



УДК 621.436.03(031)

© Г. Б. Горелик, А. Ю. Чистяков, 2007

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ МОДЕЛИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Горелик Г. Б. – д-р техн. наук, проф. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», *Чистяков А. Ю.* – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» (ТОГУ)

При создании математической модели сложной технической системы необходима полноценная проверка адекватности модели отображаемым ею реальным процессам. Для этого создаются стенды, оснащенные комплексом измерительной аппаратуры и устройствами для задания условий, характерных для всех возможных режимов работы. Особенностью работы топливной аппаратуры является неповторяемость режимов из-за межцикловой неустойчивости и неустановившихся процессов топливоподачи. В работе показаны подходы для оценки адекватности математической модели реальным процессам, учитывающие как интегральные характеристики, так и интервальный анализ путем совмещения достоверительной области экспериментальных данных с расчетной областью.

Developing a mathematical model of the complex technical system requires a careful testing of the model adequacy that can display the real processes. For this purpose we use the measuring equipment stands and programming devices for all the possible operating modes. The peculiarity of the fuel equipment work is the modes uniqueness because of inter cyclic instability and the fuel supply unsteady processes. The work submits some methods for estimating the adequacy of a mathematical model to the real processes, with the account of both integrated characteristics, and the interval analysis, achieved by overlapping the confidential area of the experimental data with the calculated area.

При создании и доводке математических моделей сложных быстропротекающих процессов, например, в дизельной топливоподающей аппаратуре, возникает необходимость проверки достоверности отображения моделью реальных физических процессов на всем диапазоне режимов работы.

До настоящего времени наиболее надежным способом оценки адекватности математических моделей (ММ) топливной аппаратуры (ТА) дизелей являлось сопоставление результатов моделирования (интегральных и параметрических характеристик процессов) с экспериментальными данными с учетом особенностей режимов работы. Поэтому разработка и отладка алгоритмов и программ для исследования процессов топливоподачи в дизелях сопровождалась, как правило, поэтапным сопоставлением результатов моделирования объекта с экспериментальными данными, полученными на специальных стендовых установках.

Главная особенность поставленной задачи связана с тем, что на номинальных режимах имеют место высокие уровни давлений и других параметров процессов топливоподачи при повторяемости их, а на режимах малых подач и частот вращения вследствие межциклового неустойчивости (нестационарность процессов) при пониженных значениях параметров отсутствует повторяемость последовательных циклов впрыскивания. Возникает необходимость в разработке и создании специальных средств представительного экспериментального изучения процессов и методов оценки адекватности ММ.

С целью оценки адекватности разрабатываемых ММ ТА, предназначенных для исследования неустановившихся режимов работы, в разные годы в лабораториях кафедр «Двигатели внутреннего сгорания» Ленинградского политехнического института и ТОГУ разработаны и введены в практику специальные стенды: установка для исследования неустойчивости цикловых подач, стенд для исследования топливного факела в условиях неустойчивой от цикла к циклу работы топливной аппаратуры, устройство для исследования расходных характеристик и оценки влияния остаточного давления (в том числе и разрывов сплошности) на параметры топливоподачи [1].

При создании стендов учитывались требования, установленные государственными стандартами, а также принимались во внимание специфические особенности работы ТА на дизеле. Например, в качестве приводного вала и соединительной муфты использовались детали серийного двигателя, в том числе и сама штатная топливная аппаратура, предусматривалось задание реального противодействия со стороны цилиндра двигателя и т.п. Оборудование стендов позволяло проводить контрольно-регулирующие испытания во всем рабочем диапазоне цикловых подач и оборотов, регистрацию процессов топливоподачи у насоса и у форсунки, в том числе, подъем нагнетательного клапана, давление и подъем иглы форсунки, характеристику подачи топлива, давление в наполнительной магистрали. Измерительная аппаратура состояла из тензометрических датчиков типа ЦНИТА для записи дав-



лений у насоса высокого давления (ТНВД), форсунки и в нагнетательной магистрали, индуктивных датчиков подъема иглы распылителя и нагнетательного клапана, тензометрического усилителя УТС 1-ВТ-12 и шлейфного осциллографа. В настоящее время проводится отладка и доводка измерительного комплекса на базе аналоговых датчиков, аналогово-цифрового преобразователя и интерфейсных портов, обеспечивающих запись процессов на ПЭВМ с последующей экспресс-обработкой результатов измерений.

