УДК 621.436

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ СРЕДЫ В КАНАЛАХ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ

В.С. Морозова, В.С. Гун, В.Л. Поляцко

Предложен метод расчета течения в каналах распылительного устройства дизеля. Показана эффективность применения конформных отображений для преобразования области течения в параметрический прямоугольник с ортогональной сеткой. Продемонстрировано, как краевые задачи для вычисления отображающих функций могут быть решены методом конечного элемента (МКЭ).

Ключевые слова: электрогидравлическая форсунка, течение вязкой среды, метод конечных разностей, конформное отображение.

С применением системы впрыска Common Rail, основанной на принципе подачи топлива к форсункам от общего аккумулятора высокого давления, связаны последние достижения в снижении расхода топлива, токсичности отработавших газов, уровня шума дизеля. Ее главное преимущество – широкий диапазон регулирования рабочего процесса, который достигнут за счет разделения процессов создания давления и впрыска, а также реализации многократной подачи топлива на протяжении одного цикла работы силовой установки.

Электрогидравлическая форсунка (ЭГФ) – основной элемент системы впрыска, который позволяет за счет электронного управления фазами и продолжительностью открытия иглы распылителя регулировать углы опережения впрыскивания и цикловые подачи топлива [2, 4].

Известно [1, 5], что пропускная способность, внутренняя геометрия и состояние гидравлических трактов (силовые и температурные деформации конструкции форсунки, изношенность трущихся пар, загрязнение внутренних полостей, закоксовывание распыливающих отверстий) оказывает влияние на параметры и характеристики впрыскивания топлива. Поскольку при работе приходится учитывать весьма тонкие эффекты (точно распределенная во времени и пространстве подача топливных смесей, сравнимая по длительности с временем формирования фронтов распыливания), встает задача расчета нестационарных по времени потоков в гидравлических трактах с учетом их состояния и влияющих факторов [4].

Также ставится задача построения математической модели гидравлических трактов форсунки, учитывающей параметры формирования топливной струи и эффективности топливоподачи:

- реологию (вязкость и сжимаемость) топлива и ее зависимость от полей температур, давлений и скоростей течения в гидравлических трактах;
- профилирование элементов гидравлических трактов: жиклеров, камер, игл распылителя;
- нестационарный характер работы форсунки, переменное по времени сечение гидравлических трактов, влияние хода иглы на формирование струй топлива.

Решение этих задач предусматривает поэтапный расчет нестационарных процессов работы форсунки, в частности, переменного по времени течения вязкой среды, которой является распыляемое топливо, в канале игла – корпус распылителя при различных положениях иглы (рис. 1).

Это течение вязкой сжимаемой жидкости описывает система дифференциальных уравнений в частных производных (Навье – Стокса).

В цилиндрических координатах, при наличии осевой симметрии, эти соотношения принимают следующий вид:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_x}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 x}\right]; \tag{1}$$

$$v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial^2 x}\right]; \tag{2}$$

$$\frac{\partial (v_x r)}{\partial x} + \frac{\partial (v_r r)}{\partial r} = 0, \tag{3}$$

где v_x и v_r – осевая и радиальная компоненты скорости течения соответственно; x и r – продольная и радиальная координаты.

Система уравнений (1)–(3), дополненная уравнением теплопроводности и зависимостями реологического состояния, может описывать поведение многокомпонентных смесей жидкостей и газов.

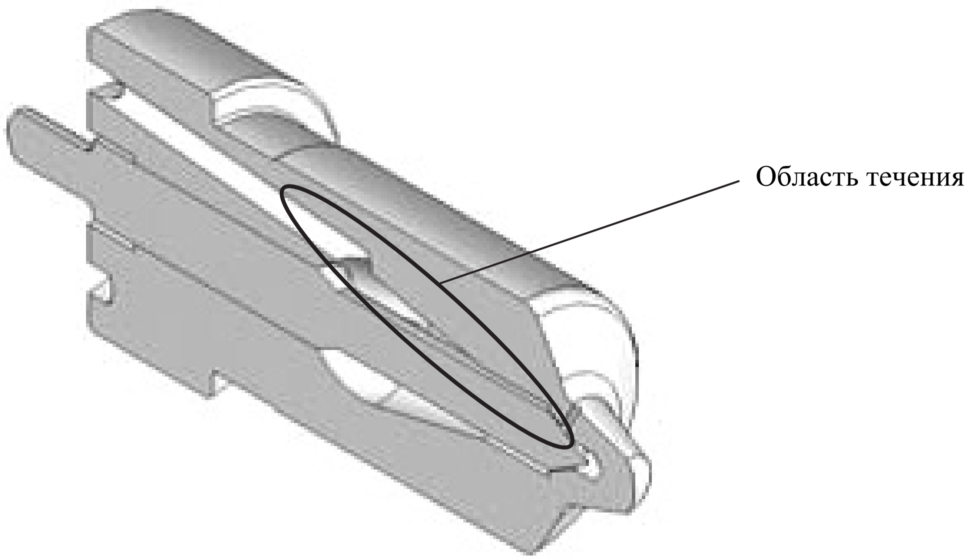

Рис. 1. Канал игла-корпус распылителя [5]

