

Исследование процесса развития струи при истечении воды из сверхкритического состояния через тонкое сопло¹

Болотнова Р.Х.* , Коробчинская В.А.**,**

* Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

** Башкирский государственный университет, Уфа

Исследована динамика истечения воды из исходного сверхкритического состояния через тонкое сопло. Для описания начальной стадии нестационарного процесса истечения использована система уравнений сохранения массы, импульса, энергии в двумерной цилиндрической системе координат в условиях осевой симметрии. Получены пространственные распределения давления и скорости формирующейся струи. Установлено, что при сверхкритической температуре 650 К формируется сверхзвуковой режим истечения, согласующийся по скорости истечения с аналитическим решением по формуле Бернулли и имеющий качественное согласование с экспериментальными данными.

Ключевые слова: парообразование, взрывное истечение, математическое и численное моделирование

1. Введение

Исследование особенностей взрывного истечения парожидкостных потоков приобретает важное значение в связи с развитием требований к безопасной эксплуатации оборудования, включающих в свой состав технические системы с жидкими рабочими телами. В последнее время все чаще используются струи, истекающие из камер высокого давления выше 100 бар, при создании различных устройств для распыления жидкости [1–3].

Экспериментальное изучение вопросов истечения перегретой жидкости из камер высокого давления проведено в [4, 5]. Численное моделирование процесса формирования и эволюции волны сжатия в результате разгерметизации трубопровода с горячим теплоносителем на основе гомогенной релаксационной модели проведено в [6].

На основе экспериментов [4] в работе [7] чис-

ленно исследованы нестационарные процессы истечения вскипающей воды в одномерной постановке. В продолжении исследований авторами проведено обобщение двухфазной модели вскипающей пароводяной смеси для двумерного случая с осевой симметрией [8, 9]. Были изучены особенности формирования струй вскипающей жидкости при различных значениях начальных параметров насыщения, близких к термодинамической критической точке.

Особый интерес представляют задачи, в которых процесс истечения формируется из начального состояния выше критической точки, что отражено в экспериментальных работах [3, 5]. В работе [3] теневым методом получены видеок кадры процесса развития водяной струи при истечении из сопла при исходном давлении 400 МПа на начальной стадии процесса. В [5] исследуется истечение перегретой воды через короткий цилиндрический канал с $d = 0.5$ мм. Определены температурные режимы и влияние механизмов зародышеобразования на формирование струй вскипающей жидкости. В [5] показано, что при сверхкритической температуре 650 К струя приобретает форму, близкую к полой параболе (см. рис. 1).

Целью настоящей работы является численное исследование процесса формирования струи при

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-97007-р_поволжье_а) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6987.2016.1).



Рис. 1. Фотография струи пара [5], истекающей через сопло диаметром 0.5 мм при начальной сверхкритической температуре $T_0 = 650$ К

истечении воды из камеры, в которой вода находится в сверхкритическом состоянии.

2. Постановка задачи, метод решения

Для описания динамики процесса формирования струи запишем систему дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат в двумерном осесимметричном приближении [10]:

– уравнение неразрывности

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

– уравнения движения среды

$$\rho \frac{dv_x}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \rho \frac{dv_y}{dt} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

– закон сохранения энергии

$$\rho \frac{de}{dt} + p \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

где

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{1}{y} \frac{\partial(yv_y)}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial x};$$

x, y — соответственно осевая и радиальная эйлеровы координаты; t — время; ρ, p, T — плотность, давление и температура; \mathbf{v} — вектор скорости с проекциями v_x, v_y на соответствующие оси.

Термодинамические свойства воды и пара описываются широкодиапазонным уравнением состояния [11].

Численная реализация системы модельных уравнений (1)–(3) осуществлена методом сквозного счета с использованием подвижных лагранжевых сеток [12] с применением естественной аппроксимации частных производных по пространственной координате, что позволило решать задачу на деформирующейся во времени лагранжевой сетке и обеспечило консервативность численной схемы. Для задания граничных условий, соответствующих эксперименту [5], в расчетную схему дополнительно введены «псевдоуячейки» со значениями давления, плотности и скорости для соответствующей границы [12]. На оси Ox задано условие симметрии.

