

нительное влияние на снижение гидравлических потерь в контурах циркуляции.

Заключение

Проведенные численные и лабораторные исследования подтвердили возможность снижения затрат мощности на привод циркуляционных насосов систем охлаждения ДВС путем изменения свойств охлаждающих жидкостей за счет введения многофункциональных присадок.

Созданная численная модель имеет достаточную адекватность при исследованиях воды. Для повышения точности моделирования при исследованиях жидкостей, содержащих присадки необходимо введение корректирующих коэффициентов, позволяющих учесть изменения структуры пограничного пристеночного слоя жидкости.

Дополнительных исследований требуют высокотемпературные системы охлаждения, в полостях которых присутствуют зоны с пузырьковым кипением и течение двухфазных жидкостей.

УДК 621.436.038

А.Н. Врублевский, канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УТЕЧЕК ТОПЛИВА В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКЕ НА ПАРАМЕТРЫ ВПРЫСКИВАНИЯ

Введение

В дизельных топливных системах (ТС) непосредственного действия утечки топлива по прецизионным зазорам плунжерной пары насоса и распылителя происходит в основном в период впрыскивания. Как известно, расход топлива на утечки зависит от давления топлива в полостях, расположенных перед прецизионным зазором. В ТС разделенного типа это надплунжерное пространство насоса и карман распылителя форсунки. В данных полостях максимальное давление немногим выше 100 МПа. В связи с этим, при расчете ТС, утечками топлива можно пренебречь. С внедрением аккумуляторных ТС типа COMMON RAIL определение расхода топлива на утечки в уравнениях баланса граничных условий становится актуальной задачей. Объясняется это следующими факторами:

- в полостях, из которых происходит истечение топлива по прецизионным зазорам ЭГФ, величина давления равна давлению в топливном аккумуляторе $P_{ак}$, которое изменяется в диапазоне 20 – 180 МПа;

Список литературы:

1. Тузов Л.В. Исследование влияния присадок к охлаждающей жидкости дизелей на процессы теплоотдачи / Л.В. Тузов, О.К. Безюков, В.А. Жуков, В.А. Ларин // *Двигателестроение*. – 1996. – №1. – С. 46-51.
2. Бекнев В.С. Газовая динамика. Механика жидкости и газа. : Учебник для вузов / Бекнев В.С., В.М. Етифанов, А.И. Леонтьев; под общей ред. А.И. Леонтьева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 671 с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник; под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – М.: МЭИ, 2001. – 564 с.
4. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания / Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
5. Тракторные дизели: Справочник [Б.А. Взоров, А.В. Адамович, А.Г. Арабян и др.]; под общ. ред. Б.А. Взорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 535 с.
6. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справ. Пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

- между впрыскиваниями в данных полостях уровень давления остается равным $P_{акк}$.

Следовательно, расход топлива на утечки в аккумуляторных ТС, по сравнению с ТС непосредственного действия, увеличивается, а требования к изготовлению прецизионных пар ужесточаются. Так, для ЭГФ фирмы Delphi величина зазора в паре корпус-клапан должна быть равна 0,5 – 1,0 микрона. При отклонениях от данной величины ЭГФ не обеспечивает требуемые характеристики впрыскивания.

Анализ публикаций

Для определения утечек топлива при расчете процесса впрыскивания общепринятыми являются методы, изложенные в работах [1 - 3]. В данных методах расход топлива через поршневую часть плунжера определяется по формуле:

$$Q_{ут}^м = \frac{\pi d_m (\delta_m + 2 \cdot B \cdot P_u)^3 \cdot P_u}{96 \cdot \mu \cdot l_m}, \quad (1)$$

где d_m – диаметр мультипликатора; δ_m – начальный диаметральный зазор в паре мультипликатор-втулка; B – коэффициент, учитывающий деформацию втулки

от давления топлива; P_u – давление топлива в камере управления ЭГФ; μ – коэффициент динамической вязкости топлива в зазоре при текущих давлениях и температуре топлива; l_m – длина прецизионной части мультипликатора.

Для определения расхода через прецизионный зазор между иглой и корпусом распылителя предложена формула [3]:

$$Q_{\text{ут}}^{\text{рас}} = \frac{\pi d_n \delta_n^3 \cdot \beta \cdot P_\phi \cdot \ln c}{12 \cdot \mu \cdot l_n \cdot (c^{P_\phi} - 1)}, \quad (2)$$

где d_n – диаметр иглы; δ_n – начальный диаметральный зазор в паре игла-распылитель; P_ϕ – давление топлива в кармане распылителя; l_n – длина прецизионной части иглы; β – коэффициент, учитывающий изменение формы уплотняющего зазора вследствие эксцентриситета иглы

$$\beta = 1 + 1,5 \cdot (l_n / \delta_n)^2;$$

где c – постоянный коэффициент, зависящий от физических свойств топлива; $c = 1,0025$.

