,631 г/(кВт·ч), т.е. на 2,1 %. Удельный массовый выброс монооксида углерода CO при этом снизился с 7,872 до 7,126 г/(кВт·ч), т.е. на 9,5 %, а удельный массовый выброс углеводородов CH_x уменьшился с 2,207 до 1,967 г/(кВт·ч), т.е. на 10,9 %. Повышение экологических показателей сопровождалось улучшением топливной экономичности дизеля. Удельный эффективный расход топлива g_e на номинальном режиме снизился с 285,4 до 283,6 г/(кВт·ч), а на режиме максимального крутящего момента — с 248,2 до 243,9 г/(кВт·ч).

Выступление М.Н. Рахметуллаева посвящено результатам проведенных в ОАО “НИКТИД” исследований по разработке, построению и циклу безмоторных испытаний аккумуляторной топливной системы с электронным управлением типа Common-Rail. Традиционно значительное внимание было уделено созданию электрогидравлических форсунок. Их оптимизация велась на математических моделях, отработывалась конструкция и технология изготовления и сборки. В результате созданы эффективные форсунки, управляющие клапаны, быстродействующие электромагнитные приводы. Микропроцессорный блок управления, предназначенный для работы в безмоторных и моторных условиях, использует два сравнительно недорогих 8-разрядных процессора и обеспечивает функционирование системы в широком поле рабочих режимов. Обеспечено управление характеристикой впрыскивания, в частности, устойчивое двухфазное впрыскивание с оптимизируемыми продолжительностями и интервалами между впрыскиваниями. Успешно проведенные безмоторные испытания позволили перенести систему на развернутый дизель ЗМЗ-514.10.

С докладом “Некоторые результаты исследования аккумуляторной топливной системы на дизеле ЗМЗ 154.10” выступил Ю.Е. Драган. В ОАО “НИКТИД” создана аккумуляторная топливная система с электронным управлением типа Common-Rail. Разработка подобной отечественной топливной системы позволит: улучшить экономические и экологические показатели отечественных дизелей за счет организации преимущественно объемного смесеобразования с высоким давлением впрыскивания (до 150...180 МПа); снизить шум от сгорания за счет применения предварительного впрыскивания малых доз топлива (порядка 1...3 мм³), обусловленного быстродействием исполнительных устройств (0,15...0,20 мс); исключить неблагоприятное взаимодействие процессов создания энергии впрыскивания и дозирования топлива; поддерживать оптимальные значения давления впрыскивания на любых, в том числе и на частичных, режимах работы дизеля. Выполненная система предназначена для дизеля ЗМЗ-514.10. Планируемые результаты могут быть использованы также в дизелях, применяемых в качестве энергетических силовых установок наземного

и водного транспорта, чему способствует отработанная технология адаптации микроконтроллера к конкретному дизелю. Все компоненты системы — оригинальные, разработаны в ОАО “НИКТИД” или в сотрудничестве с другими отечественными организациями. Испытания на развернутом дизеле подтвердили работоспособность и необходимую надежность топливной системы.

С докладом об электронной системе управления (ЭСУ-1) выступил Ю.Е. Хрящёв (ЯГТУ). Разработанная ЭСУ включает в себя электронный поворотный исполнительный механизм ЭМП-01 производства ООО “Объединение Родина” (Йошкар-Ола), электронный блок управления 50.3763 производства НПК “ЭЛАРА” (Чебоксары), комплект датчиков, контролирующих режимные параметры и параметры состояния, педальный модуль КДБА 453621.001 (ЗАО “Автокомплект”, г. Арзамас). С помощью системы ЭСУ-1 в совокупности с ТНВД 337-23 (ОАО “ЯЗДА”) двигателя КамАЗ (740.60-360; 740.61-320, 740.62-280) в 2004 г. сертифицированы на соответствие экологическим нормам по ограничению вредных выбросов уровня EURO-3.

