

ISSN: 2658–5782

Номер 1–2

2022

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Особенности формирования сверхкритических пароводяных струй (обзор)¹

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

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

**Башкирский государственный университет, Уфа

В настоящей статье приведен обзор работ по исследованию динамики формирования струи водного флюида сверхкритических параметров при истечении из камеры высокого давления через тонкое сопло. Рассмотрена система модельных уравнений, описывающих динамику процессов истечения как однофазной, так и многофазной газо- парожидкостной сред, основанная на законах сохранения массы, импульса и энергии фаз в соответствии с однодавленческим, односкоростным и двухтемпературным приближениями с учетом контактного теплообмена и массообменных процессов испарения и конденсации в условиях равновесного состояния. Численная реализация модельных представлений осуществлена методом подвижных лагранжевых сеток, а также с применением модифицированных решателей открытого пакета OpenFOAM. Дан анализ особенностей начальной стадии формирования пароводяной струи при истечении через тонкое сопло, основанный на результатах численного моделирования лагранжевым методом в случае двумерной осесимметричной постановки. Рассмотрены задачи, относящиеся к исследованию эволюции формирующейся струи в процессе истечения однофазного потока водяного пара и вскипающей струи сверхкритических параметров состояния, численно реализованные с применением пакета OpenFOAM. Отмечены особенности образования диска Маха, сопровождающиеся возникновением полости внутри струи. Показано, что в процессе истечения вскипающей пароводяной струи формируются вихревые зоны вблизи оси симметрии и образуются периодические пульсации давления и массовой скорости, которые в дальнейшем приводят к акустическим колебаниям, предшествующим основному струйному течению, наблюдаемым в экспериментах. Приведено обоснование достоверности применяемого численного метода, реализованного в новых решателях пакета OpenFOAM, на примере сравнения численного и аналитического решений задачи Л.И. Седова о точечном взрыве в двухфазной газожидкостной смеси и сопоставления результатов численного решения и экспериментальной фотографии сверхзвуковой струи азота при истечении через цилиндрическое сопло из резервуара высокого давления.

Ключевые слова: тонкое сопло, истечение вскипающего флюида, математическое и численное моделирование, пакет OpenFOAM

1. Введение

Интерес к изучению процессов формирования струйных течений водяного пара связан с их широким применением в различных технологиях по распылению жидкостей, также он обусловлен задачами, возникающими при внезапной разгерметизи-

зации камер высокого давления критических параметров состояния. Анализ динамики таких струй необходим при решении проблем безопасности современного энергетического оборудования с целью предупреждения аварийных ситуаций.

Для задач по определению параметров двухфазных потоков используются различные модели: гомогенного зародышеобразования равновесного или метастабильного потока, термически равновесного или гетерогенного неравновесного потока, модель вихревого па-

¹Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию № 0246-2019-0052.

рообразования, а также модели с различным межфазным взаимодействием [1–15].

В работе [1] изучались процессы эволюции газовых струй, сопровождающиеся формированием дисков Маха и образованием вихревых колец. Авторами [2, 3] проводились эксперименты по исследованию истечения перегретой воды из камеры высокого давления через короткие цилиндрические сопла. В работе [4] были продолжены экспериментальные исследования [2] по вскипанию струи перегретой воды при ее истечении через короткий цилиндрический канал при наличии пассивного завихрителя, который оказывает воздействие на форму и структуру потока.

В экспериментальных исследованиях [5] с помощью метода теневой фотографии изучался процесс распыления жидкого топлива высокоскоростной струей перегретого водяного пара, который используется при сжигании жидких углеводородов. Численное исследование нестационарного процесса истечения вскипающего теплоносителя при начальном сверхкритическом давлении, вызванного торцевым разрывом трубопровода, проводилось авторами [6, 7] на основе неравновесной гомогенной [6] и релаксационной [7] моделей, и было обнаружено формирование периодических вихреобразных структур. В работе [7] определялся угол распада струи в зависимости от различных режимных факторов и начальных условий.

В работе [8] представлены результаты численного моделирования и проведен сопоставительный анализ инъекции воздушной струи под большим давлением в замкнутый объем с жидкостями различной плотности при периодических пульсациях давления в газовом объеме, приводящих к его разрушению. Авторами [9] с привлечением численного моделирования и экспериментальных данных была апробирована математическая модель динамики нестационарной жидкой струи, описывающая впрыск топлива в дизеле, подаваемого под давлением в камеру сгорания.

Влияние начального состояния воды в камере высокого давления с учетом интенсивности зародышеобразования вскипающей воды на эволюцию формы пароводяной струи на начальной стадии истечения в условиях эксперимента [2] проанализировано в работе [10]. Численное моделирование проводилось методом сквозного счета с использованием подвижных лагранжевых сеток на основе модели вскипания, предложенной в [11]. Термодинамические свойства воды и пара описывались широкодиапазонным уравнением состояния [12]. Авторы представили сравнительный анализ расчетных и экспериментальных частот зародышеобразования с целью уточнения начального числа и радиуса микропузырьков, влияющих на интенсивность парообразования.

Дальнейшие исследования рассматриваемого процесса проводились для последующих стадий формирования струи с использованием решателей библиотеки открытого пакета OpenFOAM для задачи по истечению водяного пара, изначально находящегося при высоком давлении в сверхкритическом состоянии [13]. Здесь использовалось однофазное приближение для условий истечения, когда возможно не учитывать процессы испарения и конденсации. В [14] исследовалась динамика формирования пароводяной струи с параметрами, близкими к критическим.

В работе [15] были продолжены исследования [10–14] с более детальным изучением особенностей процесса истечения из тонкого сопла в окружающую среду водного флюида со сверхкритическими параметрами. В [15] показана пространственная динамика эволюции формирующейся парожидкостной струи с применением предложенной модели двухфазной смеси, учитывающей равновесные тепло- и массообменные процессы испарения и конденсации с использованием модифицированного авторами решателя reactingTwoPhaseEulerFoam открытого пакета OpenFOAM.