Уточнение величины утечек возможно с использованием формул, полученных в [2], а также при решении деформационной задачи. Но, как показано ниже, формулы (1, 2) позволяют с достаточной точностью определять величины утечек в ЭГФ и анализировать их влияние на процесс топливоподачи.

Цель и постановка задачи

Цель данной работы – определить влияние утечек топлива по прецизионным зазорам электрогидравлической форсунки на основные параметры впрыскивания. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить величину утечек по мультипликатору и игле распылителя;
- включить в программу расчета ЭГФ формулы для определения утечек.

Объект исследования – прецизионные пары электрогидравлической форсунки

Объектом исследования является прецизионная пара мультипликатора, обеспечивающая гидравлическое запираание иглы форсунки. В разработанных и серийно выпускаемых ЭГФ нашли применение три конструктивных варианта выполнения мультипликатора:

- с подвесной втулкой, рис. 1 – а);
- с втулкой, запрессованной в корпус форсунки, рис. 1 – б);
- без втулки, пару составляют корпус форсунки

(рис. 1 – в) или проставка (рис. 1 – г) и мультипликатор.

В первых двух вариантах втулка выполняется «глухой» с отношением внутреннего диаметра к наружному $1/3 - 1/2$, следовательно, неизбежно изменение прецизионного зазора вследствие деформации втулки. В третьем варианте (рис. 1 – в) деформацией можно пренебречь, так как толщина стенок в 2 – 3 раза больше диаметра мультипликатора. Отметим также, что из всех представленных вариантов, ЭГФ Delphi наиболее чувствительна к величине прецизионного зазора.

Результаты исследования

В математическую модель ЭГФ, особенности которой описаны в работах [4, 5], включены формулы (1, 2), что повышает достоверность моделирования.

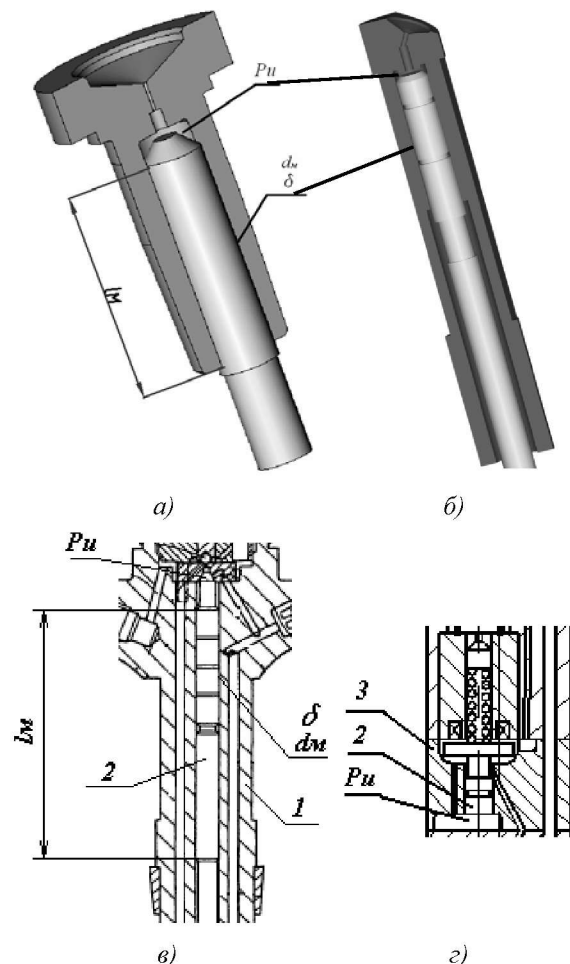


Рис. 1 Прецизионные пары ЭГФ: а) – Bosch; б) – КП ХКБД; в) – Denso; г) – Delphi: 1 – корпус форсунки, 2 – мультипликатор, 3 – проставка, P_u – давление в камере управления, l_m – длина прецизионной части, d_n – диаметр мультипликатора, δ – зазор

В математической модели топливо, прошедшее по прецизионным зазорам мультипликатора и распылителя, добавляется к объему топлива на управление. Следовательно, утечки учтены при составлении объемного баланса полостей низкого давления ЭГФ (подробнее см. [5]).

