

Создание топливных систем дизелей

Уже в первые годы развития отечественного двигателестроения встала проблема создания бескомпрессорных дизелей, т.е. использующих насосное впрыскивание жидкого топлива вместо пневматического распыливания. Такие дизели должны были преодолеть недостатки дизелей с пневмораспыливанием: ограничение по быстроходности, наличие компрессора высокого давления, сложность эксплуатации, взрывоопасность.

Одним из первых предложение отказаться от компрессора и применить гидромеханический способ распыливания была высказана профессором МВТУ В.И. Гриневецким и осуществлена им на опытном реверсивном дизеле. Однако, недостаточный технологический уровень не позволял быстро найти надежные и простые технические решения. В период с 1918 по 1925 г. было проведено большое количество конструкторских работ отечественными и зарубежными учеными и инженерами, направленными на получение удовлетворительной бескомпрессорной системы подачи топлива.

Среди таких работ, связанных с получением положительных результатов, следует отметить конструкцию топливоподающей аппаратуры, предложенную инженером Н.Н. Бобровым - впоследствии профессором МВТУ. Основными особенностями этой системы являлись введение в форсунку дифференциальной иглы, нагруженной пружиной с предварительной затяжкой. Винтовой распылитель с тангенциальной закруткой струи обеспечивал тонкое распыливание топлива и образование широкого факела распыленного топлива в соответствии с формой камеры сгорания. Таким образом, Н.Н. Бобровым было предложено гидравлическое управление работой форсунки при помощи насоса высокого давления, получившее в настоящее время название систем непосредственного действия и наибольшее распространение на всех типах дизелей. Именно такая система была на соответствующем технологическом уровне реализована в 1927 г. с ТНВД серии А.

В целях усовершенствования бескомпрессорных двигатели с воспламенением от сжатия уделялось большое внимание исследованию вопросов, связанных с увеличением среднего индикаторного давления, снижением удельного расхода топлива, повышением быстроходности, приспособлением двигателя для работы на низкосортных топливах. Первоначально считалось, что топливоподающая аппаратура сравнительно мало влияет на эти показатели, и основное внимание сосредотачивалось на конструировании камеры сгорания. Однако эксплуатация и проведенные эксперименты убедительно показали, что качество работы двигателя в целом во многом зависит прежде всего от качества работы топливоподающей аппаратуры и, главным образом, форсунки и топливного насоса высокого давления. Стало ясно, что без глубокого анализа и изучения нестационарных процессов, происходящих в агрегатах топливной аппаратуры, невозможно добиться высокого качества работы самого двигателя; выяснилось, что в работе двигателя первостепенное значение имеет динамическая характеристика впрыска (изменение давления впрыска по времени), скорость истечения топлива, запаздывание начала впрыска, подтекание топлива, качество распыливания, форма факела и др.

Широкий круг исследований в этом направлении в период с 1932 по 1963 гг. проводились с участием и под руководством проф. МВТУ Германа Георгиевича Калиша. Начав преподавательскую работу в МВТУ в 1920 г, Герман Георгиевич стал ведущим специалистом в своей области, авторитетнейшим педагогом, Кроме того, им проводился широкий круг исследований в различных аспектах теории и конструирования двигателей.

Г.Г. Калишем была разработана наиболее полная методика расчета гидромеханического процесса впрыска для форсунок различных типов, с упором клапанов. Было показано, что при работе на нерасчетных режимах с малыми расходами трудно рассчитывать на высокие показатели распыливания топлива. Также и при выходе иглы на упор характеристика нормальной форсунки становится эквивалентной характеристике открытой форсунки, т.е. придает топливной системе нежелательное свойство сильной зависимости давле-

ния впрыскивания от режимов работы дизеля, в первую очередь от частоты вращения вала.

Другим важным выводом из теории форсунок Г.Г. Калиша явилась формулирование условий наступления и практические рекомендации относительно неустойчивости работы форсунок. Было объяснено и обоснованы условия и возможности практического использования явления дробящего впрыскивания. Позднее этот режим вошел в ГОСТы на испытания форсунок, как критерий их исправности.

Г.Г.Калишем изучался и теоретически описан нестационарный процесс подачи топлива в системах непосредственного действия. В его основу были положены два основных фактора, обуславливающих специфику этого процесса.