Целью настоящей работы является обзор исследований, касающихся процессов формирования вскипающих пароводяных струй при различных режимах истечения из тонких сопел, с описанием наиболее значимых результатов, полученных за последние несколько лет.

2. Уравнения модели парожидкостной смеси с учетом испарения и конденсации

Рассмотрим условия моделируемых экспериментов [2], которые были выбраны в качестве базовых при численных исследованиях, проведенных в работах [10, 14, 15]. В зависимости от изучаемого эксперимента водный флюид может находиться в различных состояниях насыщения вплоть до сверхкритического, определяемых давлением p_0 и температурой T_0 [2]. После отпирания заслонки, расположенной на торце узкого цилиндрического сопла радиуса $y_s = 0.25$ мм [2], происходит разгерметизация, сопровождающаяся распадом разрыва, в результате которого в камеру высокого давления распространяется волна разгрузки, а в невозмущенную окружающую воздушную среду ($p = 0.1$ МПа, $T = 300$ К) — ударная волна, инициирующая процесс истечения водного флюида.

При численном моделировании изучаемых режимов истечения использовались уравнения динамики газожидкостной смеси в трехмерной декартовой системе координат [16, 17], включающие законы сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с однодавленческим, односкоростным и двухтемпературным приближениями с учетом контактного теплообмена и массообменных процессов испарения и конденсации:

- уравнения неразрывности фаз

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v}) = \Gamma_i; \quad (1)$$

- уравнения сохранения импульса фаз

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \vec{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v} \vec{v}) &= -\alpha_i \nabla p + \\ &+ \operatorname{div}(\alpha_i \vec{\tau}_i) + \Gamma_i \vec{v}, \\ \vec{\tau}_i &= \mu_i (\nabla \vec{v} + \vec{v}^T) - \frac{2}{3} (\mu_i \operatorname{div} \vec{v}) I; \end{aligned} \quad (2)$$

- уравнения сохранения энергии фаз

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i))}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v} (e_i + K_i)) &= \\ &= -p \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} - \operatorname{div}(\alpha_i \vec{v} p) + \\ &+ \operatorname{div}(\alpha_i \gamma_{i,eff} \nabla h_i) + \\ &+ K_{ht} (T_j - T_i) + L_i \Gamma_i, \quad \gamma_{i,eff} = \frac{c_{p_i}}{c_{V_i}} \gamma_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Скорость массообмена $\Gamma_i = \frac{dm_i}{dt}$ определяется интенсивностью процесса испарения (конденсации) в равновесном состоянии насыщения, описываемым уравнением Антуана [18]. В уравнениях (1)–(3) использовались следующие обозначения: $\vec{\tau}_i$ – тензор вязких напряжений; c_{p_i}, c_{V_i} – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме; γ_i – температуропроводность; $\gamma_{i,eff}$ – эффективная температуропроводность; h_i – энтальпия; T_i – температура; L_i – скрытая теплота парообразования/конденсации; K_{ht} – коэффициент теплообмена; μ_i – динамическая вязкость; ρ_i – плотность; α_i – объемное содержание; e_i, K_i – внутренняя и кинетическая энергии; нижний индекс $i = l, g$ соответствует жидкой и газовой фазам; \vec{v} – вектор массовой скорости; p – давление. Термодинамические свойства воды и водяного пара описывались совершенными уравнениями состояния.

3. Оценка достоверности метода численной реализации модели для решения задач динамики струйных течений

Для обоснования достоверности используемого метода численного моделирования на платформе OpenFOAM в работе [15] было проведено сравнение расчетного решения, полученного с помощью решателя из пакета OpenFOAM, и автоматического решения задачи Л.И. Седова о точечном взрыве плоской конфигурации в газокапельной среде [19]. Ниже приведено используемое для сравнительного анализа аналитическое решение задачи Седова для эйлеровой координаты x , скорости v и давления p [19]:

$$\begin{aligned} \frac{x}{r_2} &= \left[\frac{3}{4} (\gamma + 1) V \right]^{-\frac{2}{3}} \left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left(\frac{3}{2} \gamma V - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma - 1}} \times \\ &\times \left[3 \left(1 - \frac{\gamma + 1}{2} V \right) \right]^{\frac{5\gamma - 4}{3(1 - 2\gamma)}}, \quad r_2 = \left(\frac{E}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}}, \\ \frac{v}{v_2} &= \frac{3}{4} (\gamma + 1) V \frac{x}{r_2}, \quad v_2 = \frac{4}{3(\gamma + 1)} \left(\frac{E}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{t^{\frac{1}{3}}}, \\ \frac{p}{p_2} &= \left[\frac{3}{4} (\gamma + 1) V \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{3}{2} V \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 2}} \times \\ &\times \left[3 \left(1 - \frac{\gamma + 1}{2} V \right) \right]^{\frac{5\gamma - 4}{3(2 - \gamma)}}, \quad p_2 = \frac{8E}{9r_2 (\gamma + 1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где интервал изменения безразмерной переменной V определен неравенством $\frac{2}{3\gamma} \leq V \leq \frac{4}{3(\gamma + 1)}$,

где $\gamma = \frac{c_{p_g} + kc}{c_{V_g} + kc}$ – показатель адиабаты газокапельной смеси, зависящий от удельных теплоемкостей газа c_{p_g}, c_{V_g} и теплоемкости жидких частиц c . В работе [19] предполагалось, что наличие жидких частиц в газе увеличивает инерцию среды, которая остается однородной по плотности: $\rho' = \rho_g (1 + k)$, где ρ_g – плотность совершенного газа (азот), а k – положительная константа.