В докладе Ю.Е. Хрящёва и А.Н. Круглова (ЯГТУ) “Динамическая погрешность установки момента начала впрыскивания топлива” проведен анализ колебаний крутильной системы транспортной силовой установки КамАЗ, в результате которого вычислена динамическая погрешность установки момента начала впрыскивания топлива (МНВТ). Выявлено влияние крутильных колебаний на установку МНВТ и показано, что динамическая погрешность МНВТ превышает критическую величину в 1° п.к.в. Показано, что максимальные значения динамической погрешности наблюдаются на режимах, близких к режиму максимального крутящего момента дизеля. Делается вывод о том, что в дизельных двигателях типа КамАЗ 740.60, оснащенных ТНВД 337-23 с электронной системой управления ЭСУ-1 в программе управления необходимо учитывать динамическую погрешность МНВТ.

Н.Н. Патрахальцев (РУДН) и К.М. Тапиа (Национальный инженерный университет Перу) выступили с докладом “Метод безразборного раскоксовывания распылителей форсунок дизелей автобусов в условиях г. Лима (Перу)”. Городские автобусы эксплуатируются в условиях резко неустановившихся режимов, повышенной температуры окружающего воздуха, нестабильного качества топлива и т.д. Все эти факторы приводят к тому, что уже после порядка 250 ч работы до 70 % отказов двигателей (снижение мощности более, чем на 15 % и повышение на 40 % и более дымности ОГ) происходит из-за коксования распылителей форсунок. Предложен и исследован на дизеле Перкинс метод раскоксовывания распылителей без демонтажа двигателя с транспортного средства при работе дизеля на режиме холостого хода и при подаче в цилиндры через штатные форсунки топлива с эмульгированной добавкой 4 %-ного водного или спиртового раствора антидымной присадки — хлорида бария. Добавка вводится в дизельное топливо в линии высокого давления вблизи форсунки через клапан регулирования начального давления (РНД). Для повышения эффективности очистки распылителей часть цилиндров дизеля отключается для повышения нагрузки на работающие цилиндры. Устройства отключения цилиндров выполнены на базе указанных клапанов РНД. Завершение очистки контролируется по показателям дымности и развиваемой мощности, определяемых в режимах свободных разгонов дизеля после статистической обработки пятикратных реализаций режимов.

Автоматизированной методике выбора главных двигателей для судов внутригородских линий было посвящено выступление В.И. Толщина и В.А. Зяброва (МГАВТ). Для заданного маршрута движения предлагается автоматизированный метод выбора главных двигателей судов типа “Москва” из условия получения необходимых показателей топливной экономичности, экологических показателей и надежности. В основу математической модели положены расчет параметров в цилиндре дизеля, уравнение динамики вращающихся масс двигателя, уравнение автоматического

регулятора, расчет температурных полей втулки цилиндра дизеля и тепловых напряжений рабочего цилиндра в переходных режимах работы дизеля. Исходными данными для расчета являются параметры работы двигателя и тахограммы работы судна на маршруте. В результате расчета переходных режимов прогнозируется работа двигателя до вероятного возникновения микротрещин в цилиндре. На основании полученных данных, используя автоматизированный метод, провели оценку экономической целесообразности установки на судне выбранных двигателей. В программу были введены параметры дизелей 3Д6, ЯМЗ-238 и 6Л160, а также тахограммы работы судна на маршруте. Проведенные расчеты показали, что количество циклов теплового нагружения до вероятного возникновения внутренних микротрещин цилиндрической втулки двигателя 3Д6 составляет 6700 циклов, двигателя ЯМЗ-238 — 3450 циклов, двигателя 6Л160 — всего 2595 циклов. В результате выявили, что возможно сокращение срока службы цилиндрической втулки до капитального ремонта, например, для двигателя 3Д6 — с 15 000 до 13 000 часов, для двигателя ЯМЗ-238 — с 8 000 до 6 900 ч, для двигателя 6Л160 — с 7 000 до 5 190 часов. Расчет приведенных затрат, с учетом снижения срока службы деталей, показал, что для двигателя 3Д6 затраты составят 2,88 руб/(кВт·ч), для двигателя ЯМЗ-238 — 2,72 руб/(кВт·ч), для двигателя 6Л160 — 2,98 руб/(кВт·ч). Экспериментальные исследования этих двигателей на содержание оксидов азота в ОГ показали, что удельные средневзвешенные выбросы этого токсичного компонента для двигателя 3Д6 составляют 11,23 г/(кВт·ч), для двигателя ЯМЗ-238 — 8,71 г/(кВт·ч), для двигателя 6Л160 — 12,76 г/(кВт·ч). По результатам комплексного анализа полученных данных в качестве судовой энергетической установки (СЭУ) выбран двигатель ЯМЗ-238. Несмотря на то, что срок службы деталей этого двигателя в 2 раза меньше, чем у двигателя 3Д6, из всех рассмотренных двигателей он имеет наилучшие экологические и экономические показатели. Таким образом, использование предложенной автоматизированной методики позволит прогнозировать срок службы выбранных главных двигателей до капитального ремонта. В результате возможна наиболее полная оценка надежности двигателя с учетом его экологических и экономических показателей.

