

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФОРСУНОК ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Ю. Коньков, к.т.н., доц., В.Г. Кочерга, преподаватель  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Предложена модернизация типового стенда для проверки и регулировки форсунок дизелей, заключающаяся в установке дополнительного измерительного оборудования для регистрации быстропротекающих процессов при впрыскивании топлива. Представлен новый метод получения информации о техническом состоянии проверяемой форсунки с использованием положений теории идентификации. Приведены результаты практической реализации метода, предназначенного для проверки форсунок дизелей 10Д100 и Д49.

Существующая технология проверки технического состояния (ТС) форсунок основана на использовании специальных устройств, в которых для впрыскивания топлива используется секция топливного насоса высокого давления (ТНВД) с ручным приводом плунжера. Огромное количество конструктивных вариантов исполнения таких устройств — от приспособлений, разработанных для гаража, до производительных автоматизированных стендов, — принципиально соответствуют схеме, изображенной на рис. 1 сплошными линиями. Отрабатанная десятилетиями технология испытания форсунок позволяет объективно определить показатели герметичности распылителя по запирающему конусу, гидравлическую плотность форсунки, давление начала впрыскивания. Заводы изготовителя уделяют большое внимание контролю перепада давления в процессе впрыскивания  $\Delta p_{\text{впр}}$  (разницы между давлением начала и конца подачи топлива). Однако достоверное определение этого показателя сопряжено в эксплуатации с определенными трудностями, обусловленными, по мнению авторов, применением в качестве средства измерения трубчато-пружинного манометра. Суть проблемы становится понятной при анализе серии осциллограмм (рис. 2), полученных при испытании одной и той же форсунки одним и тем же оператором на стенде А106.2, сертифицированным для использования в локомотиворемонтных депо страны [1]. Для

осциллографирования стенд был дополнительно оснащен датчиком давления, датчиком хода плунжера и устройством ввода данных в персональный компьютер, которые показаны на рис. 1 прерывистой линией. Существенное отличие представленных на рис. 2 осциллограмм давления на участке после т. 2 обусловлено, в первую очередь, остаточным давлением, с которого начался нагнетательный ход плунжера, и, во вторую, — законом движения плунжера. Следует отметить, что оба эти фактора являются во многом случайными и не регламентируются существующими инструкциями.

На всех осциллограммах можно выделить несколько участков. На первом участке, предшествующем открытию иглы, давление нарастает, усилие, прикладываемое оператором, приближается к максимальному значению и поэтому определение давления в момент начала впрыскивания (т. 1) не вызывает трудностей, в том числе и с использованием штатного манометра стенда. Теоретически следовало бы прекратить нагнетательный ход плунжера сразу после того как откроется клапан (игла) форсунки и начнется процесс 1–2 — истечение топлива. Пример такого впрыска приведен на рис. 2, а. Нагнетательный ход в этом случае начался с малого значения

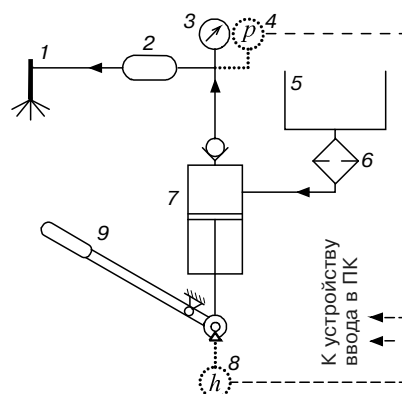
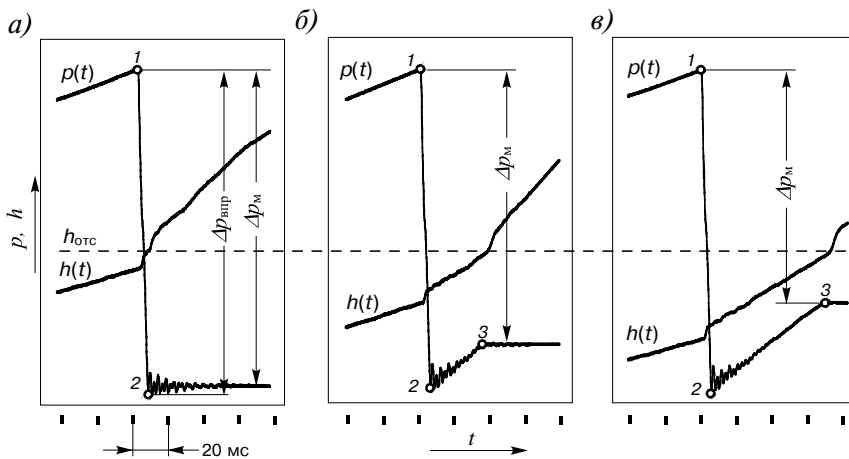


