

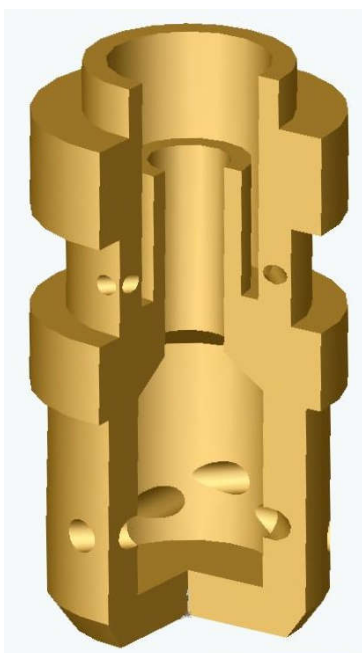
## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ЖРД.

Центробежные форсунки широко используются в жидкостных ракетных двигателях.

Их конструкторы обходятся в основном теорией Абрамовича и экспериментальными данными. Для расчета расходных характеристик, угла распыла однокомпонентных форсунок этот подход достаточен, но для более сложных задач уже возникают затруднения.

Расчет течения внутри форсунки – первый шаг к расчету параметров распыла на выходе форсунки, когда получаются начальные условия для расчета дальнейшего дробления образующейся жидкой пелены на капли.

Проведено численное моделирование течения жидкости внутри двухкомпонентной центробежно-центробежной форсунки ЖРД, работающей на компонентах керосин – жидкий кислород (рис.1.). Результаты проливок форсунки в холодных модельных условиях на воде в барокамере, средой в которой был воздух, использовались для тестирования результатов численного моделирования.



### Модельные условия

Модельные компоненты:	Вода
Расходы компонентов на одну форсунку	Тракт горючего: 127 g/s. Тракт окислителя: 270 g/s.
Давление в барокамере:	1,28 МПа.
Среда в барокамере	Воздух

Рис. 1. Двухкомпонентная форсунка ЖРД.

Течение внутри форсунки смоделировано с помощью Метода Объемной Доли (VOF).  
Объемная доля жидкости VOF:

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{в жидкости} \\ 0 < \gamma < 1 & \text{на интерфейсе} \\ 0 & \text{в газе} \end{cases}$$

Газовая и жидкая фазы рассматриваются как несжимаемые; кавитацией, тепловыми и турбулентными эффектами пренебрегают. Плотность и вязкость потока:

$$\rho = \gamma \rho_{\text{ж}} + (1 - \gamma) \rho_{\text{г}}$$

$$\mu = \gamma \mu_{\text{ж}} + (1 - \gamma) \mu_{\text{г}}$$

Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)$$

Уравнение переноса объемной доли VOF с искусственным членом сжимающим интерфейс:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\gamma) + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r \gamma (1 - \gamma)] = 0$$

Решение этих уравнений выполнено с использованием программы OpenFOAM.

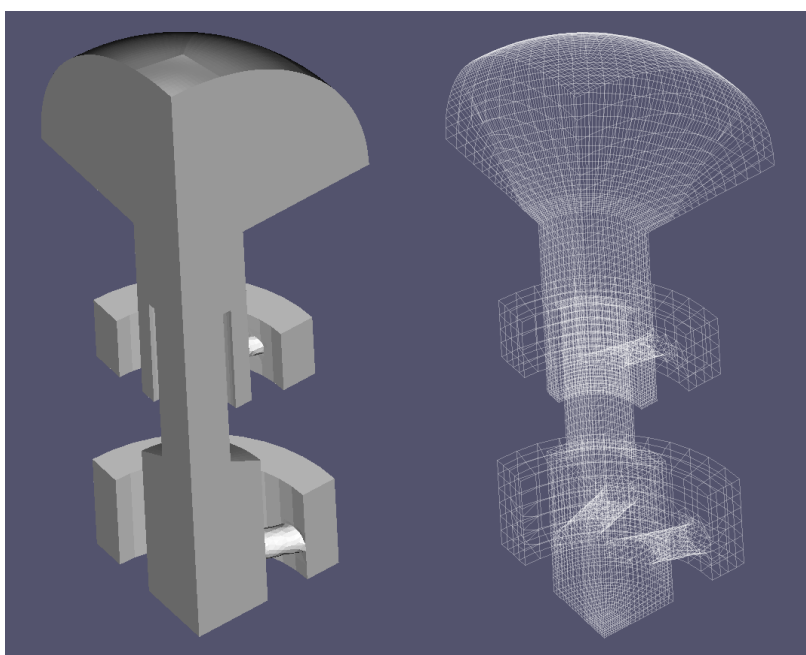
Специальный акцент уделяется внутреннему потоку в форсунке, поэтому расчетные объемы, моделирующие предфорсуночные полости, и объем, в который происходит истечение из форсунки, для уменьшения объема вычислений, выполнены как можно меньшими.

