

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНКАХ ДИЗЕЛЕЙ

Введение

Аккумуляторные топливные системы дизелей получают всё более широкое распространение. Они оснащаются электрогидравлическими форсунками (ЭГФ) с электронным управлением, которые позволяют за счет изменения фаз и продолжительности открытия иглы распылителя регулировать углы опережения впрыскивания и цикловые подачи топлива.

Эти форсунки имеют камеру гидроуправления, расположенную выше плунжера-мультипликатора запирания, связанного за одно целое со штангой и иглой распылителя. Камера гидроуправления через входной жиклёр соединена с аккумулятором топлива, давление которого автоматически поддерживается на оптимальном уровне электронным блоком управления. С аккумулятором также постоянно связана подводящим каналом подыгольная камера. Площадь поперечного сечения плунжера-мультипликатора превышает площадь дифференциальной площадки иглы распылителя, поэтому при равенстве давлений топлива в этих камерах обеспечивается гидравлическое запираание иглы распылителя.

Для осуществления цикловой подачи топлива в цилиндр дизеля по команде электронного блока управления включается электромагнитный клапан (ЭМК), открывающий отверстие выходного жиклёра камеры гидроуправления. Эффективное проходное сечение выходного жиклёра должно превышать такое же сечение входного жиклёра. Поэтому при открытии клапана давление топлива в камере гидроуправления падает, и игла открывает проход топлива к сопловым отверстиям.

Конструктивный анализ аккумуляторных топливных систем, их достоинства и недостатки, а также методы проектирования топливоподающих систем и устройств управления топливоподачей отечественных и зарубежных дизелей наиболее полно представлены в монографиях [1-3].

В этих работах обращается внимание на то, что конструкция и параметры ЭГФ для обеспечения работоспособности, а тем более эффективности, требуют оптимизации. Это, прежде всего, относится к подбору эффективных проходных сече-

ний входного и выходного жиклёров камеры гидроуправления.

Формулирование проблемы

В работе [4] предложена методика математического моделирования электрогидравлических форсунок, в которой учитывается сжимаемость топлива не как усредненный параметр, а как функция от давления топлива. Математическое представление этой функции стало результатом экспериментального исследования сжимаемости дизельного топлива до максимального давления 160 МПа. В этой работе также обращается внимание на существенное влияние деформации штанги, мультипликатора запирания и иглы на процесс топливоподачи. Это влияние учтено при моделировании.

Цель настоящей работы состоит в выявлении закономерностей влияния некоторых конструктивных параметров ЭГФ на гидродинамические процессы в гидравлических трактах форсунки. Для достижения цели предусматривается разработка и применение методики математического моделирования для поэлементного расчётного исследования этих процессов. Применение разработанной методики, в частности, направлено на определение рабочих диапазонов и оптимальных соотношений проходных сечений входных и выходных жиклёров камеры гидроуправления, а также на учёт влияния хода иглы с другими подвижными деталями на длительность её подъёма и, в конечном счёте, на долю цикловой подачи в этот период.

Математическое моделирование расходов топлива через жиклёры

Поэлементный подход к исследованию гидродинамических процессов базируется на классических уравнениях мгновенного баланса топлива в гидравлических трактах форсунки, предложенных И.В. Астаховым, и на уравнениях динамики подвижных её частей.

Мгновенный баланс топлива в камере управления ЭГФ при открытии ЭМК описывается дифференциальным уравнением [5]:

$$\beta V_z \frac{dz}{dt} = Q_{az} - Q_{z0} + f_z \frac{dz}{dt}, \quad (1)$$

где β – коэффициент сжимаемости топлива, 1/Па; V_z – объем камеры гидроуправления, м³; P_z – давление топлива в камере гидроуправления, Па; t – время, с; Q_{az} и Q_{z0} – расходы топлива через входной и выходной жиклёры, соответственно, м³/с; f_z – площадь поперечного сечения плунжера – мультипликатора запирания, м²; z – подъем иглы распылителя ЭГФ, м.

