

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

В МГТУ им. Н.Э. Баумана в феврале 2006 г. состоялось очередное 81 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.И. Толшин (МГАВТ) во вступительном слове остановился на путях повышения экологических показателей судовых дизелей и задачах совершенствования систем автоматического регулирования и управления (САР и САУ). Требования к экологическим показателям дизелей постоянно возрастают. При этом парк отечественных судовых дизелей практически не обновляется из-за их дороговизны, поэтому на большинстве судов выброс основного токсичного компонента отработавших газов (ОГ) — оксидов азота  $\text{NO}_x$  сравнительно высок и составляет 12...14 г/(кВт·ч). В связи с этим весьма остро стоит задача снижения токсичных выбросов: чтобы не лишиться возможности захода судов в зарубежные порты в ближайшем будущем выбросы  $\text{NO}_x$  должны быть не более 2...3 г/(кВт·ч). При модернизации существующих дизелей в качестве средств снижения выбросов  $\text{NO}_x$  можно выделить следующие: уменьшение угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) с одновременным увеличением давления впрыскивания для обеспечения приемлемой топливной экономичности дизеля; рециркуляция ОГ с одновременной установкой фильтра-нейтрализатора для снижения содержания в ОГ монооксида углерода  $\text{CO}$ , легких углеводородов  $\text{CH}$  и сажи (твердых частиц); дробное впрыскивание топлива, которое позволяет уменьшить период задержки воспламенения основной порции топлива и существенно снизить эмиссию  $\text{NO}_x$ ; снижение температуры воздуха на впуске путем впрыскивания воды или пара или реализации цикла Миллера; впрыскивание мочевины в ОГ для уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$ ; применение природного газа в качестве топлива для дизелей, позволяющее снизить эмиссию основных токсичных компонентов ОГ. Все перечисленные способы требуют проведения соответствующих исследований и применения САР и САУ. В настоящее время, в частности, необходимо проведение исследований в целях разработки рекомендаций по применению тех или иных средств снижения токсичности ОГ для судовых дизелей различных типов.

В соответствии с планом работы ВНТС было заслушано 25 докладов.

С докладом “Анализ статических и динамических свойств САР дизель-генератора” выступили А.Г. Кузнецов, В.А. Марков, В.И. Шатров (МГТУ им. Н.Э. Баумана), В.В. Фурман, А.В. Федянов (ППП “Дизельавтоматика”, Саратов). Отмечено, что дизель является тепловым двигателем периодического действия и поэтому ему свойственна нестабильность таких параметров, как положение дозирующей рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД), крутящий момент двигателя, частота вращения коленчатого вала и других, даже при работе на установившихся режимах. Колебательные процессы, протекающие в регуляторе, топливоподающей системе и самом двигателе (в частности, изменение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , теплового состояния деталей камеры сгорания и др.), являются нестационарными и не поддаются точному математическому описанию. Авторами предложена эмпирическая методика оценки перерасхода топлива и изменений показателей токсичности ОГ,

основанная на анализе колебаний значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , приводящих к ухудшению экономических и экологических показателей дизеля. Оценку такого ухудшения показателей дизеля в автоколебательном процессе предлагается проводить, используя зависимости удельного эффективного расхода топлива, концентраций оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов в ОГ дизеля от  $\alpha$ , полученные на установившихся режимах. Намечены пути уменьшения нестабильности параметров на установившихся режимах работы дизеля. Для оптимизации неустановившихся (динамических) режимов проведены расчетно-теоретические исследования САР. При моделировании переходных процессов САР комбинированный двигатель представлен как совокупность взаимосвязанных элементов: поршневой части, турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов, охладителя наддувочного воздуха, топливной аппаратуры и регулятора. Исследуемая САР дизеля с газотурбинным наддувом имела электронный регулятор, представляющий собой последовательное соединение датчика частоты вращения, вычислительного устройства и исполнительного механизма (ИМ). Датчик частоты вращения индукционного типа был описан как задержка в сьеме сигнала частоты вращения  $\Delta t_{\omega} = 0,005$  с. Вычислительное устройство регулятора формирует управляющее напряжение  $U_{упр}$ , которое включает в себя напряжение импульса по нагрузке  $U_n$  и напряжение  $U_{ПИД}$ , соответствующее пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону регулирования. Дополнительное напряжение импульса по нагрузке  $U_n = 5$  В формируется в вычислительном устройстве регулятора на момент наброса нагрузки на генератор и суммируется с  $U_{ПИД}$ . По истечении заданного времени с момента наброса нагрузки (около 3 с) дополнительное напряжение  $U_n$  снижается и дальнейший процесс регулирования осуществляется только по  $U_{ПИД}$ . В качестве ИМ использован электрогидравлический привод, охваченный жесткой отрицательной обратной связью, работа которого описывается дифференциальным уравнением аperiodического звена первого порядка. Представленная математическая модель САР с электронным регулятором частоты вращения использована для исследования динамических свойств дизеля 16 ЧН 26/26, работающего на генератор переменного тока. В этих условиях регулярная характеристика дизеля — астатическая, отклонения частоты вращения коленчатого вала в переходных процессах незначительны. Для проведения расчетных исследований уравнения элементов дизеля дополнены функциональными зависимостями параметров, входящих в правые части указанных уравнений и представленными в виде нелинейных полиномиальных зависимостей. Разработанная математическая модель использована для проведения расчетного анализа влияния некоторых параметров электронного регулятора на показатели качества переходных процессов в САУ — время переходного процесса  $t_n$  и перерегулирование  $\sigma$ . Показано, что увеличение задержки работы цифрового (микропроцессорного) регулятора  $\Delta t_z$  ухудшает качество переходных процессов. В частности, при увеличении  $\Delta t_z$  от 0 до 0,1 с наблюдалось увеличение  $t_n$  с 3,1 до 3,4 с и повышение  $\sigma$  с 5,3 до 7,3 %. Проведена сравнительная оценка различных способов улучшения показателей качества переходных процессов в САР, среди которых — снижение момента инерции движущихся деталей дизель-генератора, подвод дополнительной энергии для увеличения крутящего момента к ротору турбокомпрессора, подача в цилиндры двигателя дополнительного воздуха в переходном процессе.