При аналитическом решении задачи о точечном взрыве в газокапельной смеси (4) были использованы следующие начальные условия: энергия взрыва $E = 10$ Дж, $\rho'_0 = \rho_{g0} (1 + k)$, где $k = 100$, $\rho_{g0} = 0.01251$ кг/м³, показатель адиабаты смеси $\gamma = 1.1$, $p_0 = 0$ Па, $T_0 = 0$ К.

Численное моделирование задачи о точечном взрыве в газокапельной среде с использованием пакета OpenFOAM [18] проводилось для начальных и граничных условий, близких к выбранным при автоматическом решении рассматриваемой тестовой задачи. Ниже приведена система уравнений

сохранения массы, импульса и энергии для двухфазной смеси в односкоростном однотемпературном приближении с равным давлением фаз [18]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \vec{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v} \vec{v}) &= -\alpha_i \nabla p + \operatorname{div}(\alpha_i \vec{\tau}_i), \\ \frac{\partial(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i))}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v} (e_i + K_i)) &= \\ &= -p \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} - \operatorname{div}(\alpha_i \vec{v} p). \end{aligned}$$

Начальное объемное газосодержание азота $\alpha_{g0} = 0.99$ соответствовало начальной плотности смеси, принятой в аналитическом автомодельном решении: $\rho_0 = \rho_{g0} \alpha_{g0} + \rho_{l0} (1 - \alpha_{g0})$, $\rho_{g0} = 0.01251 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{l0} = 1000 \text{ кг/м}^3$. Теплофизические параметры газокapельной смеси выбирались таким образом, чтобы показатель адиабаты также соответствовал используемому в аналитическом решении [19] $\gamma = 1.1$. При формировании начальных и граничных условий использовались утилиты `setFieldsDict` и `blockMeshDict` из выбранного решателя OpenFOAM. На левой границе расчетной области задавались временные зависимости давления $p(t)$, температуры $T(t)$, скорости $\vec{v}(t)$ и объемного газосодержания $\alpha_g(t)$ в виде табличной функции для нестационарного типа граничного условия `uniformFixedValue`, задаваемой в нулевом файле данных созданной файловой структуры решателя в соответствии с аналитическими решениями, полученными для координаты, удаленной от точки взрыва на расстояние $x = 0.2 \text{ мм}$.

На рис. 1 представлены профили давления $p(x)$ и массовой скорости $v_x(x)$ в указанные моменты времени (в мкс), полученные в случае автомодельного решения [19] (1), и численные результаты аналогичной задачи с применением пакета OpenFOAM (2), по которым можно оценить их удовлетворительное согласование.

В дополнение к сравнению аналитического и численного с использованием пакета OpenFOAM решений был проведен сопоставительный анализ данных численного расчета с результатами эксперимента [20], приведенного в [15]. В выбранном эксперименте изучался процесс формирования сверхзвуковой струи азота при истечении через цилиндрическое сопло диаметром $d = 10 \text{ мм}$ из резервуара высокого давления при начальном давлении $p_{0r} = 4 \text{ МПа}$ и температуре $T_{0r} = 300 \text{ К}$ в окружающую атмосферу с $p_b = 0.1 \text{ МПа}$, $T_b = 300 \text{ К}$. На рис. 2(a) показана фотография струи азота в момент времени $t = 0.2 \text{ мс}$ от начала процесса истечения [20].

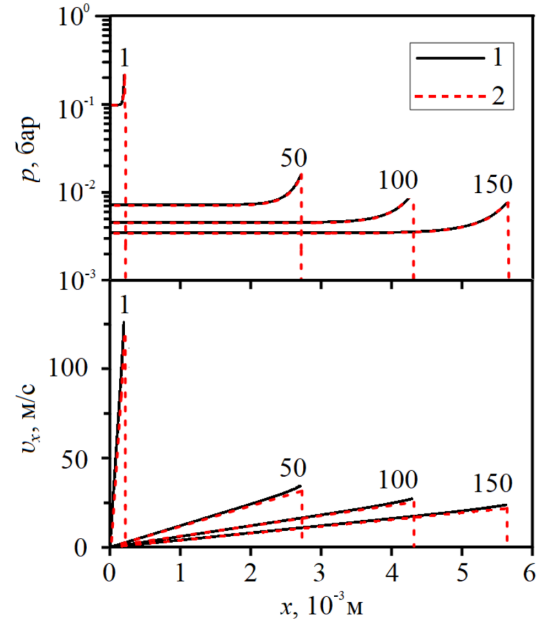


Рис. 1. Распределения давления $p(x)$ (a) и массовой скорости $v_x(x)$ (b) в моменты времени 50, 100 и 150 мкс: 1 – аналитическое решение [19], 2 – численное решение с применением решателя пакета OpenFOAM

Численная реализация моделируемого эксперимента проводилась с использованием системы уравнений газовой динамики, включающей уравнения сохранения массы, импульса и энергии [18]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \operatorname{div} \vec{\tau}, \\ \frac{\partial(\rho(e + K))}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}(e + K)) &= -\operatorname{div}(\vec{v} p). \end{aligned}$$

На рис. 2(b) приведены результаты численных расчетов в виде магнитуды скоростей $|\vec{v}(x, y)|$, полученные для задачи о струйном истечении азота в момент времени 0.2 мс и соответствующие условиям эксперимента, представленного на рис. 2(a).