Исследование утечек топлива в распылителе

В литературе приведены результаты исследования утечек в распылителях форсунок с диаметром иглы не менее 6 мм. Для используемых в ЭГФ иглах с диаметром 4 и 3,5 мм достоверных расчетных, а тем более экспериментальных данных в литературе не встречается. Поэтому возникла необходимость в проверке адекватности определения утечек при помощи известных формул. В данной статье приведены результаты исследования распылителя с иглой диаметром 4 мм.

Для проверки адекватности используемого в работе расчетного метода определения утечек топлива в ЭГФ автором совместно с сотрудниками КП ХКБД проведен следующий эксперимент. При затяжке пружины технологической форсунки 60 МПа к штуцеру форсунки с исследуемым распылителем подводилось топливо от аккумулятора давления стенда для проверки дизельных форсунок. В результате эксперимента получены зависимости утечек топлива от δ_n и P_ϕ . Исследовались распылители с параметрами, приведенными в табл. 1. На рис. 2 представлены графики зависимостей $Q_{ут}^{рас} = f(\delta_n, P_\phi, d_n)$, полученных экспериментально, а на рис. 3 – сравнение данных зависимостей с результатами расчета по формулам (2) и предложенной Л.В.Греховым в [2].

Таблица 1. Параметры исследуемых распылителей

№ распылителя	d_n , мм	l_n , мм	t^* , с	δ_n , мкм
1	4	1	8	5
2	4	1	3	8
3	4	1	1	1

* время падения давления P_ϕ с 20 до 18 МПа

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Расчет утечек в распылителе ЭГФ с иглой 4 мм можно производить без учета деформации поверхностей, образующих пре-

цизионный зазор. Для расчета утечек можно использовать формулы, предложенные в работах [2, 3]. Очевидно, что формула, предложенная В.Л.Греховым, позволяет более точно определять утечки. Так как учитывает перемещение иглы и величину давления в полости, в которую происходят утечки.

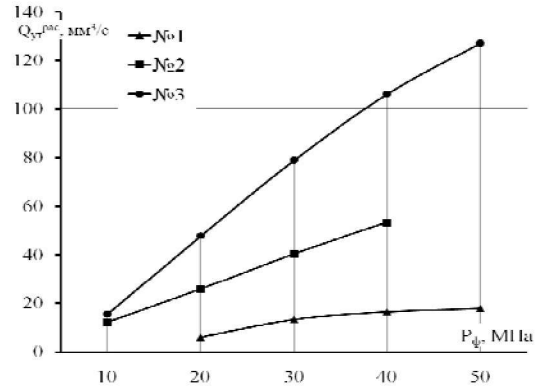


Рис. 2 Экспериментальные зависимости

$$Q_{ут}^{рас} = f(\delta_n, P_\phi, d_n)$$

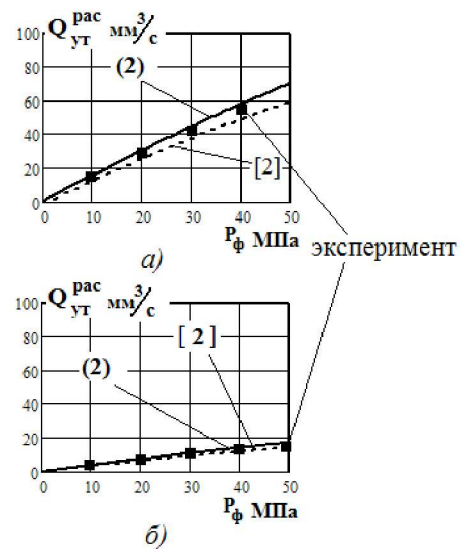


Рис. 3 Расчетные и экспериментальные зависимости $Q_{ут}^{рас} = f(\delta_n, P_\phi)$ полученные для:

а) – распылителя №1; б) – распылителя №2 (см. табл. 1)

Исследование утечек топлива в мультипликаторе

Исходные данные для расчета - прецизионный зазор в паре мультипликатор-штулка – 2 – 10 мкм, номинальный диаметр мультипликатора – 3,8 мм, длина цилиндрической прецизионной поверхности – 17,5 мм.

