

лее чем в 1,7 раза по сравнению с электромагнитной форсункой.

На основании изложенного можно сделать вывод о возможности использования магнитострикционной насос-форсунки на быстроходных автомобильных двигателях с электронным регулированием подачи топлива.

Л и т е р а т у р а

1. Будыко Ю.И. Аппаратура впрыска легкого топлива автомобильных двигателей. – Л., 1975. 2. Кюнчер Ф. Некоторые результаты развития работ по электронно управляемой системе впрыска топлива. – В кн.: Процессы смесеобразования и сгорания в быстроходных двигателях внутреннего сгорания. Всесоюз. конф. М., 1973. 3. А.с. 253484 (СССР). Насос-форсунка / Моск. авиац. ин-т им. С.Орджоникидзе. Авт. изобрет. В.Г.Базаров. – Заявл. 22.11.66. № 1115650/24-6. Опубл. в Б.И. 1970, № 13, МКИ F 02 m 57/02. 4. Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов / Под ред. проф. А.С.Орлина. – М., 1972.

УДК 621.436.038

С.Н.Явнишкис

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ

При проектировании и доводке форсунок возникает необходимость исследовать влияние ее конструктивных элементов на процесс топливоподачи. Для этой цели рекомендуется использовать математическую модель, в основу которой положена гидравлическая схема, приведенная на рис. 1. На схеме в качестве частного случая показан гидравлический тракт распределительного топливного насоса, расчет которого можно производить по методике И.В.Астахова [1, 2] или методике, изложенной в работах [3, 4].

Как видно, из схемы, нагнетательный тракт форсунки имеет сложную, разветвленную сеть, состоящую из дополнительных объемов, местных гидравлических сопротивлений в сетчатом фильтре, конусной части в сопловом аппарате, т.е. это трубопровод с изменяющимся диаметром и разветвлениями, пример расчета которого приведен в работе [2]. По длине такого тру-

бопровода нарушается характер течения топлива, изменяются значения амплитуд прямых и отраженных волн давления, которые можно получить, используя гидродинамические уравнения, выведенные Н.Е.Жуковским [5] при исследовании гидравлического удара в трубах. При этом топливный тракт форсунки разделяется на отдельные конструктивные элементы, определяющие процесс топливоподачи. На границах разделения получаются новые значения амплитуд прямых и отраженных волн. Для каждого сечения топливного тракта форсунки гидродинамические уравнения Н.Е.Жуковского, решение которых по Даламберу имеет вид

$$P_n = P_o + F_n \left(t - \frac{l_n}{a} \right) + W_n \left(t + \frac{l_n}{a} \right); \quad (1)$$

$$C_n = C_o + \frac{1}{\alpha \rho} \left[F_n \left(t - \frac{l_n}{a} \right) + W_n \left(t + \frac{l_n}{a} \right) \right], \quad (2)$$

решаются совместно с уравнениями граничных условий на границах разделения конструктивных элементов и уравнением движения топлива через гидравлическое сопротивление.

В общем виде уравнение неразрывности для любого сечения записывается

$$f_n C_n = f_{n+1} C_{n+1}.$$

Уравнение скорости течения топлива через гидравлическое сопротивление определяется по формуле

$$C_m = \mu_m \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_n - P_{n+1}}. \quad (3)$$

С учетом изложенного расчет процесса топливоподачи сводится к составлению граничных условий для каждого сечения, обозначенного на рис. 1

Для сечения 1-1

Уравнение неразрывности для сечения 1-1 запишется в виде

$$f_T C_T = f_{ш} C_1.$$

В этом уравнении скорости C_T и C_1 выразим через волны давления с помощью формул Даламбера [3]

$$C_T = \frac{P_1 + 2W_1 \left(t + \frac{l_1}{a} \right) - P_o}{\alpha \rho};$$

$$C_1 = \frac{P + 2W_2(t) - P_o}{\alpha \rho}.$$

Решение относительно $P_1 - P_o$; $F_2(t)$ и $W_1 \left(t + \frac{l_1}{a} \right)$

имеет следующий вид:

$$P_1 - P_0 = F_1\left(t - \frac{l_1}{a}\right) - W_1\left(t - \frac{l_1}{a}\right);$$

$$P_1 - P_0 = F_2(t) - W_2(t);$$

$$P_1 - P_0 = \frac{2}{f_T + f_{\text{ш}}} \left[f_T F_1\left(t - \frac{l_1}{a}\right) - f_{\text{ш}} W_2(t) \right]; \quad (4)$$

$$F_2(t) = \frac{2f_T}{f_T + f_{\text{ш}}} F_1\left(t - \frac{l_1}{a}\right) + \frac{f_T - f_{\text{ш}}}{f_T + f_{\text{ш}}}; \quad (5)$$

$$W_1\left(t + \frac{l_1}{a}\right) = \frac{f_T - f_{\text{ш}}}{f_T + f_{\text{ш}}} F_1\left(t - \frac{l_1}{a}\right) - \frac{2f_T}{f_T + f_{\text{ш}}} W_2(t). \quad (6)$$