“Показатели транспортного дизеля, работающего на смесевом биотопливе” — тема доклада С.Н. Девянина, Е.Г. Пономарева (НПП “Агродизель”), В.А. Маркова, Д.А. Коршунова (МГТУ им. Н.Э. Баумана). В настоящее время все большую актуальность приобретают работы по переводу транспортных дизелей на альтернативные виды топлива. Наиболее перспективное альтернативное топливо для дизелей — это рапсовое масло. Несомненным преимуществом использования на транспорте рапсового масла являются его высокие экологические свойства. Масло не загрязняет почву и грунтовые воды при утечках, так как в атмосферных условиях полностью разлагается в течение трех недель. Содержание в рапсовом масле около 12 % кислорода (по массе) позволяет заметно снизить выбросы в атмосферу с ОГ продуктов неполного сгорания топлива — монооксида углерода СО и легких углеводородов C_nH_x , являющихся нормируемыми токсичными компонентами. Рапсовое масло не содержит соединений серы, что приводит к отсутствию в ОГ оксидов серы SO_x — сернистых газов и образующихся из них кислот. В рапсовом масле отсутствуют и полициклические ароматические углеводороды, являющиеся канцерогенами. Использование в качестве топлива рапсового масла не нарушает баланс между кислородом и углекислым газом в атмосфере. Однако физико-химические свойства рапсового масла заметно отличаются от свойств стандартных дизельных топлив. В первую очередь, это относится к большей вязкости рапсового масла, которая является важнейшим параметром, определяющим качество процессов распыливания, смесеобразования и сгорания. Рапсовое масло отличается и худшей воспламеняемостью в условиях камеры сгорания дизеля - его цетановое число заметно ниже, чем у дизельного топлива (соответственно 36 против 45 единиц). Меньше и низшая теплота сгорания

рапсового масла: 37 против 43 МДж/кг у дизельного топлива. Указанные различия физико-химических свойств приводят к тому, что при работе дизеля на рапсовом масле возникает целый ряд проблем, связанных с ухудшением смесеобразования. Однако эти проблемы могут быть решены при использовании рапсового масла в смеси с дизельным топливом. Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245 (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода при его работе на смесевом биотопливе — смеси рапсового масла и дизельного топлива в соотношении 20 и 80 % (объемных), подтвердили возможность улучшения таким образом экологических показателей дизеля.