Для исследования гидродинамических процессов в камере гидроуправления уравнение (1) преобразовано к виду:

$$dt = \frac{\beta V_z * dP_z - f_z * dz}{Q_{az} - Q_{z0}}, \quad (2)$$

Знаменатель уравнения (2) представляет собой разность расходов топлива через входной и выходной жиклёры. Эти расходы являются функцией давления топлива в камере гидроуправления P_z и зависят от эффективных проходных сечений входного $\mu F_{вх}$ и выходного $\mu F_{вых}$ жиклёров:

$$Q_{az} = \mu F_{вх} * \sqrt{\frac{2}{\rho_t} (P_a - P_z)}, \quad (3)$$

$$Q_{z0} = \mu F_{вых} * \sqrt{\frac{2}{\rho_t} (P_z - P_0)}, \quad (4)$$

где P_a и P_0 – соответственно давление топлива в аккумуляторе и атмосферное давление ($P_0 = 101,3$ кПа); ρ_t – плотность дизельного топлива (в расчётах принято $\rho_t = 850$ кг/м³).

Знаменатель в уравнении (2) вычисляется по формулам (3) и (4). На рисунке 1 приведены графики расходов топлива через выходной жиклер (верхний график), через входной жиклер (средний график) и их разность (нижний график).

Применение метода наименьших квадратов для аппроксимации массива данных на рисунке 1 в интервале давлений от 5 до 70 МПа привело к полиному третьей степени:

$$y = -1,25 * 10^{-28} * x^3 + 1,753 * 10^{-20} * x^2 - 1,437 * 10^{-12} * x + 1,646 * 10^{-6}; \quad (5)$$

где $y = Q_{az} - Q_{z0}$, м³/с; $x = P_z$, Па; $R^2 = 0,999$ – достоверность аппроксимации.

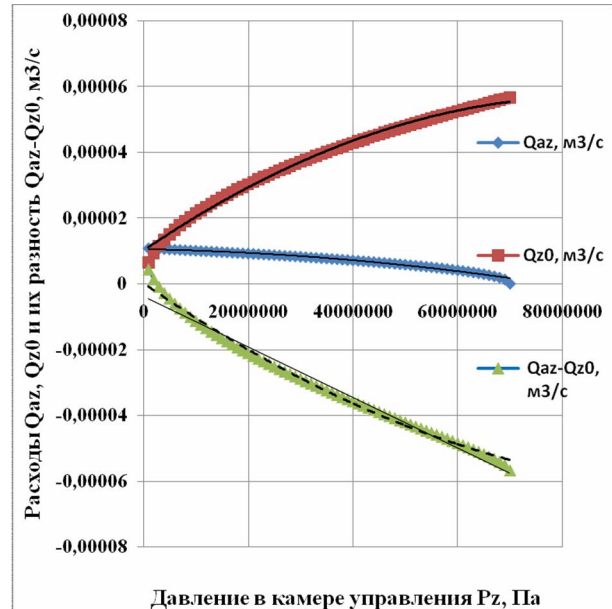


Рис. 1. Расходы топлива через входной Q_{az} , выходной Q_{z0} жиклёры и их разность $Q_{az} - Q_{z0}$ в м³/с при давлении в аккумуляторе, равном 70 МПа; $\mu F_{вх} = 0,0268$ мм²; $\mu F_{вых} = 0,14$ мм²

Для решения первой из поставленных задач – определения рабочих диапазонов и оптимальных соотношений эффективных проходных сечений входных и выходных жиклёров камеры гидроуправления – намечены следующие ограничивающие условия:

- интервал значений отношений $\mu F_{вх} / \mu F_{вых}$ равен 0,04 – 0,5;
- для реализации этого условия интервал значений эффективных проходных сечений входных жиклёров принят $\mu F_{вх} = 0,005 - 0,07$ мм² при фиксированном значении выходного жиклёра $\mu F_{вых} = 0,14$ мм²;
- давление топлива в аккумуляторе $P_a = 70$

МПа для возможности сопоставления результатов расчёта с имеющимися экспериментальными данными.