Стенд для исследования топливного факела в условиях нестабильной от цикла к циклу работы топливной аппаратуры включал в себя установку с автоматизированным управлением для фоторегистрации параметров факела, которая позволяет определять его параметры (угол конуса, дальноточность, мелкость распыливания). В основу этой установки положено то обстоятельство, что нестабильная подача топлива по циклам в каждой секции ТНВД носит закономерный характер для одного и того же режима (периодическое чередование активных и пассивных циклов впрыскивания). Импульсы, подаваемые на вход селектора циклов, обеспечивают непрерывную работу шагового его реле. В зависимости от положения переключателя селектора в момент его запуска, определяемого на экране осциллографа, в автоматическом режиме осуществляется выборка активных и пассивных циклов впрыскивания. Приспособление, смонтированное на распылителе форсунки, позволяет выделить один топливный факел, не нарушая работы многосоплового распылителя в целом. Отсечка ненужных впрыскиваний производится при помощи реле со шторкой, имеющего нормально разомкнутый контакт. Срабатывание его и реле спуска затвора фотоаппарата происходит синхронно. Короткая по продолжительности вспышка импульсной лампы стробоскопа происходит в момент, обусловленный замыканием контакта, причем положение контакта может меняться в интервале угла продолжительности впрыскивания. Изменяя положение этого контакта на определенный угол и используя единичные (выборочные) циклы впрыскивания с помощью селектора циклов, можно последовательно отснять факел на различных стадиях его развития. В зависимости от положения переключателя осуществляется выборка циклов впрыскивания (либо все циклы подряд, либо с пропуском через один цикл, либо с пропуском через два цикла). Это приводит к периодическим срабатываниям отсечного устройства и осветителя. Отсечное устройство представляет собой тонкостенный конус, установленный перед соплом распылителя и приводимый в движение соленоидом. Регистрация топливного факела при помощи фотоаппарата и анализ дисперсности распыливания требуют разового впрыскивания топлива в камеру, поэтому цепь селектора дополнительно коммутиру-

ется моноимпульсным избирателем, автоматически замыкающим ее до начала впрыска и размыкающим после окончания. С помощью устройства для выделения одного факела производится исследование много-сопловых форсунок. Одновременно реализуется возможность оценки качества распыливания в активных и пассивных циклах.

Для снятия расходных характеристик ТНВД и форсунки, задания и измерения остаточного давления и разрывов сплошности в трубопроводе высокого давления (ТВД) разработано и изготовлено в дополнение к основному топливному стенду оригинальное устройство (рис. 1).

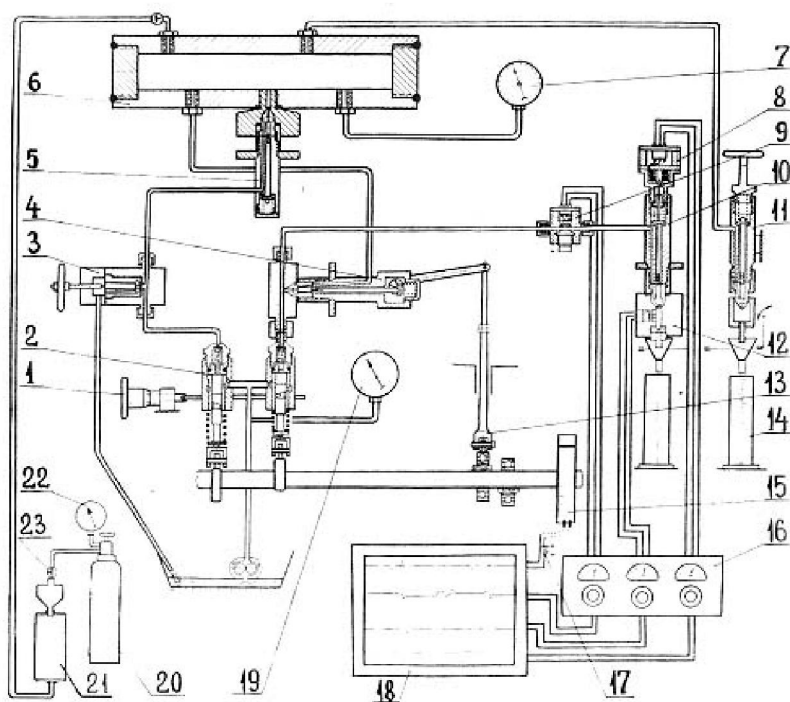


Рис. 1. Схема стендового устройства для задания и измерения остаточного давления в ТВД и определения расходных характеристик ТНВД и форсунки:

- 1-микрометрический винт; 2-секция ТНВД; 3-перепускной кран;
- 4-клапанное устройство; 5-подзарядная форсунка; 6-аккумулятор давления;
- 7-манометр; 8-датчик перемещения иглы; 9-датчик давления; 10-рабочая форсунка; 11-регулятор давления; 12-датчик характеристики подачи;
- 13-механический привод клапана; 14-мензурка; 15-маховичок с подвижным контактом; 16-тензостанция УТС ВТ-12/35; 17-фазовый отсчетчик;
- 18-осциллограф К-105; 19-манометр; 20-воздушный баллон;
- 21-измерительное устройство; 22-манометр; 23-трехходовой кран

