

03

Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал малого диаметра

© К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: kbusov@itpuran.ru

Поступило в Редакцию 23 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 15 октября 2022 г.

Принято к публикации 15 октября 2022 г.

Проведено экспериментальное исследование динамики вскипания струи перегретой воды при истечении через короткий канал малого диаметра ($d = 0.2 \text{ mm}$). Прослежено изменение формы вскипающей струи при различных степенях перегрева. Установлено полное раскрытие потока в температурном интервале $T = 493\text{--}583 \text{ K}$. Выявлена неустойчивость полного развала. На основании экспериментальных данных построена зависимость изменения угла раскрытия струи от давления насыщения в безразмерных координатах. Обнаружены низкочастотные пульсации со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте ($1/f$ -спектр), при смене форм вскипающего потока.

Ключевые слова: полное раскрытие струи, перегретая жидкость, взрывное вскипание, короткий канал, $1/f$ -спектр.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54015.19373

Фазовые превращения различной интенсивности в значительной степени оказывают влияние на форму [1,2], угол распыла [3–5] и дисперсионный состав [6–8] струи метастабильной (перегретой) жидкости [9,10]. Например, свободная струя, истекающая через короткий цилиндрический канал при небольших степенях перегрева, сохраняет стержневой вид (как у холодной жидкости). В условиях интенсивного вскипания (гетерогенное зародышеобразование) наблюдается коническая форма потока. В случае проявления интенсивного гомогенного флуктуационного парообразования струя приобретает вид эллиптического параболоида. Однако при определенных условиях (наличие внешних элементов оборудования за выходным срезом канала) может наблюдаться полное раскрытие струи перегретой жидкости [11].

Получение потока с развернутым углом раскрытия имеет как фундаментальный, так и практический интерес. До сих пор остаются открытыми некоторые вопросы, касающиеся необходимых и достаточных условий для реализации развала струи, температурного интервала его проявления и устойчивости дискообразной (вверной) формы.

В настоящей работе экспериментально изучено изменение формы и угла раскрытия струи перегретой дистиллированной воды, истекающей из сосуда высокого давления через короткий канал в неподвижную воздушную среду при комнатной температуре и атмосферном давлении. Рабочий канал диаметром $d = 0.2 \text{ mm}$ был изготовлен в титановой пластине длиной $l = 1 \text{ mm}$ с острыми входной и выходной кромками. Начальные параметры (температура, давление) жидкости в рабочей камере соответствовали условиям на линии фазового

равновесия жидкость–пар и изменялись в соответствующих пределах: $T = 383\text{--}583 \text{ K}$, $p = 0.1\text{--}9.8 \text{ MPa}$.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии струи перегретой воды, характерные для различных перегревов, и данные об изменении угла раскрытия вскипающей струи соответственно. Из рисунков видно, что форма потока и величина угла раскрытия напрямую связаны с динамикой фазовых превращений и переходными режимами вскипания.

При невысокой степени пересыщения системы у струи сохраняется стержневой вид, как у холодной жидкости (рис. 1, *a*). С постепенным возрастанием температуры жидкости в рабочей камере усиливается интенсивность испарения с поверхности струи [12], что приводит к процессу разрушения жидкостного ядра (рис. 1, *b*) и формированию двухфазного факела распыла с растущим углом раскрытия (рис. 1, *c*). Смена формы струи от цилиндрической к конической наблюдалась в окрестности

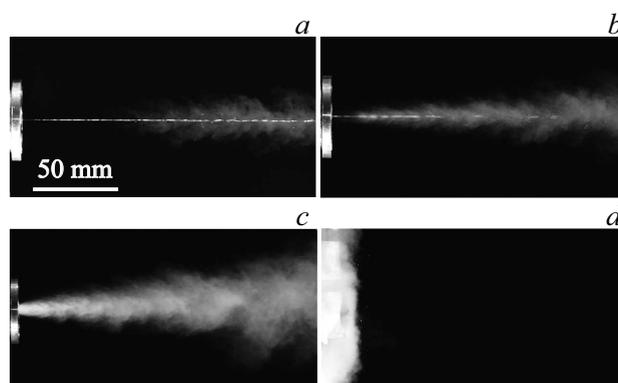


Рис. 1. Фотографии струи вскипающей воды при температурах $T = 433$ (*a*), 463 (*b*), 483 (*c*) и 573 K (*d*).

температуры $T = 463$ К (маленькая стрелка на рис. 2), при которой происходит смена режимов вскипания [1] — переход от единичных актов вскипания к гетерогенной нуклеации [9,10].