В.И. Ерохов, А.М. Ревонченков, И.Ф. Ревонченкова (МГТУ “МАМИ”) представили доклад, посвященный созданию систем электронного управления процессами топливоподачи и воспламенения двухтопливного двигателя с искровым зажиганием, работающего на бензине и природном газе. Задача заключалась в разработке общей схемы электронной системы управления двигателем (ЭСУД), выборе и расчете ее элементной базы, проведении экспериментальных исследований. В экспериментальной установке ДВС с двухтопливной системой подачи топлива применена лазерная система с полупроводниковым лазером. Задающие импульсы лазерного подогрева формируются ждущим мультивибратором, сигнал на который поступает с датчика положения коленчатого вала двигателя (ДПКВ). Формирование импульсов накачки лазера осуществляется схемой с интегральным таймером типа LM 555. Частота и скважность импульсов определяются времязадающими RC-цепями, а синхронизация таймера осуществляется от ДПКВ через согласующее устройство. При переводе инжекторных автомобилей для работы на газовом топливе необходимо устанавли-

вать эмуляторы для отключения электрических компонентов бензиновой системы питания. Эмулятор (имитатор) форсунок включается в разрыв цепи управления форсунками. Он подключается через специальный переключатель “Газ/Бензин”, т.е. питание реле эмулятора (имитатора) осуществляется при открытом газовом клапане. Проведены две серии экспериментов: с отключением электропитания лазера и с включенным лазером с различной степенью обеднения горючей смеси. При  $\alpha = 1,7$  с отключенным лазером запуск двигателя практически невозможен. С включенным лазером двигатель работает устойчиво. Прием фактов пропуска воспламенения зарегистрировано не было. Лазер включался одновременно с подачей высокого напряжения на электроды свечи. Длительность включения лазера составляла 2 мс. В последующем эксперименте лазер включался с опережением в 3 мс перед подачей высоковольтного импульса, т.е. всего на 5 мс. В этом эксперименте зарегистрирован более устойчивый пуск двигателя. По результатам экспериментов можно сделать вывод о необходимости предварительного лазерного подогрева искровой промежутка для улучшения характеристик воспламенения бедной газо-воздушной смеси. В экспериментальной установке для зажигания горючей смеси использована лазерная свеча с полупроводниковым лазером отечественного производства. Сфокусированный луч лазера через кварцевое окно, выполненное в свече зажигания, направляется в область ее искрового зазора. Для регистрации фактов воспламенения рядом с первой свечой была установлена аналогичная свеча со снятым полупроводниковым лазером и установленным вместо него фотодиодом. Устройство регистрации срабатывает только тогда, когда уровень сигнала с фотодиода превышает некоторый порог, установленный для факта воспламенения. При этом нижний предел воспламеняемости в данных опытах для метана соответствовал обеднению горючей смеси до  $\alpha = 1,90$ . В случае применения традиционной искровой системы зажигания обеднение горючей смеси приближается к предельным и наблюдается неустойчивая работа ДВС из-за пропусков воспламенения. Разработанная ЭСУД двухтопливного двигателя с лазерной системой зажигания обеспечивает выполнение современных и перспективных экологических требований, а также наиболее эффективно обеспечивает решение проблемы экономии топлива.

“Электронная система управления скоростью автомобиля” — это тема выступления Ю.Е. Хрящева и М.В. Тихомирова (ЯГТУ, НТЦ ОАО ЯЗТА). Система “Круиз-контроль” предназначена для автоматического поддержания заданной скорости движения автомобиля или автопоезда без использования педали акселератора вне зависимости от их весового состояния и рельефа местности. Алгоритм реализован на базе электронной системы управления топливopодачей дизеля типа ЭСУ-1. Система “Круиз-контроль” состоит из следующих элементов: датчиков частоты вращения двигателя и выходного вала коробки передач; датчиков положения педали акселератора, выключения сцепления, включения нейтрали; датчиков включения тормозов автомобиля, прицепа и горного тормоза; панели управления с тумблером включения, кнопками изменения режима работы, лампой режима работы; ИМ привода рейки ТНВД; электронного блока управления с управляющей программой. Работа системы осуществляется путем автоматизированного управления подачей топлива для поддержания частоты вращения двигателя, соответствующей заданной скорости автомобиля. Для этого регуляторная характеристика основного регулятора частоты вращения на время работы системы меняется на расчетную характеристику, полученную исходя из частоты вращения двигателя на момент включения алгоритма. Статизм этой характеристики определяется исходя из условий устойчивости основного регулятора, работающего по неявной схеме модифицированного ПИД-регулятора, и точности удержания скорости автомобиля. Разработанный алгоритм отличается простотой, легкостью настройки и позволяет осуществить следующие функции: удержание скорости автомобиля с заданной точностью; автоматическое отключение системы в случае невозможности поддержания требуемой скорости; возможность возврата к последнему заданному значению скорости после обгона или торможения; возможность изменения требуемой скорости; отключение работы алгоритма при возникновении каких-либо неисправностей в системе; обеспечение отсутствия колебаний скорости автомобиля во время работы алгоритма; возможность управления работой алгоритма.

Ю.Е. Хрящев, В.В. Кирик, А.А. Третьяков (ЯГТУ, НТЦ ОАО ЯЗТА) выступили с

докладом “Использование аппарата Fuzzy-логики в управлении дизелем”. Классические методы управления хорошо работают с детерминированным объектом управления и в детерминированной среде, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления, каким является дизель, оптимальными могут оказаться нечеткие методы управления. Fuzzy-управление позволяет более просто и универсально разработать алгоритмы управления САУ дизеля, а также оперировать более широко диапазоном понятий. При задании в алгоритме лингвистических переменных типа “диапазон низких частот”, “средних”, “высоких” и других, нечеткая логика основывается на использовании оборотов естественного языка, таких как “далеко”, “близко”, “холодно”, “горячо”. Системы с нечеткой логикой основаны на правилах, в которых в качестве посылки и заключения используются лингвистические переменные, что позволяет избежать ограничений, присущих классическим продукционным правилам. В САУ дизеля сигнал с датчика частоты подается на контроллер, где в результате обработки производится приведение входного сигнала частоты к лингвистической переменной. На выходе регулятора частоты вращения, построенного на нечеткой логике, результат нечеткого логического вывода является нечетким, а исполнительное устройство неспособно воспринять такую команду. С этой целью применен оригинальный математический аппарат, с помощью которого осуществляется переход от нечетких значений величин к вполне определенным, передаваемым на ИМ.

Экспериментальной реализации нейронного управления подачей топлива в бензиновом двигателе на основе персонального компьютера было посвящено выступление А.Б. Смирнова (ГТУ “МАДИ”). Проведены две серии моторных экспериментов, подтверждающих способность искусственной нейронной сети (ИНС) обучаться в режимах “on-line” и “off-line” при управлении подачей топлива в бензиновом двигателе. Рассмотрена работа ИНС в качестве  $\lambda$ -регулятора и динамического корректора подачи топлива. Управление подачей топлива было реализовано на основе персонального компьютера. Связь персонального компьютера и блока электронного управления двигателя осуществлялась посредством стандартного интерфейса обмена данными в реальном времени. ИНС была реализована с применением математического пакета MATLAB и его приложения Neural Network Toolbox. Особенностью микропроцессорной системы управления является наличие в комплектации линейного датчика динамического состава смеси и электронно-управляемой дроссельной заслонки.

