Моделирование процесса истечения вскипающей воды через тонкое сопло

Коробчинская В.А. [1,2], Гайнуллина Э.Ф. [1,2], Файзуллина Э.А. [1]

[1]Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия
[2]Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Исследования в области распыления жидкостей в перегретом состоянии представляют значительный теоретический и практический интерес ввиду их широкого применения в многочисленных технических приложениях. Для разработки новых методов распыления и модификации существующих, необходимо учитывать особенности механизма образования струй. Начальное состояние жидкости в камере высокого давления, размер выходного сопла непосредственно влияют на форму струи, ее устойчивость и дальнобойность.

Экспериментальные исследования по критическому режиму истечения пароводяной смеси проводились в [1, 2]. В работе [2] изучалась динамика вскипания струи перегретой воды при истечении через короткий канал с диаметром d = 0.2 мм при варьировании начальных параметров (температура, давление) на линии насыщения: T_s = 383–583 К, p_s = 0.1–9.8 МПа. В экспериментах [2] наблюдалась смена формы вскипающей струи от цилиндрической к ее полному раскрытию и выявлена неустойчивость в режиме полного развала.

Исследования по влиянию начального состояния воды в камере высокого давления с учетом интенсивности зародышеобразования на форму пароводяной струи на начальной стадии истечения анализировались в [3] с привлечением численного моделирования методом сквозного счета на подвижных лагранжевых сетках с применением модели вскипания, предложенной в [4].

В настоящей работе проведено численное исследование нестационарного процесса истечения вскипающей пароводяной смеси при разгерметизации камеры высокого давления через тонкое сопло в условиях экспериментальных данных [2] с использованием реалистичного широкодиапазонного уравнения состояния воды и пара [5], позволяющее получить более достоверные результаты.

Для решения поставленной задачи используется двухфазная модель в двухтемпературном, однодавленческом, двухскоростном приближениях с учетом контактного теплообмена и неравновесных массообменных процессов испарения и конденсации [6].

Система дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии для двухфазной смеси в трехмерной декартовой системе координат:

$$\frac{\partial(\alpha_i\rho_i)}{\partial t} + \mathrm{div}\ (\alpha_i\rho_i\mathbf{v}_i) = J_{ij}\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\alpha_i\rho_i\,\mathbf{v}_i)}{\partial t} + \mathrm{div}(\alpha_i\rho_i\,\mathbf{v}_i\mathbf{v}_i) = -\alpha_i\nabla p + \mathrm{div}(\alpha_i\tau_i) + \mathbf{F}_{i,drag} + \mathbf{F}_{i,vm} + J_{ij}\mathbf{v}_i\,, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\alpha_i\rho_i E_i)}{\partial t} + \mathrm{div}(\alpha_i\rho_i E_i\mathbf{v}_i) = -p\frac{\partial\alpha_i}{\partial t} - \mathrm{div}(\alpha_i\mathbf{v}_i p) + \mathrm{div}(\alpha_i\gamma_{i,eff}\nabla h_i) + K_{ht}(T_j - T_i) + l_s J_{ij}\,. \tag{3}$$

Сила присоединенных масс имеет вид: $\mathbf{F}_{i,vm} = 0.5\alpha_l\rho_g\left(\frac{d_i\mathbf{v}_i}{dt} - \frac{d_j\mathbf{v}_j}{dt}\right)$. Межфазное сопротивление описано моделью Шиллера−Науманна: $\mathbf{F}_{i,drag} = \frac{3}{4}\alpha_l C_D\frac{\rho_g}{d_{l0}}(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)\left|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j\right|$.

В уравнениях (1)–(3) использовались следующие обозначения: ρ_i – плотность, T_i – температура, α_i – объемное содержание, $\mathbf{v}_i$ – скорость, J_{ij} – скорость массообмена между i–й и j–й фазами, p – давление, $\tau_i = \mu_i(\nabla\mathbf{v}_i + \nabla\mathbf{v}_i^T) - \frac{2}{3}(\mu_i\mathrm{div}\mathbf{v}_i)\mathbf{I}$ – тензор вязких напряжений, μ_i – динамическая вязкость, $E_i = e_i + K_i$ – полная энергия в виде суммы внутренней и кинетической энергий, $\gamma_{i,eff}$ – эффективная температуропроводность, h_i – энтальпия, $\mathbf{v} = \alpha_l\mathbf{v}_l + \alpha_g\mathbf{v}_g$ – скорость парожидкостной смеси, $K_{ht} = \frac{\kappa_g}{d_{10}}\mathrm{Nu}$ – коэффициент теплообмена, κ_g – теплопроводность газа, Nu – число Нуссельта, l_s – теплота парообразования/конденсации, d_{l0} – диаметр капель. Нижние индексы i, j = 1, 2 – соответствуют жидкой (l) и паровой фазам (g) ($i \neq j$).