Граничные и начальные условия для компонент скорости следующие (рис. 2, а):

Граница *AE*: $v_x = v_{\text{нач}} = \text{const}, v_r = 0$ – задание входной скорости смеси; (4)

Границы *ABCD* и *EFGH*: $v_n = 0,\ v_\tau = 0$ – полное прилипание; (5)

Граница *HI*: $v_r = 0$ – осевая симметрия; (6)

Граница *DI*: $p = p_{\text{цил}}$ (полное давление равно давлению в цилиндре). (7)

В настоящее время решения этих уравнений найдены лишь в некоторых частных случаях. Существует несколько ситуаций, обусловленных простой геометрией, которые решены в аналитическом виде. Это стационарные течения в простых каналах – течение Пуазёйля, Куэтта и др.. В остальных случаях используется численное моделирование [7, 8].

Решение этой задачи осложняется рядом факторов.

1. Система Навье – Стокса нелинейна и ее решение сильно зависит от начальных и граничных условий.

2. При превышении некоторого критерия (числа Рейнольдса, Re) выше критического значения решение имеет хаотический (турбулентный) вид. При его уменьшении ниже критического решение принимает нехаотический (ламинарный) вид. Имеет место также исключительная чувствительность к изменению коэффициентов уравнения: при турбулентном режиме и при изменении Re на 0,05 % решения совершенно отличаются друг от друга.

3. Для описания реальных течений приемлемую точность численного решения можно получить только при такой расчетной сетке, ячейки которой меньше самого мелкого вихря. Это требует очень больших затрат расчетного времени на современных компьютерах.

4. Вблизи свободной поверхности жидкости при истечении из отверстия распылителя происходит резкое изменение скорости жидкости и ее плотности. Для того чтобы уловить эти изменения, необходима мелкая пространственная сетка. Считать во всей вычислительной области на такой сетке нельзя из-за ограниченности ресурсов ЭВМ, поэтому счет должен проводиться на неравномерной разностной сетке.

Экономичность, а следовательно, и быстродействие методов расчета таких задач значительно возрастают при простой форме расчетной области, в идеале прямоугольной в осевом сечении, допускающей построение высокоэффективных и апробированных разностных расчетных схем на ортогональных сетках. Ко всему этому надо добавить набор сервисных преимуществ, таких, как высокоточную интерполяцию, дифференцирование и интегрирование численного решения, простоту визуализации картины течения.

Поэтому существует устойчивый интерес к созданию методов построения ортогональных разностных сеток в области течения или, что то же самое – к их отображению на параметрические области (прямоугольники, параллелепипеды) и т. д. [10].