“Моторная установка для исследования перспективных систем управления” — тема выступления Ф.С. Онищука, А.Б. Смирнова, К.А. Морозова, Б.Я. Черняка (ГТУ “МАДИ”). В проблемной лаборатории транспортных двигателей ГТУ “МАДИ” создана автоматизированная установка для разработки и исследования самонастраивающихся контуров микропроцессорного управления автомобильными двигателями. В качестве объекта испытаний в настоящий момент используются двигатели ВАЗ 21114 и 21124 с микропроцессорной системой управления (МСУ) МИКАС 10, в которой имеются аналоговый вход для датчика кислорода с линейной характеристикой и канал управления электроуправляемой дроссельной заслонкой. Установка снабжена быстродействующей централизованной многоканальной системой сбора и обработки информации на основе мощной ЭВМ, а также лицензионным оборудованием фирм ETAS и AVL. Оборудование позволяет проводить работы по исследованию динамических режимов работы, индентификации давлений в цилиндре двигателя и т. п. В настоящее время основные работы идут в двух направлениях: исследование и отработка интеллектуальных технологий динамического управления подачей топлива с использованием ИНС и разработка алгоритмов управления ДВС по значению крутящего момента (“моментное” управление) с электронным приводом дроссельной заслонки.

Универсальной системе управления подачей жидкого и газового топлива для ДВС посвящалось выступление В.Е. Кузина, М.Г. Крупского, А.Д. Головачева (КИ МГОУ). За последние годы сотрудниками КИ МГОУ было создано множество систем: от транзисторных образцов управления, работающих по жесткой программе, до современных гибких аналого-цифровых и микроэлектронных систем (МСУ), с помощью которых успешно осуществлены исследования различных ДВС. Универсальность стендовой МСУ последней конструкции КИ МГОУ позволяет проводить

исследования ДВС при работе на жидком и газовом топливах. При этом возможно использование дозаторов с непосредственным электромагнитным и электрогидравлическим приводами затвора независимо от типа электромагнита (простой или шихтованный). Возможно также использование дозаторов топлива на базе пьезо-керамических наборных образцов. Последние испытания отсека дизеля 2ЧН26/26, газового двигателя 6ГЧН21/21 с искровым форкамерно-факельным зажиганием и многочисленные исследования особенностей протекания процессов смесеобразования и сгорания на установке “двигатель с прозрачными окнами” еще раз подтвердили универсальность стендовой МСУ и большие ее возможности.

Доклад “Система жидкостного охлаждения транспортного ДВС с вентильным индукторным электроприводом вентилятора обдува” представили Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский (ЗАО “Дизель-КАР”) С.А. Аникин (Холдинг “РусПромАвто”), И.П. Ксеневиц (Международная инженерная академия), С.Н. Девянин (МГАУ им. В.П. Горячкина), Е.Г. Пономарев (НПП “Агродизель”), А.В. Микитенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Как было выявлено в результате анализа, наиболее эффективными методами регулирования температуры охлаждающей жидкости при увеличении динамики тепловых нагрузок на двигатель являются методы, использующие принципы компенсации возмущающих воздействий для построения инвариантного управления тепловыми режимами работы двигателя. Техническая реализация подобной системы автоматического регулирования температуры (САРТ) возможна только на основе ее оптимизации с помощью средств электроники и вычислительной техники. В результате была разработана САРТ, в которой используется электроуправляемый вентильный индукторный электропривод вентилятора обдува радиатора жидкостного охлаждения транспортного двигателя, датчики температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора и воздуха перед радиатором, скорости воздушного потока перед вентилятором, частот вращения двигателя и вентилятора. Исследования показали, что целесообразно устанавливать вентилятор перед радиатором, что существенно повышает эффективность обдува и охлаждения радиатора вследствие того, что резко повышается весовой расход обдуваемого воздуха из-за увеличения на 30 % его плотности, а также расширения пятна (поверхности) потока обдува. Также в САРТ должны входить бортовой электронный контроллер с согласующим устройством связи с датчиками, электроприводом и аккумулятором питания. Используемый следящий электропривод вентилятора и разработанная электронная САРТ должны обеспечить существенные преимущества в процессе поддержания температурного режима транспортного двигателя как дизельного, так и бензинового по сравнению с традиционными. Масляный радиатор охлаждения может устанавливаться внутри или рядом с жидкостным радиатором.

В докладе В.Н. Тимофеева (Чув.ГУ) рассмотрены пути повышения эффективности систем охлаждения транспортных ДВС. Работа портовых буксиров, рейдовых и промысловых судов в условиях эксплуатации характеризуется частыми и резкими сменами режимов. Оптимизация температурного режима дизелей на вышеназванных судах может быть осуществлена с помощью разработанной системы охлаждения. Существующая система охлаждения главного судового дизеля, например портового буксира, модернизируется следующим образом. В системе охлаждения используются электронный терморегулятор, электрические датчик температуры и нагрузки, задатчик, программируемый электронный блок управления. В системе используется комбинированное регулирование, т.е. управление производится не только по отклонению температуры охлаждающей жидкости, но и по возмущающему воздействию, что увеличивает качество процесса регулирования. При этом во внутреннем контуре системы охлаждения температура охлаждающей жидкости поддерживается на номинальных нагрузках в пределах 80...85°C, а на режимах холостого хода и частичных нагрузок — 95...100°C. Однако в судовых дизелях используются замкнутые системы охлаждения открытого типа, в которых расширительный бачок непосредственно связан с атмосферой, и давление в этой системе не может быть выше атмосферного, а температура охлаждающей воды не должна превышать 85...90°C. Поэтому в предлагаемой системе предусматривается другой вариант — замкнутая закрытая система охлаждения. Эта система выполняется следующим образом. В существующей замкнутой открытой системе предусматривается паровоздушный клапан, который через электрический ИМ с трехходовым краном связан с внутренним контуром

системы охлаждения. При этом расширительный бачок отключается, и замкнутая система становится закрытой, давление в системе становится выше атмосферного, а температура кипения доводится до  $120^{\circ}\text{C}$  (прстенное кипение исключается). Предлагаемая система охлаждения ДВС имеет два варианта: при длительной работе дизеля на номинальных нагрузках используется замкнутая открытая система, а при работе на режимах холостого хода и частичных нагрузок — замкнутая закрытая система. Для переключения вариантов системы охлаждения рекомендуется использовать электрический ИМ, работающий в релейно-импульсном режиме. В ходовой рубке судоводителя предусматриваются переключатели предложенных вариантов. Предлагаемая система охлаждения позволяет снизить расход топлива, уменьшить износ, увеличить мощность и улучшить экологические показатели транспортного дизеля.