Для обоснования достоверности разработанной пространственной осесимметричной модели был проведен сравнительный анализ тестовой задачи в квазиодномерной постановке [13] и с аналитическим автомодельным решением задачи о сильном взрыве в газе [14]. Разработанный численный код реализован в виде программного продукта на языке Object Pascal в свободной среде разработки Lazarus [15].

Для решения поставленной задачи были выбраны начальные и граничные условия, близкие к эксперименту [5]. А именно: в цилиндрическом тонком сопле с 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 и, следовательно, плотности $\rho_0 = 324$ кг/м³ в соответствии с [11]. В начальный момент времени происходит разгерметизация торцевого участка на правом конце сопла и начинается процесс истечения.

3. Обсуждение результатов

В результате численного решения поставленной задачи получены распределения полей давления p , плотности ρ , температуры T и компонент скорости v_x, v_y в зависимости от времени t и эйлеровых координат x, y подвижной лагранжевой сетки.

Оценена достоверность результатов численного решения для скорости истечения формирующейся струи с использованием уравнения Бернулли [14]:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\mu} c_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (4)$$

где p_1, T_1 — давление и температура внутри сосуда; p_2 — внешнее давление на некотором расстоянии от открытого участка; γ — показатель адиабаты; c_p — изобарная теплоемкость. Величина скорости струйного потока в зоне измерения внешнего давления p_2 по формуле (4) составила 1600 м/с, что совпадает с

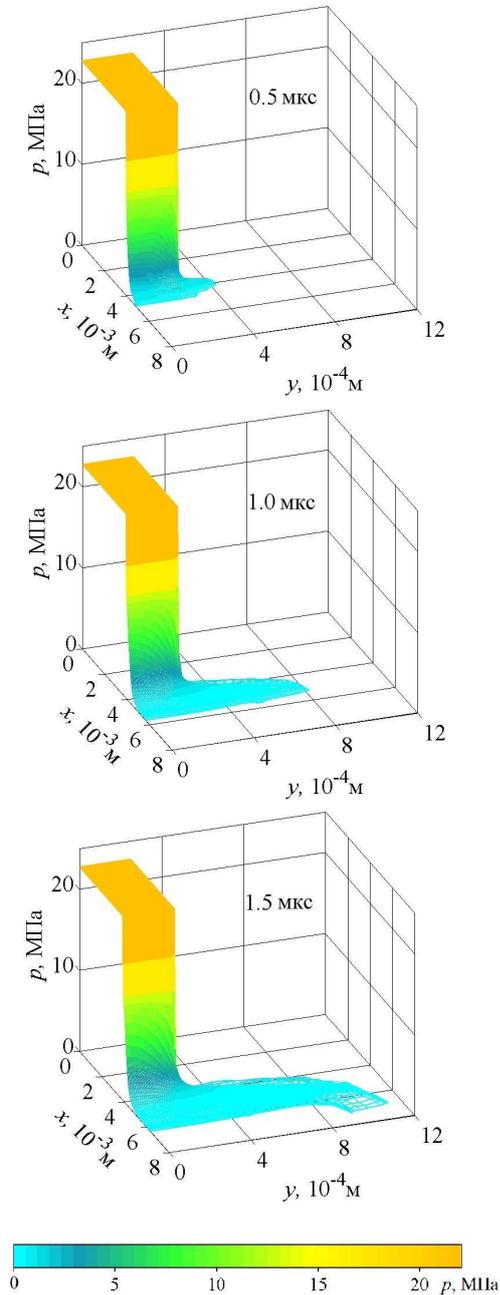


Рис. 2. Расчетные профили давления процесса истечения в указанные моменты времени из начального сверхкритического состояния при температуре $T_0 = 650$ К

результатами, полученными при решении основной задачи (см. рис. 2–4).

