

# Расчет и конструирование машин

УДК 621.436.038

## Численный расчет течения топлива в форсунке дизеля

**Ю.А. Гришин, К.Н. Рысс**

*Улучшение качества рабочего процесса современных дизельных двигателей в значительной степени зависит от системы топливоподачи и, в частности, от оптимальной геометрии проточной части каналов форсунок. Чрезмерная сложность и излишняя трудоемкость проведения натуральных экспериментов не дают возможность получить наиболее достоверные значения параметров течения внутри форсунки. С помощью численного моделирования на базе программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS-CFX удалось смоделировать течение в топливоподающей форсунке дизельного двигателя. В результате численного моделирования получены поля распределения скорости, полное и статическое давление при нестационарном течении. Найденные интегральные значения скорости и давления во всех точках канала форсунки позволяют определить значения коэффициентов расхода распылителей форсунки, а также найти зоны отрыва потока от стенок канала. Сравнение результатов численного и натурального эксперимента дает сходство полученных значений с погрешностью менее 1 %. Дальнейшая обработка результатов расчета и оптимизация геометрии проточной части улучшают гидродинамические характеристики топливоподачи, что, в свою очередь, позволит повысить технико-экономические и экологические показатели двигателя.*

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, метод контрольных объемов, форсунка, распылитель, поля скоростей и давлений.

## The numerical calculation of the flow in a diesel fuel injector

**Y.A. Grishin, K.N. Ryss**

*The efficiency of operation of modern diesel engines largely depends on the parameters of the fuel supply system and, in particular, on the geometry of flow channels of injectors. The unreasonable labor consumption and excessive*



**ГРИШИН**  
Юрий Аркадьевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**GRISHIN**  
Yuriy Arkad'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**РЫСС**  
Кирилл Николаевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**RYSS**  
Kirill Nikolaevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

*complexity of field experiments do not enable us to obtain the most reliable parameters of the flow inside the injector. For this reason, a numerical simulation of the flow in a diesel engine fuel injector was conducted on the basis of the ANSYS-CFX computational fluid dynamics software package. The velocity field and the total and static pressure were computed in the case of unsteady flow. The integral values of the velocity and pressure were calculated at all points of the injector channel in order to determine the injection nozzle flow rate and to find the area of flow separation from the channel walls. The results of numerical and full-scale experiments agree within the error of less than 1%. The further processing of the numerical results and the optimization of the flow channel geometry can do much towards improving the fuel flow parameters, which, in turn, will enhance the technical, economic and environmental characteristics of the engine.*

**Keywords:** computational fluid dynamics, finite volume method, injector, diffuser, velocity and pressure fields.

Система топливоподачи — важнейший элемент, влияющий на качество рабочего процесса в дизельном двигателе. Гидродинамическое совершенство проточной части этой системы обеспечивает улучшение подачи и распыливание топлива в цилиндрах, что повышает характеристики двигателя — мощность, экономичность, а также снижает вредные выбросы. Определение силовых нагрузок на детали топливоподающей форсунки, возникающих при движении топлива под высоким давлением в ее проточной части, необходимо для правильного расчета прочности ее деталей и усилий в системе управления топливоподачей.

Все эти характеристики топливных форсунок дизелей можно усовершенствовать путем трудоемких экспериментальных работ. Однако в настоящее время все шире начинает применяться новый исследовательский инструмент — численный эксперимент, основанный на использовании методов вычислительной гидродинамики.

Появившись в 1980-х годах на стыке вычислительной математики и теоретической гидромеханики, вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamic — CFD) активно развивалась и к настоящему времени стала обособленным раз-

делом науки, предметом которого является численное моделирование различных течений жидкости и газа, а также решение возникающих при этом задач при помощи методов, основанных на использовании компьютерных систем.

Среди несомненных достоинств компьютерного моделирования можно отметить следующие:

- сокращение времени при проектировании и обработке конструкции;
- численный эксперимент дает возможность моделировать условия, невозпроизводимые при натурных испытаниях;
- использование методов вычислительной гидродинамики позволяет получить более полную и разностороннюю научную и практическую информацию об исследуемом объекте;
- экономическая эффективность компьютерных расчетов на порядок выше проведения эксперимента;
- возможность быстрой корректировки расчетной модели позволяет эффективно использовать время исследований.

