

03

Полное раскрытие вскипающей струи при истечении через короткие цилиндрические каналы

© К.А. Бусов, Н.А. Мажейко

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

Поступило в Редакцию 3 августа 2023 г.

В окончательной редакции 13 сентября 2023 г.

Принято к публикации 13 сентября 2023 г.

Проведено экспериментальное исследование динамики вскипания струи перегретой воды при истечении через короткие цилиндрические каналы с шестью различными диаметрами: $d = 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ и 0.6 mm. Прослежено изменение формы вскипающей струи в широком температурном интервале $T = 383–583$ K. Установлены необходимые условия для полного раскрытия потока. На основании экспериментальных данных построены карта форм истекающей жидкости и зависимость изменения угла раскрытия струи от начального давления жидкости на линии насыщения.

Ключевые слова: перегретая жидкость, взрывное вскипание, полное раскрытие струи, короткий цилиндрический канал.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56458.19698

Актуальность изучения процесса распыления веществ обусловлена широким практическим применением спреев в различных технических устройствах [1–3]. Особое внимание сосредоточено на получении мелкодисперсной среды с большими (включая развернутый) углами раскрытия. Одним из эффективных способов, позволяющих получить объемный тонкий распыл, является интенсивное вскипание жидкости [4–9]. При истечении жидкости через короткий прямой цилиндрический канал, за выходным срезом которого была установлена металлическая поверхность, имеющая цилиндрическую и диффузорную части, была обнаружена дискообразная форма двухфазного потока. Такой вид потока был замечен при истечении перегретой жидкости через цилиндрический канал длиной $l = 0.7$ mm и диаметром $d = 0.5$ mm [10]. Последующее экспериментальное изучение данного явления позволило определить условия, необходимые для полного раскрытия струи: использование короткого канала, интенсивное протекание фазового перехода жидкость–пар (взрывное вскипание), проявление эффекта Коанда и стационарность давления в рабочей камере [11].

В настоящей работе представлено обобщение экспериментальных результатов, полученных при исследовании изменения формы струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через различные короткие цилиндрические каналы в атмосферу. Каналы, диаметры которых изменялись от $d = 0.15$ до 0.6 mm, просверливались в титановых пластинах и имели острые входную и выходную кромки. Температура и давление жидкости в сосуде удовлетворяли условиям бинодали и изменялись в соответствующих пределах: $T = 383–583$ K, $p = 0.1–9.8$ МПа. Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента можно найти в работах [11,12].

В зависимости от степени нагрева жидкости в рабочей камере высокого давления в экспериментах наблюдались характерные виды струй [12–15]. До проявления вскипания в объеме жидкости у струи сохраняется цилиндрический вид. Возрастание начальной температуры воды в рабочей камере приводит к интенсивному испарению с поверхности струи и фазовым превращениям внутри истекающей жидкости, что ведет к формированию конического вида струи. Чем интенсивнее проявляется в потоке фазовый переход жидкость–пар, тем больший угол раскрытия наблюдается у двухфазной струи. В случае реализации ударного режима вскипания (взрывное вскипание) происходит полное раскрытие перегретой жидкости (веерная форма струи). Комплексное изучение процесса истечения горячей воды через цилиндрические каналы различного диаметра позволило обобщить результаты экспериментов и построить карту форм рабочей жидкости (рис. 1). Области на рис. 1 соответствуют той стабильной форме, которую приобретает среда в процессе истечения из сосуда высокого давления через короткий цилиндрический канал. При анализе данной карты можно заметить некоторые черты в формообразовании потока, имеющие как общий характер, так и частные особенности. Отметим наиболее важные из полученных экспериментальных результатов.

1. При использовании каналов с диаметрами от $d = 0.15$ до 0.5 mm в характерных температурных интервалах наблюдались три различных вида струи: цилиндрический, конический, полное раскрытие.

2. Диаметр канала, равный $d = 0.5$ mm, оказался максимальным, применение которого позволяло наблюдать эффект полного раскрытия вскипающей жидкости. При большем диаметре канала дискообразная форма струи обнаружена не была [11].

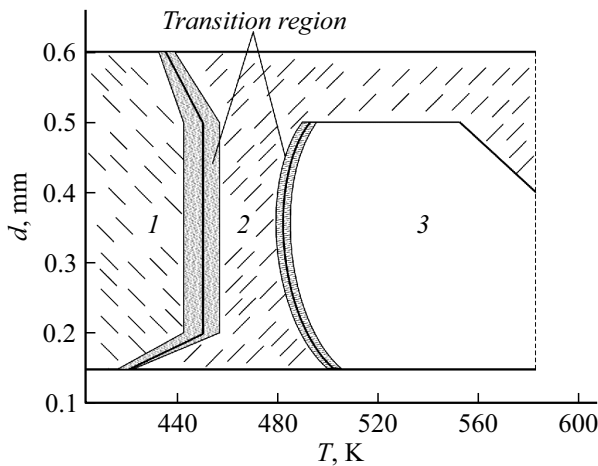


Рис. 1. Карта форм струи перегретой воды. 1 — цилиндрический вид, 2 — конический вид, 3 — полное раскрытие.