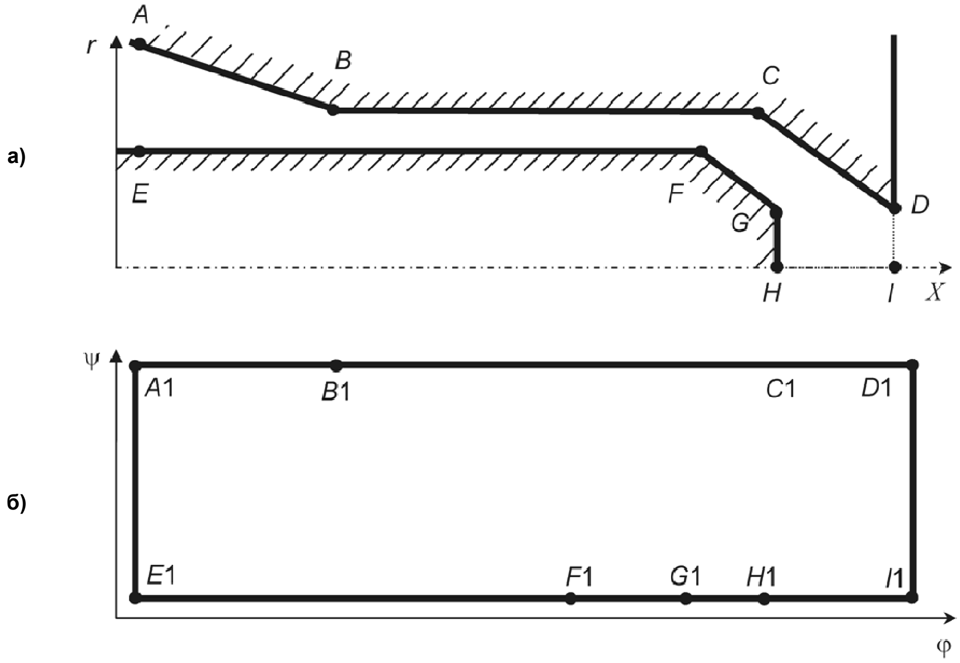

Рис. 2. Области течения (схематично): физическая (а) и параметрическая (б) плоскость

Поэтому, если будет найден достаточно универсальный метод преобразования исходной области течения среды в прямоугольник, с прямоугольной же расчетной сеткой, это позволит резко сократить расчетные затраты и повысить качество исследования и расчета каналов форсунок.

Перспективным методом выполнения такого преобразования координатных систем является его синтез путем построения конформного отображения. Однако разработанные до настоящего времени методы этого построения являются либо пригодными для ограниченного набора областей, либо построенными на итерационных алгоритмах, затратными с вычислительной точки зрения и не дающими гарантий сходимости для более-менее реальных областей течения.

В данной работе предпринята попытка построения универсального метода численного синтеза конформного отображения, лишенного отмеченных выше недостатков.

Пусть *ABCDIHGFE* – выделенная для исследования область течения в осевом сечении гидравлических трактов распылителя. Введем в рассмотрение физическую плоскость с координатами x, r (см. рис. 2, а).

Пусть искомое отображение области *ABCDIHGFE* на прямоугольник $A_1B_1C_1D_1I_1H_1G_1F_1E_1$ (рис. 2, б) в параметрической плоскости с координатами φ,ψ реализуется функциями: $\varphi=\varphi(x,r)$, $\psi=\psi(x,r)$.

Для отображения области течения плоскости (x, r) решим следующие краевые задачи:

а) для ψ:

$$\begin{cases} \Delta\psi = 0 & \text{на}: ABCDIHGFE \\ \psi = \psi_1 & \text{на}: ABCD \\ \psi = \psi_2 & \text{на}: EFGHI \\ \dfrac{\partial\psi}{\partial n} = 0 & \text{на}: AE \\ \dfrac{\partial\psi}{\partial n} = 0 & \text{на}: DI. \end{cases} \tag{8}$$

Здесь ψ_1 и ψ_2 – ординаты прямоугольника в параметрической области, задаваемые произвольно, Δ – оператор Лапласа: $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial r^2$.

b) для φ:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = 0 & \text{на}: ABCDIHGFE \\ \varphi = \varphi_1 & \text{на}: AE \\ \varphi = \varphi_2 & \text{на}: DI \\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 & \text{на}: ABCD \\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 & \text{на}: EFGHI. \end{cases} \tag{9}$$

Здесь φ_1 – абсцисса левой стороны прямоугольника $A_1B_1C_1D_1I_1H_1G_1F_1E_1$ в параметрической плоскости, задаваемая также произвольно.

Решение этих краевых задач сводится к последовательности следующих шагов, стандартных для метода конечного элемента [9].

1. Область течения $ABCDIHGFE$ покрывается сеткой конечных элементов.
2. Для краевых задач (8) и (9) решаются эквивалентные вариационные задачи:

$$U_1 = \frac{1}{2}\iint\left[\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2\right]dxdr \to \min, U_2 = \frac{1}{2}\iint\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2\right]dxdr \to \min. \tag{10}$$

Опишем процедуру минимизации функционала U_1 для функции ψ, задача минимизации функционала U_2 для функции φ решается аналогично.

3. Функция ψ внутри каждого элемента аппроксимируется выражением вида

$$\psi^e = \left[N^{(e)}\right]\{\psi\}, \tag{11}$$

где $\left[N^{(e)}\right]$ – матрица-строка значений функций формы элемента в точке, $\{\psi\}$ – матрица-столбец значений функции в узлах элемента.