На рис.2. представлена расчетная область представляющая четвертую часть объема форсунки и сетка.

Ячейки в основном – шестигранники, тангенциальные каналы выполнены из четырехгранников и переходная область между ними выполнена из пирамид.

Характерный размер ячейки в области, в которой необходимо описать интерфейс внутри форсунки, – 100 мкм.

Минимальное число ячеек, размер которых уже не влияет на решение, - порядка 50000 ячеек на расчетный объем.



**Рис.2. Расчетный объем и сетка.**

В качестве граничных поверхностей заданы стенки форсунки – как стенка со скольжением.

На границах объемов, соответствующих предфорсуночным полостям, и объема, в который происходит истечение из форсунки, для давления задается заданное значение, а для скорости и объемной доли задается inlet-outlet.

На плоскостях, вырезающих из всего объема форсунки расчетный объем, задаются циклические граничные условия. В качестве начальных условий задается нулевая скорость во всем расчетном объеме, давление равно давлению в выходном сечении форсунки, значение объемной доли равно нулю везде, кроме объемов предфорсуночных полостей.

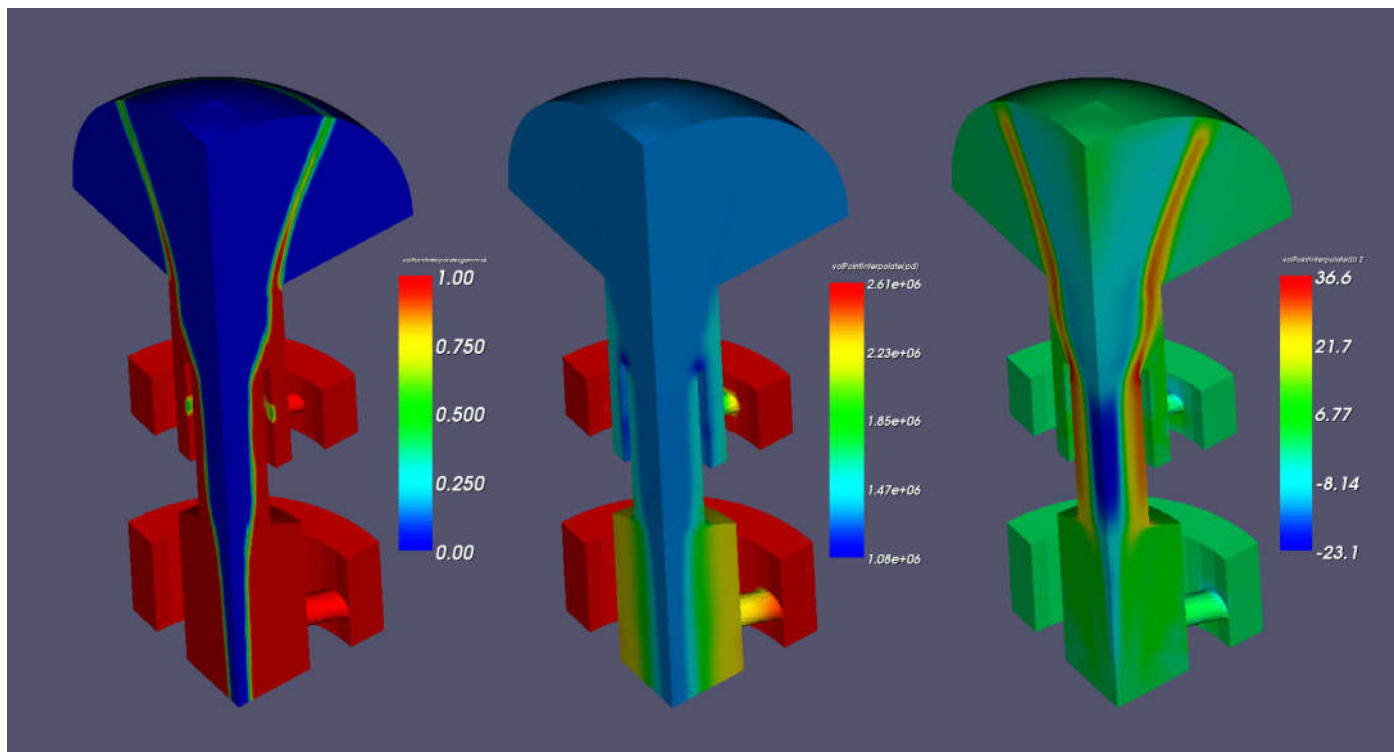
Плотность жидкости равна плотности воды, плотность газа – плотности воздуха при давлении на выходе из форсунки. Вязкость соответствует вязкости воды и воздуха, коэффициент поверхностного натяжения равен нулю.