Доклад Е.Ф. Позднякова (ОАО “Форант-Сервис”, г. Ногинск) посвящен оценке влияния структуры регулятора частоты вращения дизель-генератора на показатели качества процесса регулирования. Исследования динамических свойств дизель-электрического агрегата (ДЭА) проводились с использованием математических моделей. Перед аналитическим исследованием были экспериментально получены логарифмические амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) дизеля Д-246 и гидроэлектрического ИМ. Были разработаны математические модели дизеля и ИМ, уточнялись которые путем сравнения ЛАЧХ и ЛФЧХ, полученных экспериментально и расчетным путем. Расчеты переходных процессов и частотных характеристик проводились с использованием программы электронного моделирования ELECTRONICS WORKBENCH. При расчетах переходных процессов с разными типами электронных регуляторов использовались одни и те же модели дизеля и ИМ. При исследованиях сравнивались ЛАЧХ и ЛФЧХ регуляторов с различной структурой и переходные процессы дизеля с этими регуляторами. Было проведено сравнение характеристик ДЭА, оснащенных ПИД-регулятором и пропорциональным регулятором с корректирующими звеньями. Варьирование коэффициентами пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования позволило получить переходный процесс со следующими показателями: время переходного процесса  $t = 1,5$  с, перерегулирование  $\sigma = 3,8\%$ , наклон регуляторной характеристики  $\delta = 0$  (астатический регулятор). Исследуемый пропорциональный регулятор содержал три последовательно соединенных звена: пропорциональное усиленное и два корректирующих звена — подавляющее (интегро-дифференцирующее) и форсирующее. Корректирующих звеньев может быть и более двух. С их помощью можно гибко “исправлять” ЛАЧХ и ЛФЧХ элементов САР за счет возможности изменения наклона частотных характеристик в диапазоне от 0 до 60 дБ/дек. Варьируя коэффициентами усиления корректирующих звеньев, удалось получить ЛАЧХ с наклоном 0 дБ/дек в широком диапазоне изменения частот входного сигнала. При этом были получены следующие показатели: время переходного процесса  $t = 0,3$  с, перерегулирование  $\sigma = 1,7\%$ , наклон регуляторной характеристики  $\delta = 0,5\%$ . С использованием результатов проведенных исследований был разработан опытный образец электронного регулятора с пропорциональным законом управления и корректирующими звеньями для ДЭА типа АД-40. Осциллографирование переходных процессов этого ДЭА подтвердило возможность достижения параметров, полученных расчетным путем. Резервом улучшения динамических показателей ДЭА с разработанным электронным регулятором является совершенствование ИМ регулятора. Штатный ИМ имеет постоянную времени  $T = 0,06$  с. Ее уменьшение до  $0,015 \dots 0,02$  с позволит получить следующие показатели: время переходного процесса  $t = 0,1 \dots 0,2$  с, перерегулирование (заброс частоты вращения)  $\sigma = 0,5 \dots 0,8\%$ , наклон регуляторной характеристики  $\delta = 0,2\%$ , что соответствует требованиям промышленных электрических сетей.

В докладе Ю.Е. Драгана (ВлГУ) исследуется влияние конструктивных параметров электрогидравлической форсунки (ЭГФ) на показатели ее работы. Показано, что традиционные математические модели широко распространенных конструкций ЭГФ, содержащих штангу для соединения иглы распылителя с мультипликатором запирания, не учитывают влияния деформации сжатия штанги на кинематику иглы и процесс топливоподачи. Для ЭГФ конструкции НИКТИД, предназначенной для высокооборотного дизеля легкового автомобиля, при давлениях в аккумуляторе

30...150 МПа абсолютная деформация сжатия штанги составляет 0,048...0,24 мм. Эта деформация существенно влияет на задержку подъема иглы распылителя и сопоставима со значением ее подъема. На задержку подъема иглы также влияют процессы сброса и нарастания давления топлива в управляющей камере. Расчеты, выполненные на основе полученной экспериментальной зависимости коэффициента сжимаемости топлива от давления, показали, что длительности этих процессов существенно зависят от объема управляющей камеры и имеют порядок 15...50 мкс на сброс и 70...250 мкс на ее наполнение (при расчетных объемах камеры 30...100 мм<sup>3</sup>). Экспериментально доказано, что отсутствие размагничивающего импульса обратной полярности не позволяет осуществлять двухфазное впрыскивание. Сокращение числа витков в обмотках электромагнитного клапана и соответствующее увеличение сечения провода в 2 раза позволяет практически вдвое уменьшить задержку подъема якоря и на 35...65% уменьшить задержку начала подъема иглы распылителя. Эту задержку также сокращает повышение энергии управляющего импульса и давления в аккумуляторе. Основным инструментом регулирования производительности комплекта ЭГФ для подготовки к моторным испытаниям является подбор эффективных проходных сечений входных жиклеров при сохранении в узких пределах значения сечения выходных жиклеров. Опыт показал, что отечественная технология не позволяет обеспечить необходимые жесткие допуски на жиклеры. В этих условиях важно предусмотреть управление цикловыми подачами каждой форсунки с помощью МСУ по ее паспортным данным, полученным на безмоторном стенде. Обобщая опыт разработки в НИКИИД отечественной аккумуляторной топливной системы, следует отметить негативное влияние штанги ЭГФ на быстродействие форсунки. Применение штанги для ЭГФ с клапанным затвором вызвано необходимостью сделать ее взаимозаменяемой с серийной форсункой. Для разработки конкурентоспособной аккумуляторной топливной системы необходимо снять указанное ограничение и одновременно проектировать и дизель и, прежде всего, головку цилиндров и агрегаты топливной системы.

Л.Н. Голубков и Л.А. Емельянов (ГТУ “МАДИ”) посвятили свое выступление особенностям моделирования рабочего процесса дизеля при двухфазном впрыскивании топлива. В ГТУ “МАДИ” на основе результатов собственных исследований и материалов специалистов других организаций был разработан метод расчета показателей процесса топливоподачи и рабочего цикла дизеля, включающий в себя математические модели процессов подачи, впрыскивания, распыливания, испарения топлива и тепловыделения, а также математическую модель рабочего процесса 4-тактного дизеля. Проведенные в проблемной лаборатории транспортных двигателей ГТУ “МАДИ” исследования позволили с помощью метода фоторегистрации проследить динамику развития топливных струй при различных давлениях в аккумуляторе системы Common Rail при атмосферном противодавлении. Метод фоторегистрации основан на микрофотографировании в темном пространстве посредством засветки матрицы цифрового фотоаппарата вспышкой в требуемый момент времени. Результаты показывают целесообразность корректировки методики расчета дальности. Следует отметить, что непосредственно использовать полученные экспериментальные данные дальности затруднительно, так как лобовое сопротивление струи при повышении противодавления изменяется нелинейно. Анализ результатов расчета влияния предвпрыска и угла между предвпрыском и основным впрыском показал, что однозначного влияния этих показателей нет. Многое зависит не только от типа двигателя, но и от режима работы. Поэтому расчетные и опытные данные сопоставлялись в качественном виде. Источником опытных данных послужила работа фирмы Рено, в которой показано, что (как и в наших расчетах на режиме  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  и  $P_e = 0,4 \text{ МПа}$ ) при уменьшении порции предвпрыска снижаются выбросы сажи и оксидов азота, но возрастает значение удельного эффективного расхода топлива, а увеличение интервала между предвпрыском и основным впрыском ведет к росту перечисленных трех показателей.