Рис. 1. Схема стенда для проверки и регулировки форсунок:

1 — форсунка; 2 — аккумулятор; 3 — манометр; 4 — датчик давления; 5 — бак с топливом; 6 — фильтр; 7 — секция ТНВД; 8 — датчик линейного перемещения; 9 — рычаг



**Рис. 2. Осциллограммы давления  $p(t)$  и хода плунжера  $h(t)$  при различных условиях впрыскивания:**

$\Delta p_{впр}$  и  $\Delta p_m$  — соответственно действительный и измеренный по манометру перепады давления в процессе впрыскивания;  $h_{отс}$  — подъем плунжера, соответствующий отсечке топлива

давления в магистрали и нижняя кромка плунжера открыла отсечное отверстие практически одновременно с началом процесса впрыскивания. Давление конца впрыскивания и остаточное давление на этой осциллограмме примерно совпадают. На других реализациях сигнала давления после посадки иглы в седло нагнетательный ход плунжера продолжался (участок 2–3), и это привело к заметным отличиям остаточного давления (фиксируемого оператором по манометру) от давления в конце впрыскивания. Существует два направления устранения указанной проблемы. Задачей первого является такое конструктивное исполнение стенда, при котором процесс впрыскивания будет максимально приближен к характеру, соответствующему осциллограмме рис. 2, а. Это достигается тщательной регулировкой подачи ТНВД стенда и подбором объема аккумулятора стенда [2] или даже дополнительными устройствами для плавного досжатия топлива перед форсункой при заблаговременно остановленном плунжере, как это выполнено в приспособлении 30Д.181.61 спч. [3]. Такие решения снижают универсальность оборудования, увеличивают продолжительность операций. При этом по-прежнему остается доля случая в результатах измерения. Этого недостатка лишено второе направление, задачей которого является регистрация и анализ быстроизменяющегося в процессе впрыскивания давления. Перепад давлений, определенный по ординатам т. 1 и т. 2 во всех приведенных выше реализациях сигнала одинаков и соответствует рекомендованной заводом-изготовителем для форсунок дизель-генератора 1А-9ДГ исп. 3.

В Дальневосточном государственном университете путей сообщения в рамках работы студен-

ческого научного общества при лаборатории «Тепловые двигатели» была выполнена модернизация стенда А106.2, заключающаяся в замене манометра вышеуказанными датчиками. Дооснащение стенда микропроцессорным устройством с выводом данных анализа последнего процесса впрыскивания на жидкокристаллический индикатор (рис. 3) является на наш взгляд простым и очевидным решением проблемы корректного определения перепада  $\Delta p_{впр}$ . Такой же подход используют и ведущие производители испытательного оборудования [4], но, к сожалению, не отечественные.