Во-первых, это первостепенное влияние сжимаемости топлива на продолжительность, давление и величину подачи. Для расчета процесса топливоподачи потребовалось определение физических свойств дизельных топлив. Эту работу проводили и другие ведущие специалисты МГТУ. Интересно отметить то, что полученные ими в 30-х 50-х годах данные и расчетные соотношения с успехом используются и сегодня. Так, помимо соотношений для истинного коэффициента сжимаемости топлива профессором кафедры Д.Н. Вырубовым получено лаконичное выражение для вязкости топлива в функции давления, используемое ныне для расчета утечек, демпфирующих свойств малых зазоров: $\eta_p = \eta_0 \cdot c^{P/P_0}$. Другим примером долголетия научных результатов являются зависимости для коэффициентов сжимаемости, полученные Д.С. Миринским для топлив еще в 50-х годах при давлениях до 280 МПа. Благодаря корректно поставленному эксперименту эти данные сегодня актуальны.

Во-вторых, при теоретическом анализе и описании нестационарного процесса подачи в дизелях Г.Г.Калишем доказывалась важность учета наличия волновых явлений в нагнетательных трубопроводах между ТНВД и форсунками. Концепция волнового процесса рассматривалась, как родственной гидравлическому удару, ранее теоретически разработанному также профессором МВТУ Н.Е.Жуковским. Теоретически и экспериментально было показано, что волновой процесс изменяет не только фазу впрыскивания из-за конечной скорости распространения волны давления по трубопроводу, но также изменяет давление и характеристику впрыскивания. Еще в 1934 г. Г.Г.Калишем были записаны применительно к подаче топлива базовые для расчета нестационарного течения в трубопроводах уравнения движения и неразрывности (без учета переменности скорости звука, гидравлического сопротивления). Очевидно, что привычной реализации метода расчета подачи топлива с одномерным расчетом течения в трубопроводах мешало отсутствие средств вычислений: проводить трудоемкие гидродинамические расчеты с многочисленными итерациями на логарифмической линейке было нецелесообразно. Однако исследования влияния различных факторов волнового процесса: параметров трубопровода, величины объемов, сечения сопел, параметров ТНВД, режимных факторов продолжались экспериментально.

В таких работах участвовали и другие специалисты кафедры. В кандидатской диссертации Н.И.Костыгова (1938 г.) исследовалось влияние типа и конструкции топливного насоса на динамическую характеристику впрыскивания.

Наряду с теоретической проработкой процессов топливоподачи кафедрой проводились работы по нуждам промышленности и эксплуатации. Стремление удовлетворить разнообразные требования, предъявляемые к топливным насосам, привело к большому разнообразию конструкций последних. Однако данных для сравнительной оценки качества их работы не имелось, в связи с чем были исследованы динамические характеристики процесса впрыскивания насосов трех основных типов: с клапанным распределением, с золотниковым распределением и с переменным ходом плунжера. Насосы последних двух типов были изготовлены заводом «Красное Сормово». При исследованиях проверялось качество изготовления плунжерной пары и герметичность надплунжерной полости насоса, теоретически и экспериментально строились динамические характеристики впрыскивания, оценивалась стойкость насосов на износ.

В результате теоретического анализа работы насосов, подтвержденного экспериментальными исследованиями как в лабораторных условиях, так и непосредственно на двигателе, были выявлены недостатки в конструкциях насосов и предложены пути их устранения. Одновременно была установлена необходимость изучения влияния воздуха в топливоподающей системе двигателя на процесс впрыскивания, что и было сделано кафедрой в работе, проведенной в 40-е годы Н.И. Костыговым.

В подтверждение значительного влияния на процесс подачи волновых явлений решалась задача упрощения реверса судовых двигателей при использовании трубопроводов большой длины.

Особого внимания заслуживает научная интуиция и предвидение Г.Г. Калиша. Так, еще в 1937-1940 гг. Г.Г. Калиш со своими учениками изучали процессы и топливную аппаратуру двигателей с впрыскиванием бензина (центральный, распределенный и непосредственный впрыск бензина). Результаты исследований нашли отражение в диссертациях, научно-технических отчетах и публикациях в периодической печати. В частности, в 1941 году в МВТУ им. Н.Э. Баумана инженер С.П. Акоюн защитил кандидатскую диссертацию, посвященную проблемам впрыскивания бензина во впускной трубопровод и непосредственно в цилиндры автомобильных двигателей. Некоторые из результатов диссертации оказались реализованы лишь сегодня.

Работы, начатые Г.Г.Калишем в области теории и расчетов топливоподачи в дизелях, продолжались и в конце столетия.