Анализ экспериментальной фотографии и соответствующего ей расчетного распределения поля скоростей (рис. 2) показал согласованность результатов эксперимента с полученным решением для сформированной сверхзвуковой осесимметричной струи газа со степенью нерасчетности $n = p_a/p_b > 2$, где p_a – давление на срезе сопла; p_b – давление окружающей среды. Видно, что в обоих случаях струя приобретает бочкообразную форму с образованием нормального скачка уплотнения (диска Маха) и висячего скачка уплотне-

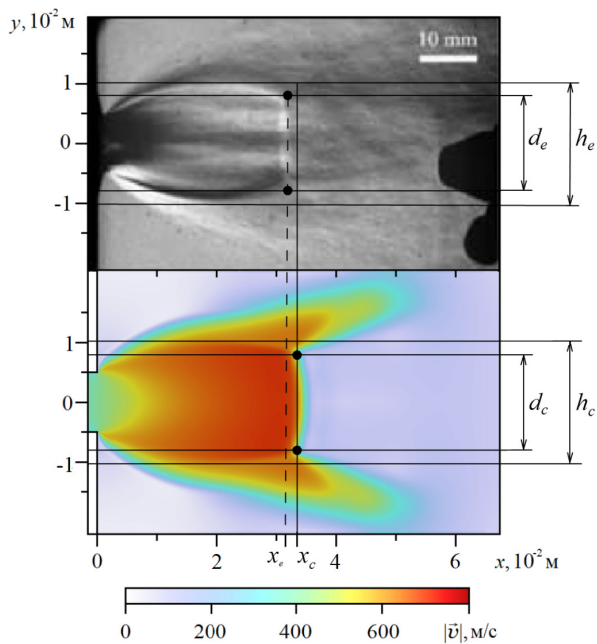


Рис. 2. Распределение полей скоростей при струйном истечении газа азота в момент времени 0.2 мс при начальном перепаде давлений $p_{0r}/p_b = 40/1$ [20]: (а) – экспериментальная фотография [20]; (б) – результаты расчетов, полученных с использованием пакета OpenFOAM

ния, формирующегося по границе «бочки». Расстояние от выхода сопла до диска Маха на оси струи оценивалось по формуле [21]:

$$x_M = 0.67d \left(\frac{p_a}{p_b} \right)^{0.5}. \quad (5)$$

Величина $x_M = 33.58$ мм была найдена исходя из значений $p_a = 2.5$ МПа, $p_b = 0.1$ МПа, полученных в расчетах моделируемого эксперимента. Численное решение показало совпадение характерного расчетного расстояния $x_c = 33.6$ мм с оценкой (5). На экспериментальной фотографии расстояние от выхода сопла до диска Маха $x_e = 33.2$ мм имеет относительную погрешность $\delta_x = (|x_e - x_M| / x_M) \cdot 100\% \approx 1\%$ в сравнении с x_M и численным решением с применением пакета OpenFOAM ($x_c = 33.6$ мм). Для значений диаметра диска Маха d и высоты бочки h получены следующие оценки экспериментальных и расчетных величин: $d_e = 15.5$ мм, $d_c = 15$ мм, $h_c = h_e = 20$ мм, $\delta_d = (|d_e - d_c| / d_e) \cdot 100\% < 5\%$. Проведенный анализ показал удовлетворительное согласование экспериментальных данных [20] и численных решений, полученных с применением пакета OpenFOAM [15].



Рис. 3. Фотография струи вскипающей воды в процессе истечения для начальных условий сверхкритического состояния при $T_0 = 650$ К [2]

4. Исследование процессов формирования и эволюции вскипающих пароводяных струй

На начальном этапе исследований особенности процессов истечения изучались в одномерном приближении. В работе [11] построена двухфазная модель вскипающей парожидкостной смеси в переменных Лагранжа и исследованы процессы полного истечения вскипающей жидкости при разгерметизации трубы высокого давления.

При исследовании задач пространственного истечения пароводяной смеси в [10] применялся численный метод сквозного счета на подвижных лагранжевых сетках, деформирующихся во времени, и анализировалось формирование начальной стадии струйного течения со следующими исходными значениями параметров в камере высокого давления: $T_0 = 650$ К и $p_0 = 22.73$ МПа.

На рис. 3 представлена фотография струи вскипающей воды в режиме гомогенного зародышеобразования для вышеуказанных начальных условий сверхкритического состояния, при котором форма образующейся струи близка к параболической [2]. При этих условиях истечения формирование струи происходит в режиме образования незначительной доли жидкой фазы ($\alpha_l \approx 10^{-4}$), т.е. при частичной конденсации пара. Так же, как и в эксперименте, в расчетах (рис. 4) наблюдается интенсивное расширение газового потока, в котором достигаются сверхзвуковые скорости истечения. На момент времени $t = 0.5$ мкс расчетные скорости потока достигают ≈ 1000 м/с, что по оценке скорости звука в паре соответствует числу Маха $M \approx 2.3$. На рис. 4 в момент времени $t = 0.5$ мкс в полученных рас-

четах фиксируется радиальное расширение струи по боковой границе на центральном участке и ее сужение в крайней граничной зоне по направлению движения потока (в лидере струи). С течением времени (см. рис. 4, $t = 1.0$ мкс) сверхзвуковой режим истечения сохраняется, происходит дальнейшее расширение потока по боковым границам с большими значениями v_y составляющей скорости на этих участках по сравнению с осевой зоной, что сопровождается, как и в эксперименте [2], формированием струи параболического вида.

Применение лагранжева подхода, используемого при численном моделировании [10], ограничивает продолжительность расчетов для изучения последующих стадий формирования струи.

В расчетах, проведенных в работе [13], процесс истечения водяного пара из тонкого сопла проводился с использованием решателя sonicFoam библиотеки открытого пакета OpenFOAM [18] с уравнением состояния водяного пара Пенга–Робинсона, что позволило исследовать изучаемое явление на более длительных временных интервалах физического процесса.