В докладе П.В. Федорова, С.Н. Вознюка, Э.Н. Федоровой (РГАЗУ), К.А. Чужикова, С.В. Трофимова, П.И. Шерешова (ВТУ) приведены результаты исследования системы контроля и защиты дизеля транспортного средства. Разработана математическая модель системы контроля технического состояния дизеля, установлены основные функциональные связи в динамической системе “дизель–трансмиссия–ведущие органы–нагрузка”. Показано, что надежность и эффективность работы транспортной машины может быть значительно повышена благодаря непрерывному контролю основных выходных параметров дизеля в зоне регулярных и случайных динамических воздействий при выполнении заданных режимов работы. Обоснован новый способ мониторинга эффективной мощности дизеля при непрерывной регистрации затраченной дизелем работы. Разработано и испытано принципиально новое устройство на основе современной микропроцессорной техники, которое может быть применено для защиты тракторных и автомобильных дизелей от силовых и температурных перегрузок. Основные функции контроля и защиты моторно-трансмиссионной установки выполняет бортовой компьютер, который позволяет с помощью штатных и дополнительных датчиков непрерывно анализировать получаемую информацию о работе дизеля, принимать соответствующее решение, показывать параметры состояния дизеля и, в случае приближения аварийной ситуации, инициировать ступенчатую остановку дизеля за 3...15 с. Блок-схема алгоритма работы системы включает 64 оператора. Программа для бортовой ЭВМ, реализующая алгоритмы контроля и защиты дизеля, может состоять из 8...30 шагов. В результате предварительных испытаний упрощенного макетного образца разработаны технические требования к системе контроля и мониторинга технического состояния тракторного дизеля.

Результатам разработок ППП “Дизельавтоматика” по системам электронного регулирования частоты вращения и мощности ДВС посвящено выступление В.В. Фурмана. Вначале был создан унифицированный ряд электронных аналоговых регуляторов по ТЗ ВМФ. В рамках этой работы разработан преобразователь оборотов, пропорциональные поворотные электромагниты, на базе гидромеханического регулятора разработано исполнительное устройство, автоматически переходящее в режим регулирования с помощью гидромеханического регулятора с сохранением заданного скоростного режима при отказе электронного регулятора. По ТТ МПС был разработан унифицированный электронный цифровой регулятор частоты вращения и мощности для дизель-генераторов (ДГ) тепловозов. Было разработано электрогидравлическое исполнительное устройство, датчик положения рек ТНВД. Необслуживаемый ресурс данного регулятора составляет 5 тыс. ч непрерывной работы. На базе данного регулятора разработана автоматизированная система управления главным судовым двигателем под надзором регистра. Были разработаны системы для электроуправляемой подачи топлива как для дизельного цикла, так и для газодизельного цикла. Для этой цели разработаны быстродействующие магнитные приводы. Опытные системы электроуправляемой подачи топлива дизелей были испытаны на дизеле ЧН 10,5/13 и одноцилиндровом дизеле 26/26 на ОАО “Коломенский завод”. Система подачи газа с помощью электроуправляемых клапанов испытана на

АДГ-100 (8ЧН21/21). Получен первый класс точности регулирования переходных процессов за счет управления подачей газа. В настоящее время по заказу ОАО “РЖД” изготовлена система управления тепловозными ДГ с электроуправляемой подачей топлива. Система управления газом проходит опытную эксплуатационную проверку на дизеле Д50 в составе тепловоза. Выпускаются цифровые системы управления ДГ с широким набором выполняемых функций управления и защиты ДГ (в частности, автоматическая синхронизация, распределение в заданной пропорции нагрузок, коррективка $\cos \varphi$ и т.д.).