Чаще всего в задачах гидродинамики требуется решить систему из четырех независимых уравнений, называемую системой уравнений Навье—Стокса и описывающую основные законы сохранения — массы, импульса и энергии в дифференциальной форме [1—4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho W_i) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{DW_i}{D\tau} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \left[ \mu \left( \frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right], \quad i, j, k = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} + \rho W_j \frac{\partial H}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} W_j) + \rho G_j W_j - w_r Q_r - \nabla q_R \quad (3)$$

и уравнение состояния

$$\rho = \rho(T, p), \quad (4)$$

где  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $W$  — скорость;  $T$  — температура;  $\tau$  — время;  $H$  — полная

энтальпия,  $H = h + \frac{W^2}{2}$ , ( $h$  — статическая энтальпия);  $G$  — объемная сила приложенная к единице объема,  $\lambda$  и  $\mu$  — коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости;  $\nabla$  — оператор Гамильтона (набла);  $w_r$  — скорость горения, выраженная через массовую концентрацию исходных веществ и продуктов сгорания;  $Q_r$  — количество теплоты, выделяемое на единицу массы;  $q_R$  — радиационный тепловой поток от источника излучения;  $\delta$  —  $\delta$ -функция Кронекера.

Для учета процессов турбулентного перемешивания в потоке может быть использована та или модель турбулентности, например  $k - \varepsilon$  [1, 2].

Из анализа уравнений (1) — (3), следует вывод, что основные переменные  $\rho$ ,  $p$ ,  $T$  подчиняются обобщенному закону сохранения [1–4]. Если ввести некоторую переменную  $\Phi$ , обозначающую различные величины, такие, как температура, составляющая скорости и т. д., то обобщенное дифференциальное уравнение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho\mathbf{W}\Phi) = \text{div}(\Gamma_\Phi \text{grad}\Phi) + S_\Phi. \quad (5)$$

При этом необходимо задать значения коэффициента диффузии  $\Gamma_\Phi$  и источникового члена  $S_\Phi$ .

Поскольку аналитических решений системы уравнений Навье—Стокса не существует, применяют численные методы, одним из которых является метод контрольных объемов (МКО). В основе большинства компьютерных CFD-пакетов или комплексов, ориентированных на широкую аудиторию пользователей — научных работников, студентов, инженеров и других, лежит МКО. Среди них одним из наиболее универсальных является программный комплекс ANSYS CFX, позволяющий решать стационарные и нестационарные задачи внешнего и внутреннего обтекания с возможностью учета горения, теплообмена и других актуальных процессов [5, 6]. Особенностью вычислительного алгоритма ANSYS CFX является использование расчетных схем разного

порядка точности, соответствующих различным способам дискретизации конвективных составляющих из обобщенного уравнения (закона сохранения) (5).

Учет сжимаемости потока в МКО ANSYS CFX выполняется на основе уравнения неразрывности, где составляющие массового переноса включают зависимость от плотности  $\rho$ , которая, в свою очередь, определяется через давление  $p$  и конвективную скорость  $W$ . Для сжимаемых течений дискретизация перечисленных составляющих выполняется неявно на каждом временном шаге с использованием линеаризации Ньютона—Рафсона:

$$(\rho W)^k A \approx \rho^k W^k A + \rho^{k-1} W^k A - \rho^{k-1} W^{k-1} A. \quad (6)$$

Здесь индексы  $k - 1$  и  $k$  указывают на значения, полученные на предыдущем и текущем временных шагах соответственно;  $A$  — параметр линеаризации. Как следует из выражения (6), линеаризация включает новые значения и для скорости, и для плотности, что соответствует представлению о неявности расчетной схемы.

В данной работе ставилась задача проверки применимости комплекса ANSYS CFX для расчета нестационарного пространственного течения в каналах топливной форсунки дизельного двигателя с тем, чтобы на следующих этапах можно было совершенствовать геометрию проточной части форсунок, определять усилия, действующие на детали форсунок для решения смежных задач прочности и управления подачей топлива.

В качестве опытного образца для численного эксперимента выбрана форсунка тепловозного дизеля Д49 с составным распылителем, состоящим из корпуса распылителя и наконечника распылителя. Модель распылителя форсунки представлена на рис. 1.

Наконечник распылителя имеет восемь сопел длиной 2,2 мм и диаметром 0,18 мм, угол наклона сопел составляет  $155^\circ$ . Ход иглы равен 0,35 мм, скорость подъема иглы 0,6 м/с, время впрыска 1,2 мс.

