

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, С.В. ВИЛКУЛ

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКОЙ

Рассмотрена возможность определения конуса распыла одно- и двухканальной центробежных форсунок, работающих на жидком топливе, путем математического моделирования течения жидкой и газообразной фаз в каналах топливных форсунок энергетических ГТУ. Представлены результаты численных экспериментов по прогнозированию процессов истечения топлива с помощью VOF-модели. Представленные контуры объемных долей жидкой фазы, давлений и скоростей свидетельствуют о сложном характере гидродинамического взаимодействия потоков в каналах форсунок.

**газотурбинный двигатель, центробежная форсунка, моделирование, конус распыла**

### Введение

Детальное математическое моделирование различных гидрогазодинамических процессов стало возможным благодаря интенсивному развитию электронно-вычислительной техники. Это позволило с помощью численных методов решать системы дифференциальных уравнений, которые включают в себе уравнения Навье-Стокса для сжимаемых жидкостей и газов, уравнения для  $k$  и  $\omega$  в моделях турбулентности, а также уравнения массопереноса [1].

Открытыми до настоящего времени остаются вопросы точности прогнозирования процессов распыливания жидкости центробежной форсункой с помощью подобных математических моделей [2].

### 1. Постановка задачи

С помощью программного комплекса Fluent проводится численный эксперимент, целью которого является выбор математической модели, которая позволяла бы с приемлемой точностью прогнозировать конус распыла дизельного топлива центробежной форсункой.

Для реализации подобного эксперимента построена трехмерная геометрическая модель одноканальной и двухканальной центробежных форсунок для газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт.

Расчеты проводятся для двух режимов форсунки: работает только первый канал (холостой режим работы ГТД), совместно работают два канала (режим номинальной мощности ГТД).

Численный эксперимент осуществляется в нестационарной постановке на тетраэдрической сетке объемом 1,2 млн. ячеек. Суммарное время расчета соответствует времени формирования конуса распыла.

Следует отметить, что область настоящего исследования ограничивается корневым углом конуса распыливания. Дальнейшее формирование и распад пелены топлива на капли не моделируется вследствие ограниченности вычислительных ресурсов. Так, для выбранной центробежной форсунки с постоянным расходом жидкости и среднем размере капель 100 мкм расчетная область должна состоять примерно из  $5 \cdot 10^9$  элементов.

### 2. Математическая модель VOF

Используемая для анализа VOF-модель базируется на следующих допущениях: компоненты жидкости несжимаемы; между ними нет теплообмена; компоненты не перемешиваются и химически не реагируют.

В каждом контрольном объеме объемные доли всех компонентов составляют единицу. Поля всех

переменных определяют среднеобъемные значения всех составляющих. Таким образом, если  $q$ -я объемная доля компонента равна  $\alpha_q$ , то возможны три основных случая: ячейка пуста для  $q$ -го компонента; ячейка заполнена  $q$ -м компонентом; ячейка содержит интерфейс между компонентами.

Контроль за интерфейсом между жидкостями осуществляется решением уравнения неразрывности для объемной доли  $q$ -го компонента:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0.$$

Уравнение объемной доли компонента не решается для первичной фазы (воздух); ее объемная доля вычисляется следующим образом:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1.$$

Свойства, вычисляемые в уравнении переноса, определяются наличием различных долей компонентов в каждом контрольном объеме. Например, плотность (как и другие свойства) находится с помощью следующего уравнения

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1.$$

Уравнение сохранения количества движения решается во всей расчетной области:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_j = & - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j. \end{aligned}$$

В результате поле скоростей разделяется между рассматриваемыми фазами.

### 3. Геометрическая модель

Трехмерная геометрическая модель центробежной форсунки представлена на рис. 1. Принцип ее работы следующий: жидкость по тангенциальным каналам 1, ось которых смещена относительно оси сопла, подается в камеру закручивания 2, где приобретает интенсивное вращательное движение и попа-

дает в сопло 3. При выходе из сопла форсунки частицы распределяются по различным траекториям, образуя факел в области 4, которая заполнена неподвижным идеальным газом при атмосферном давлении.

В соответствии с теорией идеальной центробежной форсунки, базирующейся на принципе максимального расхода, разработанной Г.Н. Абрамовичем [3], получены зависимости коэффициента расхода, заполнения сопла и угла конуса распыла от геометрической характеристики форсунки [4].