В расчетах предполагалось, что в начальный момент времени в узком цилиндрическом сопле находится водяной пар при давлении $p_0 = 22.73$ МПа и температуре $T_0 = 1273$ К. В связи с модельными ограничениями однофазного приближения начальное состояние водяного пара в камере высокого давления выбиралось таким образом, чтобы исключить возможность конденсации пара в процессе истечения, то есть предполагалось, что формирование струи происходило в режиме перегретого пара. Как и в эксперименте [2], в расчетах наблюдалось интенсивное расширение струи и достигались сверхзвуковые скорости истечения $\vec{v} \approx 1200$ м/с. Начиная с момента времени $t = 10$ мкс в расчетах формировались скачки уплотнения. Вдоль границы расширяющейся сверхзвуковой струи образуется висячий скачок уплотнения, при отражении которого от оси симметрии происходит формирование прямого скачка уплотнения, являющегося пограничной зоной между областями сверхзвукового (2) и дозвукового (3) течений (рис. 5). Вдоль боковой границы струи концентрируется основной поток газа (4), характеризующийся также сверхзвуковым режимом истечения $M = 1.17$. 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 и развитию неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [1], что сопровождается об-

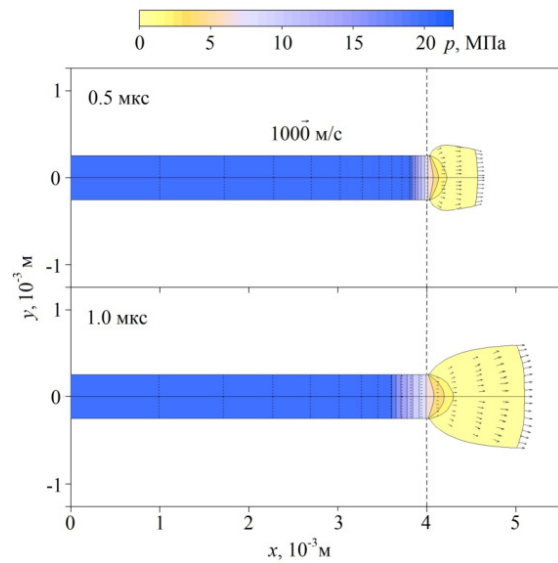


Рис. 4. Расчетные распределения давления p и мгновенного поля скоростей \vec{v} в процессе истечения в указанные моменты времени (мкс)

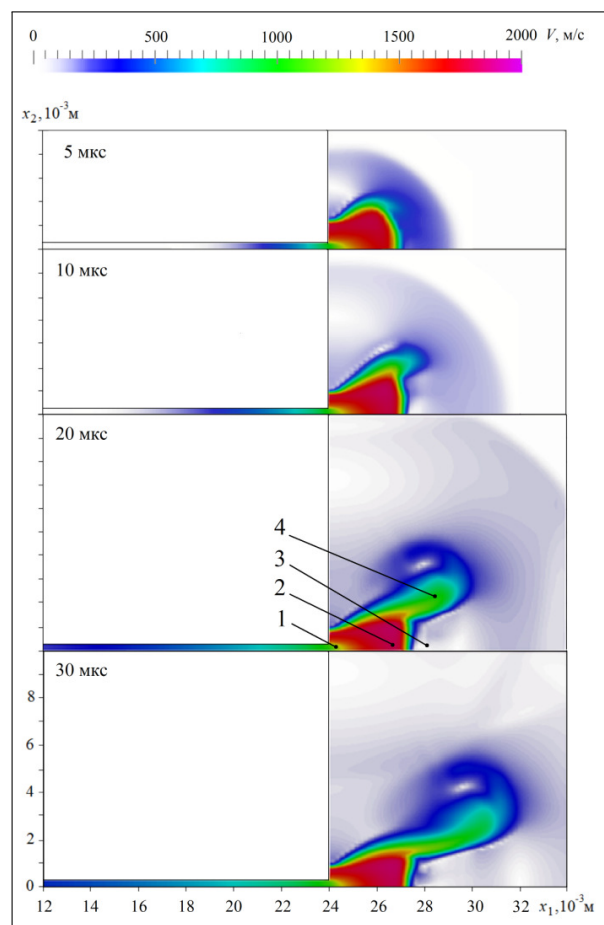


Рис. 5. Эволюция расчетного распределения скоростей в процессе истечения водяного пара из тонкого сопла из начального сверхкритического состояния

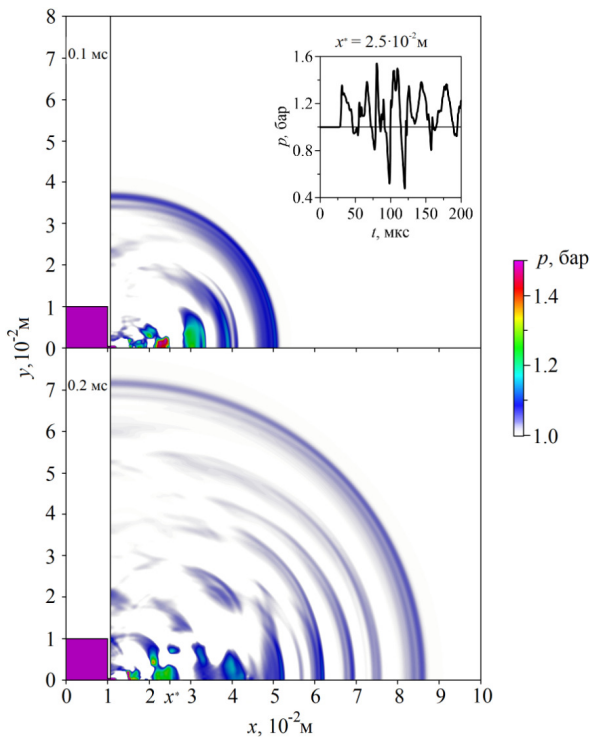


Рис. 6. Расчетные поля давления $p(x, y)$ при струйном истечении для моментов времени 0.1 (а) и 0.2 (б) мс. В верхнем углу фрагмента (а) приведена расчетная зависимость от времени давления $p(t)$ на оси симметрии струи для точки $x^* = 0.025$ м