В качестве граничного условия, задаваемого на входе в проточную часть распылителя, использовано полное давление, равное 170 МПа. Максимальное давление в цилиндре дизеля,

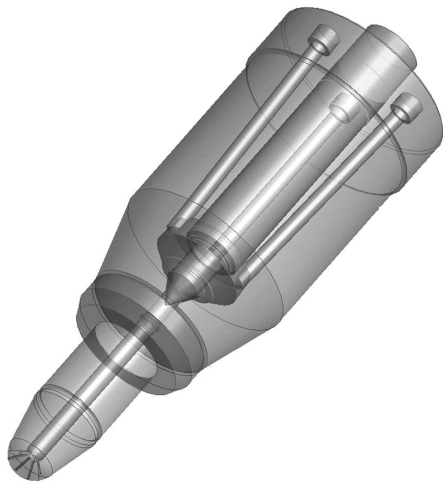


Рис. 1. Модель распылителя

в который осуществляется впрыск топлива, составляло 17 МПа. Схема задания расчетной области и граничных условий изображена на рис. 2.

В данном случае рабочее тело является дизельным топливом и в качестве уравнения состояния (4) используется соотношение

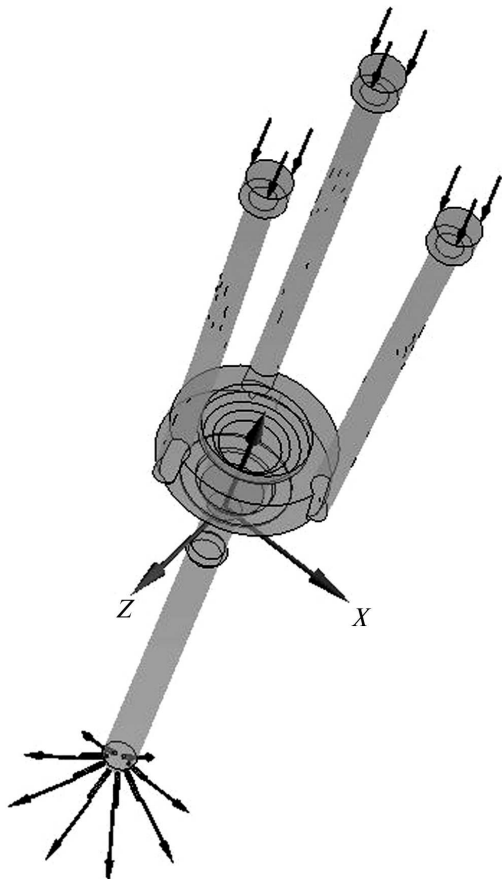


Рис. 2. Схема задания расчетной области течения и граничных условий

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{0t}}\right)^\chi = \frac{B+p}{B},$$

где

$$B = 10^6 [222,3 - 1,26(t - 20) + 0,62(\rho_{20} - 825)];$$

$$\chi = 7,49 + 0,0086(t - 20).$$

Здесь  $t$  — температура, °С;  $\rho_{20}$  — плотность при нормальных условиях кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{0t}$  — плотность при температуре  $t$  и атмосферном давлении кг/м<sup>3</sup>. Приведенные зависимости получены профессором Л.В. Греховым на кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана по результатам обработки обширного экспериментального материала [7].

Численным моделированием определены, в частности, поля скоростей и давлений для момента максимального подъема иглы рис. 3—5.

