



Исследование динамики формирования полой струи при истечении пара из сверхкритического состояния¹

Болотнова Р.Х.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Изучены особенности нестационарного процесса образования полости внутри струи при внезапном истечении водяного пара через тонкое сопло из сосуда высокого давления, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии. Численное исследование проведено с применением решателя `sonicFoam` библиотеки `OpenFOAM` с уравнением состояния Пенга–Робинсона в двумерном осесимметричном приближении. Визуализация полученных решений представлена в виде кинограмм динамики полей скоростей и температур. Показано, что режим формирования и сохранения полости внутри струи поддерживается более 100 мкс от начала процесса истечения.

Ключевые слова: численное исследование, решатель `sonicFoam` пакета `OpenFOAM`, камера высокого давления, тонкое сопло, сверхкритическое состояние водяного пара

1. Введение

Безопасность объектов современного энергооборудования, включающего в качестве рабочих жидкостей паро-газожидкостные среды, эксплуатация которых происходит в условиях высоких давлений и температур, связана с задачами исследования динамики струй, возникающих в процессе разгерметизации теплоносителя. Исследование особенностей пространственного нестационарного процесса формирования сверхзвуковых струйных течений, происходящих через сопло из сосуда, в котором исследуемый флюид находится в сверхкритическом состоянии, является весьма актуальным научным направлением.

Критические режимы истечения пароводяной смеси изучались в работах [1–5]. Эволюция сверхзвуковых режимов в холодных газовых струях с формированием дисков Маха и образованием вихревых колец исследовалась в [1]. В работе [2] при проведении экспериментальных исследований струй перегретой воды, формирующихся при

истечении из камеры высокого давления через тонкие цилиндрические каналы, было установлено, что форма струи перегретой воды при повышении исходной температуры насыщения приобретает вид полого конуса с растущим углом раствора при вершине до ее полного «развала». В [3] показано, что с повышением начальной температуры насыщения происходит изменение конической формы струи с ее закручиванием навстречу движению потока.

В работе [4] с использованием кинетики испарения [5] исследовано влияние исходного равновесного состояния воды в камере высокого давления и интенсивности зародышеобразования при вскипании воды на формирование пароводяной струи на начальной стадии истечения для диаметра сопла ($d = 0,5$ мм) в соответствии с условиями экспериментов [2].

В настоящей работе, являющейся продолжением исследований [6–8], изучается процесс истечения водяного пара, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии в сосуде высокого давления, через тонкое сопло с формированием полости в центре струи с использованием решателя `sonicFoam` библиотеки открытого пакета `OpenFOAM` [9] с уравнением состояния водяного

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-020582-р_а) и средствами государственного бюджета по госзаданию 0246-2018-0002.

пара Пенга–Робинсона [10], для более длительного по сравнению с [8], временного интервала в исследуемом процессе эволюции струи.

2. Основные уравнения и метод численного решения

При моделировании процесса формирования струи предполагалось, что в начальный момент времени в результате разрыва заслонки начнется истечение пара в окружающую среду с параметрами состояния, соответствующими начальным условиям. Процесс истечения происходит через тонкое сопло радиуса $r = 0,25$ мм [2] и длины $x_1 = 2$ мм из цилиндрического сосуда, в котором изначально водный флюид находился в сверхкритическом состоянии при давлении $p_0 = 22,73$ МПа и температуре $T_0 = 1273$ К. Рассматриваемая задача ограничивалась рамками однофазного приближения без учета возможности конденсации пара в процессе истечения, что обеспечивалось заданием соответствующих начальных условий закритического состояния в сосуде высокого давления по аналогии с [8].

Для решения поставленной задачи используется следующая система дифференциальных уравнений газовой динамики для вязкого нетеплопроводного газа:

– уравнение неразрывности

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

– уравнения Навье–Стокса с учетом сжимаемости

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

– уравнения сохранения внутренней энергии

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

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; ρ, 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; μ — коэффициент динамической вязкости; ζ — объемная вязкость.

