

# Моделирование свободных струйных течений в программном комплексе FlowVision HPC

А.С. Шишаева  
ООО «ТЕСИС»

## Введение

Струйные течения в сплошной среде можно разделить на два вида: затопленные струйные течения и свободные струйные течения [1]. Затопленные струйные течения – струйные течения в среде, вязкость которой сопоставима с вязкостью вещества струи. Примером затопленного струйного течения является истечение струи воды в резервуар, полностью заполненный покоящейся водой. Свободные струйные течения – струйные течения в среде, вязкость которой пренебрежимо мала. Примером такого течения может служить истечение струи воды из резервуара жидкости в воздух.

Целью данной работы является проверка возможности моделирования свободных струйных течений посредством программного комплекса FlowVision HPC. Для этого были выбраны простейшие виды свободных струйных течений, для которых существуют аналитические решения:

1. вертикальная струя, падающая под воздействием силы тяжести
2. наклонная струя, движущаяся под воздействием силы тяжести
3. фонтан
4. истечение струи из резервуара с жидкостью [2]
5. движение струи вдоль поверхности твердого тела [3]

В случае свободных струйных течений более важно корректно воспроизводить форму и дальность лета струи, в то время как влиянием окружающей среды на струю можно пренебречь. Поэтому, целесообразно проводить моделирование свободных струйных течений посредством свободной поверхности. Во FlowVision HPC свободная поверхность реализована посредством метода VoF [4]. В основу метода VoF положено разделение области на жидкую и газовую фазу. Расчет уравнений движения производится только в жидкой фазе. Газовая фаза является нерасчетной. Граница раздела фаз представляется в виде набора фасеток, отсекающих расчетную фазу от нерасчетной.

Исследования проводились для плоских струйных течений. При моделировании всех видов течения расчетная сетка строилась так, чтобы на поперечный размер струи приходилось не менее 5 ячеек, для того чтобы избежать возможных неустойчивостей и разрывов струй. Шаг по времени выбирался исходя из числа КФЛ = 1, чтобы избежать неустойчивостей при моделировании свободной поверхности.

## Вертикальная струя, падающая под воздействием силы тяжести

Рассмотрим движение двумерной вертикальной струи под воздействием силы тяжести (Рис. 1). Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами 0.02x0.15x0.01 м. Струя истекает из отверстия, расположенного на верхней границе расчетной области со скоростью, направленной вертикально вниз. Вследствие движения под воздействием силы тяжести скорость струи увеличивается, а диаметр уменьшается.

Скорость и поперечный размер струи на выходе можно оценить по формулам:

