

УДК 621.45.022.2

## К расчету центробежной форсунки

**М.А. Дербенев**

*Студент, кафедра «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Полянский А.Р., к.т.н., доцент кафедры «Ракетные  
двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[derbenevmaks@gmail.com](mailto:derbenevmaks@gmail.com)

Классическая теория центробежной форсунки разработана Г.Н. Абрамовичем [1]. Методика расчета жидкостных центробежных форсунок с учетом вязкости компонента представлена в [2] и [3]. В работе [4] рассмотрены теоретические и экспериментальные данные, необходимые для проектирования гидравлических элементов жидкостных ракетных двигателей, в том числе и форсунок.

Центробежная форсунка – устройство для дробления жидкости на большое число капель и распределения их в пространстве. Распад струи жидкости, представляющий собой сложный физический процесс, зависит от многих причин, как внешних, так и внутренних.

Устройство центробежной форсунки представляет собой камеру закручивания с одним или несколькими тангенциальными каналами, подводящими жидкость, и выходным отверстием. Параметры форсунки (коэффициент расхода, угол распыливания, перепад) можно регулировать в широком диапазоне в зависимости от соотношения между размерами сопла, камеры закручивания и входных каналов. Схема центробежной форсунки представлена на рис. 1.

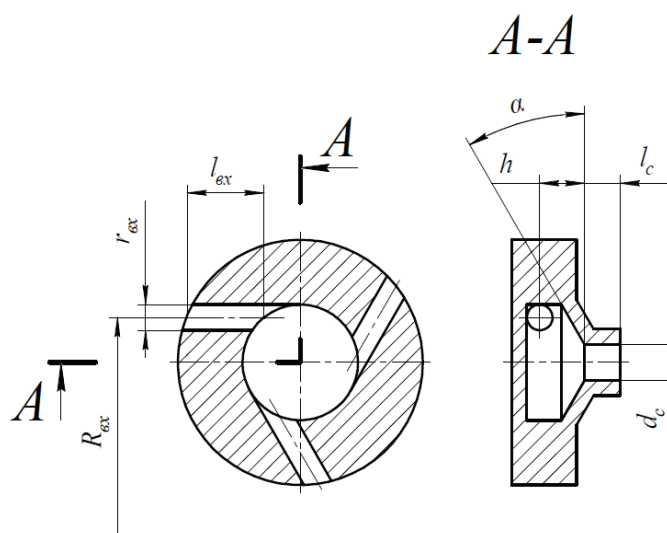


Рис. 1. Схема центробежной форсунки

Произведем расчет центробежной жидкостной форсунки с учетом вязкости по методике [2] и [3]. Для этого зададимся потребными параметрами форсунки: расход рабочего тела через форсунку  $G_f = 0,050 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ; плотность рабочего тела  $\rho = 998 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; вязкость рабочего тела  $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; угол распыливания  $2\varphi = 100^\circ$ ; перепад давления  $\Delta p_f = 0,6 \text{ МПа}$ .

В результате расчета были получены следующие геометрические параметры проточной части форсунки:  $R_{\text{вх}} = 2,95 \text{ мм}$ ;  $r_{\text{вх}} = 1,69 \text{ мм}$ ;  $l_{\text{вх}} = 5 \text{ мм}$ ;  $d_c = 2,35 \text{ мм}$ ;  $l_c = 2,35 \text{ мм}$ ;  $h = 2,95 \text{ мм}$ ;  $\alpha = 30^\circ$ .

Рассмотрим теперь моделирование истечения жидкости из центробежной форсунки с помощью методов вычислительной гидродинамики, позволяющих получить численное решение нестационарных уравнений Навье-Стокса, описывающих динамику жидкости и газа.

Для описания совместного течения вязкой жидкости и сжимаемого газа используются двухкомпонентные уравнения Навье-Стокса. Система уравнений, описывающих двухкомпонентное двухфазное течение состоит из уравнений неразрывности, состояния, баланса энергий. Для решения системы уравнений необходим также ввод условий однозначности. Условия однозначности включают в себя:

- геометрические условия, которые служат для описания формы и размеров системы;
- физические условия, служащие для задания физических свойств среды;
- граничные условия, в которых описывают особенности протекания процессов на границах системы;

-временные условия, определяющие особенности протекания процессов во времени.

Существенную роль оказывает режим течения. Для расчета турбулентных течений применяются различные модели турбулентности.

Наиболее распространенными моделями турбулентности являются: k-ε и SST модель. Модель k-ε наиболее часто применялась для успешных расчетов инженерных задач. Для описания турбулентных величин в ней используется система двух нелинейных диффузионных уравнений - для массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии [5]. Однако в k-ε модели не учитываются особенности сильно закрученных турбулентных течений.