Дальнейшее развитие работы по совершенствованию испытаний форсунок на стенде А106.2 получили за счет применения компьютерного анализа полученных при прокачке форсунок осциллограмм. Это позволило расширить возможности и объективность оценивания качества распыливания топлива форсунками вместо субъективной визуальной оценки «туманобразности» факела и слуховой оценки «резкого звука, сопровождающего впрыскивание». Здесь в кавычках приводятся выдержки из многочисленных инструкций. Компьютерный анализ выполнялся с использованием теории идентификации. Журнал «Двигателестроение» уже писал о результатах применения этой теории при анализе индикаторных диаграмм дизеля [5]. Там же были изложены основные принципы практической реализации метода количественного оценивания по результатам наблюдения за входным и выходным сигналами объекта. В рассматриваемом методе объект представлен проточной ча-



**Рис. 3. Фотография модернизированного стенда А106.2 и схема вывода данных на ЖКИ**

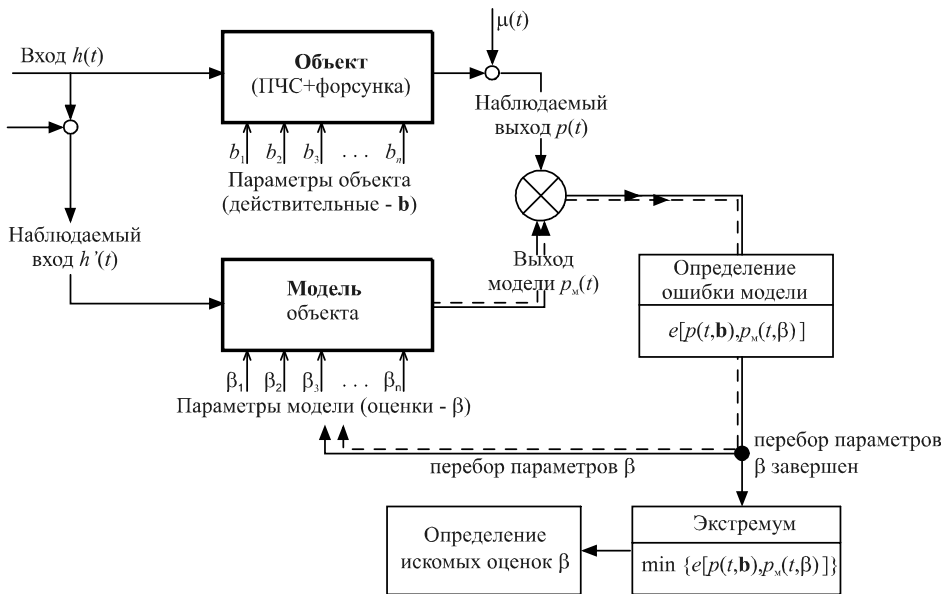


Рис. 4. Структурная схема предлагаемого метода оценивания параметров технического состояния форсунки

стью стэнда (ПЧС) и проверяемой форсункой. Наблюдаемым входным сигналом был сигнал датчика перемещения, а выходным — сигнал датчика давления в магистрали стэнда. Известно [6], что задача параметрической идентификации объекта заключается в поиске таких значений его параметров, при которых выход модели (в нашем случае результаты расчета сигнала давления) наиболее близок к выходу объекта (измеренному сигналу давления). Важнейшую роль в решении такой задачи играет корректная математическая модель процесса впрыскивания. Особенностью математической модели, разработанной для условий впрыскивания на стэнде, является отказ от методики расчета волнового распространения давления топлива в магистрали. Скорость и положение плунжера в любой момент рассчитываемого интервала времени определяются на основании эксперимента. И наконец, потребовались уточнения в описании динамики клапана ТНВД, так как при малых скоростях плунжера

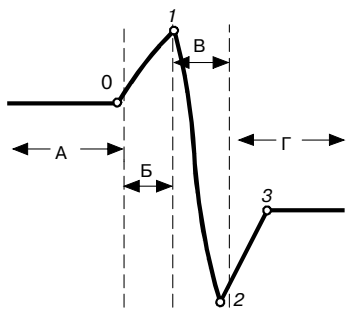


Рис. 5. Разделение расчетной области на характерные участки

его положение оказывается неустойчивым. В остальном авторами использовались подходы, заложенные еще И.В. Астаховым и Б.П. Пугачевым для расчета процесса впрыскивания топливной аппаратурой разделенного типа.