$$V_{out} = \sqrt{V_{in}^2 + 2gh}$$

$$d_{out} = \frac{V_{in} d_{in}}{\sqrt{V_{in}^2 + 2gh}}$$

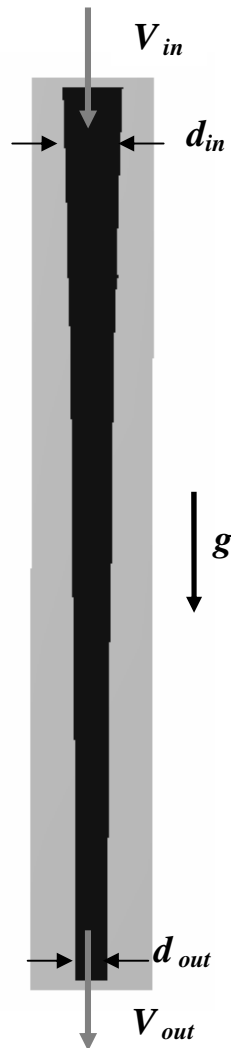
$V_{in}$  – входная скорость струи

$V_{out}$  – выходная скорость струи

$d_{in}$  – входной диаметр струи

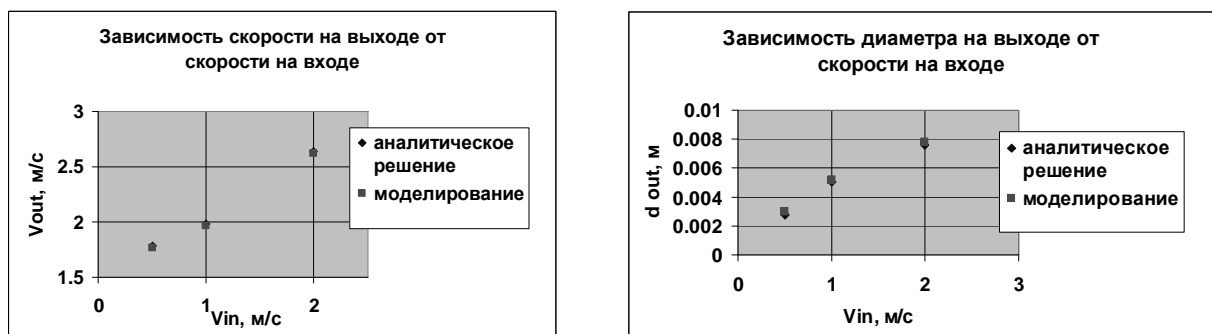
$d_{out}$  – выходной диаметр струи

$h$  – высота расчетной области



**Рис. 1** Вертикальная струя, движущаяся в поле силы тяжести

Было проведено моделирование движения струи для различных значений входной скорости. Результаты моделирования отличаются от теоретического решения не более, чем на 6 %.



**Рис. 2** Сравнение аналитической зависимости выходной скорости струи от входной скорости струи (а) и выходного диаметра от входной скорости (б) с результатами моделирования

### Наклонная струя, движущаяся в поле силы тяжести

Рассмотрим струю, движущуюся в поле силы тяжести. Струя истекает из отверстия, расположенного в левом нижнем углу расчетной области. Начальная скорость движения струи направлена под углом  $45^\circ$  к горизонту. В процессе движения струя изменяет свое направление под воздействием силы тяжести. Высоту подъема и дальность лета струи можно оценить по следующим формулам:

$$h = \frac{V_{in}^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

$$l = \frac{V_{in}^2 \sin^2 2\alpha}{g}$$

$V_{in}$  – входная скорость струи

$l$  – дальность лета струи

$h$  – высота подъема струи

$\alpha$  – угол начальной скорости струи к горизонту

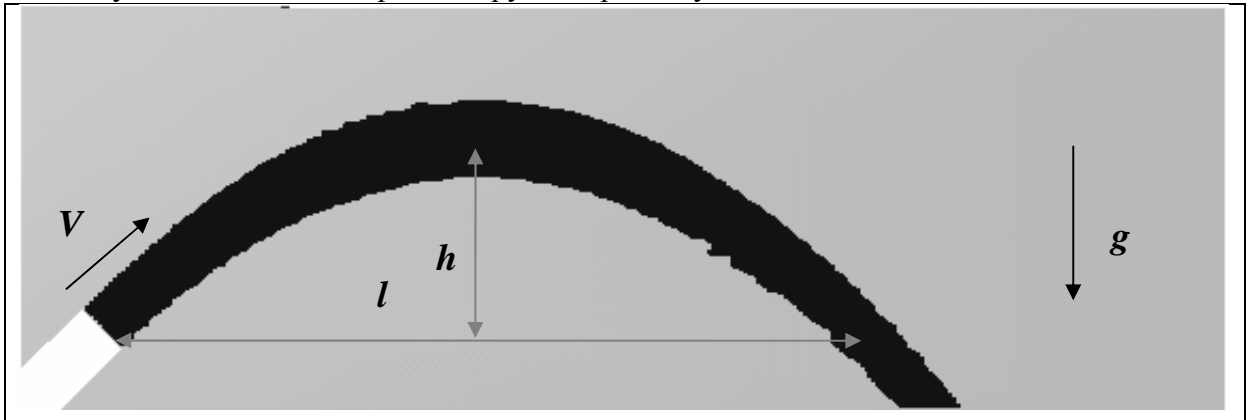


Рис. 3 Наклонная струя, движущаяся в поле силы тяжести

Было проведено моделирование движения струи для различных значений входной скорости. Результаты моделирования отличаются от теоретического решения не более, чем на 6 % (Рис. 4)