Термодинамические свойства пароводяной системы описываются широкодиапазонным уравнением состояния в форме Ми–Грюнайзена, то есть в виде суммы холодной (верхний индекс p) и тепловой (верхний индекс T) составляющих для давления и внутренней энергии [5]:

$$p(\rho_i^0,T_i) = p^{(p)}(\rho_i^0) + p^{(T)}(\rho_i^0,T_i)\,,\ e(\rho_i^0,T_i) = e^{(p)}(\rho_i^0) + e^{(T)}(T_i) + e^{(ch)}\,,$$

где упругие составляющие давления и внутренней энергии описываются потенциалом типа Борна – Майера:

$$p^{(p)}(\rho_i^0) = A\left(\frac{\rho_i^0}{\rho_{i0}^0}\right)^{-\beta+1}\exp\left[b\left(1-\left(\frac{\rho_i^0}{\rho_{i0}^0}\right)^{-\beta}\right)\right] - K\left(\frac{\rho_i^0}{\rho_{i0}^0}\right)^{\xi+1},$$

$$e^{(p)}(\rho_i^0) = \int_{\rho^\circ}^{\rho}\frac{p^{(p)}\left(\rho_i^0\right)}{(\rho_i^0)^2}\,\mathrm{d}\rho_i^0 = \frac{A}{\beta\rho_{i0}^0 b}\exp\left[b\left(1-\left(\frac{\rho_i^0}{\rho_{i0}^0}\right)^{-\beta}\right)\right] - \frac{K}{\xi\rho_{i0}^0}\left(\frac{\rho_i^0}{\rho_{i0}^0}\right)^{\xi} + e^\circ. \quad (4)$$

Здесь A, K, b, ξ, β – константы, ρ_{i0}^0 – плотность каждой фазы при нормальных условиях, e° – константа интегрирования для выполнения условия: $e^{(p)}(\rho^\circ) = 0$, когда $p^{(p)}(\rho^\circ) = 0$, $e^{(ch)}$ – величина, необходимая для согласования внутренних энергий фаз. Тепловые составляющие давления и внутренней энергии имеют вид:

$$p^{(T)}(\rho_i^0,T_i) = \Gamma(\rho_i^0)\rho_i^0 e^{(T)}(T_i)\,,\ e^{(T)}(T_i) = c_{V_i}T_i\,. \quad (5)$$

Скорость испарения J_{lg} в соответствии с [4], предполагается зависящей от числа n и радиуса a пузырьков, температуры насыщения $T_s(p)$, теплоты парообразования $l_s(T)$, коэффициента теплопроводности λ_l и числа Нуссельта Nu:

$$J_{lg} = 2\pi an\mathrm{Nu}\,\lambda_l\left(T - T_s(p)\right)/l_s(T)\,. \quad (6)$$

Численное моделирование изучаемого процесса проводилось в пакете вычислительной гидродинамики [7] с использованием разработанного авторами решателя, моделирующего уравнения (1) – (6).

Для проверки достоверности разработанной пространственной модели вскипающей пароводяной смеси было проведено сравнение численных расчетов с результатами эксперимента [1], соответствующими начальной (быстрой) стадии внезапного истечения недогретой до параметров насыщения воды из трубы радиуса r = 0.0375 м и длиной l = 4.1 м при исходных давлении p_0 = 7 МПа и температуре T_0 = 515 К.

При моделировании экспериментов [2] в расчетах в камере высокого давления принимались следующие начальные температуры, соответствующие состоянию насыщения: T_{s1} = 433 К, T_{s2} = 483 К и T_{s3} = 573 К. В результате расчетов получены распределения массовых скоростей пароводяного потока. Выявлено, что при невысокой степени перегрева струя сохраняет цилиндрический вид (T_{s1} = 433 К). При увеличении температуры до 483 К усиливается интенсивность испарения и происходит смена формы струи на коническую. Для режима истечения с начальной температурой T_{s3} = 573 К наблюдается трансформация струи, приводящая с течением времени к ее разрушению.

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

Список литературы

[1] Edwards A.R., O’ Brien T.P. Studies of phenomena connected with the depressurization of water reactors // J. Br. Nucl. Energ. Soc. 1970. Vol. 9, No. 2. Pp. 125–135.

[2] Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н. Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал малого диаметра // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 48, вып. 24. С. 8–10.

[3] Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А. Пространственное моделирование процесса формирования струи вскипающей воды при истечении из тонкого сопла // Т и А. 2017. Т. 24, № 5. С. 783–794.

[4] Болотнова Р.Х., Бузина В.А., Галимзянов М.Н., Шагапов В.Ш. Гидродинамические особенности процессов истечения вскипающей жидкости // Т и А. 2012. Т. 19, № 6. С. 719–730.

[5] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // ТВТ. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.

[6] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. С. 464.

[7] OpenFOAM. The Open source computational fluid dynamics (CFD) toolbox [Electronic source]. http://www.openfoam.com.