Термодинамические свойства водяного пара описываются уравнением состояния Пенга–Робинсона [10]:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a(T)}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)},$$

Здесь:

$$a = 0.45724 \frac{\sqrt{RT_c}}{p_c} + \alpha(T_r, \omega); \quad b = 0.0778 \frac{RT_c}{p_c};$$

$$\rho = \frac{p}{Z(p, T)RT}; \quad T_r = \frac{T}{T_c}; \quad \alpha = (1 + \kappa(1 - T_r^{0.5}));$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2;$$

R — универсальная газовая постоянная; V_m — молярный объем; T_c и p_c — критические температура и давление; ω — ацентрический фактор Питцера; $Z(p, T)$ — коэффициент сжимаемости.

Для решения поставленной задачи использовался решатель sonicFoam библиотеки открытого пакета OpenFOAM, построенный на неявном алгоритме PISO, вычисляющем давление с двухшаговым корректором. Устойчивость решения при интегрировании по времени определялась условием Куранта. В соответствии с математической постановкой задачи проведено формирование расчетной сеточной области в декартовой системе координат и заданы начальные и граничные условия задачи с помощью утилит blockMesh, setFieldsDict и blockMeshDict. В оригинальном коде решателя sonicFoam для вычисления давления и внутренней энергии в файл thermophysicalProperties были внесены изменения, обеспечивающие подключение уравнения состояния водяного пара Пенга–Робинсона. При вычислении внутренней энергии водяного пара с привлечением термодинамических соотношений используется температурная зависимость для изобарной теплоемкости p и вязкости μ в виде полиномов JANAF [9].

Оценка достоверности полученных решений для рассматриваемой задачи сделана в работе [8], в которой для начальной стадии формирования струи проведено сравнение результатов расчетов, полученных по динамике волны разгрузки, распространяющейся в области высокого давления, применением пакета OpenFOAM с уравнением состояния Пенга–Робинсона, и численным решением аналогичной задачи методом сквозного счета в случае одномерного плоского приближения с уравнением состояния совершенного газа.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов исследуемого режима формирования струи в виде динамики полей скоростей и температур. Как показано на рисунках, начиная с момента времени 10 мкс по невозмущенной области распространяется первая радиальная волна сжатия, за которой следует паровой поток, истекающий из сопла. Как и