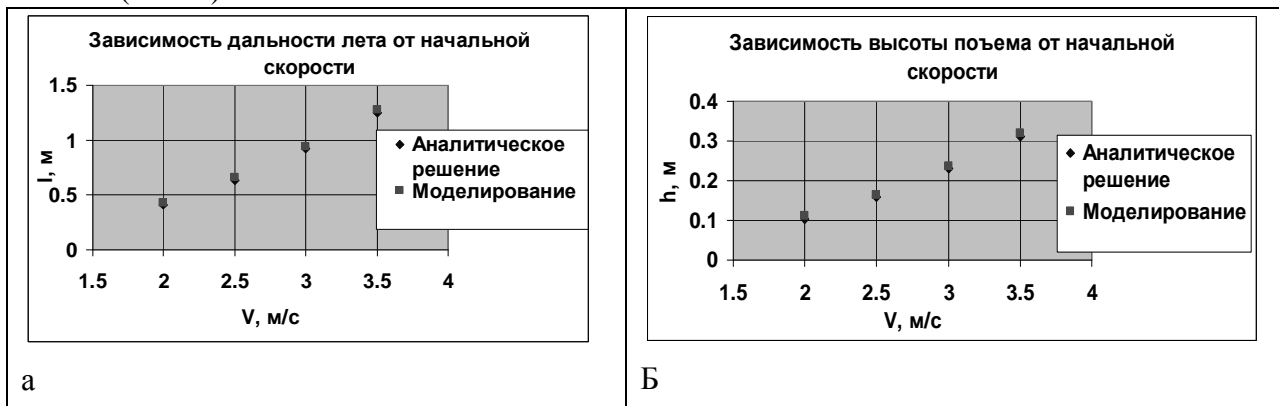


Рис. 4 Сравнение аналитической зависимости дальности лета входной скорости (а) и высоты подъема струи от входной скорости (б) и выходного диаметра от входной скорости (б) с результатами моделирования

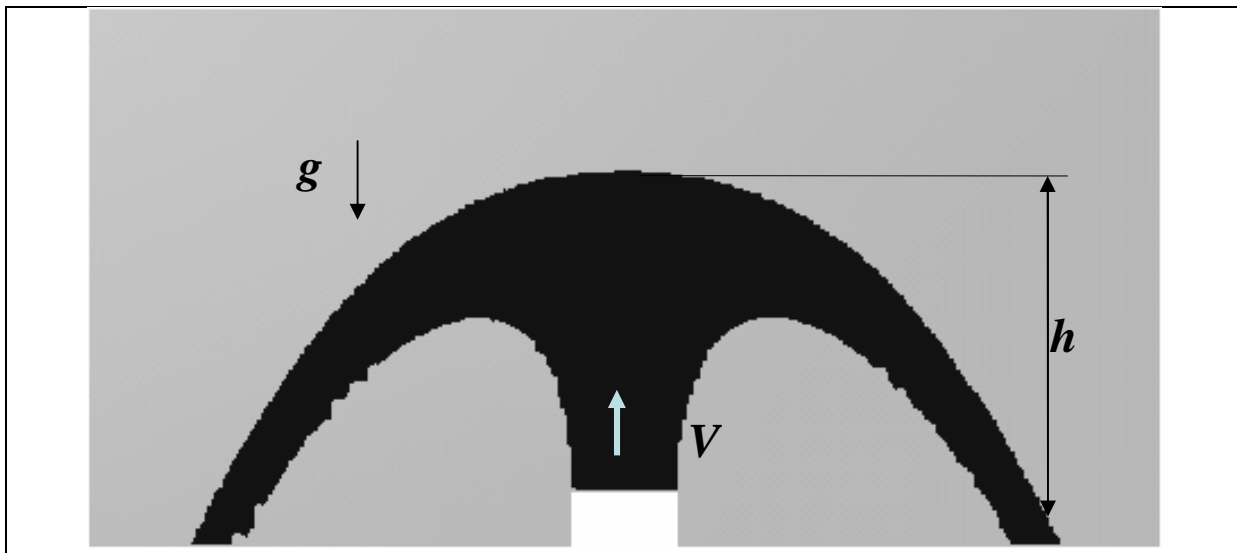
### Фонтан

Рассмотрим струю, движущуюся вертикально вверх в поле силы тяжести. Под влиянием силы тяжести изменяется скорость, направление и форма струи, образуется фонтан. Высоту фонтана можно оценить по формуле:

$$h = \frac{V_{in}^2}{2g}$$

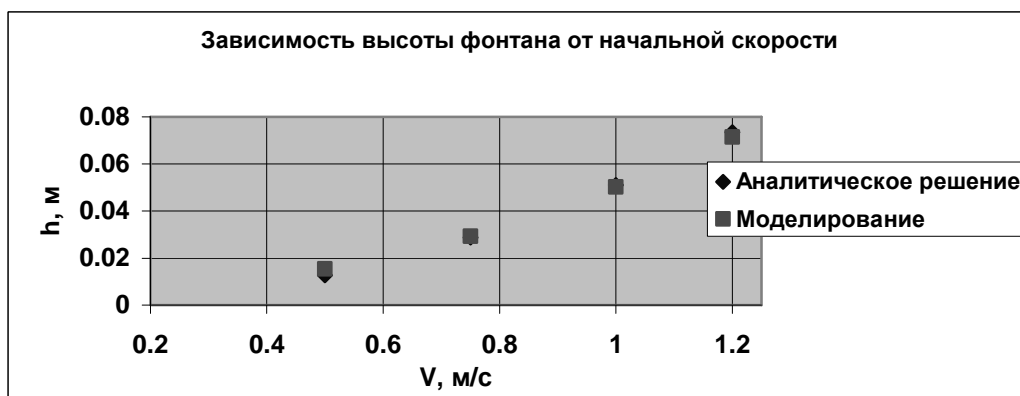
$V_{in}$  – входная скорость струи

$h$  – высота фонтана



**Рис. 5** Формирование фонтана вследствие истечения струи вертикально вверх

Было проведено моделирование формирования фонтана для различных значений входной скорости струи. Результаты моделирования отличаются от теоретического решения не более, чем на 10 % (Рис. 6).



**Рис. 6** Сравнение аналитической зависимости высоты фонтана от входной скорости струи результатами моделирования

### Истечение струи из отверстия в сосуде

Рассмотрим задачу истечения свободной плоской струи из отверстия в сосуде в поле силы тяжести (

Рис. 7) [2]. Геометрия расчетной области представляет собой два сосуда, соединенные между собой специальным насадком. Один из сосудов в начальный момент полностью заполнен жидкостью. Он имеет размеры  $1 \times 3 \times 0.01$  м. На уровне 1 м от дна сосуда находится отверстие. Форма насадка выбрана таким образом, чтобы коэффициент сжатия струи был равен 1. Скорость истечения и дальность лета струи можно оценить по формулам:

$$V = \sqrt{2\alpha gh}$$

$$l = 2\sqrt{ch_0h}$$

$V$  – скорость истечения струи

$h$  – высота столба жидкости над отверстием

$\alpha$  – коэффициент насадка

$l$  – дальность лета

$h_0$  – высота уровня отверстия

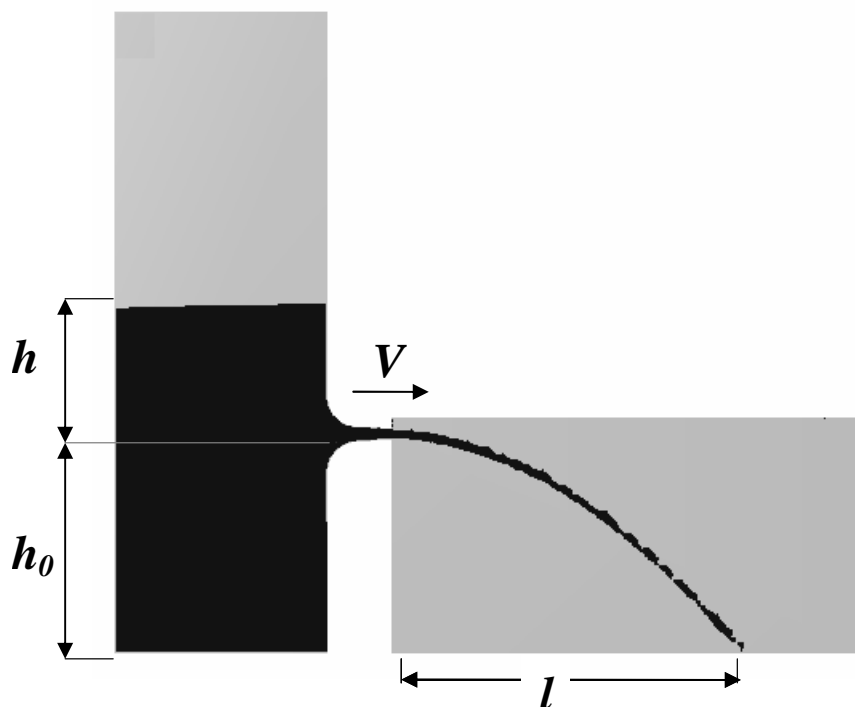


Рис. 7 Истечение струи из отверстия в сосуде

Результаты моделирования отличаются от теоретического решения не более, чем на 12 % (Рис. 8)