Как видно из представленных рисунков, изображающих распределение давления p и компонент скорости v_x , v_y в момент времени $t = 0.5$ мкс, наблюдается радиальное расширение струи за счет роста компоненты скорости v_y , достигающей значения 110 м/с; при этом $v_x = 1580$ м/с, что соответствует скорости потока $|v| \approx 1600$ м/с, который существенно превышает скорость звука в паре в рассматриваемом состоянии, равной $a = 620$ м/с [11]. Следовательно, на указанном участке формируется сверхзвуковой режим истечения, когда скорость потока в струе превышает скорость волны разрежения, движущейся со скоростью звука a , вследствие чего волны разрежения сносятся потоком и не проникают внутрь сопла, тем самым поддерживая высокий градиент давления на выходном участке сопла (см. рис. 2–4). В рассматриваемом временном интервале формируется струя, расширяющаяся в центральной зоне с уменьшением диаметра к крайней граничной зоне в направлении движения — в лидере струи. Аналогичная форма струи наблюдается в экспериментах [3].

Процесс развития сверхзвукового потока на момент времени $t = 1.0$ мкс сопровождается дальнейшим расширением потока по боковым границам и большими значениями скорости на этих участках ($|v| \approx 1700$ м/с) по сравнению со скоростью в осевой зоне ($|v| \approx 1550$ м/с), что определяет, как и в эксперименте [5], формирование струи параболического вида. С течением времени $t = 1.5$ мкс в расчетах наблюдается дальнейшее опережение потока на боковых границах струи ($|v| \approx 1800$ м/с) относительно центрального участка ($|v| \approx 1500$ м/с), что, по мнению авторов, приводит к формированию полости внутри струи, фиксируемой в экспериментах [5].

4. Заключение

В работе проведено численное исследование нестационарного процесса истечения воды из начального сверхкритического состояния через тонкое сопло на основе уравнений гидродинамики в двумерном осесимметричном приближении. Сделана оценка достоверности полученной скорости истечения формирующейся струи сравнением с аналитическим решением уравнения Бернулли. Исследованы сверхзвуковые режимы скорости потока в струе. Полученные результаты показали, что при рассматриваемом начальном состоянии в процессе истечения воды из тонкого сопла в течение микросекундного диапазона происходит формирование полой струи по форме, близкой к параболической, что качественно согласуется с экспериментом [5].

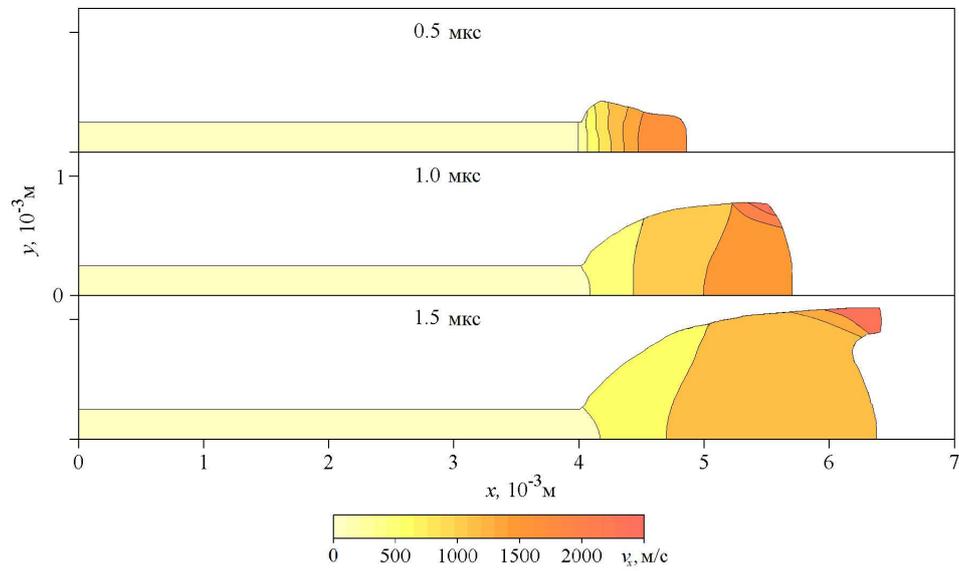


Рис. 3. Распределение компоненты скорости v_x в процессе истечения в указанные моменты времени