Для определения влияния утечек топлива по прецизионному зазору мультипликатора на топливо-

подачу рассмотрим зависимости цикловой подачи топлива от величины зазора δ_m (рис. 4). Данные зависимости получены при расчете ЭГФ разработки КП ХКБД (см. рис. 1 – б). На рис. 4 семейство кривых «цикловая подача – давление в аккумуляторе» получено при изменении величины радиального зазора δ_m от 2 до 5 мкм. Цикловая подача определялась в результате вычитания из величины объема топлива, подаваемого топливным насосом, расхода топлива на управление ЭГФ, расхода топлива на утечки по прецизионным парам и расхода топлива на регулирование давления в топливном аккумуляторе. При расчете значение коэффициента сжимаемости топлива принималось постоянным. Характерными точками на графике являются точки пересечения указанных кривых с линией заданной цикловой (на рис. 4 это 50 мм^3). Оказалось, что при зазоре $\delta_m = 2 \text{ мкм}$ с учетом деформации втулки мультипликатора давление в аккумуляторе составит 135 МПа (точка 1). Увеличение зазора δ_m до 3 мкм повышает расход топлива на утечки, что приводит к снижению уровня давления в аккумуляторе до 70 МПа (точка 3). Если исключить деформацию втулки, то при зазоре $\delta_m = 3 \text{ мкм}$ цикловая подача топлива 50 мм^3 обеспечивается при давлении в аккумуляторе 110 МПа (точка 2).

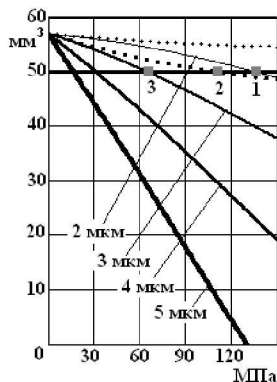


Рис. 4 Определение необходимой цикловой подачи и давления в аккумуляторе в зависимости от радиального зазора δ мультипликатора

На рис. 5 представлены расчетные зависимости объема топлива в цикловой подаче и на управление с изменением величины диаметрального зазора по мультипликатору. Два варианта – с учетом деформации по формулам (1, 2) и без учета деформации. Серия расчетов выполнена для двухфазного впрыскивания с параметрами: длительность пилотной подачи 0,2 мс, интервал – 1,2 мс, период основной подачи – 0,7 мс. Давление в аккумуляторе – 100 МПа. Для

расчета принят режим, при котором цикловая подача должна составлять 50 мм^3 .

По приведенным на рис. 5 данным можно сделать вывод о целесообразности учета утечек топлива для повышения качества моделирования процессов в ЭГФ. Погрешность в определении цикловой подачи без учета утечек топлива по зазору $\delta_m = const$ составляет 1,8 %. Игнорирование в математической модели увеличением зазора δ_m вследствие деформации втулки мультипликатора приводит к дополнительной погрешности в определении цикловой подачи и расхода топлива на управление до 10 %.

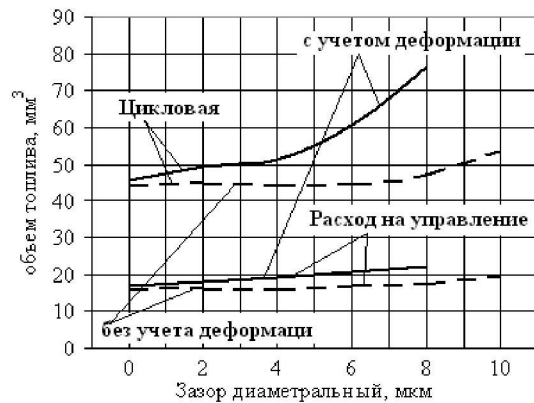


Рис. 5 Расчетные зависимости расхода топлива на управление и через распылитель от величины зазора δ_m

Для однофазного впрыскивания расчетные кривые показаны на рис. 6. При зазоре $\delta_m = 2 \text{ мкм}$ суммарная продолжительность управляющего импульса равная 0,53 мс обеспечивает впрыскивание порции топлива объемом $49,9 \text{ мм}^3$, при зазоре $\delta_m = 8 \text{ мкм}$ и той же продолжительности управляющего импульса цикловая составит $72,7 \text{ мм}^3$. Анализ осциллограмм (рис. 6) показывает, что при увеличении δ_m происходит изменение сил действующих на иглу ЭГФ. Так, на подъем иглы со стороны кармана распылителя в двух рассмотренных случаях действует сила, определяемая давлением топлива в аккумуляторе. На заправление иглы действует сила пружины, величина предварительной деформации которой постоянная в обоих случаях, и сила, определяемая давлением $P_{упр}$ топлива в камере управления, действующее на верхний торец мультипликатора. Кривые изменения $P_{упр}$ для рассмотренных вариантов отличаются. При увеличении зазора δ_m скорость изменения давления $P_{упр}$ на начальном этапе топливоподачи возрастает. В период впрыскивания, вследствие утечек топлива,

давление $P_{упр}$ до начального уровня 100 МПа не восстанавливается.

