

# Моделирование процесса формирования потока вскипающей воды при разгерметизации сосуда высокого давления с использованием открытого пакета OpenFoam<sup>1</sup>

Болотнова Р.Х.<sup>\*</sup>, Коробчинская В.А.<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

<sup>\*\*</sup> Башкирский государственный университет, Уфа

Выполнено численное исследование начальной стадии процесса истечения воды из сверхкритического состояния через тонкое сопло в двумерной осесимметричной постановке с применением пакета программного комплекса OpenFOAM с решателем sonicFoam. Математическая модель решателя sonicFoam включает уравнение сохранения массы, уравнение Навье–Стокса, уравнение сохранения внутренней энергии и уравнение состояния водяного пара в форме совершенного газа. Визуализация расчетов проведена с помощью графической платформы ParaView. Исследованы особенности сверхзвукового режима скоростного потока в струе, сопровождающегося формированием полой струи по форме, близкой к параболической.

**Ключевые слова:** формирование струи пара, пакет OpenFoam, численное моделирование

## 1. Введение

Исследование особенностей волновых процессов при истечении воды со сверхкритическими начальными параметрами связано с обеспечением высоких требований к надежности технических систем, находящихся под высоким давлением, создаваемым циркуляцией рабочей жидкости [1]. Экспериментальное изучение вопросов истечения перегретой жидкости из камер высокого давления проведено в работе [2]. Интерес для исследователей представляет также изучение процессов, связанных с особенностями формирования струй, истекающих из камер сверхвысокого давления в связи с разработкой струйных распылителей флюидов [3, 4].

В работе [5] численно исследовано стационарное течение пузырьковой газожидкостной смеси в сопле кругового сечения. Проанализирована воз-

можность реализации супервысоких температур и давлений в газовой фазе на участке сопла вблизи минимального сечения. Численное моделирование процесса формирования и эволюции волны сжатия в результате разгерметизации трубопровода с горячим теплоносителем на основе гомогенной релаксационной модели проведено в [6]. В работах [7–10] с привлечением вычислительного эксперимента исследованы нестационарные процессы истечения вскипающей воды в одномерной и двумерной осесимметричной постановках и изучены особенности формирования струй вскипающей жидкости при различных значениях начальных параметров насыщения близких к термодинамической критической точке [8–10].

Особый интерес представляют эксперименты [2, 4], в которых процесс истечения формируется из начального состояния флюида, находящегося выше критических значений давления и температуры. В работе [4] на начальной стадии процесса истечения из сопла представлены видеокдры формирования водяной струи при исходном сверхкритическом давлении 400 МПа. В [2] исследовано истечение перегретой воды через короткий цилиндриче-

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-41-020582-р\_а), АН РБ (договор № 40/10) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6987.2016.1).



Рис. 1. Фотография поллой струи пара [2], истекающей через сопло диаметром 0.5 мм при начальной сверхкритической температуре  $T_0 = 650$  К

ский канал диаметром  $d = 0.5$  мм; определены температурные режимы, влияющие на механизмы зародышеобразования и на форму струи вскипающей жидкости; также показано, что при сверхкритической температуре 650 К струя приобретает форму близкую к поллой параболе (см. рис. 1).

Предметом настоящего исследования является моделирование начальной стадии процесса формирования поллой струи при истечении водного флюида из камеры высокого давления, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии.

## 2. Основные уравнения

Для решения поставленной задачи были выбраны начальные и граничные условия близкие к эксперименту [2]: в цилиндрическом тонком сопле радиусом  $r = 0.25$  мм и длиной  $l_0 = 4$  мм находилась вода в сверхкритическом состоянии под давлением  $p_0 = 22.7$  МПа при температуре  $T_0 = 650$  К. Предполагается, что в начальный момент времени происходит разгерметизация торцевого участка на правом конце сопла и начинается процесс истечения. На рис. 2 представлена схема расчетной области моделируемого эксперимента.

Для численного исследования нестационарного процесса истечения флюида через тонкое сопло использовался решатель sonicFoam из библиотеки открытого пакета программного комплекса OpenFOAM [11]. Решатель SonicFoam построен на основе алгоритма PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) с двухшаговым корректором. При выполнении расчетов шаг интегрирования по времени выбирался из условия устойчивости Куранта. Принимая во внимание, что наилучшие показатели производительности решателями

OpenFOAM достигаются при использовании гексагональных ортогонализированных сеток [12], для соответствия принятой математической постановке задачи формирование расчетной сеточной области, моделирующей осесимметричные течения, проведено в утилите blockMesh. Начальные и граничные условия реализованы с использованием полей setFieldsDict и blockMeshDict (рис. 2).