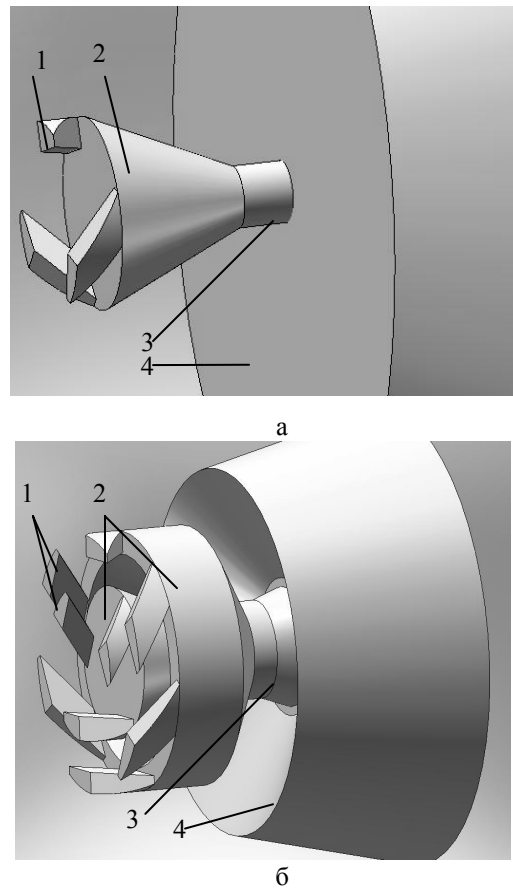


Рис. 1. Модель центробежной форсунки: а – первый канал; б – два канала

Для некруглых сечений входных каналов с перпендикулярным направлением относительно оси сопла выражение для геометрической характеристики имеет вид:

$$A = \frac{Rr_c \pi}{nf_{in}} \sin \beta_k,$$

где  $f_{in}$  – площадь поперечного сечения канала;

$\beta_k$  – угол между направлением входного канала и осью сопла.

Для первого канала форсунки (рис. 1, а) с геометрической характеристикой  $A = 3$  угол конуса распыла должен составлять  $95^\circ - 100^\circ$ .

Отметим, что для исследуемой двухканальной центробежной форсунки в литературных источниках не было найдено теоретических зависимостей для определения угла конуса распыла.

#### 4. Прогнозирование конуса распыла с помощью модели VOF

На рис. 2 представлены контуры объемной доли дизельного топлива при работе только первого канала форсунки (холостой ход двигателя). Угол конуса распыла составляет  $86^\circ - 90^\circ$ , что соответствует экспериментальным данным и отличается от угла конуса распыла идеальной центробежной форсунки примерно на 10 %.

При увеличении расхода через первый канал (до режима номинальной мощности двигателя) угол конуса распыла несколько уменьшается, что видно из рис. 3.

В случае совместной работе двух каналов на режиме номинальной мощности (рис. 4) конусы распыла первого и второго каналов сливаются, и топливо истекает с общим углом  $75^\circ - 80^\circ$ , что полностью соответствует экспериментальным данным.

Согласно экспериментальным данным [4], взаимное расположение сопел влияет в основном на корневой угол факела первой ступени. По мере заглубления сопла первой ступени корневой угол факела уменьшается, так как топливная струя попадает в вихревую зону второго канала и ударяется в стенку наружного сопла. Это влияние четко прослеживается на рис. 2 – 4.

Этот эффект объясняется тем, что в конце сопла первого канала, а также на его внешней стенке со стороны сопла второго канала, статическое давление имеет отрицательное значение (рис. 5) вследст-

вие большей скорости течения жидкости во втором канале (рис. 6).

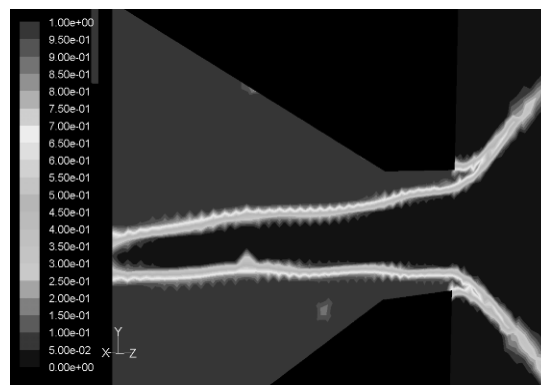


Рис. 2. Работа первого канала форсунки на холостом ходу

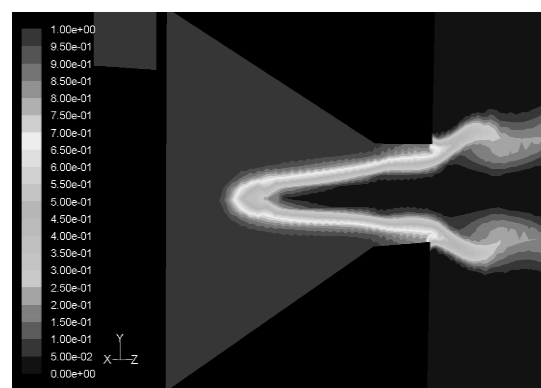


Рис. 3. Работа первого канала форсунки на номинальном режиме.