Рассмотрено отдельное и совместное течение компонентов внутри форсунки при модельной работе форсунки, когда оба компонента моделируются водой. На рис.3. представлены типичные распределения объемной доли жидкости, давления и осевой скорости на границах расчетного объема, моделирующие совместную работу форсунок горючего и окислителя.

Объемная доля равная единице соответствует жидкости, поэтому раскрашенная красным область на рис.3. слева соответствует течению жидкости в форсунке, синяя область – течению газа.

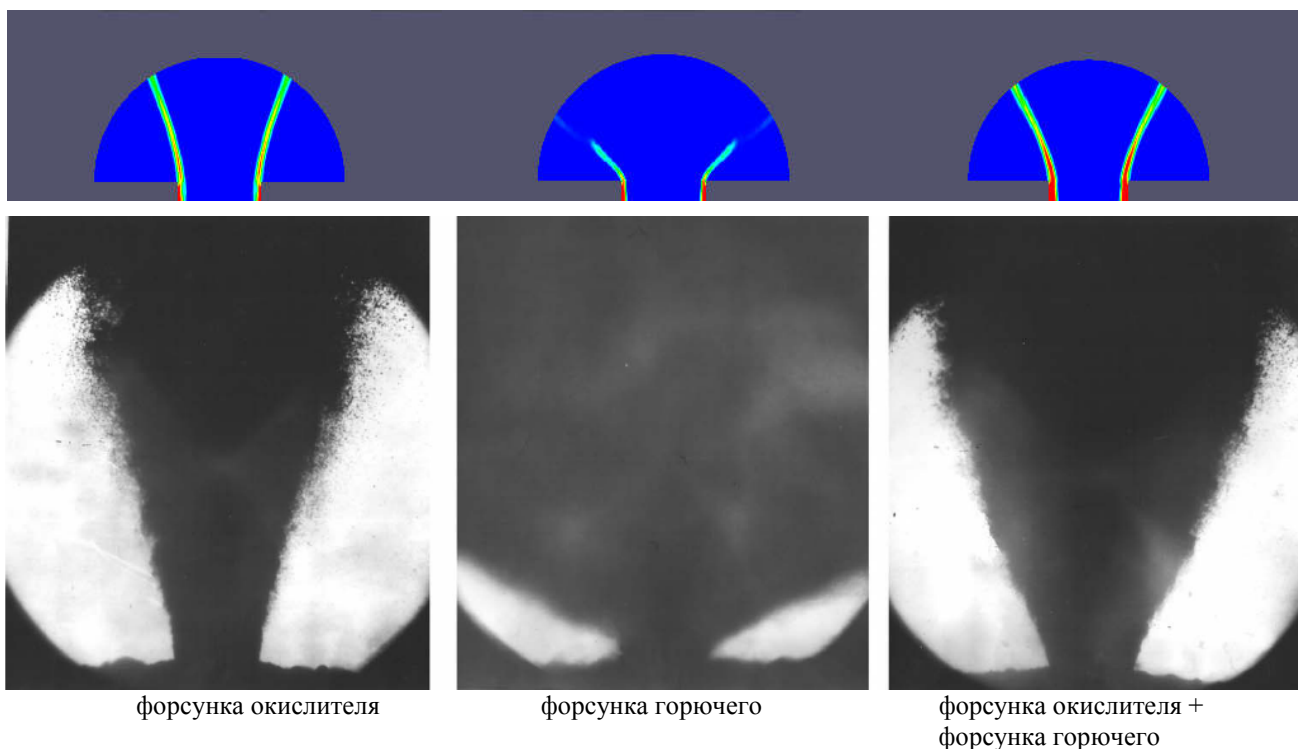
Расчеты показывают наличие газового вихря внутри форсунки, который и определяет ее коэффициент расхода.