Для сечения 2-2

Уравнение неразрывности для сечения 2-2 имеет вид

$$f_{\text{ш}1} C_1 = f_{\text{фш}} C_2.$$

Выразив C_1 через волны давления, используя выражение (2), а C_2 по формуле (3), получим

$$C_1 = \frac{2F_2\left(t - \frac{l_2}{a}\right) + P_0 - P_2}{\alpha \rho};$$

$$C_2 = \frac{\mu_{\text{фш}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} + P_0 - P_2}{\alpha \rho}.$$

$$P_2 - P_0 = 2F_2\left(t - \frac{l_2}{a}\right) - \alpha \rho C_1;$$

$$P_2 - P_0 = 2F_2\left(t - \frac{l_2}{a}\right) - \frac{\alpha \rho \mu_{\text{фш}} f_{\text{фш}}}{f_{\text{ш}1}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_2 - P_3}; \quad (7)$$

$$P_2 - P_0 = F_2\left(t - \frac{l_2}{a}\right) - W_2\left(t + \frac{l_2}{a}\right);$$

$$P_2 - P_0 = F_3(t - W_3);$$

$$W_2\left(t + \frac{l_2}{a}\right) = \alpha \rho \frac{\mu_{\text{фш}} f_{\text{фш}}}{f_{\text{ш}1}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_2 - P_3} - F_2. \quad (8)$$

$$F_3(t) = F_4(t).$$

Аналогично находятся окончательные уравнения для всех сечений 4-4; 5-5; 6-6; 7-7; 8-8; 9-9.

Для сечения 10-10

Дополнительно вводится уравнение

$$C_{и} = \frac{d h_{и}}{dt}. \quad (9)$$

Для сечения 11-11

$$P_{11} - P_{о} = 2F_{11} \left(t - \frac{l_{11}}{a} \right) - \frac{\alpha \rho}{f_{кн}} \left(\mu_{н} f_{н} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{10} - P_{11}} - f'_{и} C_{и} \right); \quad (10)$$

$$W_{11} \left(t + \frac{l_{11}}{a} \right) = W_{10} \left(t - \frac{l_{10}}{a} \right); \quad (11)$$

$$F_{12}(t) = 2F_{11} \left(t - \frac{l_{11}}{a} \right) + W_{12}(t) - \frac{\alpha \rho}{f_{кн}} \left(\mu_{н} f_{н} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{10} - P_{11}} - f'_{и} C_{и} \right). \quad (12)$$

Уравнение движения иглы форсунки записывается с учетом всех сил, действующих на нее:

$$M_{и} \frac{d^2 h_{и}}{dt^2} + \delta h_{и} + P_{фо} (f_{и} - f'_{и}) = (f_{и} - f'_{и}) (P_{10} - P_{о}) + f'_{и} P_{11}. \quad (13)$$

На движение иглы накладываются нелинейные условия:

$$0 \text{ при } h_{ир} \leq 0;$$

$$h_{и} = h_{ир} \text{ при } 0 \leq h_{ир} \leq h_{и \max};$$

$$h_{и \max} \text{ при } h_{ир} \geq h_{и \max}.$$

Для сечения 12-12

$$P_{12} - P_{о} = 2F_{12} \left(t - \frac{l_{12}}{a} \right) - \frac{\alpha \rho}{f_{кн}} \left(\mu_{ко} f_{ко} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{12} - P_{13}} - f_{и} C_{и} \right); \quad (14)$$

$$W_{12} \left(t + \frac{l_{12}}{a} \right) = \frac{\alpha \rho}{f_{кн}} \left(\mu_{ко} f_{ко} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{12} - P_{13}} - f'_{и} C_{и} \right) - F_{12} \left(t - \frac{l_{12}}{a} \right); \quad (15)$$

$$F_{13}(t) = F_{14}(t). \quad (16)$$

Для сечения 13-13

$$P_{13} - P_0 = 2F_{13} \left(t - \frac{l_{13}}{a} \right) - \frac{\alpha \rho}{f_{\text{ап}}} \times$$

$$\times \left(\mu_{\text{ко}} f_{\text{ко}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{12} - P_{13}} - f''_{\text{и}} C_{\text{и}} \right); \quad (17)$$

$$W_{13} \left(t + \frac{l_{13}}{a} \right) = W_{12} \left(t + \frac{l_{12}}{a} \right); \quad (18)$$

$$F_{13}(t) = 2F_{12} \left(t - \frac{l_{12}}{a} \right) + W_{13}(t) - \frac{\alpha \rho}{f_{\text{ап}}} \times$$

$$\times \left(\mu_{\text{ко}} f_{\text{ко}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{12} - P_{13}} - f''_{\text{и}} C_{\text{и}} \right). \quad (19)$$