Устройство состоит из двух секций ТНВД 2, специально переоборудованной форсунки 4 с механическим приводом 13 к штоку толкате-



ля форсунки, рабочей форсунки 10 с датчиком перемещения иглы 8 и тензометрическим датчиком давления 9, весов для измерения расхода топлива через рабочую форсунку, клапана-регулятора давления 11, выполненного на базе серийной форсунки с отрезанным носком распылителя, аккумулятора давления 6 с подзарядной форсункой 5, перепускного крана 3, микрометрического винта 1 для перемещения рейки ТНВД, шлейфного осциллографа 18. Измерительный тракт состоит из тензометрического многоканального усилителя 16, датчика закона подачи 12 и фазового отметчика индукционного типа 17, воздушного баллона 20 с измерительным устройством 21, подключаемого к баллону при помощи 3-ходового крана 23, а также включает топливопроводы и манометры 7, 19, 22. В промежутках между циклами впрыскивания рабочей форсунки 10 с помощью механического привода 13 отжимается шток толкателя форсунки 4 и игла под действием давления на ее дифференциальную площадку поднимается, сообщая трубопровод высокого давления с аккумулятором 6. В результате давление в ТВД устанавливается равным заданному в аккумуляторе при помощи плунжерной пары, работающей через перепускной кран 3 на подзарядную форсунку 5.

Таким образом, очередной цикл впрыскивания происходит при стабилизированном и заданном остаточном давлении. При этом топливо, прошедшее через нагнетательный клапан, уходит через форсунку 10 и клапан-регулятор 11, если заданное давление меньше остаточного давления соответствующего режима.

Если же заданное давление больше остаточного давления режима, то происходит падение давления в аккумуляторе, регистрируемое манометром 7. Зная объем аккумулятора, коэффициент сжимаемости топлива и падение давления за определенное число циклов, можно вычислить расход топлива через нагнетательный клапан ТНВД. Расход топлива через форсунку 10 определяется весовым способом. Для случая, когда в ТВД на режиме имеет место разрыв сплошности (условно отрицательное остаточное давление), с помощью измерительного устройства 21 под давлением воздушного баллона 20 в аккумулятор и соответственно в ТВД "загоняется" определенное количество топлива до заполнения разрывов сплошности (объем этого топлива можно считать).

Стенд позволяет осуществить оценку влияния величины остаточного давления на параметры топливоподачи и качество распыливания топлива. В связи с большой трудоемкостью проведения экспериментальных работ на комплексном безмоторном стенде и последующей обработки их в большом объеме применялось математическое моделирование гидродинамических процессов топливоподачи в дизельной

топливной аппаратуре, базирующееся на ограниченном эксперименте. Это позволило выполнить анализ неустановившихся режимов работы топливной аппаратуры и исследование нестабильной от цикла к циклу топливоподачи на достаточно представительном расчетно-экспериментальном материале. Расходные характеристики ТНВД и форсунки (рис. 2) определялись расчетным путем на ММ и на специально оборудованном стенде для исследования ТА (см. рис. 1).

Из графика видно, что в отношении комплексных характеристик топливоподачи имеет место качественное и количественное (в пределах 10 %) соответствие расчета эксперименту как в области положительных, так и отрицательных значений остаточного давления, что на первом этапе исследования убедительно подтверждает адекватность ММ.