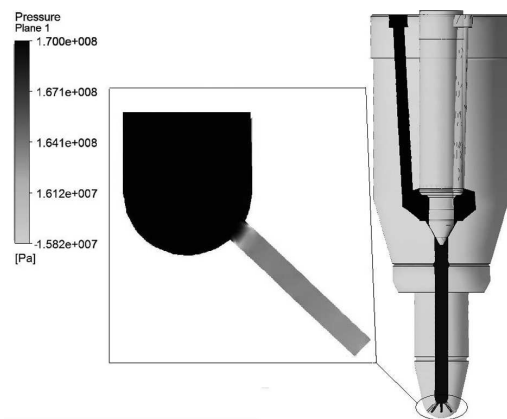


Рис. 3. Поле давлений в проточной части и сопловом канале форсунки

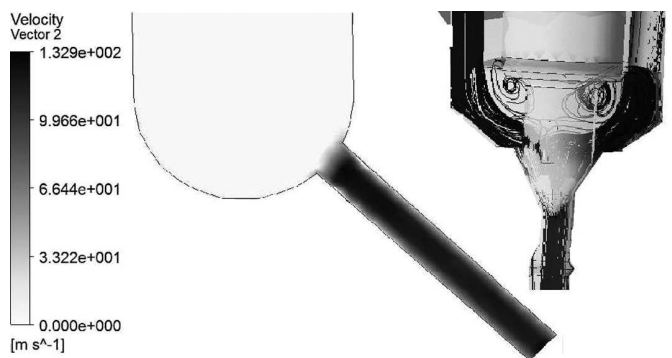


Рис. 4. Поле скоростей течения в сопловом канале и линии тока в области посадки иглы форсунки

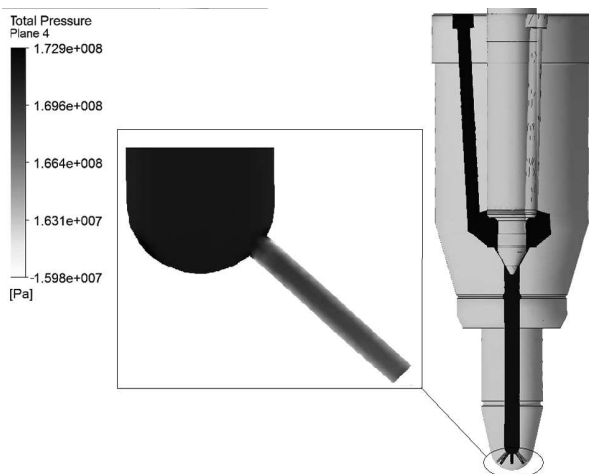


Рис. 5. Поле полного давления в проточной части и сопловом канале форсунки

## Выводы

1. Численное моделирование позволяет получить данные о распределении скорости и давления (полного и статического) при нестационарном течении топлива в проточной части форсунки. Очевидно, что такие результаты невозможно получить с помощью натуральных испытаний.

2. Продолжение численных экспериментов в программном комплексе ANSYS CFX позволит проводить гидродинамическую оптимизацию проточной части распылителя форсунки, а также определять распределение давления по внутренним поверхностям для последующего выполнения прочностного расчета деталей. Все это позволит усовершенствовать рабочий процесс двигателя и конструкцию элементов топливоподающей аппаратуры, а также систему

управления топливоподачей. Благодаря этому улучшатся основные технико-экономические и экологические характеристики двигателя.

## Литература

1. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
3. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т. Т. 1; Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 504 с.
4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т. Т. 2; Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 552 с.
5. ANSYS CFX v.12. Release. Theory Reference.
6. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. 423 p.
7. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2004. 344 с.

## References

1. Belov I.A., Isaev S.A. *Modelirovanie turbulentnykh techenii* [Simulation of turbulent flows]. Saint-Petersburg, Baltic State Technical University publ., 2001. 108 p.
2. Patankar S. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980. (Russ. ed.: Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow, Energoatomizdat publ., 1984. 152 p.
3. Fletcher K. *Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkosti. Metody rascheta razlichnykh techenii* [Computational Methods for Fluid Dynamics. Methods for calculating the various trends]. Vol. 1. Moscow, Mir publ., 1991. 504 p.
4. Fletcher K. *Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkosti. Metody rascheta razlichnykh techenii* [Computational Methods for Fluid Dynamics. Methods for calculating the various trends]. Vol. 2. Moscow, Mir publ., 1991. 552 p.
5. ANSYS CFX v.12. Release. *Theory Reference*.
6. Ferziger J. H., Peric M. *Computational Methods for fluid Dynamics*. Berlin. Springer, 2002. 423 p.
7. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaia apparatura i sistemy upravleniya dizelei* [Fuel equipment and control systems of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2004. 344 p.

Статья поступила в редакцию 25.04.2013

## Информация об авторах

**ГРИШИН Юрий Аркадьевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grishin@power.bmstu.ru).

**РЫСС Кирилл Николаевич** (Москва) — магистрант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rysskn@yandex.ru).

## Information about the authors

**GRISHIN Yuriy Arkad'evich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Piston Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: grishin@power.bmstu.ru).

**RYSS Kirill Nikolaevich** (Moscow) — Undergraduate of «Piston Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: rysskn@yandex.ru).