В качестве критерия оптимальности отношения $\mu F_{вх} / \mu F_{вых}$ принята минимальная задержка подъёма иглы распылителя ЭГФ после включения ЭМК. Эта задержка влияет на быстродействие форсунки, она обозначена временем t_0 . Для её определения дифференциальное уравнение (2) преобразуется к виду (т.к. при закрытой игле её подъём $z=0$):

$$dt = \frac{\beta V_z * dP_z}{Q_{az} - Q_{z0}} \quad (6)$$

Коэффициенты при дифференциале dP_z в числителе уравнения (6) учитывают влияние давления P_z в камере гидроуправления на сжимаемость топлива β и на изменение объема V_z этой камеры вследствие деформации штанги и других подвижных частей форсунки. Эти коэффициенты представлены следующей функцией [4]:

$$\beta V_z = 7,062 * 10^{-43} P_z^3 + 2,293 * 10^{-34} P_z^2 - 2,0096 * 10^{-25} P_z + 3,698 * 10^{-17} \quad (7)$$

Решения дифференциального уравнения (6) для принятого интервала значений жиклёров получены в Mathcad с последующей обработкой массива результатов в Excel и с их аппроксимацией методом наименьших квадратов. Для рассмотренного выше примера (рис. 1) получена функция $t = f(P_z)$:

$$t = -4,799 * 10^{-28} * P_z^3 + 7,372 * 10^{-20} * P_z^2 - 4,286 * 10^{-12} * P_z + 0,000101 \quad (8)$$

Достоверность аппроксимации этого уравнения составила $R^2 = 0,995$. Среднее значение погрешности (в интервале давлений $P_z = 70-5$ МПа) равно -0,8%. Для этого примера расчётное время $t_0 = 35,3$ мкс, оно соответствует давлению в камере гидроуправления $P_{z0} = 23,47$ МПа, при котором начинается подъём иглы.

На рисунке 2 подведены итоги выполненным расчётам.

Наибольшее быстродействие ЭГФ по параметру t_0 соответствует минимуму графика $t_0 = f(\mu F_{вх} / \mu F_{вых})$, значение которого равно 0,07 для рассмотренного интервала отношений эффективных проходных сечений жиклёров.

Хотя правая граница рассмотренного интервала находится в зоне работоспособности ЭГФ, уровень быстродействия форсунки в этом случае вдвое ниже оптимального уровня.

Таким образом, интервал отношений эффективных проходных сечений входных к выходным жиклёрам от 0,04 до 0,5 обеспечивает работоспособность ЭГФ. Оптимальное значение этого отно-

шения равно 0,07, а оптимальное значение $\mu F_{вх} = 0,01$ мм².

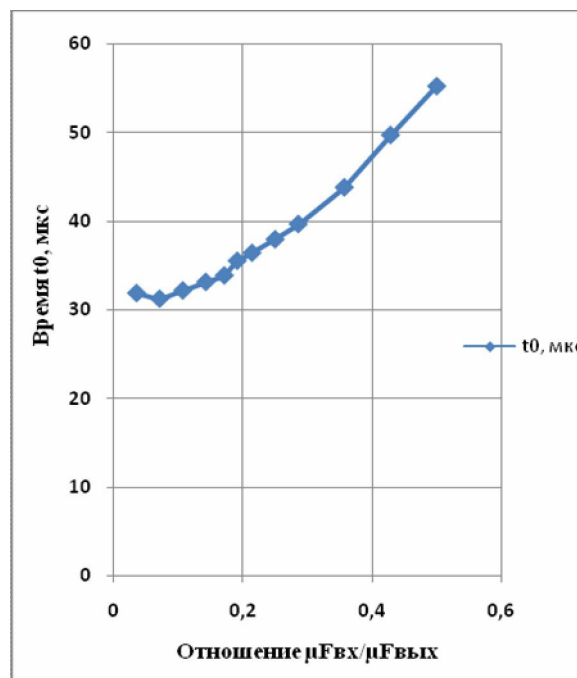


Рис. 2. Задержка начала подъёма иглы распылителя ЭГФ (t_0 , мкс) в зависимости от отношений эффективных проходных сечений входных к выходным жиклёрам