Модель турбулентности SST (Shear Stress Transport) представляет собой комбинацию k-ε и k-ω моделей, и позволяет учесть сильную закрутку потока [6].

Принятая расчетная модель включает в себя моделирование взаимодействия двухфазных потоков (истечение жидкости в газовое пространство), турбулентность потока, межфазную диффузию.

В качестве условий однозначности были приняты:

- геометрическая модель проточной части форсунки (рис.2);
- физические свойства жидкости и газа;
- массовый расход жидкости на входе в форсунку, статическое давление на выходе из форсунки, шероховатость стенки.

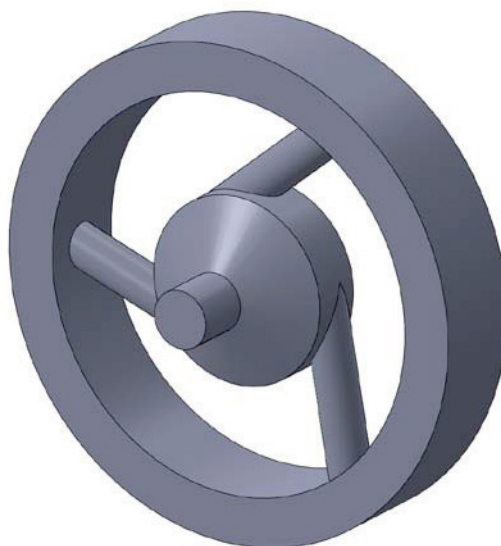


Рис.2. Модель проточной части форсунки

Первоначальная расчетная сетка состоит из 273145 тетраэдрических элементов

Использование  $k-\epsilon$  модели не позволило смоделировать течение в проточной части форсунки из-за сильно закрученного турбулентного течения. Сходимость решения была получена при использовании SST модели турбулентности.

При расчете производилась адаптация сетки в области тангенциального разрыва. Адаптация выполнялась в 5 шагов. Конечное число элементов расчётной сетки на заключительном шаге равно 538359. На рис. 3 представлена оптимизированная расчетная сетка, полученная на шаге 5.

Полученные результаты моделирования представлены в виде распределения основных параметров потока в характерных сечениях, в качестве которых были приняты: сечение, совпадающее с осью сопла форсунки; сечение, проходящее через оси входных отверстий.

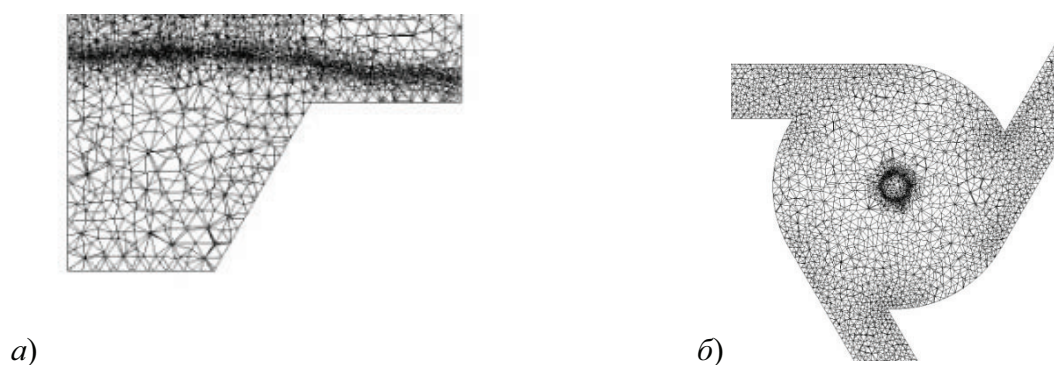


Рис. 3. Оптимизированная расчетная сетка в продольном (а) и поперечном (б) сечениях форсунки

Граница раздела жидкости и газа имеет сложную форму, схожую с гиперboloидом вращения. Наблюдается явно выраженное минимальное сечение. Диаметр газового вихря в данном сечении меньше диаметров вихря на выходе из сопла форсунки и диаметра у «доньшка» форсунки (рис.4). В общем случае газовый вихрь в сечениях, параллельных выходному отверстию форсунки, может представлять тело сложной формы, параметры которого зависят от конструктивных особенностей форсунки.