Не касаясь деталей выполненных уточнений, рассмотрим технологию поиска «оценок» технического состояния форсунки. Структура предлагаемого метода приведена на рис. 4.

В вектор оцениваемых параметров  $\beta$  были включены семь величин (табл. 1), которые наиболее существенно влияют на результаты расчета математической модели и вместе с тем отражают ТС элементов системы, в том числе и форсунки.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в проточной части стэнда, на четырех условно выделенных участках

диаграммы впрыскивания (рис. 5). Первый участок, до  $t = 0$ , характеризует величину давления, оставшегося в трубопроводе стэнда, от предыдущего впрыскивания. Наклон прямой линии на этом участке зависит от величины утечек по прецизионной поверхности иглы и корпуса распылителя форсунки, а также от утечек в системе стэнда. Движение плунжера насоса стэнда на этом участке происходит при открытых впускных окнах гильзы плунжера. В окрестности  $t = 0$  происходит открытие нагнетательного клапана ТНВД стэнда. С началом движения нагнетательного клапана начинает возрастать давление в магистрали стэнда. Положение  $t = 0$  определяется ходом

Таблица 1

Оцениваемые параметры

Обозначение		Наименование	Что характеризует
на рис. 4	общепринятое		
$\beta_1$	$d_c$	Диаметр сопловых отверстий	ТС форсунки
$\beta_2$	$\delta_n$	Суммарные утечки в форсунке, приведенные к зазору в сопряжении игла-корпус распылителя	
$\beta_3$	$z_{max}$	Ход иглы форсунки до ограничителя	
$\beta_4$	$j_n$	Жесткость пружины иглы форсунки	
$\beta_5$	$\delta_n$	Зазор в плунжерной паре	ТС плунжерной пары
$\beta_6$	$h_s$	Ход плунжера до геометрического начала процесса нагнетания топлива	Технологические допуски
$\beta_7$	$\varphi$	Подача насоса стэнда	Режим испытаний

плунжера до геометрического начала нагнетания, величиной затяжки пружины нагнетательного клапана и ее жесткости. Дальнейшее нарастание давления в магистрали стенда (участок 0—1) вызвано нагнетательным ходом плунжера при открытом нагнетательном клапане ТНВД стенда. Форма кривой на этом участке зависит от скорости плунжера и величины утечек топлива через зазор в плунжерной паре. В т. 1 давление топлива достигает величины давления начала впрыскивания. На координату расположения этой точки влияет начальная затяжка и жесткость пружины иглы форсунки. Падение давления на участке диаграммы между т. 1 и 2, определяется величиной дополнительного объема, освобождаемого иглой и расходом топлива через сопловые отверстия. Этот участок представляет собой процесс непосредственного впрыскивания топлива, который продолжается до т. 2 — момента посадки иглы на свое посадочное место. В совокупности на форму кривой участка 1—2 и расположение т. 2 влияют ход иглы до ограничителя и диаметр сопловых отверстий соплового наконечника форсунки. Следующий участок 2—3 является продолжением нагнетательного хода плунжера при открытом нагнетательном клапане ТНВД стенда. Продолжительность этого участка зависит от величины минимального давления в процессе впрыска и подачи ТНВД. Нарастание давления прекращается в момент открытия отсечного окна гильзы плунжера (т. 3) и соответственно посадки нагнетательного. Участок после т. 3 указывает на величину остаточного давления топлива в трубопроводе стенда.

Для снижения уровня оптимизации задача идентификации проводилась в четыре этапа, на каждом из которых рассматривался один из характерных участков временной реализации сигнала давления. На каждом из этапов оптимизации варьировались только те параметры, которые влияют на характер изменения сигнала давления на нем.