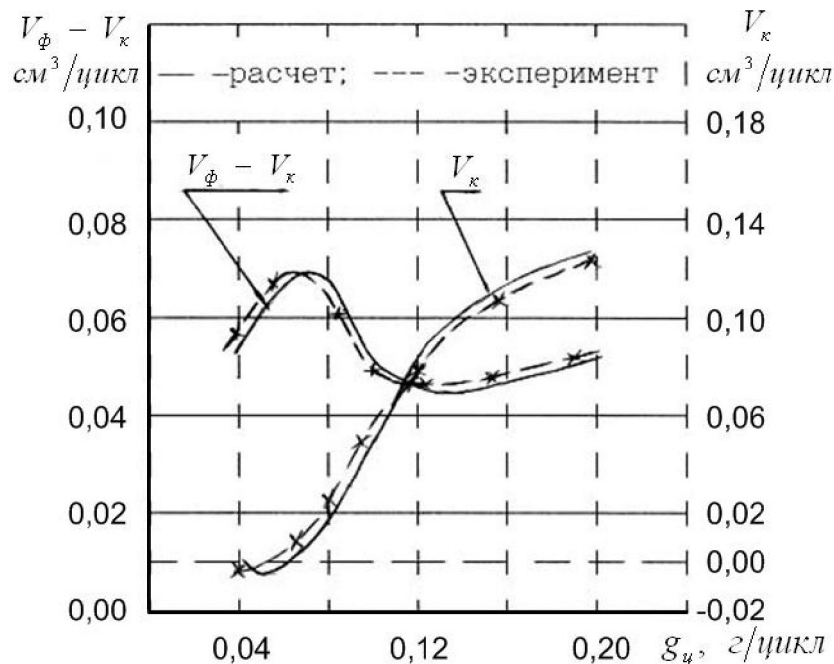


Рис. 2. Зависимости расхода топлива через нагнетательный клапан и величины разрыва сплошности после впрыскивания при заданном остаточном давлении $p_{ост} = 0,3$ МПа от цикловой подачи при 800 об/мин (для дизелей типа М50)

Пунктирной линией показана зависимость разрыва сплошности после впрыскивания, происходящего при величине заданного остаточного давления 0,3 МПа, от цикловой подачи при 800 об/мин по нагрузочной характеристике. По мере уменьшения активного хода плунжера количество топлива, прошедшего через нагнетательный клапан в ТВД, сокращается и при $g_u < 0,11$ г/цикл становится величиной отрицательной (в данном случае происходит перетекание топлива из ТВД в



надплунжерную полость). Это вызывает появление разрыва сплошности в системе высокого давления в интервалах между впрыскиваниями. Дальнейшее уменьшение активного хода приводит к снижению расхода топлива через форсунку при небольшом по величине отрицательном расходе через нагнетательный клапан (- 0,0060 г/цикл) и к сокращению разрыва сплошности в ТВД в интервалах между впрыскиваниями. Зависимость $V_{\phi} - V_k$ позволяет оценить относительную величину разрыва сплошности при работе на установившихся режимах, но для анализа стабильности последовательных циклов топливоподачи она не может быть применена, так как характеризует не установившийся режим, а лишь первый цикл после "единичного возмущения" (в данном случае подразумевается впрыскивание при остаточном давлении 0,3 МПа, не соответствующему установившемуся остаточному давлению). Представленная на рис. 2 характеристика разрыва сплошности как функции нагрузочного режима, являясь комплексной характеристикой, как нельзя лучше и в полной мере позволяет подтвердить адекватность ММ.

Влияние остаточного давления на расходные характеристики и параметры впрыскивания представлено на рис. 3 (сравнение расчета с экспериментом). Это дает возможность отработать ММ ТА в части введения в нее различных уточнений и дополнений при исследовании частичных режимов работы.

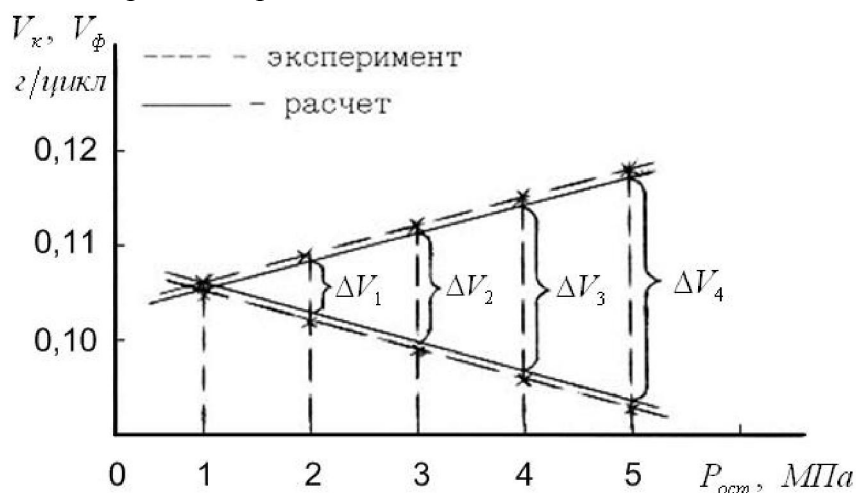


Рис. 3. Расходные характеристики ТНВД и форсунки, полученные расчетом и на специальном стенде (для дизелей типа М50)

Удовлетворительное совпадение интегральных характеристик при этом (рис. 4) на режиме малой подачи топлива дополнительно подтверждает адекватность ММ.

Таким образом, адекватность проверялась, исходя как из комплексной характеристики процессов и параметрических показателей работы, так и по интегральной характеристике. Сравнение результатов эксперимента с расчетами на ЭВМ подтверждает соответствие ММ реальным процессам в ТА дизеля при работе, в том числе и на долевых режимах. При этом сравнение производилось как при работе в области положительных значений остаточных давлений, так и при разрывах сплошности в ТВД.