Математическая модель решателя SonicFoam включает систему дифференциальных уравнений газовой динамики для вязкого нетеплопроводного газа:

- уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

- уравнения Навье–Стокса с учетом сжимаемости

$$\rho \left( \frac{d\vec{v}}{dt} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \left( \xi + \frac{\mu}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \vec{v}, \quad (2)$$

- уравнения сохранения внутренней энергии

$$\rho \frac{de}{dt} + p \operatorname{div} \vec{v} + \frac{2}{3} \mu (\operatorname{div} \vec{v})^2 - 2\mu e^{ij} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

здесь

$$\operatorname{div} \vec{v} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3},$$

$x_1, x_2, x_3$  — эйлеровы координаты;  $t$  — время;  $\rho, p, T$  — плотность, давление и температура соответственно;  $\vec{v}$  — вектор скорости с проекциями  $v_1, v_2, v_3$  на соответствующие оси;  $e^{ij}$  — тензор скоростей деформаций;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости;  $\xi$  — объемная вязкость. Уравнение состояния пара принято в форме совершенного газа.

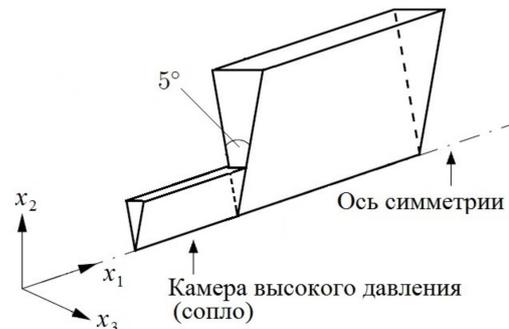


Рис. 2. Схема расчетной области

### 3. Анализ результатов численного моделирования

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования в форме распределения скоростей в указанные моменты времени  $t$  в виде кинограммы процесса истечения водного флюида из сверхкритического состояния при давлении  $p_0 = 22.7$  МПа и температуре  $T_0 = 650$  К. Как видно из представленных рисунков, наблюдается радиально распространяющаяся волна сжатия по невозмущенной газовой области (обозначена голубым цветом из представленной палитры), соответствующей полученному в расчетах диапазону скоростей. Такая волна возникает вследствие разгерметизации как результат распада разрыва на границе областей высокого и низкого давлений. Вслед за ней следует флюидный поток, истекающий из сопла. В момент времени  $t = 2.5$  мкс начинается формирование струи со скоростью потока, достигающей 2500 м/с, что соответствует сверхзвуковому режиму истечения, превышающему скорость звука. В рассматриваемый

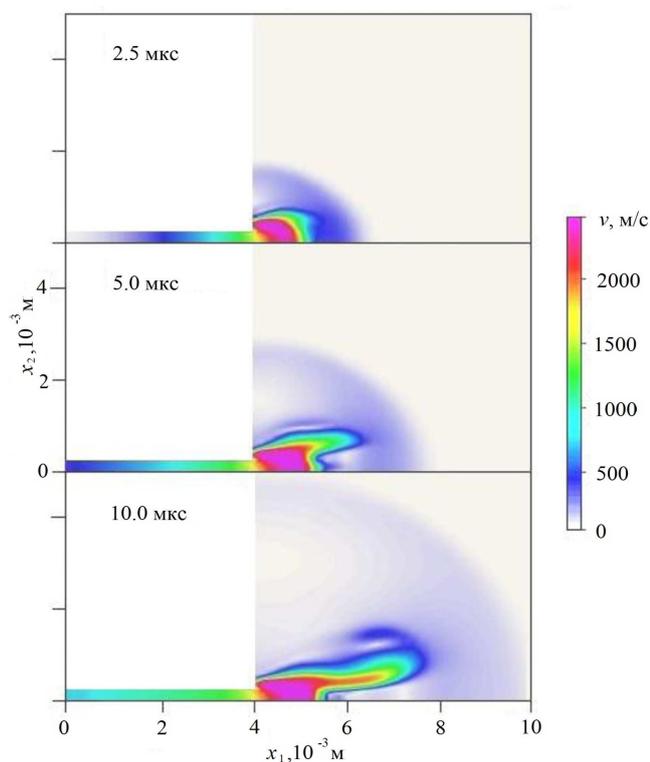


Рис. 3. Распределение скоростей в указанные моменты времени в процессе истечения водного флюида из тонкого сопла, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии при температуре  $T_0 = 650$  К и давлении  $p_0 = 22.7$  МПа