“Совершенствование процесса топливоподачи в транспортном дизеле” — тема доклада В.А. Маркова (МГТУ им. Н.Э. Баумана), С.Н. Девянина (МГАУ им. В.П. Горючкина), Е.А. Сиротина (ФГУП “НАМИ”), В.А. Павлова (ОАО “НЗТА”). Одним из главных факторов влияния на характеристики процессов впрыскивания и распыливания топлива является конструкция форсунки и масса ее подвижных деталей. В

ОАО “НЗТА” на базе серийно выпускаемой форсунки ФДМ-22 была разработана опытная форсунка типа 145.1112110 с уменьшенной массой подвижных деталей. Общие приведенные массы подвижных деталей этих форсунок соответственно равны 27 и 10,8 г. Опытная форсунка типа 145.1112110 была снабжена распылителем мод. 171-02 производства ОАО “АЗПИ” (г. Барнаул). Распылитель имел пять распыляющих отверстий, устья которых расположены в колодце носка распылителя. Суммарная эффективная площадь распылителя в сборе составляла  $\mu_p f_p = 0,25 \text{ мм}^2$ . Форсунка была отрегулирована на давление начала впрыскивания  $p_{\text{фо}} = 21,0 \text{ МПа}$ . При безмоторных испытаниях опытную форсунку исследовали совместно с ТНВД модели 4 УТНИ-Т-1111005 размерности  $10 \times 10 \text{ мм}$ . При индицировании процесса топливоподачи было отмечено уменьшение примерно на 30% продолжительности посадки иглы у опытной форсунки. При испытаниях на дизеле Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) использовали штатный ТНВД фирмы Motorgal (Чехия) типа РР4М10У1f. Были исследованы штатные форсунки ФДМ-22 производства АО “Куроаппаратура” (Вильнюс) с распылителями типа DOP 119 S 534 фирмы Motorgal (Чехия) и опытные форсунки НЗТА с распылителями АЗПИ серии 171. Оба типа распылителей имели пять распыляющих отверстий с эквивалентным проходным сечением  $\mu_p f_p = 0,25 \text{ мм}^2$ . При моторных испытаниях отмечено улучшение показателей токсичности ОГ при замене штатных форсунок ФДМ-22 опытными форсунками НЗТА. Удельные массовые выбросы токсичных компонентов ОГ на режимах 13-ступенчатого цикла, предусмотренного Правилами 49 ЕЭК ООН, заметно уменьшились: удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  снизился с 7,442 до 7,159 г/(кВт·ч), монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  — с 3,482 до 2,711 г/(кВт·ч), легких углеводородов  $e_{\text{CH}_x}$  — с 1,519 до 0,790 г/(кВт·ч). Таким образом, удалось выполнить требования норм EURO-2 по эмиссии монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  и легким углеводородам  $e_{\text{CH}_x}$ . При этом несмотря на некоторое снижение выбросов оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  при использовании опытной форсунки, они оказались выше предельных значений, предусмотренных Правилами 49 ЕЭК ООН (нормами EURO-2); условный средний расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла  $g_{\text{еусл}}$  изменился незначительно — увеличился с 247,2 до 250,6 г/(кВт·ч).

С докладом “Повышение качества управления подачей топлива в камеры сгорания дизелей с использованием пьезокерамических дозаторов” выступили М.Г. Крупский, А.В. Башкин, В.Е. Кузин, Э.В. Широких (КИ МГОУ). Рассматривается возможность использования для управления дозирующими элементами топливоподающей аппаратуры (ТПА) ДВС пьезоактюаторов (ПА), работа которых основана на новом принципе, а именно, эффекте объемной деформации, что отличает его от традиционно используемого в ПА принципа осевого деформационного перемещения. При этом используется ПА погружного типа, непосредственно находящегося в камере управления в среде дизельного топлива, благодаря чему отпадает необходимость механического контакта ПА с дозирующим элементом — иглой, клапаном или промежуточным элементом — мембраной, поршнем и др. Новое качество запатентованного способа работы ПА позволяет повысить быстроту действия, надежность и упростить конструкцию форсунок, а также создавать ТНВД с большими давлениями и цикловыми подачами. Приводятся результаты некоторых расчетных и экспериментальных исследований, подтверждающих целесообразность использования ПА объемного принципа действия погружного типа в качестве привода для дозирующих элементов в ТПА.

В.А. Марков, Д.А. Коршунов (МГТУ им. Н.Э. Баумана), С.Н. Девянин (МГАУ им. В.П. Горячкина), О.В. Дробышев (АЗПИ, г. Барнаул) представили доклад “Улучшение показателей дизеля путем совершенствования конструкции распылителя форсунки”. Для оценки влияния конструкции распылителей на параметры процессов распыливания топлива, смесеобразования, и, в конечном счете, на показатели работы дизеля в ОАО “АЗПИ” изготовлены распылители с 10 распыляющими отверстиями, расположенными попарно на носке распылителя. Причем, каждая из этих пар отверстий выполнена с пересекающимися осями. Оценка влияния конструкции проточной части распылителя форсунки на экономические и экологические показатели проведена с использованием результатов экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), выпускаемого Минским мотор-