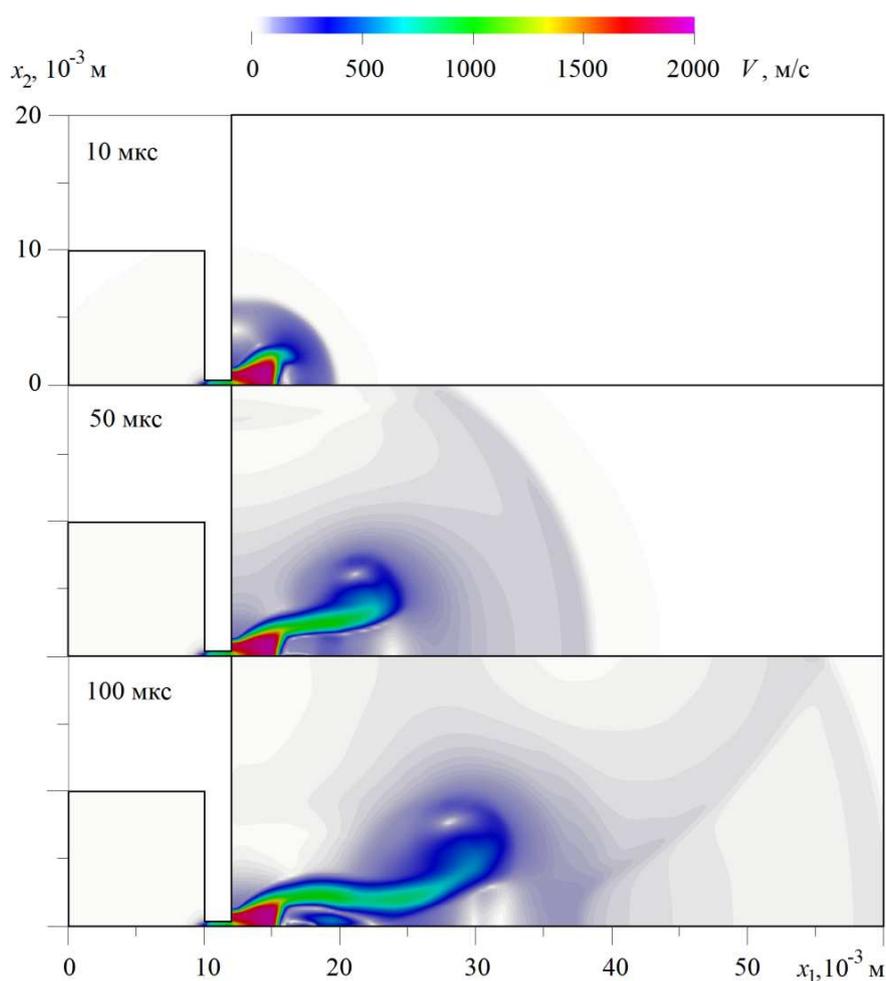


Рис. 1. Эволюция расчетного распределения скоростей в процессе истечения водяного пара через тонкое сопло из камеры высокого давления, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии

в эксперименте [2], в расчетах наблюдается интенсивное расширение струи со сверхзвуковыми скоростями истечения, достигающими 2000 м/с близ границы со слабовозмущенной зоной на оси симметрии. Вдоль внешней границы расширяющейся сверхзвуковой струи формируется висячий скачок уплотнения, при отражении которого от оси симметрии образуется прямой скачок уплотнения — диск Маха: граница между зонами сверхзвукового и дозвукового течений (рис. 1). Вдоль боковой границы струи формируется основной поток газа, который характеризуется также сверхзвуковым режимом истечения со скоростями и температурами, достигающими 1000 м/с и 900 К соответственно. С течением времени по внешнему участку струи сверхзвуковой режим истечения сохраняется.

Взаимодействие высокоскоростного потока с

примыкающей к нему слабо возмущенной зоной приводит к искривлению траектории движения газа, что сопровождается образованием и развитием вихревых зон. В расчетах, представленных на рис. 1 и 2, заметен процесс формирования внешнего тороидального вихря (учитывая осесимметричность постановки задачи), который поддерживает сверхзвуковую скорость потока на внешнем участке струи. Более слабый вихрь, направление вращения которого противоположно основному внешнему вихрю, образуется вблизи оси симметрии в окружающем струю газе [8] и, за счет направления потока газа навстречу движению струи в ее центре, перемещает диск Маха к зоне истечения, что приводит к развитию полый струи. Рассматриваемый в расчетах режим истечения с сохранением полости внутри струи поддерживается в течении 100 мкс.