Математическое моделирование подъёма иглы распылителя

Вторая из поставленных задач – учёт влияния перемещения иглы с другими подвижными деталями на длительность её подъёма и, в конечном счёте, на долю цикловой подачи в этот период – вызвана следующими обстоятельствами.

Как следует из анализа дифференциального уравнения (2), на длительность процессов падения давления в камере гидроуправления влияет перемещение иглы z , но на перемещение иглы, в свою очередь, влияет изменение давления P_z в этой камере.

Для решения проблемы на предварительном этапе исследования определяется зависимость падения давления P_z от времени при закрытой игле ($z = 0$), а затем определяются зависимости скорости C_i и перемещения иглы z от предварительно полученной функции $P_z = f(t)$. На следующем этапе по уравнению (2) с учётом предварительного перемещения иглы $z = f(t)$ определяется уточненная функ-

ция $P_z = f(t)$. Далее на основе этой функции определяется уточненное значение скорости и перемещения иглы. Цикл может повторяться для получения асимптотического приближения к истинному результату.

Ниже приведен пример реализации этого подхода. Ускорение подвижных частей ЭГФ, включая иглу распылителя, штангу и плунжер-мультипликатор запираания, определяется в соответствии с принципом Д'Аламбера следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dCi}{dt} = \frac{1}{M} * (P_f * f_i - P_z * f_z - A - B * z), \quad (9)$$

где Ci – скорость иглы и других деталей, м/с; M – масса подвижных частей ЭГФ, кг; P_f – давление в подыгольной камере, Па, которое в первом приближении можно принять равным давлению в аккумуляторе, т.е. $P_f = P_a$; f_i и f_z – соответственно, площади поперечного сечения направляющей части иглы распылителя и плунжера-мультипликатора запираания, м²; A – сила затяжки пружины, прижимающей штангу и иглу к седлу в корпусе распылителя, Н; B – жесткость этой пружины, Н/м.

Для решения в Mathcad в уравнение (9) необходимо подставить функцию давления от времени ($P_z = f(t)$), которая определяется на том же массиве данных, что и выражение (8). В результате в первом приближении (при $z = 0$) определяется скорость, а затем и подъём иглы в функции времени ($R^2 = 0,999$):

$$z = 13446t^2 - 0,821t + 1 * 10^{-5}. \quad (10)$$

На втором этапе в уравнение (2) следует подставлять выражение для перемещения иглы z в функции не времени t , а в функции давления P_z . Это выражение получается в результате сопоставления двух функций: $P_z = f(t)$ и $z = f(t)$. В рассматриваемом примере ($R^2 = 0,966$):

$$z = -2,626 * 10^{-26} * P_z^3 + 1,536 * 10^{-18} * P_z^2 - 2,979 * 10^{-11} * P_z + 1,919 * 10^{-4}. \quad (11)$$

Значение числителя уравнения (2) при подъеме иглы ($z \neq 0$) с учётом уравнений (7) и (11) определяется по формуле:

$$\beta V_z dP_z - f_z * dz = (7,062 * 10^{-43} * P_z^3 + 6,325 * 10^{-31} * P_z^2 - 2,291 * 10^{-23} * P_z + 2,417 * 10^{-16}) * dP_z. \quad (12)$$

На рисунке 3 показано уточненное время падения давления топлива в камере гидроуправления (график t-Pz-0.0268b при ($z \neq 0$)), рассчитанное с учетом подъема иглы распылителя. Для сравнения показан график t-Pz-0.0268b при ($z = 0$), который соответствует результату предварительного расчёта и в котором не учитывался подъём иглы.