ным заводом. Дизель имел топливную систему, которая включала ТНВД фирмы Motorpal типа PP4M10U1f с диаметром плунжеров  $d_{пл} = 10$  мм и их полным ходом  $h_{пл} = 10$  мм, топливопроводы высокого давления длиной  $L_T = 540$  мм и форсунки ФДМ-22, которые были отрегулированы на давление начала впрыскивания  $p_{фо} = 21,0$  МПа. Форсунки поочередно оснащались серийными распылителями типа DOP 119 S 534 фирмы Motorpal, имеющими 5 распыливающих отверстий, и опытными распылителями АЗПИ с 10 распыливающими отверстиями. При этом суммарная эффективная площадь распылителей обоих типов составляла  $\mu_p f_p = 0,25$  мм<sup>2</sup>. Результаты проведенных исследований показывают, что при установочном угле опережения впрыскивания топлива (УОВТ)  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала (п.к.в.) до верхней мертвой точки (ВМТ), работе на режимах 13-ступенчатого цикла, предусмотренного Правилами 49 ЕЭК ООН, и использовании штатных распылителей DOP 119 S 534 удельные массовые выбросы токсичных компонентов составили: оксидов азота  $e_{NO_x} = 7,442$  г/(кВт·ч), монооксида углерода  $e_{CO} = 3,482$  г/(кВт·ч), легких углеводородов  $e_{CH_x} = 1,519$  г/(кВт·ч). При этом условный средний расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла составил  $g_{еусл} = 247,2$  г/(кВт·ч). При замене штатных распылителей опытными и неизменном  $\theta = 13^\circ$  п.к.в. до ВМТ эти показатели оказались следующими:  $e_{NO_x} = 8,772$  г/(кВт·ч),  $e_{CO} = 2,646$  г/(кВт·ч),  $e_{CH_x} = 0,869$  г/(кВт·ч),  $g_{еусл} = 244,5$  г/(кВт·ч). Установка меньшего УОВТ и использование опытных распылителей АЗПИ позволили обеспечить выполнение требований норм EURO-2 к токсичности ОГ и приемлемый расход топлива:  $e_{NO_x} = 6,534$  г/(кВт·ч),  $e_{CO} = 3,395$  г/(кВт·ч),  $e_{CH_x} = 0,897$  г/(кВт·ч),  $g_{еусл} = 261,6$  г/(кВт·ч).

Доклад Н.Н. Патрахальцева, А.А. Бадеева и А.Р. Русинова (РУДН) был посвящен повышению эффективности регулирования работы дизеля путем изменения физико-химических свойств топлива. Разработка дизельных систем топливоподдачи с регулированием начального давления (РНД) позволяет реализовать метод регулирования рабочего процесса, изменяя физико-химические свойства топлива путем поддачи в основное топливо вблизи форсунки различных присадок или добавок, в том числе альтернативных топлив. Созданное таким образом смесевое топливо с иными свойствами, чем у дизельного, обеспечивает достижение различных положительных эффектов. Например, происходит снижение дымности ОГ, повышение развиваемой мощности при том же положении рейки ТНВД, понижение минимальной частоты вращения дизеля, корректировка внешней скоростной характеристики и др. Такая САР работает при полных подачах топлива и воздействует на работу дизеля без смещения рейки ТНВД. Быстродействие системы зависит от места расположения клапана РНД, а объем линии высокого давления от клапана до форсунки определяет время переходного процесса замещения части дизельного топлива соответствующей добавкой.

“Метод регулирования рабочего процесса дизеля” – тема выступления Н.Н. Патрахальцева, В.Л. Казначевского, А.А. Бадеева (РУДН). Нетрадиционным методом совершенствования энергетических, экономических, экологических и других эксплуатационных характеристик дизеля может стать метод воздействия на протекание рабочего процесса путем изменения свойств топлива, т. е. “физико-химическое регулирование”. Метод заключается в том, что во время работы дизеля по сигналам датчиков соответствующих параметров (например, дымности, частоты вращения при полной подаче топлива и т.д.) в основное топливо с помощью систем топливоподдачи с РНД топлива оперативно вводят те или иные добавки, обычно альтернативное топливо или другие вещества (например каталитически активные, хотя и не горючие). Например, при работе дизеля ЯМЗ-238 (8Ч13/14) по внешней характеристике и падении частоты вращения из-за перегрузки можно форсировать дизель по крутящему моменту на 10...15% без превышения установленного для дизеля предела дымления (35% по Хартриджу) за счет подачи 20...30% сжиженного нефтяного газа в линию высокого давления топлива (перед форсункой). При “холодном” пуске при низких температурах окружающего воздуха добавка к топливу перед форсункой легко воспламеняющейся жидкости типа “Холод-Д-40”) позволяет повысить эффективность пуска и обеспечить надежный выход дизеля на устойчивый режим.

Оценке существенности коэффициентов регрессии при обработке данных испытаний ДВС посвящено выступление С.В. Гусакова, А.М. Довольнова, А.С. Макареву-

ского (РУДН). В современных автомобильных ДВС для оптимизации топливно-экономических и экологических характеристик в функции режимных параметров, состояния окружающей среды, наличия переходных режимов работы широко применяется оперативное регулирование, обеспечивающее необходимый характер протекания рабочего процесса (управление длиной впускного трубопровода, фазами газораспределения, высотой подъема клапанов, давлением и фазой впрыскивания топлива, рециркуляцией ОГ и др.). Поиск оптимального сочетания большого количества регулировочных параметров, дающего минимизацию целевой функции во всем поле режимов работы двигателя, удобно вести, используя функцию отклика в виде уравнения регрессии. Таким образом, первоначально необходимо на основе проведения активного планируемого эксперимента получить корреляционные связи между всеми изучаемыми факторами. Практика показывает, что чаще всего эти связи нелинейны. Получаемое уравнение регрессии множественной нелинейной корреляции достаточно громоздко, так как содержит все коэффициенты, значения которых определяют характер и силу взаимосвязи между факторами и целевой функцией. Достоверность этой связи по факторам определялась путем оценки существенности коэффициента регрессии, что привело к обоснованному упрощению уравнения множественной нелинейной регрессии.

Доклад “О формировании угла конуса топливной струи” представил В.Ю. Рудаков (КИ МГОУ). При обработке кинограмм дизельного процесса, полученных на установке “двигатель с прозрачными окнами”, обнаружено, что изменение угла конуса топливной струи проходит четыре фазы. Объяснить их можно изменениями давления впрыскивания. Диаграмма давления впрыскивания имеет следующие основные участки — начало впрыскивания, передний фронт с пиком давления, участок квазистационарного истечения и задний фронт. В первой фазе длительностью до 0,5 мс угол конуса формируется за счет характеристики начала фронта, связанной с отрывом иглы от седла. Различают плавный отрыв иглы от седла и резкий ступенчатый отрыв с небольшим подъемом иглы. В обоих случаях давление начала впрыскивания составляет 1...3 МПа. Скоростной напор фрагментов распада струи невысокий и они сливаются на расстоянии до 10 мм от сопла. Их взаимодействие между собой и воздухом усиливает радиальную составляющую движения, в результате чего образуется небольшое каплевидное облачко с углом конуса до 40°. В третьем случае игла сразу поднимается на величину полного хода, минуя плавный и ступенчатый отрыв. В этом случае струя имеет игловидную форму, а облачко перед соплом не образуется. Во второй фазе (во временном интервале 0,5...1,5 мс), определяемой формой переднего фронта характеристики впрыскивания, скорость истечения быстро растет, струя поглощает облачко и движется дальше с высоким скоростным напором. Соотношение радиальной и осевой составляющих скорости смещается в сторону последней, что снижает угол конуса до 15°. Рост угла конуса до 27° в третьей фазе (в интервале 1,5...2,3 мс) перед воспламенением и сразу после него объясняется снижением давления впрыскивания после перехода через пик и действием температуры. Четвертая фаза соответствует квазистационарному истечению с медленным снижением давления впрыскивания. Угол конуса уменьшается со скоростью 1...3 град/мс, что вызвано выгоранием оболочки струи. Задний фронт характеристики давления впрыскивания угол конуса не формирует. После завершения впрыскивания струя теряет конусность. Сравнительно большой угол конуса струи в начале впрыскивания не оказывает заметного влияния на рабочий процесс дизеля, так как количество топлива в этой фазе невелико и оно не воспламеняется. При этом размеры облачка незначительны и оно трансформируется и поглощается струей. Результаты проведенных работ позволили объяснить закономерности формирования угла конуса топливной струи.