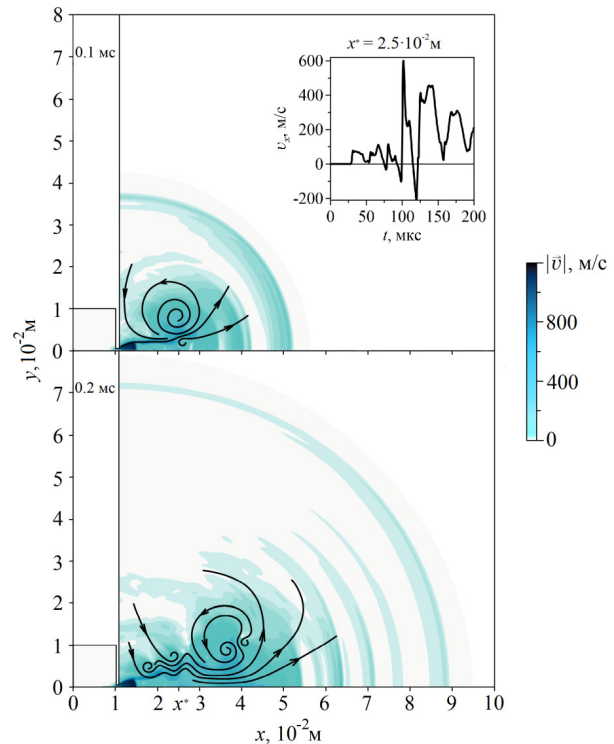


Рис. 7. Расчетные поля модуля скорости $|\vec{v}(x, y)|$ при струйном истечении для моментов времени 0.1 (а) и 0.2 (б) мс. В верхнем углу фрагмента (а) приведена расчетная зависимость от времени составляющей скорости $v_x(t)$ на оси симметрии струи для точки $x^* = 0.025$ м

разованием и развитием вихревых зон. Основной вихрь поддерживает сверхзвуковую скорость потока на внешнем участке струи. Более слабый вихрь, образующийся вблизи оси симметрии в окружающем струю газе за счет направления потока газа навстречу движению струи, способствует смещению центральной зоны диска Маха в сторону сопла, что приводит к формированию полой струи.

Дальнейшее исследование изучаемого явления проводилось с дополнительным учетом в модели газо-парожидкостной смеси тепло- и массообменных процессов, происходящих при наличии испарения и конденсации в соответствии с системой уравнений (1)–(3) [15].

При компьютерной реализации использовался модифицированный авторами решатель `reactingTwoPhaseEulerFoam` в среде пакета `OpenFOAM`, построенный на основе вычислительного алгоритма `PIMPLE`, который значительно ускоряет вычисления и позволяет достичь хорошей скорости сходимости решений. Интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных по каждому контрольному объему

обеспечивает консервативность численной схемы. Численное решение задачи выполнено в осесимметричной постановке. Для достижения точности расчетов использовалась адаптивная сгущающаяся сетка в области тонкого сопла. На внутренних границах расчетной области принималось условие скольжения.

Результаты численного моделирования исследуемого режима истечения, соответствующего приведенной в разделе 2 постановке задачи при начальных значениях давления водного флюида $p_0 = 22.73$ МПа и температуры $T_0 = 650$ К, находящегося в цилиндрическом сосуде высокого давления длины $x_h = 10$ мм и радиуса $y_h = 10$ мм, представлены на рис. 6 и 7 в моменты времени $t = 0.1$ и 0.2 мс в виде динамики полей давлений $p(x, y)$ (рис. 6), модуля скоростей $|\vec{v}(x, y)|$ и линий тока (рис. 7). На дополнительных фрагментах рис. 6(а) и 7(а) приведены временные зависимости давления $p(t)$ и составляющей скорости $v_x(t)$, контролируемые на оси симметрии в точке $x^* = 0.025$ м. К моменту времени $t = 0.1$ мс (рис. 6, 7), как и в эксперименте [2], фиксируется

интенсивное расширение струи, которая приобретает форму, близкую к параболической, и достигаются сверхзвуковые скорости истечения порядка 1200 м/с с числом Маха $M = 1.22$. Основной поток газа вдоль боковой границы струи характеризуется также сверхзвуковым режимом истечения. На границах сверхзвукового течения наблюдается образование висячего и центрального (диска Маха) скачков уплотнения. Со временем ($t = 0.1, 0.2$ мс) взаимодействие высокоскоростного потока со слабо возмущенной газовой областью сопровождается искривлением линий тока и появлением вихревых зон, являющихся следствием развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Процесс формирования серии тороидальных вихрей способствует закручиванию струи, ее расширению и в дальнейшем приводит к турбулизации потока (см. на рис. 7 динамику полей скоростей и линий тока в моменты времени $t = 0.1, 0.2$ мс).

Давление в струе снижается от изначально создаваемого в камере высокого давления $p_0 = 22.73$ МПа до значений ниже 0.15 МПа (рис. 6). С течением времени в ближней зоне оси симметрии формирующийся режим истечения образует локальные области периодически изменяющегося давления и массовой скорости потока в струе, показанные в виде пульсаций давления и массовой скорости на дополнительных фрагментах рис. 6(а) и 7(а) для точки $x^* = 0.025$ м, расположенной на оси симметрии струи. Полученные в расчетах пульсации с амплитудой давления $\Delta p \approx 0.6$ бар и нарастающим диапазоном колебаний массовой скорости до $\Delta v_x \approx 400$ м/с имеют характерный период колебаний $\tilde{T} \approx 25$ мкс, что соответствует частоте $\tilde{\nu} = 1/\tilde{T} \approx 40$ кГц. Рассмотренный выше режим струйного течения является источником формирования радиально распространяющихся периодических акустических колебаний, присутствующих в изначально невозмущенной газовой области перед основной струей, которые наблюдались также и в экспериментальных исследованиях [2, 3].