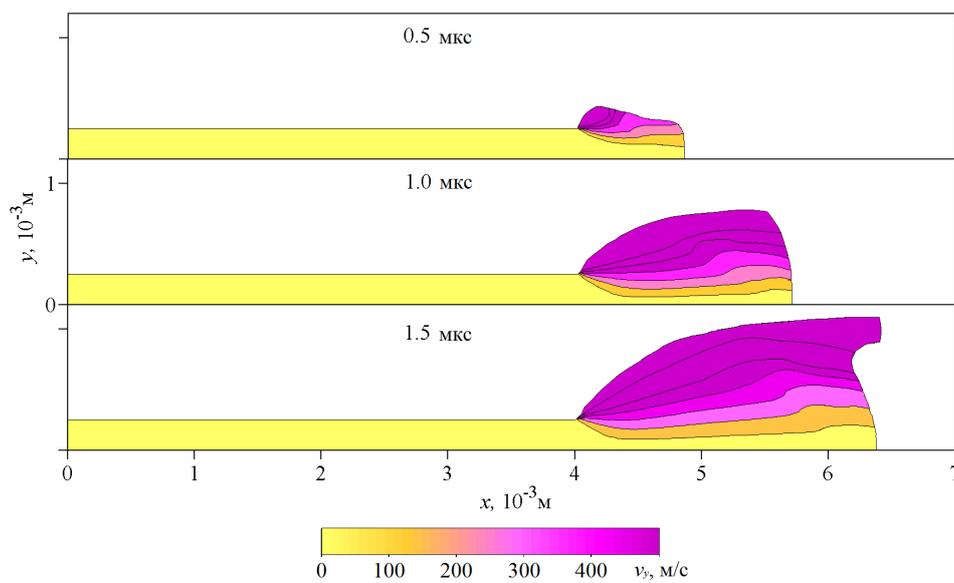


Рис. 4. Распределение компоненты скорости v_y в процессе истечения в указанные моменты времени

Список литературы

- [1] Weaver D.S. et. al. Loading of Steam Generator Tubes during Main Steam Line Breaks. Ottawa, 2015. 171 p.
- [2] Лепешинский И.А., Решетников А.В., Антоновский И.В., Гузенко А.А., Зуев Ю.В., Заранкевич И.А. Смеситель с двухфазным рабочим телом // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. М.: МАИ. 2016. С. 93–95.
- [3] Ширшов Я.Н., Нерсесян 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.
- [4] Edwards A.R., O' Brien T.P. Studies of phenomena connected with the depressurization of water reactors // Journal of The British Nuclear Energy Society. 1970. Vol. 9, No. 2. P. 125–135.
- [5] 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.
- [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] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред // М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 360 с.
- [11] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
- [12] Олдер Б., Фернбах С., Ротенберг М. Вычислительные методы в гидродинамике // М.: Мир, 1967. 384 с.
- [13] Бузина В.А. (Коробчинская В.А.) Нестационарное пространственное истечение газонасыщенной жидкости из осесимметричных сосудов // Вестник Башкирского государственного университета. 2013. Т. 18, № 3. С. 636–639.
- [14] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [15] Болотнова Р.Х., Бузина В.А. (Коробчинская В.А.) 3D расчеты динамических процессов истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660241 // Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. Роспатент. 25.09.2015.

The study of the process of evolution of the jet under outflow of water from the supercritical state through a thin nozzle

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

* Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

** Bashkir State University, Ufa

The dynamics of the water outflow from the initial supercritical state through a thin nozzle is studied. To describe the initial stage of non-stationary process outflow the system of differential equations of conservation of mass, momentum and energy in a two-dimensional cylindrical coordinates with axial symmetry is used. The spatial distribution of pressure and velocity of jet formation was received. It was established that a supersonic regime of outflow at supercritical temperature of 650 K is formed, which have a qualitative agreement for the velocity compared with the Bernoulli analytical solution and the experimental data.

Keywords: vaporization, boiling liquid outflow, mathematical and numerical modeling