3. В случае истечения горячей воды через короткий канал диаметром $d = 0.15 \text{ mm}$ переход от стержневого вида струи к конусообразному происходил при более низких температурах, а переход от конической формы к дискообразной имел место при более высоких температурах, чем для других каналов.

4. Коническая форма вскипающей жидкости (область 2) для каналов с диаметрами $d = 0.3$ и 0.4 mm была зафиксирована в узком температурном диапазоне (от 450 до 480 К).

5. Полное раскрытие струи выявлено только тогда, когда в струе реализовывался механизм взрывного вскипания в условиях стационарного истечения.

В качестве еще одного следствия следует заметить, что переход от стержневого вида струи к конической форме происходил в более широком температурном интервале по сравнению с переходом от конического вида потока к дискообразному. В обоих случаях в процессе перехода от одного вида вскипающей жидкости к другому наблюдалась резкая смена форм (рис. 2).

Значительное количество отличительных признаков формообразования струи свидетельствует о значимости выбора определенного канала и о возможностях его применения.

В зависимости от степени пересыщения жидкости происходило изменение ее угла раскрытия. На рис. 3 в безразмерных координатах показано, как изменялся угол струи с ростом начальных параметров в рабочей камере. В качестве масштаба для угла раскрытия струи выбран развернутый угол ($\alpha/\alpha_{\text{max}}$, $\alpha_{\text{max}} = 180^\circ$), для давления — давление термодинамической критической точки воды (p/p_c , $p_c = 22.1 \text{ MPa}$).

Видно, что для всех исследованных каналов существует некоторый диапазон давлений (для каждого из изученных каналов данный диапазон имеет свои характерные границы), в котором струя имеет нулевой угол раскрытия до проявления в ее объеме фазовых превращений.

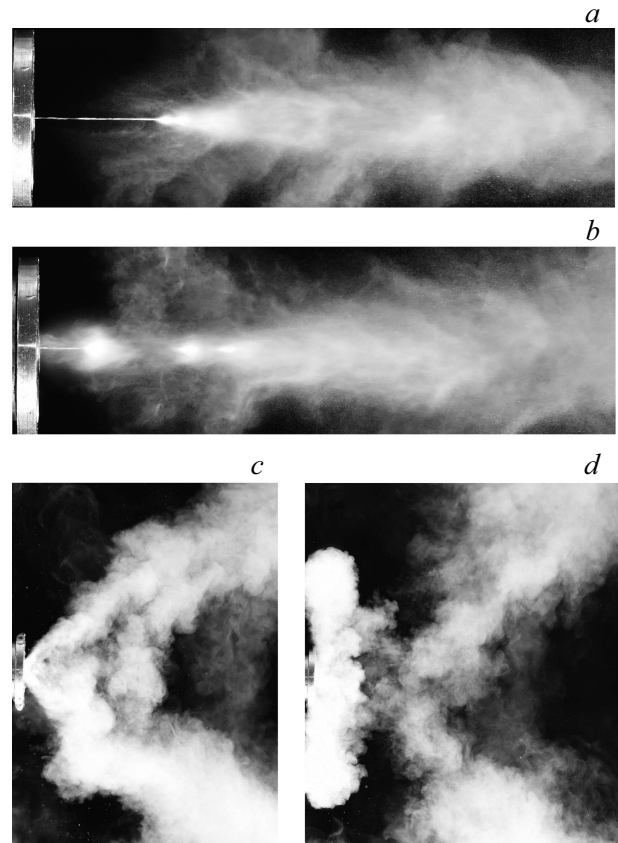


Рис. 2. Неустойчивость формы струи вскипающей воды при переходе от стержневого (а) к коническому виду (b) и при переходе от конического вида (c) к полному раскрытию (d).