Параметры этого газового вихря соответствуют параметрам, рассчитанным по теории Абрамовича для центробежной форсунки.



**Рис.3. Распределения VOF, давления и скорости по расчетному объему.**

На рис.4. для сравнения представлены фотографии факелов распыла форсунки при отдельной и совместной проливке ступеней форсунки, а также результаты расчетов течения жидкой фазы на выходе из форсунки при этих же режимах. На рисунке видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений угла факела распыла форсунки. Величина этих углов также хорошо совпадает с величиной углов, рассчитанной по теории Абрамовича.



форсунка окислителя

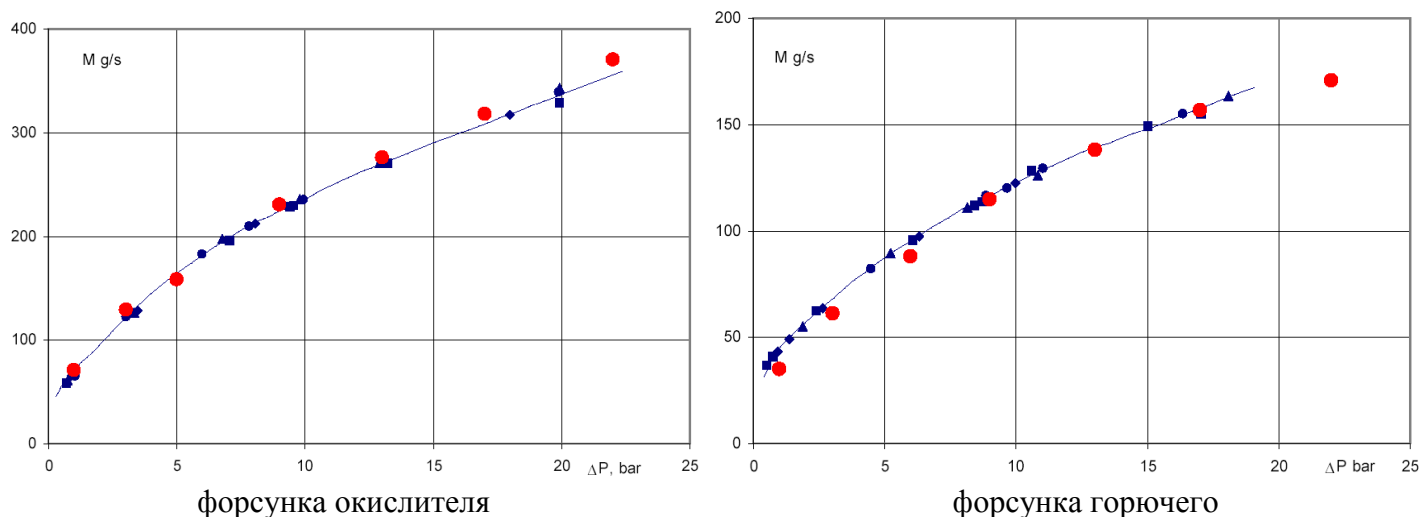
форсунка горючего

форсунка окислителя +  
форсунка горючего

**Рис.4. Фотографии факелов распыла форсунки при отдельной и совместной проливке (внизу) и рассчитанное распределение жидкой фазы на выходе из форсунки (вверху).**

Расходная характеристика форсунки (зависимость расхода жидкой фазы от перепада давления) при отдельной работе форсунок горючего и окислителя получена численным моделированием при различных значениях давления на входе.

На рис.5. представлено сравнение экспериментально измеренных и рассчитанных расходных характеристик для форсунки окислителя и форсунок горючего. Незначительное расхождение результатов может быть объяснено влиянием размеров ячеек сетки.



**Рис. 5. Расходные характеристики форсунки окислителя и горючего (отдельная проливка водой в барокамеру  $P_{ch}=13$  бар.). Красное расчет, синее - эксперимент.**

Выводы:

Результаты численного моделирования течения компонентов топлива в двухкомпонентной жидкостной центробежной форсунке ЖРД, в частности, расходные характеристики и угол факела распыла, показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными, и с расчетами по теории Абрамовича.

Параметры течения, рассчитанные на выходе форсунки, могут служить начальными условиями для расчета дальнейшего дробления образующейся жидкой пелены на капли.

Таким образом, методы численной гидродинамики могут служить надежным инструментом для разработки форсунок ЖРД.