С ростом температуры в диапазоне от $T = 463$ до 493 К поток имел конический вид с увеличением угла раскрытия при вершине от $\alpha = 15$ до 60° (рис. 2). Дальнейший рост начальных термодинамических параметров жидкости приводил к более интенсивным фазовым превращениям (взрывное вскипание [9]) в струе перегретой воды. При температуре жидкости $T = 493$ К происходило изменение вида потока — переход от конической формы к дискообразной, сопровождающийся значительными пульсациями угла раскрытия. В температурном интервале $T = 503–583$ К наблюдалось устойчивое полное раскрытие струи (рис. 1, *d*). Отметим ряд особенностей, которые были обнаружены при полном развале в данном исследовании. Первая особенность состояла в смещении нижней (на 10 градусов) и верхней (на 35 градусов) температурных границ в сторону более высоких значений. Вторая особенность была связана с резким увеличением угла раскрытия струи от $\alpha = 60^\circ$ до развернутого угла. В случае использования цилиндрического канала с диаметром отверстия $d = 0.5$ мм переход к полному развалу происходил от $\alpha = 120^\circ$. В качестве третьей отличительной черты можно выделить проявление значительных пульсаций угла раскрытия вскипающей воды (показано большой стрелкой на рис. 2), которые наблюдались при переходе от конической к дискообразной форме струи.

Анализ колебаний проводился методом фотометрии лазерного излучения [4,13]. Лазерным лучом просвечивался двухфазный поток жидкости в поперечном направлении. Изменения интенсивности проходящего излучения фиксировались фотодиодом. Сигнал оцифровывался 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем и записывался в память компьютера. По полученным вре-

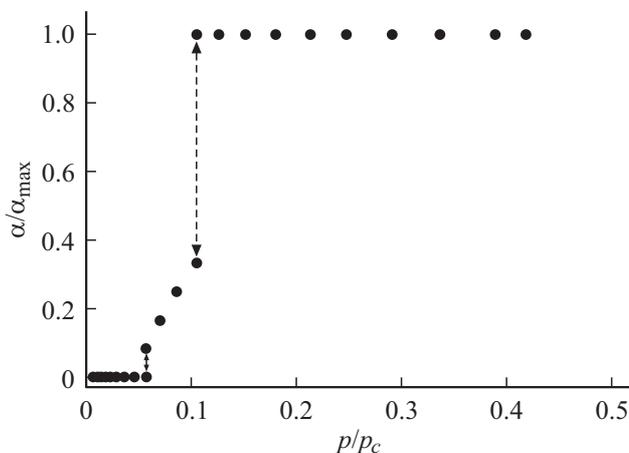


Рис. 2. Зависимость угла раскрытия струи перегретой жидкости от давления на бинадали (в приведенных координатах: $\alpha_{\max} = 180^\circ$, p_c — критическое давление жидкости). Стрелками показаны переходы от одной формы струи к другой.

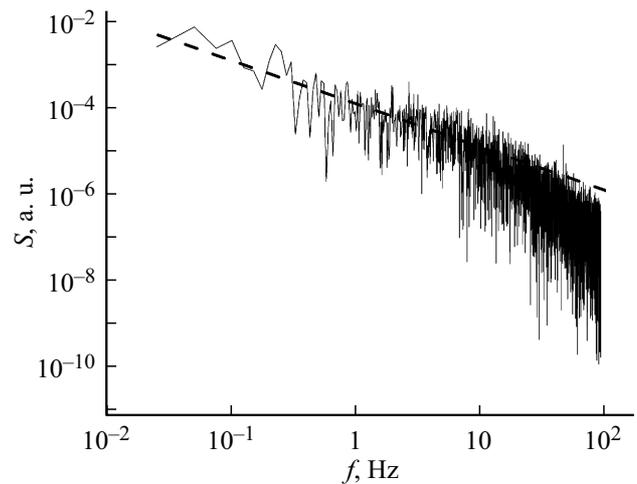


Рис. 3. Спектр мощности пульсаций угла раскрытия струи вскипающей воды при температуре $T = 463$ К. Штриховая линия — $S = 1/f$.

менным реализациям методом быстрого преобразования Фурье определялись спектры мощности пульсаций. Важность проведения подобной спектральной диагностики пульсаций заключается в возможности выявлять переходные и кризисные явления в системах различной природы [13–15].

В ранее проведенных работах было установлено, что в переходных или критических случаях наблюдается спектр мощности, изменяющийся обратно пропорционально частоте ($1/f$ -спектр) [1,4,15]. Такое поведение спектральной плотности свидетельствует о накоплении энергии на низких частотах и возможности возникновения крупномасштабных пульсаций, амплитуда которых соизмерима или даже превышает средние значения пульсирующих параметров [15]. На рис. 3 представлен спектр мощности, соответствующий пульсациям в струе метастабильной воды, нагретой до $T = 463$ и 493 К (для обеих температур спектр имел одинаковый вид). Как было отмечено выше, струя жидкости при таких значениях нагрева претерпевает смену форм, сопровождающуюся большими флуктуациями. При температуре $T = 463$ К наблюдается переход от цилиндрической формы к конической (интенсивное испарение сменяется вскипанием струи), а при температуре $T = 493$ К струя изменяет конический вид на дискообразный (резко возрастает интенсивность вскипания — переход к гетерогенному зародышеобразованию).