Анализ приведенных на рисунке 3 результатов свидетельствует о том, что уточненный расчёт, учитывающий подъём иглы распылителя, выявил замедление времени падения давления в камере гидроуправления с момента начала подъёма иглы и других подвижных деталей.

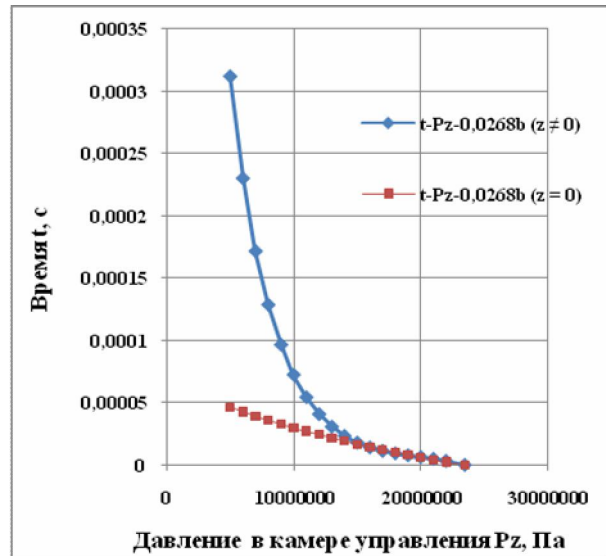


Рис. 3. Время в функции процесса падения давления в камере гидроуправления:

t-Pz-0.0268b(z=0) – упрощенный расчёт;
t-Pz-0.0268b (z≠0) – уточненный расчёт, в котором учтено перемещение иглы распылителя и других подвижных деталей

Аппроксимация уточненного графика $t = f(P_z)$ для рассматриваемого примера представлена полиномом третьей степени ($R^2 = 0,997$):

$$t = -1,1418 * 10^{-25} * P_z^3 + 7,453 * 10^{-18} * P_z^2 - 1,3231 * 10^{-10} * P_z + 7,9053 * 10^{-4}. \quad (13)$$

Зависимость для упрощенного расчёта в этом же примере представлена формулой (8). Уравнение (13) является базой для уточненного цикла расчё-

тов скорости и подъёма иглы распылителя, в котором учитывается перемещение иглы.

На рисунке 4 показаны результаты уточненного и упрощенного моделирования подъёма иглы. Характерно, что с момента начала подъёма иглы распылителя $t_0 = 35,3$ мкс и до $t = 68$ мкс в рассмотренном примере наблюдается отставание подъёма иглы по результатам уточненного расчёта по сравнению с предварительным расчётом.

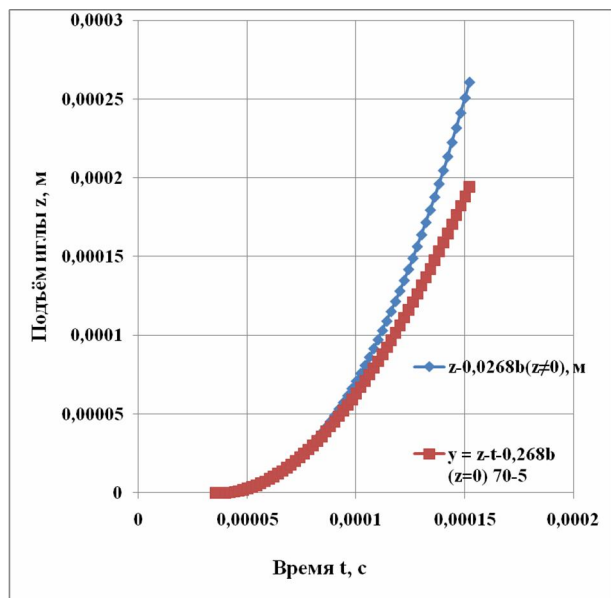


Рис. 4. Подъём иглы распылителя ЭГФ в зависимости от времени:

$z-t-0,0268b(z=0)$ – упрощенный расчёт;
 $z-0,0268b(z≠0)$ – уточненный расчёт, в котором учтено перемещение иглы распылителя и других подвижных деталей

Заключение

Предложен подход, основанный на поэтапном применении моделирования для сложных процессов. К объектам такого моделирования можно отнести гидродинамические процессы в гидравлических трактах форсунок.