момент времени струя имеет форму, расширяющуюся в центральной зоне с уменьшением диаметра на конечном участке по направлению движения — в лидере струи. Аналогичная форма струи наблюдается в экспериментах [4]. Процесс развития сверхзвукового потока на момент времени  $t = 5.0$  мкс сопровождается дальнейшим расширением струи и увеличением ее скорости по боковым границам по сравнению со скоростью вдоль оси симметрии, что определяет, как и в эксперименте [2], формирование струи параболического вида. С течением времени (см. на рис. 3  $t = 10.0$  мкс) в расчетах наблюдается дальнейшее опережение потока на боковых границах струи относительно центрального участка, что сопровождается формированием полой струи, по аналогии с полученной в расчетах [13], а также фиксируемой в экспериментах [2].

### 4. Заключение

В работе проведено численное исследование нестационарного процесса истечения водного флюида из начального сверхкритического состояния через тонкое сопло на основе уравнений гидродинамики вязкого газа в осесимметричном приближении с использованием решателя sonicFoam из библиотеки программного комплекса OpenFOAM для уравнения состояния водного флюида в форме совершенного газа. Визуализация результатов расчетов реализована с помощью графической платформы ParaView. Исследовано формирование сверхзвукового режима скоростного потока в струе. Численные расчеты показали, что в процессе истечения на начальной стадии происходит формирование полой струи по форме, близкой к параболической, что согласуется с расчетами [13] и экспериментом [2].

### Список литературы

- [1] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Волновые процессы при истечении водяного теплоносителя со сверхкритическими начальными параметрами // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 5. С. 821–824.
- [2] Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 359–367.
- [3] Weaver D.S. et. al. Loading of Steam Generator Tubes during Main Steam Line Breaks. Ottawa, 2015. 171 p.
- [4] Ширшов Я.Н., Нерсисян Д.А., Сысоев Н.Н., Иванов И.Э., Знаменская И.А. Оптические исследования динамики развития водяной струи высокого давления // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. М.: МАИ. 2016. С. 196–198.

- [5] Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Реализация высоких давлений и температур в газовой фазе при истечении пузырьковой жидкости через сопло // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80, № 6. С. 134–137.
- [6] Алексеев М.В., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Формирование и эволюция волн при торцевом разрыве трубопровода со вскипающим теплоносителем // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 2(2). С. 75–84.
- [7] Болотнова Р.Х., Бузина В.А. (Коробчинская В.А.), Галимзянов М.Н., Шагапов В.Ш. Гидродинамические особенности процессов истечения вскипающей жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 6. С. 719–730.
- [8] Болотнова Р.Х., Бузина В.А. (Коробчинская В.А.) Пространственное моделирование нестационарной стадии истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 4. С. 343–352.
- [9] Bolotnova R., Topolnikov A., Korobchinskaya V. Modeling an explosive liquid outflow from high pressure thin tubes and nozzles // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 851. P. 377–382.
- [10] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Пространственное моделирование процесса формирования струи вскипающей воды при истечении из тонкого сопла // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 5. С. 783–794.
- [11] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com>.
- [12] Михайленко К.И. К моделированию вихревой трубы: подготовка гексагональной сетки для вычислительных экспериментов в среде OpenFOAM // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 112–118.
- [13] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Исследование процесса развития струи при истечении воды из сверхкритического состояния через тонкое сопло // Тр. Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 66–71.

# Simulation the formation process of boiling water flow during depressurization of a high pressure vessel using OpenFoam open source

**Bolotnova R.Kh.\* , Korobchinskaya V.A.\*\***

\* Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

\*\* Bashkir state university, Ufa

A numerical study of the initial stage of water outflow process through a thin nozzle from a supercritical state in a two-dimensional axisymmetric setting is performed using the OpenFOAM software open source with the sonicFoam solver. The mathematical model of sonicFoam solver includes the equation of mass conservation, Navier-Stokes equation, internal energy conservation and equation of state of water vapor in the form of a perfect gas. Visualization of calculation results was carried out by the ParaView graphic platform. The features of supersonic high-speed flow regime in a jet accompanied by the formation of a hollow jet in a form close to parabolic are investigated.

**Keywords:** steam jet formation, OpenFoam package, numerical simulation