“Обоснование выбора типа двигателя при проектировании эффективных судовых энергетических установок (СЭУ)” — тема доклада О.К. Безюкова, Д.И. Буханца, В.К. Васильева (С.-Петербургский Университет водных коммуникаций). СЭУ оказывает определяющее влияние на технико-экономические характеристики судов. Существующие методы обоснования типа, состава и схемного исполнения СЭУ основаны на системно-иерархическом подходе к ее комплексной оптимизации. Под комплексной оптимизацией понимают нахождение некоторой совокупности параметров при заданных условиях и ограничениях, которая дает наилучшие значения локальных критериев оптимизируемой СЭУ. Однако эта задача решена далеко не в полной мере. Наиболее сложной процедурой является построение критериев оптимальности, по которым определяется степень совершенства СЭУ. Работа двигателей характеризуется совокупностью показателей, среди которых важнейшими являются: экономичность при проектировании, производстве и эксплуатации; массогабаритные показатели; ресурс; тяговые характеристики и пусковые качества; ремонтпригодность; малая токсичность и др. Несомненно, что все они по-разному влияют на общую оценку технического совершенства двигателя. Кроме того, использование конструктивного, функционального и других видов описаний не всегда удобно при оценке качества газотурбинных двигателей (ГТД) и дизелей. Поэтому возникла необходимость применения более компактной формы описания качества тепловых двигателей в виде совокупности численных значений параметров. Поскольку аналитические методы решения подобных задач в настоящее время недостаточно развиты, на практике нашли применение метод экспертных оценок, носящий субъективный характер, и метод построения критериев качества тепловых двигателей на основе анализа размерностей. В последнем случае исследование проводится на основе результатов экспериментальных данных или опыта эксплуатации двигателей в целях определения величин, существенных для оценки качества двигателей. Сложные термодинамические процессы в рабочих элементах ГТД, высокие частоты вращения их роторов приводят к возникновению высоких механических и тепловых напряжений, влияющих на надежность и долговечность двигателя. Существенные различия в процессах, протекающих в компрессорах, камерах сгорания и турбинах делает целесообразным разработку критериев совершенства для каждого из этих узлов ГТД. Они должны включать в себя конструктивные и эксплуатационные показатели, характеризующие совершенство того или иного узла: эффективный КПД, степень форсированности рабочих процессов, массу узла и его ресурс до переборки, капитального ремонта и списания. Качество камер сгорания (КС) в значительной мере определяет технико-экономические показатели судовых ГТД, которые, в свою очередь, зависят от совершенства их жаровых труб. Тепловое совершенство КС оценивается суммой тепловых потерь, вызванных неполным сгоранием топлива, и потерь теплоты в окружающую среду. Общий КПД камеры сгорания может быть представлен в виде произведения теплового и аэродинамического КПД, которое является безразмерной величиной и может быть использовано в качестве критерия совершенства КС. При оценке их совершенства целесообразно учесть еще один безразмерный параметр — степень повышения давления воздуха в компрессоре. Оценить качество высокотемпературной газовой турбины можно по следующим технико-экономическим

показателям: аэродинамическому совершенству; степени форсирования; массе и габаритным размерам. Следует учесть также отсутствие разрушений и недопустимых деформаций под действием механических, температурных и химических факторов. Для определения структуры критерия качества судовых дизелей также используют приведенные ранее принципы. В его состав должны входить параметры, характеризующие эффективность, форсированность, массу и ресурс двигателя. Очевидно, что эффективность двигателя в наибольшей степени определяется его топливной экономичностью. Наиболее сложен выбор показателя, характеризующего степень форсированности дизелей. В практике проектирования дизелей для этой цели широко используются: давление наддувочного воздуха; среднее эффективное давление; цилиндровая, литровая и поршневая мощности; средняя скорость поршня и др. Для оценки степени форсированности в наибольшей степени подходит значение поршневой мощности или ее аналог — произведение среднего эффективного давления и средней скорости поршня. Оба параметра входят в уравнение эффективной мощности двигателя. С помощью предложенных критериев можно проводить сравнение дизелей одного назначения и агрегатной мощности при проектировании эффективных СЭУ.

С докладом “Компактные транспортные теплообменные аппараты” выступил В.Н. Афанасьев (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Отмечается, что характерной особенностью развития силовых энергетических установок, особенно транспортных, является резкое увеличение удельной мощности и повышение их эффективного КПД, а также форсирование рабочего процесса и значительное повышение температуры и давления рабочего тела. Сброс теплоты в современных транспортных энергосистемах представляет собой одну из важнейших проблем, требующих разработки и внедрения новых методов охлаждения и термостабилизации. Для существенного улучшения характеристик бортовых систем, в том числе и систем охлаждения, необходимо создание высокоэффективных, компактных и легких теплообменных аппаратов (ТОА). Одним из направлений решения данной проблемы может оказаться использование в системах охлаждения дисперсных потоков вещества, что обеспечивает им значительные преимущества по сравнению с обычными ТОА. Анализ показывает, что использование теплообменников типа “капля-газ” в транспортных энергосистемах, созданных на базе закрытых газотурбинных установок, может дать до 15 % снижения массы энергосистемы при ее мощности до 100 кВт и до 30 % — при мощностях энергосистем в несколько мегаватт. Установлено, что выигрыш в количестве отведенной теплоты по сравнению со струйным истечением составляет до 10 %. Проведенные исследования смесительного теплообменного аппарата (СМТОА), созданного на базе существующей технологии, показали, что непосредственный контакт между газом и диспергированным в виде капель теплоносителем может обеспечить большую компактность, меньшую массу и более высокую эффективность теплопередачи по сравнению с обычными теплообменниками трубчатого типа. В работе получены следующие результаты: коэффициент компактности теплообменной поверхности более $7500 \text{ м}^2/\text{м}^3$, удельная масса порядка $0,12 \text{ кг}/\text{м}^2$. Более существенно улучшаются эти параметры при уменьшении диаметра капель. Получены также новые экспериментальные данные по теплообмену в СМТОА.