На этапе А искомыми параметрами являются  $h_s$  и  $\delta_n$ . При этом начальная затяжка пружины

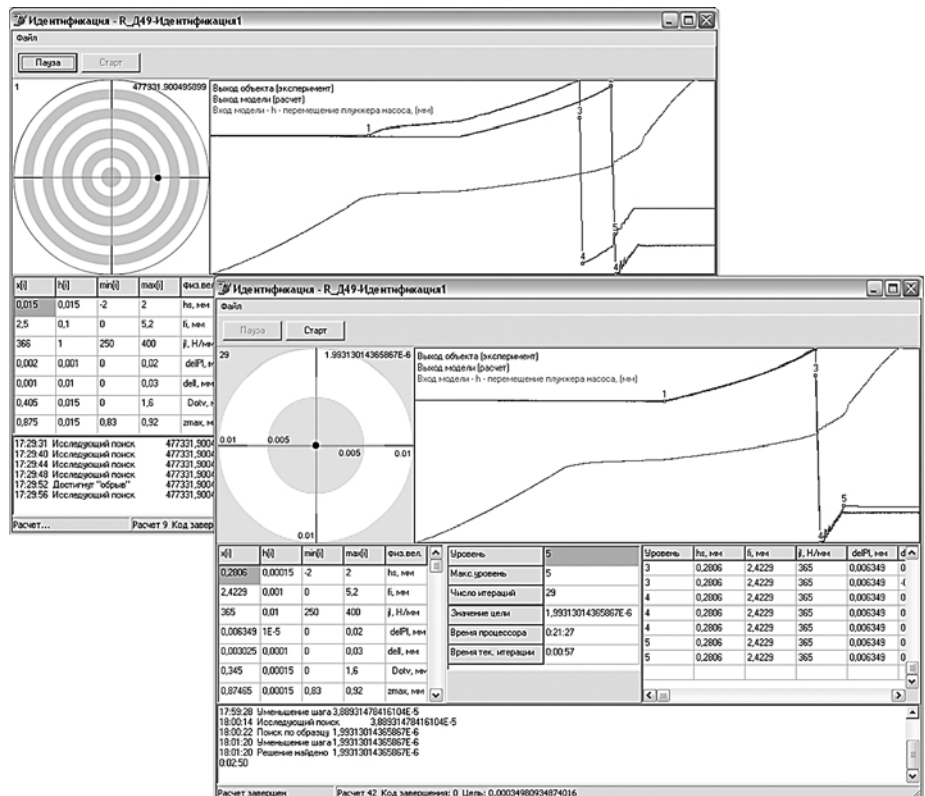


Рис. 6. Внешний вид рабочей области управляющей программы в начале и в конце процесса идентификации

нагнетательного клапана и ее жесткость измерены инструментальными средствами и не определяются в процессе идентификации. После нахождения оптимальных значений этих параметров последующие расчеты (на этапах Б—Г) производятся без их поиска. На этапе Б ищется только один параметр  $\delta_n$ . Критерием качества оптимизации для этапов А и Б является среднее квадратичное отклонение между экспериментальной и расчетной характеристиками. На этапе В к расчету добавляется участок непосредственного впрыскивания топлива. Минимизация ошибки модели достигается подбором значений сразу трех параметров:  $j_n$ ,  $d_c$ ,  $z_{max}$ . Для последнего этапа Г находится величина подачи насоса стенда —  $\phi$ . Критерием качества оптимизации этапов В и Г является отклонение по фазе и амплитуде рассматриваемых сигналов в характерных точках: 1 и 2 для этапа В, и 3 для этапа Г. Так как параметр, определяемый на последнем этапе оптимизации, никак не отражает ТС форсунки и относится только к насосу стенда, то его определением в процессе идентификации можно пренебречь.

Таким образом, задача оптимизации с начальными семью параметрами была разбита на отдельные задачи с числом варьируемых параметров не более трех. Для всех этапов использовался модифицированный (с ограничениями) метод Хука—Дживса.