5. Заключение

В обзоре представлены результаты теоретических исследований особенностей формирования осесимметричных струй в процессе истечения вскипающих жидкостей через тонкое сопло из камеры высокого давления.

Приведены уравнения модели, описывающие динамическое поведение газо-парожидкостной среды в процессе формирования многофазных струйных течений с учетом тепло- и массообменных процессов.

Обозначены методы численного моделирова-

ния, используемые при решении рассматриваемых задач. Показано развитие модельных представлений и применяемых численных методов при исследовании изучаемых процессов с визуализацией полученных результатов.

На первых этапах исследований начальной стадии процесса формирования струи показано, что при начальной сверхкритической температуре формируется сверхзвуковой режим истечения с незначительной конденсацией паровой фазы и формированием струи параболического вида.

Дальнейшие численные исследования с применением модификаций решателей из пакета OpenFOAM выявили условия образования в струе висячего скачка уплотнения, диска Маха и вихревых зон, которые закручивают струю в сторону внешнего участка. Развитие струйного потока сопровождается формированием группы тороидальных вихрей, которые образуют динамические локальные области периодических пульсаций давления и массовой скорости в ближней зоне оси симметрии струи, являющиеся источниками акустических пульсаций в газовой области, предшествующих основному потоку.

Достоверность используемого численного метода основана на сравнении численных и аналитических решений тестовой задачи. Показано удовлетворительное согласование моделируемого процесса формирования сверхзвуковой струи азота с экспериментальными данными.

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. Pp. 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. eLIBRARY ID: 18198606
- [3] Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Беглецов В.Н., Коверда В.П. Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды // *Письма в Журн. техн. физики.* 2007. Т. 33, вып. 17. С. 31–37. eLIBRARY ID: 20326320
- [4] Бусов К.А., Решетников А.В., Мажейко Н.А., Капитунов О.А. Исследование влияния пассивного завихрителя на истечение перегретой жидкости // *Прикл. механика и техн. физика.* 2019. № 1. С. 62–68. DOI: 10.15372/PMTF20190108
- [5] Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Шарыпов О.В., Лещевич В.В. Распыление жидкого топлива высокоскоростной струей водяного пара // *Теплофизика и аэромеханика.* 2020. Т. 27, № 4. С. 659–662. eLIBRARY ID: 44466732
- [6] Алексеев М.В., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Сорокин А.Л. Генерация ударноволновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды // *Теплофизика и аэромеханика.* 2014. Т. 21, № 6. С. 795–798. eLIBRARY ID: 22599881

- [7] 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. [eLIBRARY ID: 30291172](#)
- [8] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И. Пульсации давления при инъекции газа в заполненный жидкостью закрытый объем при больших перепадах давления // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 833–836. [eLIBRARY ID: 42313598](#)
- [9] Сеначин П.К., Кирушин И.И., Самарин А.В., Сеначин А.П., Ульрих С.А. Численное моделирование динамики нестационарной жидкой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 6. С. 853–867. [eLIBRARY ID: 46374941](#)
- [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. [eLIBRARY ID: 30291168](#)
- [11] 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. [eLIBRARY ID: 18198246](#)
- [12] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313. [eLIBRARY ID: 15639102](#)
- [13] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности формирования поллой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 783–789. [eLIBRARY ID: 36825486](#)
- [14] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Faizullina E.A. Analysis the dynamic formation of a vapor supersonic jet under outflow from thin nozzle // J. Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2103. P. 012219-1–012219-6. [DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012219](#)
- [15] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Моделирование динамики струи при истечении через тонкое сопло водного флюида, находящегося в сверхкритическом состоянии // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 361–370. [eLIBRARY ID: 48738287](#)
- [16] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. Т. 1. 1987. 464 с.
- [17] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука. Т. VI. 1986. 736 с.
- [18] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. <http://www.openfoam.com> (дата обращения: 31.10.2022)
- [19] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1977. 440 с.
- [20] Orescanin M.M., Austin J.M., Kieffer S.W. Unsteady high-pressure flow experiments with applications to explosive volcanic eruptions // J. of Geophysical Research. 2010. Vol. 115. Pp. B06206-1–B06206-18. [DOI: 10.1029/2009JB006985](#)
- [21] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука. Т. 1. 1991. 597 с.



The formation features of supercritical steam-water jets (review)

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

*Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa, Russia

**Bashkir State University, Ufa, Russia

The review of works on study of dynamics formation of water fluid jet of supercritical parameters outflowing from a high-pressure chamber through a thin nozzle has been carried out. The system of model equations describing the dynamics of outflow processes in both single-phase and multiphase gas-vapor-liquid media is considered. It based on the laws of conservation of mass, momentum and energy of phases in accordance with single-pressure, single-speed and two-temperature approximations with the allowance for contact-type heat transfer and mass transfer for evaporation and condensation under equilibrium conditions. The numerical realization of model representations is carried out by the method of movable Lagrangian grids and using modified solvers of the OpenFOAM package. The analysis of the features initial stage of the formation of a steam-water jet at outflow through a thin nozzle is given based on the results of numerical simulation by the Lagrangian method in the case of a two-dimensional axisymmetric formulation. The problems about the study of the evolution a forming jet during the outflow of a single-phase flow of water-steam and a boiling jet of supercritical state parameters are considered, by the numerical realization in the OpenFOAM package. The features the formation of Mach disk, accompanied by the appearance of a cavity inside the jet, are noted. It is shown that during the outflow of a boiling steam-water jet, the vortex zones are formed near the axis of symmetry and periodic pulsations of pressure and mass velocity are generated, which subsequently lead to acoustic oscillations preceding the main jet flow observed in experiments. The justification of reliability the applied numerical method realized by the new OpenFOAM solvers is given on the example of comparing numerical and analytical solutions to L.I. Sedov's problem of a point explosion in two-phase gas-drop mixture and comparing the results of numerical solution and experimental photography of supersonic nitrogen jet outflowing through cylindrical nozzle from high-pressure vessel.