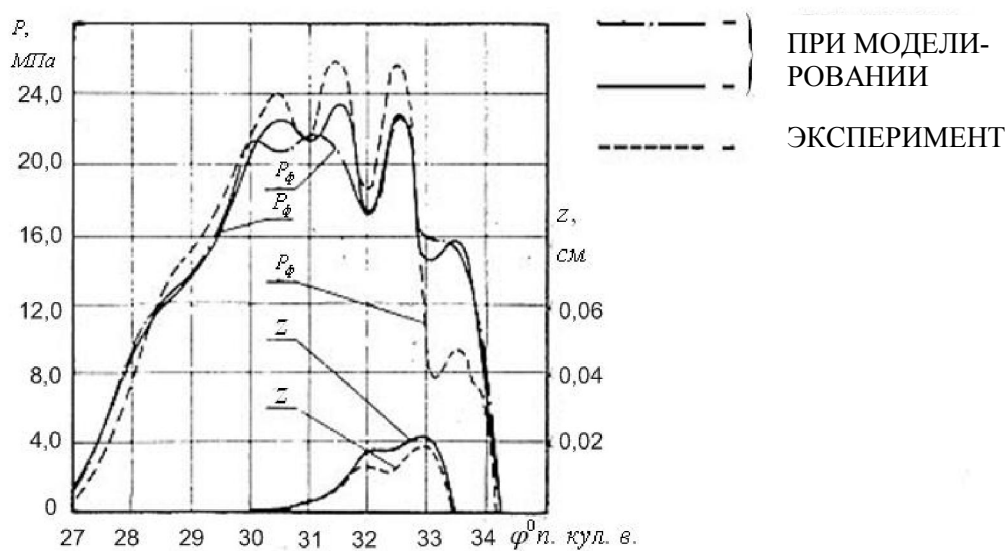


Рис. 4. Совмещение результатов расчета на ММ и осциллографирования реальных процессов на режиме малой подачи топлива (при активном ходе плунжера 0,14 см и 160 об/мин кулачкового вала для ТА дизелей типа М50)

Однако до сих пор во внимание исследователей не принимался такой существенный факт, как возможность флуктуирования реальных процессов (в том числе периодических) во времени. Например, подобное происходит при нестабильной работе топливной аппаратуры от цикла к циклу. При этом и рабочий процесс в цилиндре дизеля протекает с периодической активностью (пассивный и активные циклы). Поэтому на режимах малых подач и частот вращения, где это явление характерно, трудно, а подчас и невозможно сопоставлять результаты расчета и эксперимента по параметрам или интегральным характеристикам. Именно в данном случае адекватность должна оцениваться по совпадению не параметров, а по полям возможных погрешностей и их



доверительных областей как объекта исследования и самой измерительной аппаратуры, так и расчетных методик.

Широко применяемым в дизелестроении способом определения точности ММ ТА является графический метод, представляющий собой совмещение на одном графике кривых изменения параметров, полученных на модели и при экспериментальных исследованиях. Недостатком этого способа является то, что при оценке адекватности модели не учитываются возможные ошибки определения параметров ММ ТА и моделируемой ею системы. Следует учитывать и то, что при проведении экспериментальных исследований никогда неизвестны истинные параметры объекта исследования. И в это же время начальные условия при расчете на ММ ТА должны быть заданы точно. Еще одна сложность заключается в том, что для полной проверки адекватности ММ необходимо сравнить ее с моделируемым объектом при условии одинаковости всех возможных сочетаний значений независимых параметров ММ и объекта. Экспериментальная проверка всех возможных сочетаний независимых параметров такого сложного объекта как ТА дизелей не представляется возможной.

Имеются два подхода к решению проблемы правильной оценки адекватности ММ: точечный и интервальный. Точечный подход основывается на концепции, что адекватной ММ признается такая, истинные значения параметров которой совпадают с истинными значениями соответствующих параметров моделируемого объекта при равных значениях соответствующих независимых параметров, определяющих состояние объекта, с точностью до заданной ошибки. Подобный подход излагался выше.

Однако из-за необходимости точного согласования исходного массива данных, описывающих состояние объекта в ММ с истинными значениями параметров, и возможными флуктуациями процессов во времени более приемлемым представляется интервальный метод оценки адекватности ММ [2, 3]. Суть метода заключается в следующем. Проводится как можно большее количество измерений величины, на основе которой осуществляется проверка адекватности ММ при одинаковых значениях входных параметров состояния объекта. В данном случае исследуемой величиной является давление топлива вблизи форсунки P_{ϕ} . Чем больше количество измерений m , тем меньше вероятность появления случайных ошибок, однако из-за возрастания трудоемкости эксперимента считается нецелесообразным брать $m > 5 \dots 10$. Результаты всех измерений возможно представить в виде диаграммы наложенных циклов, показанной на рис. 5. По полученным экспериментальным данным всех измерений строится кривая среднестатисти-