Таким образом, в настоящей работе экспериментально прослежено изменение формы и угла раскрытия струи перегретой воды в широком температурном интервале ($T = 383–583$ К) при истечении через короткий канал диаметром $d = 0.2$ мм. Подтверждено влияние интенсивных фазовых превращений как доминирующего фактора на процесс истечения метастабильной жидкости.

Важный аспект работы заключался в выявлении эффекта полного раскрытия струи для используемого ка-

нала, который имел место в широком диапазоне температур $T = 493\text{--}583\text{ К}$. Принципиальная новизна проведенных исследований состояла в обнаружении неустойчивости полного раскрытия струи. Также впервые было зафиксировано изменение угла раскрытия факела струи от малых значений ($\alpha = 60^\circ$) до развернутого угла.

Результаты исследований могут быть полезны для развития имеющихся представлений о механизмах распада метастабильных (перегретых) струй, а также для создания и совершенствования устройств, обеспечивающих объемное мелкодисперсное распыление.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00426).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.N. Pavlenko, V.P. Koverda, A.V. Reshetnikov, A.S. Surtaev, A.N. Tsoi, N.A. Mazheiko, K.A. Busov, V.N. Skokov, *J. Eng. Thermophys.*, **22** (3), 174 (2013). DOI: 10.1134/S1810232813030028
- [2] А.А. Авдеев, *Теплофизика высоких температур*, **54** (5), 742 (2016). DOI: 10.7868/S0040364416040037 [A.A. Avdeev, *High Temp.*, **54** (5), 698 (2016). DOI: 10.1134/S0018151X16040039].
- [3] F. Fathinia, M. Khiadani, Y.M. Al-Abdeli, *Powder Technol.*, **355**, 542 (2019). DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.081
- [4] А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, В.Н. Беглецов, В.Н. Скоков, В.П.Коверда, *Письма в ЖТФ*, **33** (17), 31 (2007). [A.V. Reshetnikov, N.A. Mazheiko, V.N. Begletsov, V.N. Skokov, V.P. Koverda, *Tech. Phys. Lett.*, **33** (9), 732 (2007). DOI: 10.1134/S1063785007090052].
- [5] J. Yan, S. Gao, W. Zhao, T.H. Lee, C.-F. Lee, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **179**, 121715 (2021). DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2021.121715
- [6] B. Ralph, J.L. York, *AIChE J.*, **8** (2), 149 (1962). DOI: 10.1002/aic.690080204
- [7] K.A. Busov, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **136**, 106199 (2022). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106199
- [8] A. Rees, L. Araneo, H. Salzmann, G. Lamanna, J. Sender, M. Oswald, *Exp. Fluids*, **61** (8), 182 (2020). DOI: 10.1007/s00348-020-03020-7
- [9] В.П. Скрипов, *Метастабильная жидкость* (Наука, М., 1972). [V.P. Skripov, *Metastable liquid* (Wiley, N.Y., 1974)].
- [10] В.П. Скрипов, Е.Н. Сеницын, П.А. Павлов, Г.В. Ермаков, Г.Н. Муратов, Н.В. Буланов, В.Г. Байдаков, *Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии* (Атомиздат, М., 1980).
- [11] О.А. Исаев, М.В. Неволин, В.П. Скрипов, С.А. Уткин, *Теплофизика высоких температур*, **26** (5), 1028 (1988). [O.A. Isaev, M.V. Nevolin, V.P. Skripov, S.A. Utkin, *High Temp.*, **26** (5), 878 (1988)].
- [12] П.А. Павлов, О.А. Исаев, *Теплофизика высоких температур*, **22** (4), 745 (1984). [P.A. Pavlov, O.A. Isaev, *High Temp.*, **22** (4), 603 (1984)].
- [13] K.A. Busov, N.A. Mazheiko, O.A. Kapitunov, V.N. Skokov, V.P. Koverda, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **157**, 119711 (2020). DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.119711
- [14] P. Lloveras, F. Salvat-Pujol, L. Truskinovsky, E. Vives, *Phys. Rev. Lett.*, **108** (21), 215701 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.215701
- [15] V.N. Skokov, V.P. Koverda, A.V. Reshetnikov, V.P. Skripov, N.A. Mazheiko, A.V. Vinogradov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **46** (10), 1879 (2003). DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00475-1