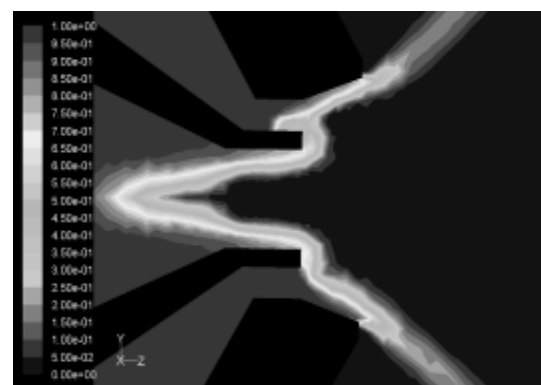


Рис. 4. Совместная работа двух каналов на номинальном режиме

Из рис. 7 видно, что осевая (поступательная) составляющая скорости в сопле рассматриваемой одноканальной форсунки ГТД значительно изменяется по сечениям в отличие от идеальной форсунки, где предполагается, что она остается постоянной [4].

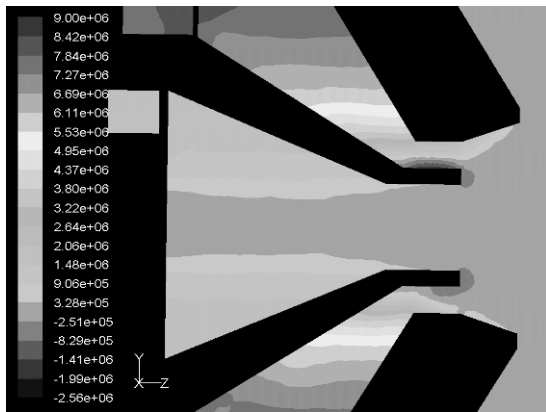


Рис. 5. Распределение статического давления (Па) в продольном сечении

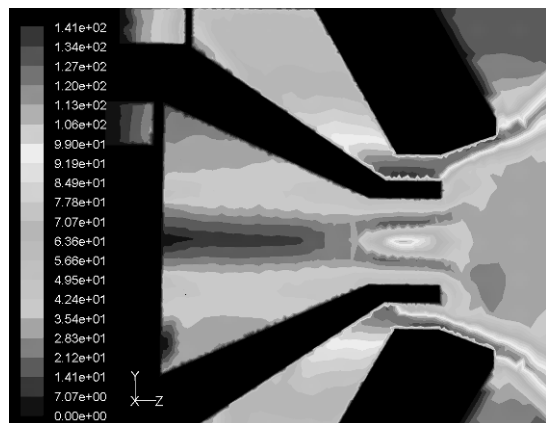


Рис. 6. Распределение абсолютной скорости (м/с) в продольном сечении

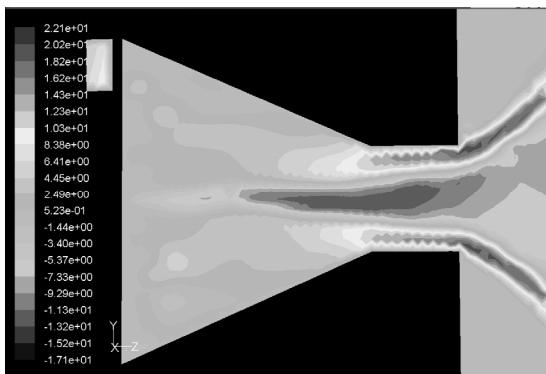


Рис. 7. Распределение осевой скорости (м/с) в первом канале форсунки

### Заключение

Проведенный численный эксперимент по прогнозированию угла конуса распыла дизельного топлива центробежной форсункой в камере сгорания

жидкотопливного энергетического ГТД дает возможность сделать следующие выводы.

1. Результаты трехмерного моделирования достаточно хорошо коррелируются с экспериментальными данными, что позволяет применять подобную методику при проектировании и модернизации жидкотопливных форсунок газотурбинных двигателей.

2. Трехмерное моделирование дает детальную картину сложного течения в двухсопловой центробежной форсунке и указывает на взаимное влияние каналов при формировании конуса распыла. Так, выбором соответствующего расположения сопел путем изменения геометрической модели, можно добиться, чтобы корневой угол факела оставался почти постоянным при изменении давления топлива на переходных режимах работы ГТД.

3. Существует возможность теоретического нахождения расходной характеристики форсунки для определения угла конуса распыла на переменных режимах работы газотурбинных двигателей.

### Литература

1. Романовский Г.Ф., Сербін С.І. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – 259 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Абрамович Г.Н. Теория центробежной форсунки. – В кн.: Промышленная аэродинамика. – М.: БНТ ЦАГИ, 1944. – 144 с.
4. Дитякин Ю.Ф. Клячко Л.А. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

*Поступила в редакцию 21.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.