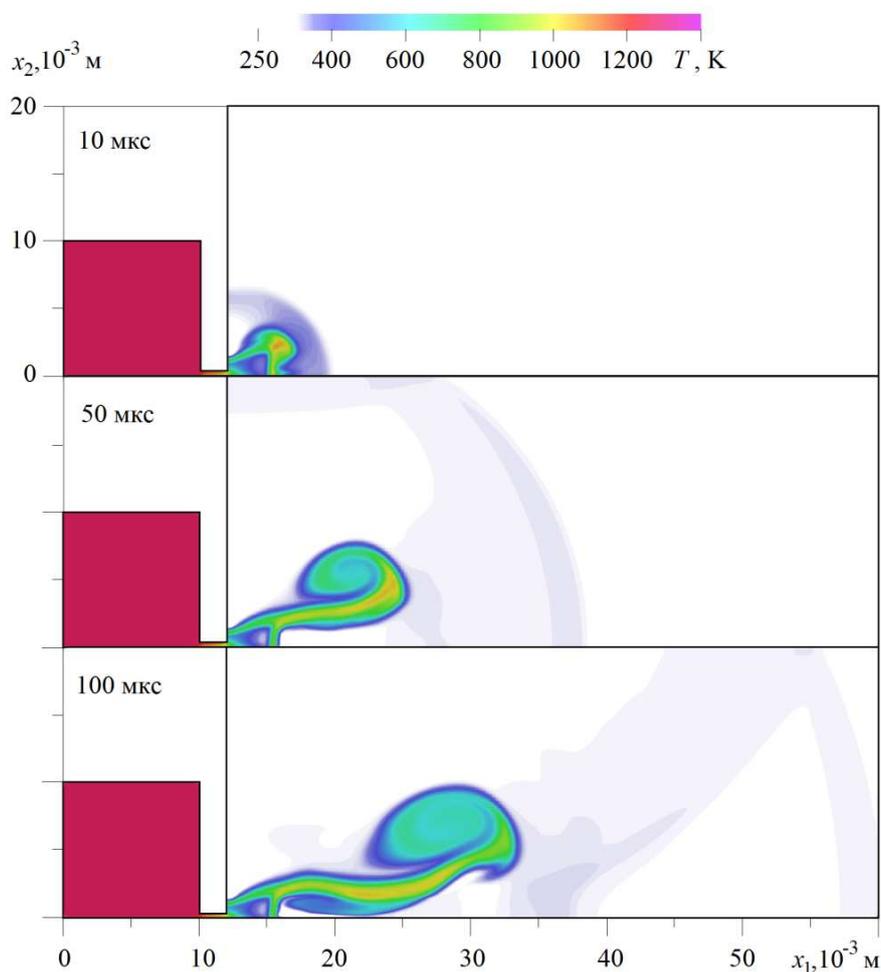


Рис. 2. Эволюция расчетного распределения температур в процессе истечения водяного пара через тонкое сопло из камеры высокого давления, изначально находящегося в сверхкритическом состоянии

4. Заключение

Проведенные численные исследования по изучению сверхкритического режима истечения водяного пара через тонкое сопло показали, что в процессе истечения водяного пара из цилиндрического сосуда через тонкое сопло радиуса $r = 0,25$ мм, изначально находящегося при давлении $p_0 = 22,73$ МПа и температуре $T_0 = 1273$ К, формируется полая струя пара со сверхзвуковым режимом истечения при отсутствии конденсации, чему способствует образование внутренней границы струи (диска Маха) и развитие внешнего и внутреннего тороидальных вихрей, поддерживающих режим полой струи в течении времени до 100 мкс, что качественно согласуется с данными экспериментальных исследований [2]. Для последующего

исследования рассматриваемого процесса потребуются учет конденсации, сопровождающей охлаждение пара при дальнейшем развитии струи.

Список литературы

- [1] Ishii R., Fujimoto H., Hatta N., Umeda Y. Experimental and numerical analysis of circular pulse jets // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 392. P. 129–153. (DOI: 10.1017/S0022112099005303)
- [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. (<http://www.sibran.ru/upload/iblock/df3/df31846b55e7256ad10864ce5e0f7ccf.pdf>)
- [3] Болотнова Р.Х., Бузина В.А. Пространственное моделирование нестационарной стадии истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 4. С. 343–352. (DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.33)

- [4] 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. (http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=171733&ARTICLE_ID=171744)
- [5] 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. (<http://www.sibran.ru/upload/iblock/771/771227b1ee44e66c6d97c09317d651ad.pdf>)
- [6] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Исследование процесса развития струи при истечении воды из сверхкритического состояния через тонкое сопло // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11. С. 66–71. (DOI: 10.21662/uim2016.1.010)
- [7] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Моделирование процесса формирования потока вскипающей воды при разгерметизации сосуда высокого давления с использованием открытого пакета OpenFoam // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 169–173. (DOI: 10.21662/uim2017.2.025)
- [8] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности формирования полой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 783–789. (http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=174876&ARTICLE_ID=174887)
- [9] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. (<http://www.openfoam.com>)
- [10] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59–64. (DOI: 10.1021/i160057a011)



Study the dynamics of hollow jet formation under vapor outflow from the supercritical state

Bolotnova R.Kh.

Mavlutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa

The features of the unsteady process of a cavity formation inside the jet at a sudden outflow of water vapor through a thin nozzle from a pressure vessel, initially in a supercritical state, are studied. A numerical study was carried out by using the sonicFoam solver of the OpenFOAM library with the Peng-Robinson equation of state in a two-dimensional axisymmetric approximation. Visualization of the obtained solutions is presented in the form of pictures dynamics for fields of velocities and temperatures. It is shown that the mode of formation and maintenance of the cavity inside the jet is supported more than 100 μs from the beginning of the expiration process.

Keywords: numerical study, sonicFoam solver of package OpenFOAM, high-pressure chamber, thin nozzle, supercritical state of water vapor