В результате анализа выполненных расчетных исследований гидродинамических процессов в трактах ЭГФ установлено следующее:

- Работоспособность ЭГФ обеспечивается в интервале отношений эффективных проходных сечений входных к выходным жиклёрам от 0,04 до

0,5 при фиксированном значении площади выходного жиклёра, равном $0,14 \text{ мм}^2$. Оптимальное значение этого отношения по критерию быстродействия форсунки равно 0,07, а оптимальное значение $\mu F_{\text{ex}} = 0,01 \text{ мм}^2$;

- Уточненный расчёт, учитывающий подъём иглы распылителя, выявил замедление времени падения давления в камере гидроуправления с момента начала подъёма иглы и других подвижных деталей (рис. 3). Выявлено влияние перемещения иглы распылителя и других подвижных деталей ЭГФ на сам процесс их подъёма (рис. 4).

Такой подход следует распространить на моделирование цикловых подач топлива и выявление доли цикловой подачи при подъёме, посадке и нахождении иглы на упоре. В этом суть программы дальнейших работ.

Список литературы:

1. Грехов Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : учебник для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – М. : Легион-Автodata, 2004. – 344 с.
2. Иващенко Н. А. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей / Н. А. Иващенко, В. А. Вагнер, Л. В. Грехов. – Барнаул – М. : Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2002. – 166 с.
3. Габитов И. И. Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей : учебное пособие / И. И. Габитов, Л. В. Грехов, А. В. Неговора. – Уфа : Изд-во БГАУ, 2008. – 240 с.
4. Методика учета сжимаемости топлива и деформации штанги при математическом моделировании электрогидравлических форсунок / Ю. Е. Драган // Всеукраинский научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания». – 2007 г. – № 2. С. 35–39.
6. Астахов И. В. Подача и распыливание топлива в дизелях / И. В. Астахов, В. И. Трусов, А. С. Хачиян, Л. Н. Голубков. – М. : Машиностроение, 1971. – 359 с.

Bibliography (transliterated):

1. Grehov L. V. Toplivnaja apparatura i sistemy upravlenija dizelej : uchebnik dlja vuzov / L. V. Grehov, N. A. Ivawenko, V. A. Markov. – M. : Legion-Avtodata, 2004. – 344 s.
2. Ivawenko N. A. Modelirovanie processov to-plivopodachi i proektirovanie toplivnoj apparatury dizelej / N. A. Ivawenko, V. A. Vagner, L. V. Grehov. – Barnaul – M. : Izd-vo AltGTU im. I. I. Polzunova, 2002. – 166 s.
4. Gabitov I. I. Tehnicheskoe obsluzhivanie i diagnostika toplivnoj apparatury avtotraktornyh dizelej : uchebnoe posobie / I. I. Gabitov, L. V. Grehov, A. V. Negovora. – Ufa : Izd-vo BGAU, 2008. – 240 s.
5. Metodika ucheta szhimaemosti topliva i deformacii shtangi pri matematicheskom modelirovanii jelektro-gidravlicheskih forsunok / Ju. E. Dragan // Vseukrainskij nauchno-tehnicheskij zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoranija». – 2007 g. – № 2. S. 35–39.
6. Astahov I. V. Podacha i raspylivanie topliva v dizeljah / I. V. Astahov, V. I. Trusov, A. S. Hachijan, L. N. Golubkov. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 359 s.