ческих значений (рис. 6). Для этого диаграмма разбивается на сечения по углу поворота кулачкового вала ТНВД. Шаг изменения величины угла поворота выбирается в зависимости от объема экспериментальных данных. Определяются среднестатистические значения величины давления топлива для каждого сечения. Например, для сечения φ_k (рис. 5)

$$\bar{P}_{\varphi_k} = \frac{\sum_{j=1}^m P_{\varphi_k, j}}{m},$$

где $\sum_{j=1}^m P_{\varphi_k, j}$ - сумма значений P_{φ} всех измерений для сечения φ_k .

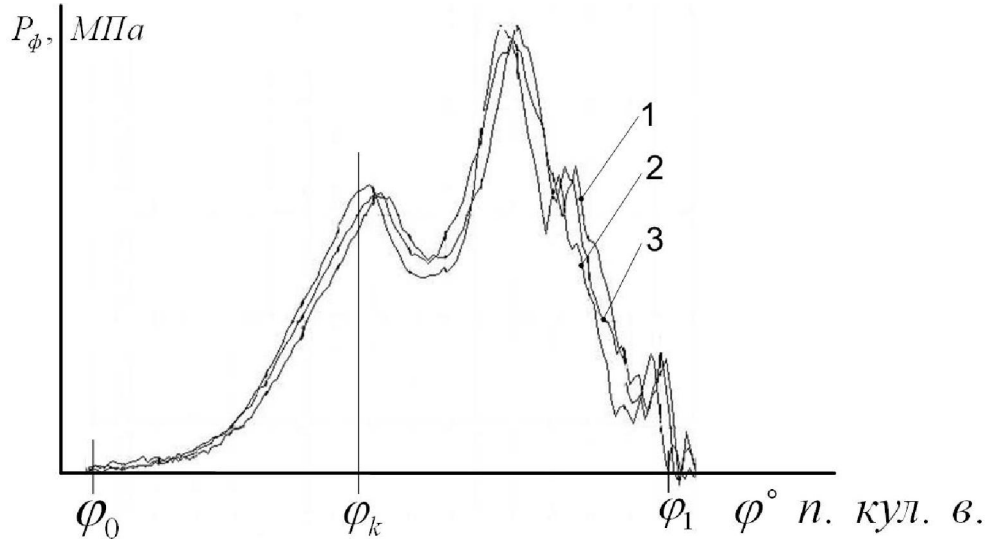


Рис. 5. Диаграмма, полученная путем совмещения данных измерений: 1, 2, 3, - экспериментальные кривые изменения давления топлива вблизи форсунки в различных циклах одного режима

В результате получаем кривую, состоящую из среднестатистических значений давления топлива на каждом сечении диаграммы, т.е. математическое ожидание P_{φ} от φ . Далее определяется стандарт выборки по формуле

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (\bar{P}_{\varphi_k} - P_{\varphi_k, j})^2}$$

и определяется доверительный интервал



$$\beta = \frac{s}{\sqrt{m}} \cdot t(P_0, m),$$

где $t(P_0, m)$ - критерий Стьюдента, P_0 - доверительная вероятность, по сути являющаяся вероятностью адекватности полученного доверительного интервала, т. е. $\beta \geq |P_{\phi_{\kappa, j}} - \bar{P}_{\phi_{\kappa}}|$ с вероятностью P_0 . Целесообразно задавать значение P_0 в диапазоне 0,95 – 0,99.

При этом следует провести обнаружение грубых ошибок. Это связано с тем, что при достаточно больших m возрастает вероятность того, что результаты хотя бы одного измерения сильно отклонятся от среднего значения случайно, т.е. на законном основании.

Если для всех измеренных величин выполняется условие

$$|P_{\phi_{\kappa, j}} - \bar{P}_{\phi_{\kappa}}| \leq \sqrt{t^2(\sqrt{m}P_0, m) + \frac{1}{m} \cdot t^2(P_0, m)} \cdot s,$$

то нет оснований считать одну из них грубо ошибочной. При наличии грубых ошибок их допустимо отбрасывать.