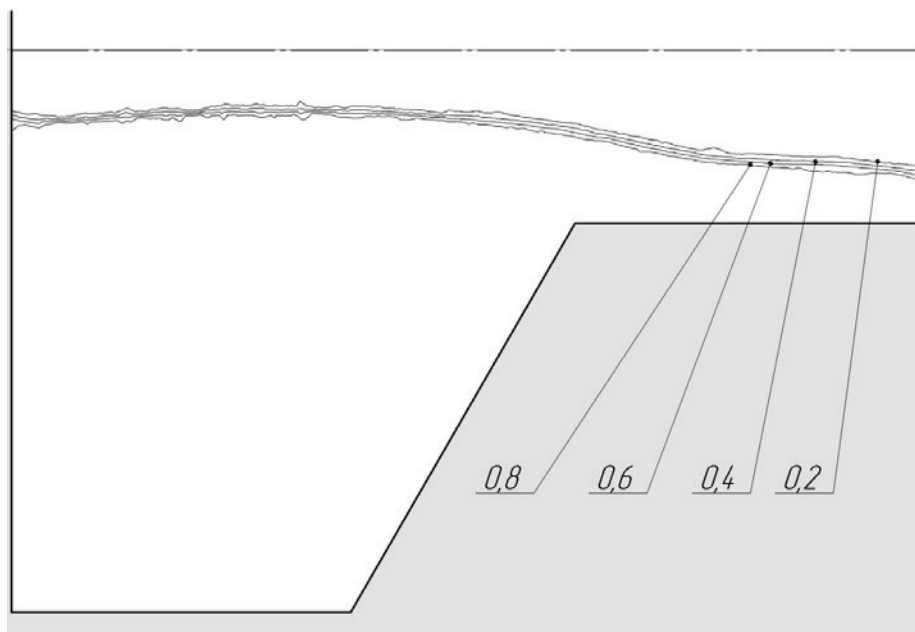


Рис. 4. Распределение объемных частей жидкости в продольном сечении форсунки

В тангенциальных каналах форсунки образуется область подтормаживания потока, в которой наблюдается значительное снижение скорости жидкости. Происходит также образование зон подтормаживания на выходе из тангенциальных каналов форсунки (рис.5). Одновременно происходит снижение статического давления в тангенциальных каналах с последующим повышением его на острых кромках (рис.6).