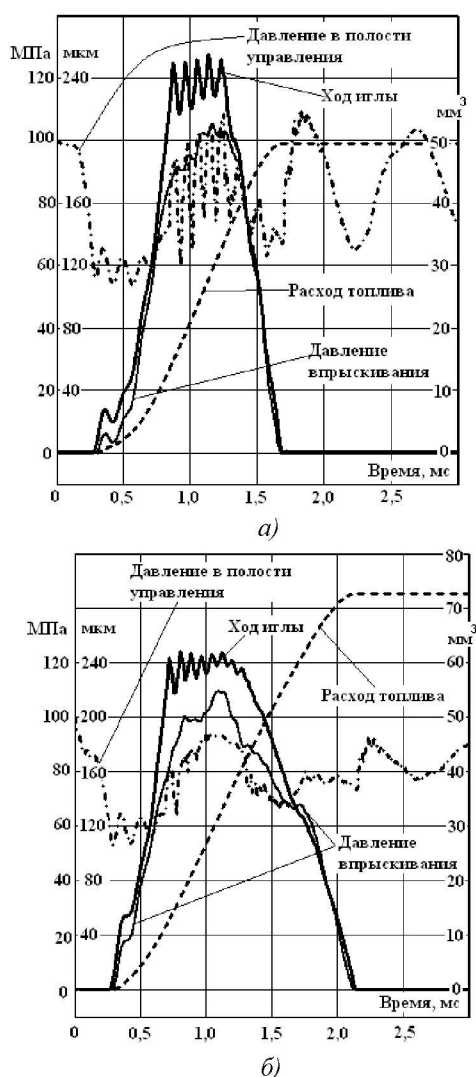


Рис. 6 Расчетные кривые изменения основных параметров ЭГФ при зазоре мультипликатора:

- а) $\delta_m = 2$ мкм, цикловая подача $49,9 \text{ мм}^3$;
 б) $\delta_m = 8$ мкм, цикловая подача $72,7 \text{ мм}^3$

Указанные факторы увеличивают скорость подъема иглы и затягивают впрыскивание топлива. Следует отметить, что минимальный уровень давления P_u в период впрыскивания от зазора δ_m в рассматриваемом диапазоне не зависит и составляет 60 МПа.

Выявленные особенности работы ЭГФ при увеличенном зазоре в прецизионной части мультипликатора позволяют уточнить алгоритм поиска неисправностей аккумулирующей топливной системы типа Common Rail. Также можно сделать вывод, что требования к выполнению данного зазора соответствуют требованиям, предъявляемым к распылителям дизельных форсунок. Величина δ_m не должна превышать 3 мкм.

Выводы

Обоснована необходимость уточнения математической модели связанная с учетом утечек топлива по прецизионным зазорам электрогидравлической форсунки.

Выбрана методика определения расхода топлива на утечки по прецизионным зазорам ЭГФ.

Получены экспериментальные зависимости утечек распылителя от величины зазора и давления перед запорным конусом для распылителя с иглой 4 мм.

Для обеспечения работоспособности ЭГФ величина прецизионного зазора не должна превышать 3 мкм в мультипликаторе и 5 мкм в распылителе.

Список литературы:

1. Фомин Ю.Я. Оценка утечек через плунжерную пару топливного насоса высокого давления дизеля / Ю.Я. Фомин, В.Г. Ивановский // Двигателестроение. – 1982. – №1. – С. 17 – 19.
2. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков – М.: Легион - Автодата, 2004. – 344 с.
3. Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусов, А.С. Хачиян и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 359 с.
4. Врублевский А.Н. Особенности математического моделирования гидромеханических процессов электрогидравлической форсунки / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.В. Грицюк, А.В. Денисов, Г.А. Щербаков // Двигатели внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. – Харьков; НТУ «ХПИ». – 2007. – №1. – с. 44 – 52.
5. Врублевский А.Н. Математическая модель движения элементов и течения топлива в полостях низкого давления электрогидравлической форсунки / А.Н. Врублевский // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. Вып. 22. с. 109 - 117.