В докладе С.Н. Девянина (МГАУ им. В.П. Горячкина), В.А. Маркова и А.В. Микитенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассмотрен метод организации направленного движения воздушного заряда в камере сгорания (КС) быстроходного дизеля. В быстроходных дизелях с полуразделенными КС в поршне эффективность процесса смесеобразования в значительной степени определяется интенсивностью вихревого движения воздушного заряда в цилиндрах двигателя. Для повышения энергии смесеобразования и улучшения его качества в дизелях производства ОАО “АМЗ”, имеющих камеру сгорания в поршне, авторами было предложено несколько опыт-

ных конструкций поршней, обеспечивающих направленное движение воздушного заряда в цилиндрах за счет выполнения профилированных каналов на его верхней торцовой поверхности (на днище поршня). Серийная КС в поршне диаметром  $d = 80$  мм и глубиной  $h = 24$  мм обеспечивает степень сжатия  $\varepsilon = 15$ . В опытных вариантах поршней диаметр КС в поршне был уменьшен до  $d = 76$  мм с целью сохранить неизменную степень сжатия  $\varepsilon = 15$  при выполнении профилированных каналов на днищах опытных поршней. Первый опытный вариант КС обеспечивает направление воздушного заряда к струе топлива за счет выполнения на днище поршня в его периферийной части четырех радиально расположенных трапециевидных каналов, сужающихся в направлении центрально расположенной КС. Вторым опытным вариантом КС позволяет направлять воздушный заряд в пристеночную зону за счет выполнения на днище поршня четырех тангенциально расположенных (по касательной к центрально расположенной КС) трапециевидных сужающихся каналов. Третьим опытным вариантом КС аналогичен варианту № 2, но поршень выполнен без острых граней в направляющем воздушном канале для снижения теплонапряженности острых кромок профилированных каналов. Экспериментальные исследования поршней со штатным и опытными поршнями проведены на одноцилиндровой установке двигателя 1 ЧН 13/14. Изменение интенсивности впрыскивания в процессе испытаний достигалось за счет гидродогружения форсунки от дополнительного насоса, работающего на гидроаккумулятор и приводимого от коленчатого вала установки. Такая система топливоподдачи позволяла изменять давление в гидроаккумуляторе  $p_{\text{фг}}$  от 0 до 36 МПа, что приводило к увеличению максимального давления топлива в линии высокого давления от 27 до 80 МПа. Результаты проведенных испытаний подтвердили улучшение показателей дизеля при использовании поршней предложенных конструкций. В частности, замена штатного поршня опытным по варианту № 1 и одновременная оптимизация давления впрыскивания в дизеле, работающем на режиме с  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>,  $N_e = 34$  кВт и  $p_{\text{фг}} = 36$  МПа позволили снизить удельный эффективный расход топлива  $g_e$  с 266 до 247 г/(кВт·ч) при уменьшении дымности ОГ  $K_x$  с 57 до 50 % по шкале Хартриджа. При опытных поршнях по варианту № 2 в этих условиях также снижается  $g_e$  до 247 г/(кВт·ч) при дымности ОГ  $K_x = 25$  %. Опытные поршни по варианту № 3 обеспечили получение  $g_e = 250$  г/(кВт·ч) и  $K_x = 28$  %. Таким образом, на номинальном режиме с  $p_{\text{фг}} = 36$  МПа наименьшие значения удельного эффективного расхода топлива ( $g_e = 247$  г/(кВт·ч)) достигнуты при установке поршней по вариантам № 1 и 2, а минимальные значения дымности ОГ ( $K_x = 25$  %) — при установке поршня по варианту № 2. Улучшение показателей дизеля при оптимизации давления впрыскивания и движения воздушного заряда достигнуто и на других режимах.

“Экспериментальное исследование теплового состояния поршня газового двигателя транспортного назначения КамАЗ 740.13Г” — тема выступления А.И. Гайворонского (ООО “ВНИИГАЗ”). При разработке газовой модификации дизельного двигателя транспортного назначения КамАЗ 740.13Г были проведены исследования теплового состояния поршня. Для определения тепловых нагрузок днища поршня был использован бесконтактный метод теплофизических исследований на основе кристаллических измерителей максимальной температуры (облученный алмаз), которые в количестве шести штук были размещены на расстоянии 1...1,5 мм от поверхности огневого днища поршня в углублении камеры сгорания (имеющей цилиндрическую симметричную форму), на плоской торцовой поверхности и на выточке под выпускной клапан. Испытания проводились при частоте  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup> и мощности двигателя  $N_e = 174,3$  кВт. Угол опережения зажигания составлял 24° п.к.в., а коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,34$ . Степень сжатия для газовой модификации была уменьшена с  $\varepsilon = 16$  (дизельный прототип) до  $\varepsilon = 11,3$ . Полученные в ходе проведения испытаний данные сопоставляли с результатами измерений, сделанных этим же методом на дизельном прототипе, работающем на режиме с  $n = 2600$  мин<sup>-1</sup> и  $N_e = 154$  кВт. Сравнение полученных значений температур позволяет отметить следующее. Увеличение диаметра КС газового варианта, вызванное увеличением мертвого объема для необходимого понижения степени сжатия  $\varepsilon$  с 16 до 11,3, переносит область высоких температур на теплообменных поверхностях от центральной части КС ближе к периферии и боковой поверхности поршня. В центральной части КС за счет “срезания” выпуклости, имеющейся у дизельного прототипа, происхо-

дит снижение температуры поверхности, в том числе за счет уменьшения скорости перемещения газов в этой области. За счет более высокой температуры периферийной “днищевой” части поршня можно прогнозировать трудности с обеспечением требуемой температуры в районе верхнего компрессионного кольца. Повышение температур на периферийной боковой поверхности поршня и уменьшение толщины кольцевой части его днища может уменьшить по сравнению с дизельным вариантом величину бокового зазора между верхним поясом гильзы и поршнем, что может привести к задирам пар трения. Таким образом, проведенные во ВНИИГАЗе исследования по определению температурных полей деталей цилиндропоршневой группы высокофорсированного газового двигателя транспортного назначения с использованием бесконтактных датчиков температур, позволили определить температурное поле днища поршня. Эти данные могут быть использованы при разработке надежных и конкурентоспособных газовых и газожидкостных двигателей различного назначения.