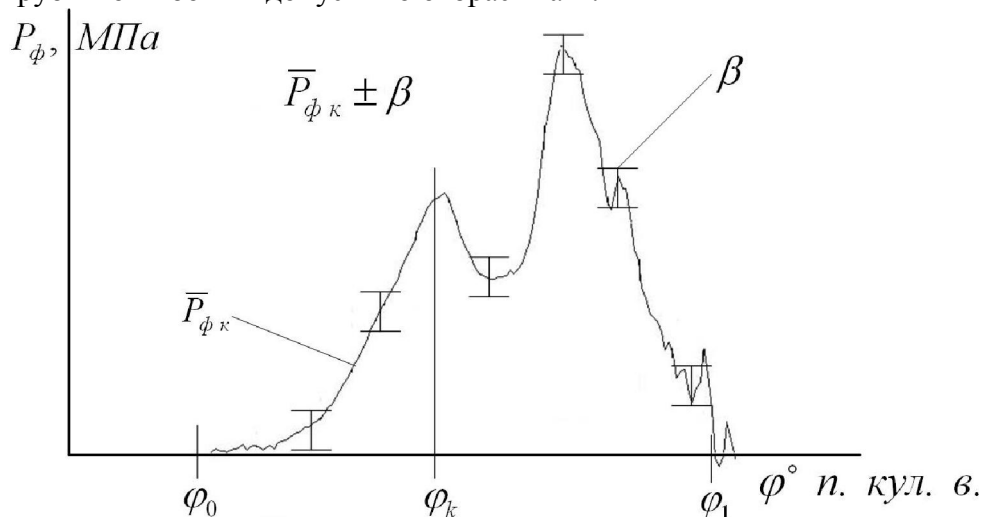


Рис. 6. Кривая среднестатистических давлений топлива и доверительный интервал

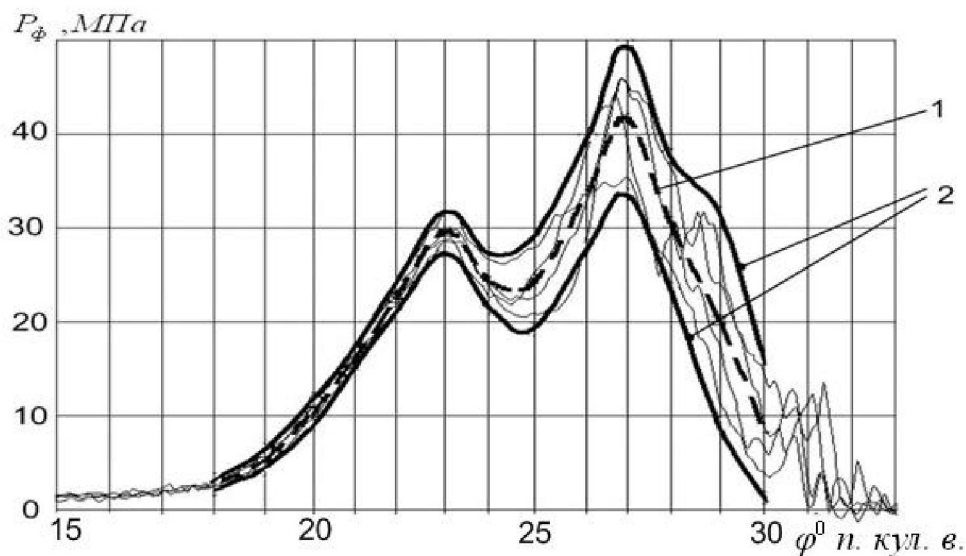
При этом следует также учитывать, что при проведении эксперимента, как правило, не удается с достаточной точностью определить значения необходимых для численного моделирования конструктивных и настроечных параметров ТА. Это связано, в первую очередь, с погрешностями измерительного оборудования и принципиальной невозможностью точного измерения некоторых параметров. В то же вре-

мя при гидродинамическом расчете на ММ ТА все входные параметры ТА должны быть заданы точно. Поэтому для наиболее важных конструктивных и настроечных параметров проводятся серии расчетов при значениях входных параметров ТА $k \pm \Delta k$, где Δk - вероятная погрешность определения данного параметра при неизменности остальных. Таким образом, для каждого входного параметра получим область допустимых значений P_ϕ в каждом сечении диаграммы по углу поворота кулачкового вала ТНВД, сформированную серией расчетов на ММ ТА с учетом возможной погрешности определения каждого исследуемого входного параметра ТА. При этом следует учитывать, что при изменении входных параметров ТА также будет изменяться режим ее работы и степень межциклового неустойчивости РП ТА. Для проверки адекватности ММ выбирается область, полученная варьированием параметра, наиболее влияющего на протекание процессов топливоподачи.

Оценка адекватности ММ производится путем совмещения достоверной области экспериментальных данных с расчетной областью, полученной на ММ параметра, по которому проверяется адекватность. При совмещении областей в каждом сечении диаграммы ϕ_{kj} может быть принята гипотеза об адекватности модели по данному параметру.

Сравнение расчетной и экспериментальной диаграмм изменения P_ϕ по углу поворота кулачкового вала ТНВД в соответствии с вышеизложенной методикой представлено на рис. 7.