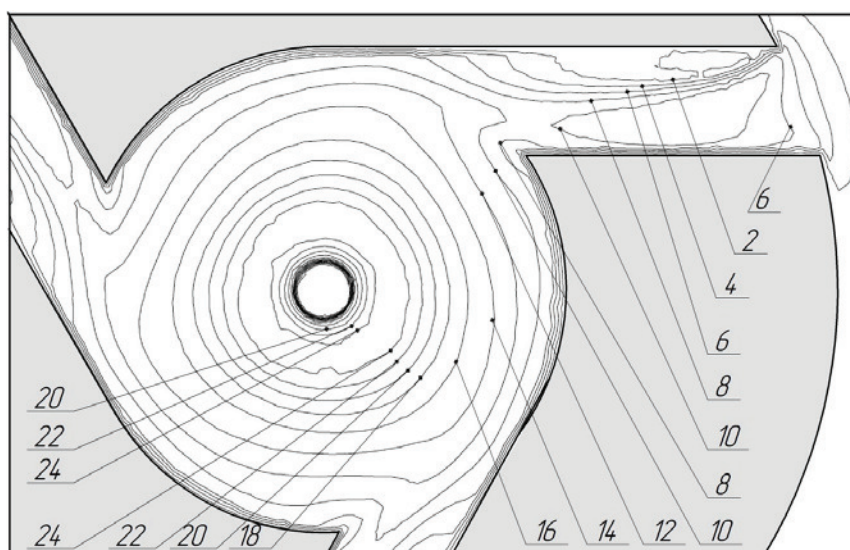


Рис. 5. Распределение скорости жидкости (м/с) в поперечном сечении форсунки

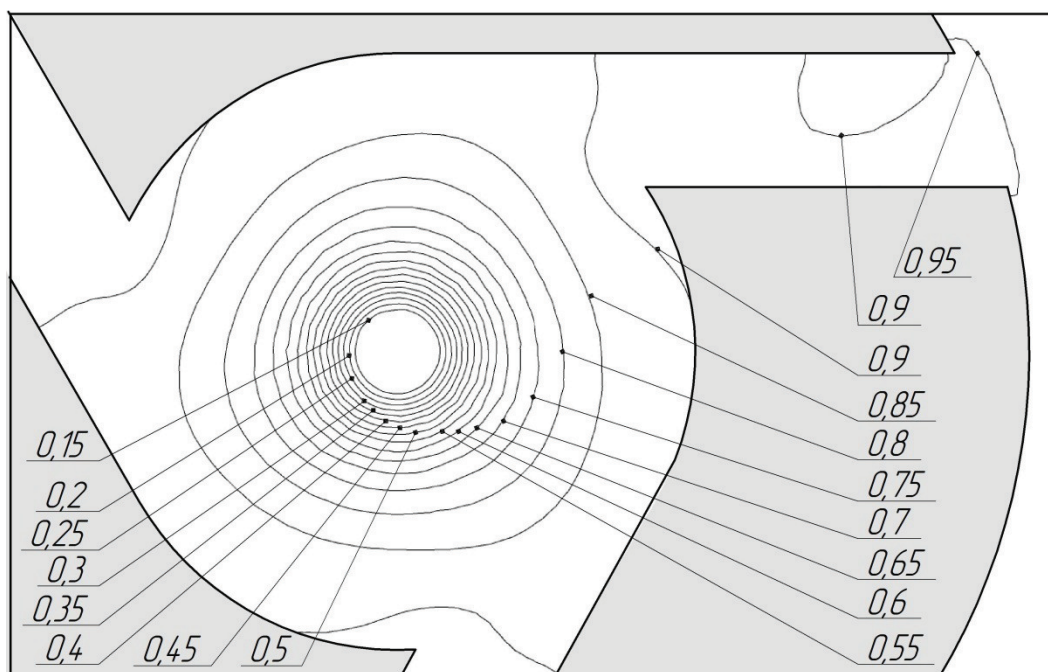


Рис. 6. Распределение статического давления (МПа) в поперечном сечении форсунки

Особый интерес представляет распределение параметров по радиусу выходного сечения форсунки. На рис.7 представлено распределение параметров  $r$  и  $V$  от оси сопла форсунки до стенки в относительных координатах  $R_{\text{отн}}$ . Распределение объемной доли жидкости  $r$  (штриховая линия) позволяет оценить диаметр газового вихря и толщину области вспененной жидкости. Распределение полной скорости  $V$  (сплошная линия) имеет нелинейный характер с выраженным максимумом.

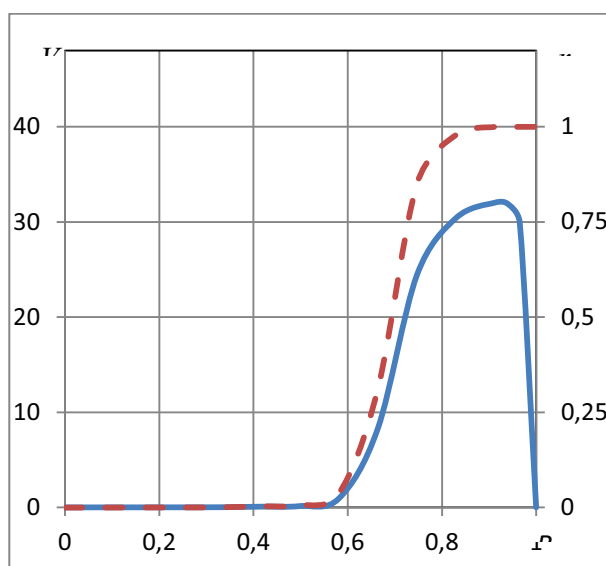


Рис. 7. Распределение параметров по радиусу в выходном сечении сопла форсунки

С помощью методов вычислительной гидрогазодинамики рассчитаны: перепад давления, срабатываемый на форсунке, при заданном массовом расходе; область диффузии компонентов (вспененного течения жидкости); распределение скоростей в выходном сечении форсунки. Получены локальные эффекты распределения скорости и статического давления, характерные для заданной геометрии. Интегральные характеристики имеют приемлемую сходимость с экспериментальными результатами [4] и теоретическими данными для определенного класса малорасходных форсунок.

### **Список литературы**

1. Абрамович Г.Н. Теория центробежной форсунки. // Промышленная аэродинамика (Сборник статей). ЦАГИ. Из-во Бюро Новой техники НКШ, 1944, с. 18-26.
2. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования // Под ред. Ягодникова Д.А. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 488 с.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей // Васильев А.П. и др.; под ред. Кудрявцева М.В. - М.: Высш. шк., 1993— 383 с.
4. Сточек Н.П., Шапиро А.С. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей. М.: «Машиностроение», 1978, 128 с.
5. Авраменко М.И. О к-ε модели турбулентности. Снежинск: Изд-во РФЯЦ - ВНИИТФ, 2005, 76 с.
6. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений // Гарбарук А.В. и др. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, 88 с.