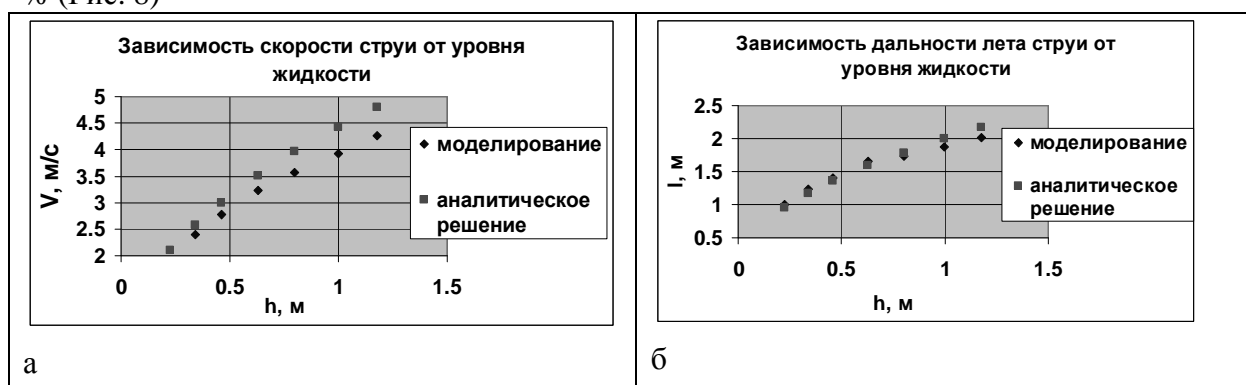
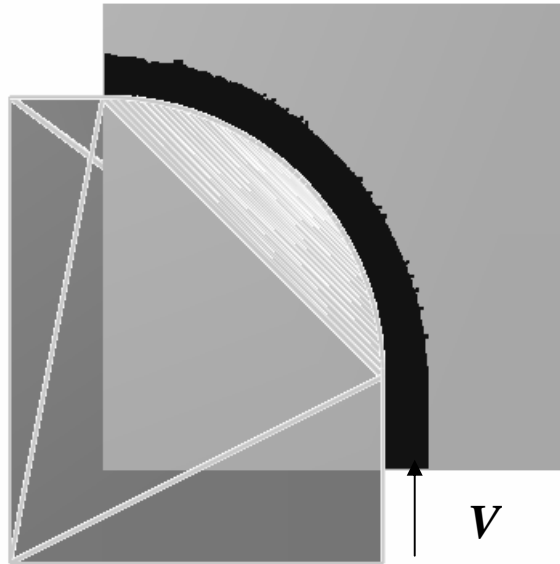


Рис. 8 Сравнение аналитической зависимости скорости истечения (а) и дальности лета (б) струи от уровня жидкости над отверстием с результатами моделирования

### Движение струи вдоль поверхности твердого тела

Рассмотрим движение струи вдоль изогнутой поверхности тела, размеры которого много больше, чем диаметр струи (Рис. 9). Необходимым условием отрыва струи от тела является равенство прямого и обратного градиента давления. Поэтому, в случае отсутствия противодействия отрыва струи от поверхности тела не происходит и струя движется вдоль поверхности тела, изменяя направление начальной скорости. Это явление называется эффект Коанда. [3]



**Рис. 9** Движение струи вдоль искривленной поверхности тела.

### **Заключение**

В ходе проведенных исследований было установлено, что программный комплекс FlowVision НРС позволяет моделировать свободные струйные течения на качественном и количественном уровне. Погрешность количественных результатов моделирования различных типовых задач не превышает 12%.

Для моделирования свободных струйных течений оптимально использовать метод VoF. Для предотвращения возможных неустойчивостей решения рекомендуется задавать сетку таким образом, чтобы на поперечный размер струи приходилось не менее 5 ячеек, а шаг по времени выбирать исходя из  $K\Phi L = 1$ .

### **Литература**

1. Э. Биркгоф, Э. Саратонелло, «Струи, следы, каверны», Москва, Мир, 1964
2. Дж. К. Бэтчелор, «Введение в динамику жидкости», Москва – Ижевск, РХД, 2004
3. Л. Г. Лойцянский, «Механика жидкости и газа», Москва, Дрофа, 2003
4. FlowVision НРС, Руководство пользователей, Версия 3.0.3, 2007.