а





б

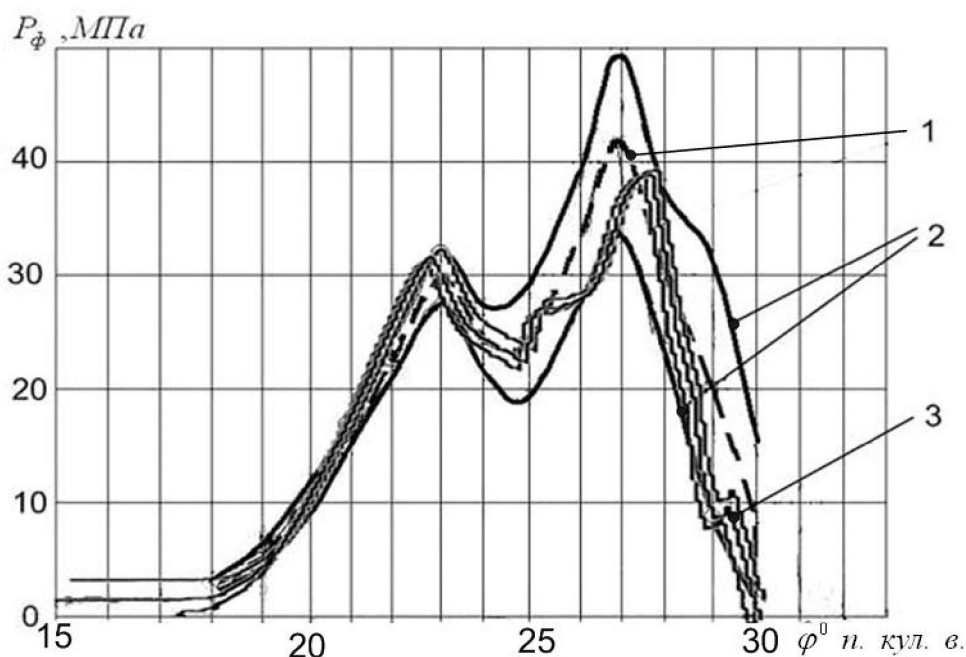


Рис. 7. Проверка адекватности ММ ТА на примере исследования процессов топливоподачи топливной аппаратуры дизель-генераторов ДГР 160/750 на режиме холостого хода:

а – доверительный интервал (2) и среднестатистическая кривая (1) экспериментальных данных; б – совмещение экспериментальной (2) и расчетной (3) областей данных

Проверка адекватности проводилась для режима с $n_n = 337$ об/мин и величиной цикловой подачи $g_u = 3,4 \cdot 10^{-5}$ кг/цикл. Расчетная область допустимых значений формировалась с учетом возможной погрешности при определении следующих величин: диаметр нагнетательного клапана $\pm 5\%$, величина давления открытия иглы форсунки $\pm 5\%$, величина разгрузочного хода клапана $\pm 10\%$. Сравнение расчетных областей по трем входным параметрам показало, что наиболее значимой является величина разгрузочного хода клапана, что связано со значительным влиянием данного параметра на величину режимного $P_{ост}$ и степень межцикловой неустойчивости РП ТА. Следует отметить, что в данном случае расчетная область допустимых значений P_ϕ значительно меньше доверительной области эксперимента.

Как видно из рис. 7, имеет место достаточная точность ММ ТА во всей области процесса впрыскивания. При этом на участках, характеризующихся полным совмещением экспериментальной и расчетной областей исследования, вероятность адекватности по P_ϕ составляет $P_{0\ \Sigma} = P_0 = 0,95$.

Для участков с неполным совмещением – $P_{0\ \Sigma} \leq P_0 = 0,95$. При этом максимальное отклонение кривой средних расчетных значений от среднестатистических экспериментальных данных составило около 12 % в сечении $\varphi = 26^0$ п. кул. в.

Таким образом, решение такого важного вопроса, как обеспечение адекватности ММ отображаемым реальным процессам в объектах (даже в условиях работы на неуставившихся режимах) представляет собой трудоемкую, но тем не менее обязательную задачу при проведении исследований и принципиально в любой области знания. Эксперимент на специально подготовленных стендах, оснащенных современной измерительной аппаратурой, необходим на первой стадии исследования для отладки достоверной ММ, далее возможен объемный и многосторонний расчет и, наконец, венцом исследования является экспериментальная проверка выбранного оптимального решения.

Библиографические ссылки

1. Горелик Г. Б. Процессы топливоподачи при работе топливной аппаратуры дизелей на долевых и переходных режимах. Хабаровск, 2003.
2. Исерлис Ю. Э., Мирошников В. В. Системное проектирование двигателей внутреннего сгорания. Л., 1981.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы / Под ред. А. А. Самарского. М., 1978.