Раздел “Хроника” был посвящен памяти активного и многолетнего участника ВНТС, известного ученого в области автоматического управления топливной аппаратурой дизелей действительного члена Академии электротехнических наук, д-ра техн. наук, проф. Феликса Ильича Пинского (1930–2004). С воспоминаниями о жизни и деятельности Ф.И. Пинского выступили Б.Я. Черняк и Т.Ф. Пинский. Ф.И. Пинский родился в Ленинграде. Окончив в 1953 г. Ленинградский политехнический институт по специальности “Автоматика и телемеханика”, он заведовал лабораторией Коломенского тепловозостроительного завода, занимаясь измерениями

температуры подвижных деталей двигателей. В 1965 г. под руководством известного ученого В.П. Преображенского защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию на тему “Разработка метода измерений и автоматической регистрации температуры деталей поршней ДВС”. Таким образом, по образованию он был профессионалом в области автоматики, а по направлению научной деятельности — специалистом в области ДВС. В 1966 г. Ф.И. Пинский перешел на работу в Коломенский филиал ВЗПИ, где продолжительное время руководил лабораторией топливных систем и заведовал кафедрой. Здесь им был создан творческий коллектив, многие сотрудники которого защитили под его руководством кандидатские диссертации. После защиты в 1986 г. докторской диссертации “Оптимизация режимов работы дизелей электронным управлением впрыскивания топлива” Ф.И. Пинский переехал в Москву и работал профессором в МГТУ “МАМИ”. Его отличал творческий, новаторский подход к решению технических задач, он умел находить конкретные технические решения, а затем путем глубоких исследований добиваться их реализации. Достаточно сказать, что из более чем двухсот его работ около половины приходится на авторские свидетельства и изобретения. Он не только получил ряд авторских свидетельств и патентов, но и сумел их внедрить. Среди его изобретений такие, как система впрыскивания топлива аккумуляторного типа для дизелей (которую сегодня называют Common-Rail, или русской системой), ряд решений, касающихся микропроцессорных систем управления (МСУ) топливоподачей в двигателях завода “Звезда”, малогабаритные магнитные приводы для управления форсунками и клапанами, регуляторы с переменной структурой, свободнопоршневой дизель с линейным двигателем-генератором и многие другие. Горячий сторонник широкого применения электроники, он неоднократно выступал на ВНТС с глубокими и интересными докладами. На базе собственных разработок им написаны интересные учебные пособия, он был идеологом написания в соавторстве с Б.Я. Черняком и Р.И. Давтяном книги “Микропроцессорные системы управления ДВС”. Ф.И. Пинский ушел из жизни в самом расцвете своей кипучей творческой деятельности. Надеемся, что его идеи будут реализованы в трудах соратников и учеников. Выступившие затем М.В. Мазинг и В.И. Ерохов поделились своими воспоминаниями о Ф.И. Пинском — крупном ученом и прекрасном человеке.

В дискуссии по докладам активное участие приняли профессора Л.В. Грехов, В.И. Ерохов, В.А. Марков, Н.Н. Патрахальцев, В.И. Толшин, Ю.Е. Хрящёв, Н.Д. Чайнов, Б.Я. Черняк, Г.И. Шаров.

В заключение работы ВНТС была принята резолюция, проведен обмен научной информацией, намечены пути дальнейшей работы.

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