Keywords: thin nozzle, boiling water outflow, mathematical and numerical modeling, OpenFOAM package

References

- [1] Ishii R., Fujimoto H., Hatta N., Umeda Y. Experimental and numerical analysis of circular pulse jets // *J. Fluid Mech.* 1999. V. 392. Pp. 129–153.
DOI: [10.1017/S0022112099005303](https://doi.org/10.1017/S0022112099005303)
- [2] Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // *Thermophysics and Aeromechanics.* 2012. V. 9, No. 2. Pp. 329–336.
DOI: [10.1134/S0869864312020151](https://doi.org/10.1134/S0869864312020151)
- [3] Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Begletsov V.N., Koverda V.P. Pulsation dynamics during explosive boil-up of overheated water jets // *Techn. Phys. Letters.* 2007. V. 33, No. 9. Pp. 732–737.
DOI: [10.1134/S1063785007090052](https://doi.org/10.1134/S1063785007090052)
- [4] Busov K.A., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Kapitonov O.A. Effect of a passive swirler on the superheated liquid flow // *J. Applied Mech. Techn. Phys.* 2019. V. 60, No. 1. Pp. 53–58.
DOI: [10.1134/S0021894419010085](https://doi.org/10.1134/S0021894419010085)
- [5] Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Sharypov O.V., Leschevich V.V. Liquid fuel spraying by a high-speed steam jet // *Thermophysics and Aeromechanics.* 2020. V. 27, No. 4. Pp. 627–630.
DOI: [10.1134/S0869864320040162](https://doi.org/10.1134/S0869864320040162)
- [6] Alekseev M.V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A., Sorokin A.L. Generation of shockwave and vortex structures at the outflow of a boiling water jet // *Thermophysics and Aeromechanics.* 2014. V. 21, No. 6. Pp. 763–766.
DOI: [10.1134/S0869864314060122](https://doi.org/10.1134/S0869864314060122)
- [7] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Wave processes at outflow of water coolant with initial supercritical parameters // *Thermophysics and Aeromechanics.* 2017. V. 24, No. 5. Pp. 799–802.
DOI: [10.1134/S0869864317050158](https://doi.org/10.1134/S0869864317050158)
- [8] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I. Pressure pulsations during gas injection into a liquid-filled closed vessel with a

- high pressure drop // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26, No. 5. Pp. 781–784.
DOI: [10.1134/S0869864319050159](https://doi.org/10.1134/S0869864319050159)
- [9] Senachin P.K., Kiryushin I.I., Samarin A.V., Senachin A.P., Ulrich S.A. Numerical simulation of the dynamics of a non-stationary liquid jet // Thermophysics and Aeromechanics. 2020. V. 27, No. 6. Pp. 811–824.
DOI: [10.1134/S0869864320060025](https://doi.org/10.1134/S0869864320060025)
- [10] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A. Boiling water jet outflow from a thin nozzle: spatial modeling // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. V. 24, No. 5. Pp. 761–771.
DOI: [10.1134/S0869864317050110](https://doi.org/10.1134/S0869864317050110)
- [11] Bolotnova R.Kh., Buzina V.A. (Korobchinskaya V.A.), Galimzyanov M.N., Shagapov V.Sh. Hydrodynamic features of boiling liquid outflow // Теплофизика и Аэромеханика [Thermophysics and Aeromechanics]. 2012. V. 19, No. 6. Pp. 719–730 (in Russian).
eLIBRARY ID: 18198246
- [12] Nigmatulin R.I., Bolotnova R.Kh. Wide-range equation of state of water and steam: Simplified form // High Temperature. 2011. V. 49, No. 2. Pp. 303–306.
DOI: [10.1134/S0018151X11020106](https://doi.org/10.1134/S0018151X11020106)
- [13] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Supercritical steam outflow from a thin nozzle: forming a hollow jet // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. V. 25, No. 5. Pp. 751–757.
DOI: [10.1134/S0869864318050116](https://doi.org/10.1134/S0869864318050116)
- [14] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A., Faizullina E.A. Analysis the dynamic formation of a vapor supersonic jet under outflow from thin nozzle // J. Physics: Conference Series. 2021. V. 2103. Pp. 012219–1–012219-6.
DOI: [10.1088/1742-6596/2103/1/012219](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012219)
- [15] Bolotnova R.Kh., Korobchinskaya V.A. Modeling of dynamics of supercritical water jet outflowing from a thin nozzle // Thermophysics and Aeromechanics. 2022. Vol. 29, № 3. Pp. 347–355.
DOI: [10.1134/S0869864322030039](https://doi.org/10.1134/S0869864322030039)
- [16] Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media. Hemisphere, New York, 1990.
- [17] Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid Mechanics. Vol. 6. Pergamon Press, Oxford, 1987.
- [18] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox.
<http://www.openfoam.com> (дата обращения: 31.10.2022)
- [19] Sedov L.I. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. CRC Press, Boca Raton, 1993.
DOI: [10.1201/9780203739730](https://doi.org/10.1201/9780203739730)
- [20] Orescanin M.M., Austin J.M., Kieffer S.W. Unsteady high-pressure flow experiments with applications to explosive volcanic eruptions // J. of Geophysical Research. 2010. V. 115. Pp. B06206-1-B06206-18.
DOI: [10.1029/2009JB006985](https://doi.org/10.1029/2009JB006985)
- [21] Abramovich G.N. Applied Gas Dynamics. Foreign Technology Div Wright-Patterson AFB, OH, 1973.