Если ранее считалось, что для практических расчетов в быстроходных дизелях можно пренебрегать влиянием трения топлива о стенки трубопровода на процесс подачи, то в работах кафедры 90-х годах было показано, что гидродинамическое трение существенно не только для судовых дизелей (с длинными трубопроводами, при работе на мазуте, с малыми частотами), но теперь и для среднеоборотных и высокооборотных дизелей ввиду увеличения скоростей течения топлива благодаря интенсификации впрыскивания и уменьшению диаметров трубопроводов. Главным же достижением в этой области стало утверждение концепции трения в существенно нестационарных условиях (т.е. с многократным отличием в обе стороны коэффициентов сопротивления от квазистационарных значений). Для этой цели профессором кафедры Л.В.Греховым разработаны новые гидродинамические и теплофизические модели в рамках теории пограничного слоя, поставлены тонкие эксперименты с регистрацией профилей скорости в пограничном слое с пространственным разрешением 5 мкм, и временным 15 мкс. Определение характеристик турбулентности в нестационарных потоках в каналах диаметром порядка 2 мм позволило, наконец, констатировать режим течения в трубопроводах топливоподающей аппаратуры. В нестационарных условиях он никак не может характеризоваться известным значением критического числа Рейнольдса, а помимо прочего от времени. Для практических приложений рекомендованы соотношения для коэффициентов сопротивления и критических чисел Рейнольдса в быстропотекающем процессе.

Процессы в нагнетательных трубопроводах, как известно, осложняются двухфазностью топлива. В работах профессора С.Г.Роганова и тогда еще аспиранта А.А.Дамера путем фотографирования потоков в прозрачном круглом канале проведена визуализация динамики двухфазного состояния топлива. Позднее путем микрофотографирования через микроскоп с увеличением $\times 1200$ динамика пузырьков изучалась в импульсном освещении Л.В.Греховым. Практическим выходом этих исследований стали уравнения для упругих свойств (сжимаемости) двухфазных жидкостей в нестационарном процессе с теплообменом между фазами и экспериментально определенными константами.

Другим новым и актуальным фактором топливоподачи к концу XX века стали тепловые эффекты. В 1996 г. впервые были экспериментально зарегистрированы мгновенные температуры топлива в процессе подачи. Разработаны математические модели с учетом разогрева от сжатия, нестационарного теплообмена, диссипации. Экспериментально заре-

гистрирован разогрев топлива на 280...300 град при истечении с давлениями впрыскивания 200 МПа и выше.

В соответствии с запросами промышленности были разработаны математические модели сопряженного расчета топливоподачи и нерезонансных крутильных колебаний в сложных крутильных системах привода ТНВД. Их применение к случаю крутильных колебаний коленчатого вала и возникающих от работы ТНВД колебаний в кольцевой крутильной системе привода ТНВД позволило снять проблему потери управляемости подачей насоса VE Bosch на серийном дизеле ЗМЗ-5143.10.

Эти и другие разработки кафедры нашли использование в программном комплексе «Впрыск», разработанном Л.В. Греховым. Ныне он используется в промышленности, а также стал основным инструментом при выполнении студентами 6-го курса введенного в 1993 г. курсового проекта по топливной аппаратуре и магистерских работ.

Упомянув о разработанных на кафедре профессиональных программах, нельзя не сказать, что как при выполнении заказов промышленности, так и при обучении студентов кафедра уже 20 лет практикует следующий подход: формулировка требований к параметрам топливной аппаратуры производится единственно научно обоснованным способом – на базе оптимизации рабочего процесса дизеля. Сегодня она часто ведется по параметрам токсичности, в том числе удельным выбросам в соответствии с нормами Регламента РФ. Эти работы проводятся с применением программного комплекса «Дизель-РК» (разработчик А.С.Кулешов), которым уже 6 лет пользуются специалисты всего мира по сети Интернет.

Эти программные продукты сделали актуальную задачу – синтез и параметрическая оптимизация топливной системы по заданным энергетическим, экологическим и иным показателям дизеля – не только реальной, но типовой. Для этого применяется обширный оптимизационный аппарат с решением прямой, т.е. корректно поставленной, задачи.