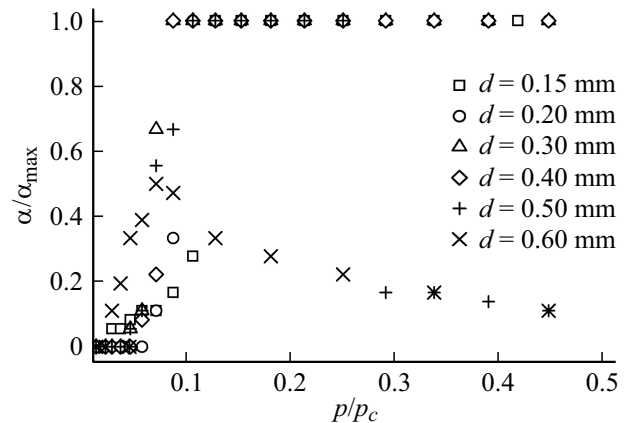


Рис. 3. Зависимость изменения угла раскрытия струи от начального давления жидкости (в приведенных координатах).

Чем с большей интенсивностью в истекающей среде начинают проявляться акты рождения и взаимодействия пузырьков пара, тем более резко ее угол раскрытия начинает возрастать. А при реализации интенсивного вскипания (ударный режим кипения) угол раскрытия струи вскипающей жидкости достигал максимальных значений ($\alpha = 180^\circ$). Особенным образом происходило

распыление жидкости при ее истечении через канал диаметром $d = 0.6 \text{ mm}$. В этом случае наблюдались более ранний рост угла раскрытия, достижение максимума ($\alpha = 90^\circ$) при взрывном вскипании и последующее уменьшение.

Таким образом, в данной экспериментальной работе проведено обобщение результатов комплексного исследования истечения струи метастабильной воды, истекающей из камеры высокого давления через короткие цилиндрические каналы в неподвижную воздушную среду. В ходе опытов прослежено изменение формы и угла раскрытия струи перегретой воды в широком температурном интервале $T = 383\text{--}583 \text{ K}$ для всех использованных каналов. Построены карта форм потока и зависимость изменения угла раскрытия струи от начальных условий. Установлены температурные интервалы, соответствующие определенному виду вскипающей струи. В случае изменения формы истекающей жидкости выявлена потеря ее устойчивости, сопровождающаяся значительными флуктуациями.

Также результаты исследований показали, что использование прямых цилиндрических каналов различных диаметров может служить достойной альтернативой сложным форсункам, процесс распыления через которые осуществляется с применением дорогостоящего оборудования.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00426 (<https://rscf.ru/project/22-29-00426/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.H. Lefebvre, V.G. McDonell, *Atomization and sprays* (CRC Press, Boca Raton, 2017).
- [2] J. Eggers, E. Villermaux, *Rep. Prog. Phys.*, **71** (3), 036601 (2008). DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601
- [3] *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*, ed. by N. Ashgriz (Springer, N.Y., 2011).
- [4] В.П. Скрипов, *Метастабильная жидкость* (Наука, М., 1972). [V.P. Skripov, *Metastable liquid* (Wiley, N.Y., 1974)].
- [5] В.П. Скрипов, Е.Н. Сеницын, П.А. Павлов, *Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии* (Атомиздат, М., 1980).
- [6] К.А. Бусов, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **136**, 106199 (2022). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106199
- [7] В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Щигель, *Прикладная механика и техническая физика*, **64** (3), 32 (2023). DOI: 10.15372/PMTF202215177 [V.I. Zalkind, Yu.A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Shchigel', *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **64** (3), 388 (2023). DOI: 10.1134/S0021894423030045].
- [8] Р.Х. Болотнова, В.А. Коробчинская, *Теплофизика и аэромеханика*, **24** (5), 783 (2017). [R.K. Bolotnova, V.A. Korobchinskaya, *Thermophys. Aeromech.*, **24** (5), 761 (2017). DOI: 10.1134/S0869864317050110].
- [9] Т. Bar-Kohany, M. Levy, *Atom. Sprays*, **26** (12), 1259 (2016). DOI: 10.1615/AtomizSpr.2016015626
- [10] 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)].
- [11] К.А. Бусов, *Инж.-физ. журн.*, **96** (1), 66 (2023). [K.A. Busov, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **96** (1), 64 (2023). DOI: 10.1007/s10891-023-02662-8].
- [12] А.В. Решетников, К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков, В.П. Коверда, *Теплофизика и аэромеханика*, **19** (3), 359 (2012). [A.V. Reshetnikov, K.A. Busov, N.A. Mazheiko, V.N. Skokov, V.P. Koverda, *Thermophys. Aeromech.*, **19** (2), 329 (2012). DOI: 10.1134/S0869864312020151].
- [13] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, О.А. Капитонов, В.Н. Скоков, В.П. Коверда, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **157**, 119711 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119711
- [14] 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
- [15] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков, *Письма в ЖТФ*, **48** (24), 8 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54015.19373 [K.A. Busov, N.A. Mazheiko, V.N. Skokov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (12), 45 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54946.19373].