Минимизируем функционал на множестве значений функции $\{\psi\}$ в узлах элементов. Вводя в рассмотрение матрицу производных $\{g\}^T = \left[\dfrac{\partial\psi}{\partial x}\dfrac{\partial\psi}{\partial y}\right]$, можем записать

$$U = \iint_D \left[\{g\}^T\{g\}\right]ds\,, \tag{12}$$

или, суммируя по элементам в области течения:

$$U = \sum\int_E \left[\{g\}^T\{g\}\right]ds\,. \tag{13}$$

Минимизация (13) приводит к системе

$$[K]\,\{\psi\}=0. \tag{14}$$

Система (14) состоит их линейных алгебраических уравнений с ленточной, положительно определенной матрицей [9]. Решая ее каким-либо численным методом, получим распределение значений функции $\{\psi\}$ в узлах элементов, покрывающих отображаемую область.

Краевая задача (9) для функции φ решается совершенно аналогично.

Из теории аналитических функций [6] известно, что односвязная область может быть отображена на прямоугольник с фиксированным соотношением сторон, или при заданной длине одной стороны – с определенной длиной другой стороны.

Поэтому, при заданных значениях функции ψ: ψ_1 и ψ_2, значение φ_2 на правой стороне отображаемой области не может быть взято произвольным.

Воспользуемся соотношением, связывающим действительную φ и мнимую ψ части отображающей аналитической функции в любой точке области *ABCDIHGFE*, в частности – на сторонах *AE* и *DI*:

$$\varphi = \int_A^B -\frac{\partial\psi}{\partial y}dx + \frac{\partial\psi}{\partial x}dy + \varphi_1, \tag{15}$$

где φ_1 – произвольная постоянная.

Интегрирование выполняется вдоль любого контура, соединяющего произвольные точки сторон *AE* и *DI*.

Таким образом, длина прямоугольника по координате φ:

$$L = \int_A^B -\frac{\partial\psi}{\partial y}dx + \frac{\partial\psi}{\partial x}dy\,. \tag{16}$$

Приведенная методика, как видно из изложенного, снимает практически всякие ограничения по геометрии области течения в каналах распылителя.

Литература

1. Габитов, И.И. Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей: учеб. пособие / И.И. Габитов, Л.В. Грехов, А.В. Неговора. – Уфа: Изд-во БГАУ, 2008. – 240 с.

2. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.

3. Драган, Ю.Е. Методика учета сжимаемости топлива и деформации штанги при математическом моделировании электрогидравлических форсунок / Ю.Е. Драган / Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 35–39.

4. Иващенко, Н.А. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей / Н.А. Иващенко, В.А. Вагнер, Л.В. Грехов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2002. – 166 с.

5. Лазарев, В.Е. Повышение ресурса распылителей топлива в дизелях снижением нагруженности прецизионных сопряжений: дис. ... д-ра техн. наук / В.Е. Лазарев. – Барнаул: АГТУ им. И.И. Ползунова, 2011. – 336 с.

6. Маркушевич, А.И. Краткий курс теории аналитических функций / А.И. Маркушевич. – М.: Мир, 2006. – 424 с.

7. Морозова, В.С. Бессливной процесс топливоподачи: дис. ... д-ра техн. наук / В.С. Морозова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 226 с.

8. Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусов, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков. – М.: Машиностроение, 1971. – 359 с.

9. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

10. Handbook of grid generation / ed. by Joe F. Thompson, Bharat K. Soni, Nigel P. Weaterill. – New York: CRC Press, 1998. – 1097 p.

Морозова Вера Сергеевна. Доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), Vera_Morozova_38@mail.ru.

Гун Валентина Сергеевна. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), vgoun@mail.ru.

Поляцко Владимир Леонидович. Ассистент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), polyacko_2002@list.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Mechanical Engineering Industry”
2013, vol. 13, no. 2, pp. 75–80

METHOD OF CALCULATION OF THE CURRENT OF THE VISCOUS ENVIRONMENT IN SPRAY CHANNELS OF THE NOZZLE OF THE DIESEL

V.S. Morozova, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, Vera_Morozova_38@mail.ru,*
V.S. Goun, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vgoun@mail.ru,*
V.L. Polyatsko, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, polyacko_2002@list.ru*

A method for calculating the flow in the channels of the diesel spray nozzle was proposed. The effectiveness of the use of conformal mapping to transform the area into a parametric flow rectangle with an orthogonal grid is shown. Demonstrated how boundary value problems for the calculation of the mapping functions can be solved using the finite element method (FEM).

Keywords: electro-hydraulic nozzle, viscous medium, finite difference method, conformal mapping.

Поступила в редакцию 11 сентября 2013 г.