Крупным направлением работ, проводимым в 60-80-е годы под руководством проф. Леонова О.Б., явилось изучение и поиск улучшения протекания переходных процессов в двигателях. Впервые детально экспериментально исследовались параметры рабочего процесса, топливоподачи, наддува, охлаждения и другие. Была специально подготовлена аппаратура повышенного быстродействия с регистрацией по 24 параметрам дизеля в течение всего периода разгона, включая поцилиндровую диагностику. В работах Мануйлова Н.Н., Шкарупило А.Я, Павлюкова В.Г. были выявлены особенности протекания рабочего процесса, наличие и существенное влияние на ухудшение протекания переходных процессов в дизеле переходных процессов в топливной аппаратуре. Было показано, что разгон дизеля задерживается не только из-за инерционности агрегата наддува, собственной инерции, но и снижением цикловой подачи. При этом был выявлен ключевой параметр топливной системы, провоцирующий замедление переходного процесса – остаточное давление в линии высокого давления. Управление этим параметром было обосновано в качестве наиболее эффективного пути ускорения переходных процессов. Дальнейшие разработки в этом направлении Н.Н.Патрахальцева (ныне проф., заведующего кафедрой ДВС РУДН) позволили теоретически обосновать способы, количественные соотношения и ожидаемую эффективность управления переходными процессами.

Наконец, естественным направлением работ кафедры на протяжении 100 лет было совершенствование существующих видов и создание новых образцов топливоподающей аппаратуры. Во всех упомянутых разработках проводилась и такая работа. Однако, она велась и применительно к традиционным двигателям, традиционным топливам. Ее на протяжении трех десятилетий вел Г.Г.Калиш, в том числе совместно с НАТИ, НАМИ, Нижегородским университетом и НММИ.

Большое число разноплановых актуальных работ было выполнено под руководством проф. С.Г.Роганова. Совместно с Ю.П.Макушевым, А.К.Каракаевым им разработаны работоспособные форсунки с замкнутым надыгольным объемом. Продолженные А.Г.Коротневым, Л.В.Греховым работы с аккумулярованием утечек обеспечили в сходных системах не только гарантированную работоспособность, но и возможность 2-3 кратной интенсификации впрыскивания и улучшение экологических показателей ряда дизелей. С.Г.Рогановым и М.Н.Покусаевым изучалось поведение форсунок и устойчивость иглы, разработаны способы обеспечения их эффективной работы в широком диапазоне режимов дизеля.

Еще в 70-е...80-е годы были разработаны топливные системы со ступенчатой характеристикой впрыскивания за счет форсунки с двумя запирающими и гибко связанными между собой иглами (Роганов С.Г., Ищенко В.Н.). За счет специального привода плунжеров ТНВД обеспечивалась двухфазная подача и снижение вредных выбросов тракторами для теплиц (Ивин В.И., Пономарев Е.Г.).

Усовершенствовались конструкции единственного выпускаемого в СССР распределительного насоса НД (проф. МГТУ Роганов С.Г., Борисов Б.Н. и Борисов В.Н.). В 70-е годы для испытаний широкого класса топливных дизельных систем был создан проект и построен топливный стенд с прямым приводом ТНВД от вала электродвигателя (А.Н. Крылов, И.Ю. Ходненко, А.П. Ляпин, Б.П. Ляпин). В соответствии с теми возможностями был применен электродвигатель постоянного тока. Механический стробоскопический сборник позволял определять характеристику впрыскивания

Еще в 80-годах были созданы в содружестве КФ ВЗПИ, КТЗ и МВТУ аккумуляторные системы с электронным управлением (С.Г.Роганов, Ф.И.Пинский, В.А.Рыжов – ныне главный конструктор ОАО КЗ). Все основные решения, используемые ныне в системах Common Rail, тогда уже нашли применение и, в частности, обеспечивали высокие показатели дизелей типа Д49. Уместно сказать, что мировые фирмы в то время шли иным путем, оказавшимся неперспективным.

Уже в последние годы Л.В.Греховым создавались образцы специализированных ТНВД для Common Rail, а совместно с БашГАУ, с ОАО НИКТИД - усовершенствованные электрогидравлические форсунки. Все они доведены до испытаний на дизелях.

Топливные насосы с электронным управлением с двумя рейками управления подачей и углом опережения были созданы и прошли успешные испытания коллективом под руководством профессора В.И.Крутова (В.И.Шатров, В.А.Марков, А.Г.Кузнецов).

Проекты насосов с быстродействующим электроуправляемым клапаном для нужд отечественных заводов подготовлены Л.В.Греховым. Для них также подготовлены математические модели наполнения-отсечки и процессов в линии низкого давления, а также модели быстродействующих электроприводов.

Рассмотренные в качестве примеров работы в области исследования процессов и создания конструкций топливоподающей аппаратуры неполно иллюстрируют тот круг вопросов, который охватывался кафедрой в связи с задачами, выдвигаемыми промышленностью. Часть теоретических и экспериментальных работ обеспечила расширение представлений о процессах подачи топлива.