В докладе Г.И. Шарова (СПбГМТУ) и П.М. Быкова (ЧГУ) рассмотрены вопросы теплофизики процесса наращивания металлосиликатной поверхности. В процессе анализа системы энергосбережения ДВС установлено, что при обеспечении научно-обоснованного режима обработки узлов трения серпентино-магниевым составом (СМС) наблюдается образование на контактирующих поверхностях устойчивых противоизносных слоев, получивших название силикатно-магниевого покрытия (СМП). В основе процессов наращивания СМП на изношенных деталях лежат трибохимические преобразования трущихся поверхностей, имеющие место при следующих условиях: в зоне контакта деталей обеспечено наличие СМС; создан режим “критических” температур, при которых наблюдается дезориентация граничного слоя смазки, измельчение СМС шероховатостями, образование электромагнитных полей, выделение на локальном уровне тепловой энергии с достижением температур 400...1100°С. Проведенные исследования с использованием прибора контроля режима обработки типа ИВК 7607 “Кронверк” показали, что выделяемая энергия трибохимических процессов определяется зернистостью и скоростью процесса измельчения СМС. При внесении в состав смазочного материала СМС повышается ее электропроводность, а при омическом сопротивлении менее 0,8...1 кОм образуется “туннельный пробой”, при котором продукты химических реакций наращивания СМП перестают удерживаться электромагнитными полями в зоне контакта, электрически нейтрализуются в слое движущегося смазочного материала и оседают по мере роста в фильтрах. Прибор ИВК 7607 “Кронверк” позволяет ранее неуправляемый процесс обработки перевести в подконтрольный режим.

Доклад В.И. Толщина, В.А. Зяброва (МГАВТ) посвящен комплексной оценке надежности, экономичности и токсичности судовых дизелей мощностью 65...300 кВт, работающих в акватории городов и портов. Основной задачей работы является разработка рекомендаций для судоходных компаний по выбору главного двигателя в целях улучшения экологических, экономических параметров и увеличения надежности за счет анализа режимов работы. Для этого была разработана математическая модель расчета изменения тепловых напряжений, коэффициента избытка воздуха и ряда других параметров при работе судна на переходных режимах, при пуске и прогреве двигателя. В основу математической модели положены: теория тепломассообмена, закон тепловыделения по методу И.И. Вибера, дифференциальные уравнения динамики вращающихся масс двигателя, система дифференциальных уравнений регулятора частоты вращения, а также разгона судна при отходе судна от причала. Кроме того, учитывались температурные поля втулки цилиндра дизеля, рассчитанные неявным конечно-разностным методом. В результате расчета определены тепловые напряжения рабочего цилиндра на переходных режимах работы дизеля. Кроме того, модель используется для программы тренажера по подготовки морских инженеров. В программе учитываются различные неисправности, возникающие при пуске двигателя: неисправность пускового устройства, ТПА и т. д. Для регулирования качества переходного процесса, в целях изменения времени на наработку, разработан стенд с электронным регулятором. По результатам моделирования и экспериментальным данным был выбран наиболее оптимальный режим разгона двигателя с точки зрения увеличения времени на наработку. Для выбора двигателя в качестве целевой функции был предложен экономический показатель, учитывающий такие факторы,

как цена двигателя, изменение наработки на отказ, изменение дохода судна, изменение средней годовой наработки, затраты на ремонт, экономический ущерб и т.д. По результатам расчета был выбран двигатель ЯМЗ-238 как наиболее перспективный и экономически выгодный. Результаты выбора оптимального разгона двигателя в случае внедрения на речном транспорте систем электронного управления дают возможность значительно увеличить моторесурс двигателя. Результаты расчета предложены ОАО “Столичная Судоходная Компания”.

Коллектив авторов — С.Н. Вознюк, В.Б. Филатов, П.И. Шерешов, С.В. Трофимов (ВТУ) П.В. Федоров, Э.Н. Федорова, К.А. Чужиков (РГАЗУ) — представили доклад “Разработка средств полной защиты дизеля”. Разработано устройство, предназначенное для повышения безопасности эксплуатации дизелей дорожно-строительных машин, позволяющее понижать частоту вращения вала двигателя с различной интенсивностью в зависимости от ускорения выхода скоростного режима за пределы допустимой зоны. Устройство включает блок анализа режима; блок коррекции топливоподачи; датчики частоты вращения, теплового режима, хода рейки ТНВД и индикатор эффективной мощности; электромеханические ИМ перемещения топливного дозатора и заслонки аварийного останова дизеля. При превышении частоты вращения двигателя пределов регуляторной зоны на  $30 \dots 50 \text{ мин}^{-1}$  или перегреве системы охлаждения вначале автоматически уменьшается цикловая подача топлива, а затем закрывается воздушная заслонка аварийного останова со скоростью, пропорциональной ускорению вращения коленчатого вала. Вопросы безопасности работы дизеля особенно актуальны в период обучения (подготовки) молодых призывников, а также гражданских специалистов.

“Особенности построения диагностических моделей энергетического оборудования при развитии множественных дефектов” — тема выступления В.К. Васильева и Д.И. Буханца (РАН). Для идентификации дефектов энергетического оборудования при их множественном развитии необходимо построение обобщенных диагностических моделей (ДМ). Авторами предложен алгоритм построения таких ДМ, включающий математическую модель объекта исследования и учитывающий воздействия внешних факторов, способных повлиять на результаты диагностирования. Математическая модель объекта строится путем обработки результатов его экспериментальных исследований и вычисления коэффициентов регрессии. Предлагаемый алгоритм подтвердил свою работоспособность при создании обобщенных ДМ циркуляционных насосов.

В дискуссии по докладом активное участие приняли профессора Л.В. Грехов, В.И. Ерохов, В.А. Марков, В.И. Толшин, Ю.Е. Хрящев, Б.Я. Черняк, Г.И. Шаров, другие участники семинара. В заключение работы ВНТС была принята резолюция, проведен обмен научной информацией, намечены пути дальнейшей работы.

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