Программная реализация предложенного метода идентификации ТС форсунок выполнена в среде Delphi7. Разработанный комплекс является универсальным для решения разнообразных задач, отвечающих постановке в форме структурной схемы, представленной на рис. 4. Программный комплекс состоит из нескольких модулей. Все исходные данные для расчета и результаты идентификации хранятся в файле MS Excel: геометрические характеристики стенда и испытуемой форсунки; варьируемые параметры; начальные условия процесса расчета; метод вычисления критерия оптимизации, а также выход модели. Эти данные используются управляющей программой расчета, внешний вид рабочей области которой в начале и конце процесса идентификации показан на рис. 6.

Практическая реализация предложенного метода параметрической идентификации выполнена на стенде А106.2 для форсунок тепловозного дизель-генератора 1А-9ДГ исп. 3 и тепловозного дизеля 10Д100. Известно, что наибольшую сложность при диагностике технических систем представляет выявление двух и более одновременно существующих дефектов. Поэтому в представленных ниже примерах оценивалось состояние форсунок с характерными для эксплуатации неисправностями: закоксовывание сопловых отверстий и увеличение хода иглы до ограничителя. Эти неисправности были искусственно созданы для исследуемых форсунок. Наибольшее расхождение между действительными и найденными при идентификации значениями параметров (табл. 2) составило не более 5 %. Необходимо отметить, что хотя в представленных примерах имели место одновременно две неисправности, в ходе процедуры идентификации определялись оценки всех семи параметров.

Для исследованных типов форсунок суммарная площадь сопловых отверстий составила 2/3 от номинальной. Диаметр сопловых отверстий испытуемых форсунок был пересчитан через площадь оставшихся рабочих отверстий. Действительный ход иглы до ограничителя измерялся при помощи специального микрометрического приспособления. Жесткость пружины форсунки определялась на динамометрическом стенде. Зазор по прецизионной поверхности распылителя измерению не поддается. Кроме того, эта величина является интегральной характеристикой, учитывающей гидравлические неплотности по направляющей прецизионной пары и посадочному месту иглы форсунки.

**Результаты идентификации при одновременном изменении диаметра сопловых отверстий и хода иглы до ограничителя форсунок дизель-генератора 1А-9ДГ исп. 3 и дизеля 10Д100**

Параметр	1А-9ДГ исп. 3			10Д100		
	Н*	b	b	Н	b	b
$\delta_n$ , мкм	1-3	—	3,23	1-3	—	3,29
$z_{max}$ , мм	0,75±0,05	0,85	0,87	0,45±0,05	0,7	0,68
$d_c$ , мм	0,39	0,32	0,33	0,56+0,02	0,46	0,45
$j_n$ , Н/мм	532-435	365	355	180-130	140	137

### Выводы

Разработанный метод стендовой диагностики форсунок дизелей позволяет осуществить количественную оценку важнейших характеристик форсунки, эталонные значения которых не требуют экспериментального определения, так как они указаны заводом-изготовителем.

Выполненная модернизация опрессовочного стенда типа А106.2 отличается простотой доработки штатной конструкции и позволяет не только корректно определять величину перепада давления в процессе впрыскивания, но и практически реализовать предложенный метод количественного оценивания параметров ТС форсунок.

Дальнейшее развитие метода целесообразно вести в направлении использования его в условиях работы топливной аппаратуры непосредственно на дизеле.

### Литература

1. Продукция и каталог ПКБ ЦТ ОАО РЖД [Электронный ресурс] / ПКБ ЦТ ОАО РЖД, 1995-2010. — Режим доступа: <http://www.pkbc.ru/SPD/Products.aspx>.
2. Федотов, Г.Б., Левин Г.И. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытание, совершенствование. — М. : Транспорт, 1983. — 192 с.
3. Дизель-генератор 1А-9ДГ исп. 3. Руководство по эксплуатации 1А-9ДГ.62РЭ.
4. Motorpal: service-equipment [электронный ресурс] / Motorpal a.s., 2008. — Режим доступа: <http://www.motorpal.cz/en/products/service-equipment.aspx>.
5. Коньков, А.Ю., Лашко В.А. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19-23.
6. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния; пер. с англ. В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель; под ред. Н.С. Райбмана. — М. : Мир, 1975. — 680 с.