Для сечения 14-14

$$P_{14} - P_0 = 2F_{14} \left(t - \frac{l_{14}}{a} \right) - \frac{\alpha \rho \mu_{\text{ро}} f_{\text{ро}}}{f_{\text{ап}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{14} - P_{13}};$$

$$(20)$$

$$W_{14}(t) = 2\rho \frac{\mu_{\text{ро}} f_{\text{ро}}}{f_{\text{ап}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_{14} - P_{13}} -$$

$$- F_{14} \left(t - \frac{l_{14}}{a} \right). \quad (21)$$

Кроме обозначений, приведенных на рис. 1, в вышеуказанных формулах встречаются следующие:

- $F(t)$ и $W(t)$ - величины прямых и отраженных волн в соответствующих сечениях;
- a - скорость распространения звука в топливе;
- ρ - плотность топлива;
- $C_{\text{и}}$ - скорость перемещения иглы распылителя;
- $M_{\text{и}}$ - масса подвижных частей форсунки;
- $f'_{\text{и}}; f''_{\text{и}}; f'''_{\text{и}}$ - площади поперечных сечений конусной части иглы;
- δ - жесткость пружины форсунки;
- $h_{\text{и}}$ - перемещение иглы распылителя;
- $P_{\text{фо}}$ - давление начала подъема иглы распылителя;
- $l_{1...12}$ - длины участков топливного тракта форсунки.

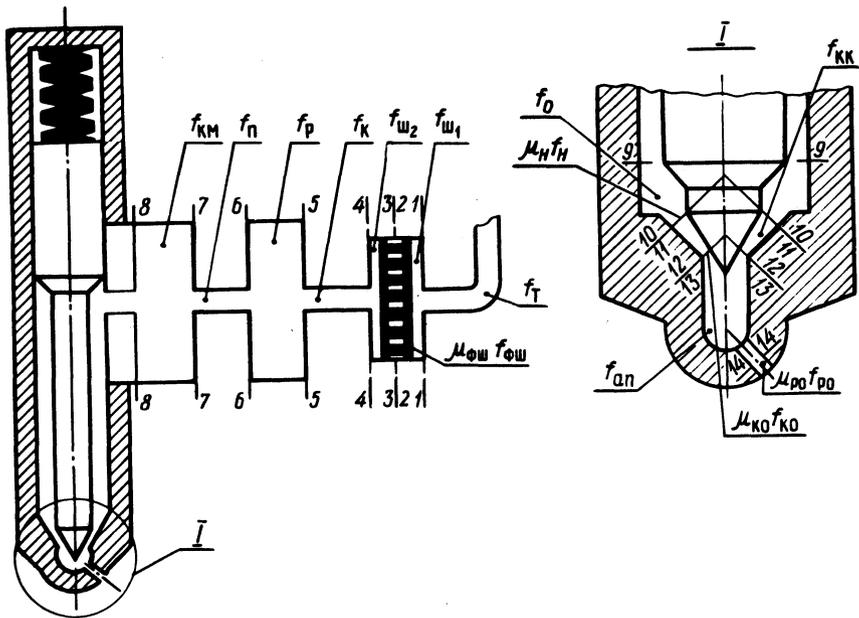


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема процесса топливоподачи.

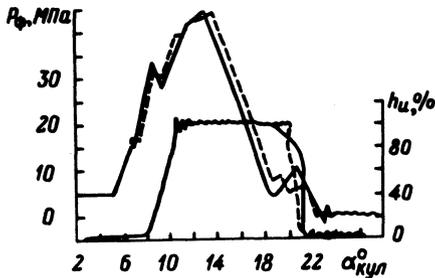


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных процесса впрыска топливной аппаратуры дизеля СМД-72:
 --- — расчетные данные; — — опытные данные.

Таким образом, используя одну из известных схем для расчета процесса топливоподачи у насоса и решив предлагаемые уравнения, получаем характеристику процесса впрыска с учетом конструктивных параметров форсунки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что погрешность расчетного метода гарантирует получение достоверных данных при практических расчетах.

На рис. 2 приведены результаты расчета на ЦВМ "Минск - 32" и результаты осциллографирования топливной аппаратуры двигателя СМД-72.

Л и т е р а т у р а

1. Астахов И.В., Владимиров П.А., Эйдельман Я.А. Основы гидродинамического расчета топливных систем дизелей с насосами распределительного типа. - Тракторы и сельхозмашины, 1969, № 10.
2. Астахов И.В., Трусков В.И. Подача и распыливание топлива в дизелях. - М., 1971.
3. Крук Б.А. Методика гидравлического расчета топливоподдачи дизелей. - Труды ЦНИТА, 1969, вып. 40.
4. Гидравлический расчет распределительной топливной аппаратуры типа НД/Б.А.Крук, Г.П. Ширяев, Н.И.Самусь, В.И.Журбенко. - Труды ЦНИТА, 1971, вып. 48.
5. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. - М.-Л., 1949.