03

Отклонение оси струи вскипающей воды при ее истечении через наклонный цилиндрический канал

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

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

Поступило в Редакцию 15 января 2026 г.
В окончательной редакции 6 апреля 2026 г.
Принято к публикации 6 апреля 2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния угла наклона короткого цилиндрического канала диаметром $d = 0.4\,\text{mm}$ на форму струи перегретой воды. Исследовано изменение вида вскипающей струи в широком температурном интервале $T_s = 110{-}310\,^\circ\text{C}$. Построены зависимости угла раскрытия и угла отклонения оси потока (относительно оси канала) от изменения температуры рабочей жидкости в сосуде высокого давления. Выявлено значительное отклонение оси факела распыла вскипающей жидкости от оси цилиндрического канала.

Ключевые слова: перегретая жидкость, взрывное вскипание, короткий цилиндрический канал, угол отклонения.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63145.20626

Интерес к изучению потоков вскипающей жидкости [1,2], с одной стороны, связан с получением новых и расширением полученных знаний о веществе, находящемся в метастабильном состоянии. Свободная (не взаимодействующая с другими потоками и с элементами установки) струя перегретой жидкости является уникальной тепловой системой, по характерному внешнему виду которой (форма, угол раскрытия, устойчивость течения) можно судить о происходящих в ней внутренних процессах (появление, рост и взаимодействие между собой паровых пузырьков), что позволяет рассматривать вскипающие потоки вещества как существенное дополнение к известным теплофизическим комплексам и методам исследования перегретых жидкостей: метод нагрева капелек [3], пузырьковая камера [4], метод импульсного нагрева [5,6], вскипание жидкости в стеклянном капилляре [7,8], метод измерения времени жизни [9] и др.

С другой стороны, внимание к перегретым средам обусловлено их различным практическим применением, так как при интенсивных фазовых превращениях появляются условия создания объемной, однородной и мелкодисперсной среды [10–12]. При комплексном подходе (достижение необходимой степени перегрева, выбор геометрии канала и установление за ним определенной формы конструкционных элементов, вследствие взаимодействия с которыми происходит формирование факела распыла) возникают интересные возможности (невоспроизводимые или требующие дополнительного оборудования и подвода энергии при истечении недогретого вещества) для эффективного и рационального использования метастабильной жидкости. В качестве примеров можно привести эффект полного раскрытия вскипающего потока [13,14], явление отклонения оси струи (до 18°) от оси выходного отверстия, которое наблюдалось при истечении метастабильной воды через каналы с косым срезом [15].

В данной экспериментальной работе обнаружено значительное отклонение вскипающей струи перегретой воды при ее истечении через прямой цилиндрический канал с острыми входной и выходной кромками, просверленный в миллиметровой пластине из нержавеющей стали под углом $\beta = 10^\circ$ (рис. 1). Исследования проводились при использовании многофункциональной экспериментальной установки, обеспечивающей герметичность и нагрев исследуемой жидкости до высоких температур ($T_s = 310\,^\circ\text{C}$) при высоком давлении ($p_s = 9.9\,\text{MPa}$).

Результаты проведенных опытов с прямым коротким цилиндрическим каналом [10,14], просверленным нормально к плоскости пластины, показали, что форма струи изменяется при различных степенях перегрева, но при этом сохраняет симметричный вид относительно оси канала. Никаких отклонений оси потока от оси канала в этом случае замечено не было.

При установке пластины, в которой цилиндрический канал был просверлен под углом $\beta = 10^\circ$, в зависимости от нагрева наблюдались определенные формы струи перегретой воды (рис. 2, 3). Также на основании опытных данных были построены графики, отражающие изменение угла раскрытия и угла отклонения оси струи вскипевшей жидкости во всем изученном температурном интервале (рис. 4).

До момента проявления фазовых превращений в объеме истекающей жидкости ось струи совпадала с осью канала. При относительно небольших степенях перегрева, когда температура жидкости не превышала $T_s = 120\,^\circ\text{C}$, наблюдалась сплошная цилиндриче-

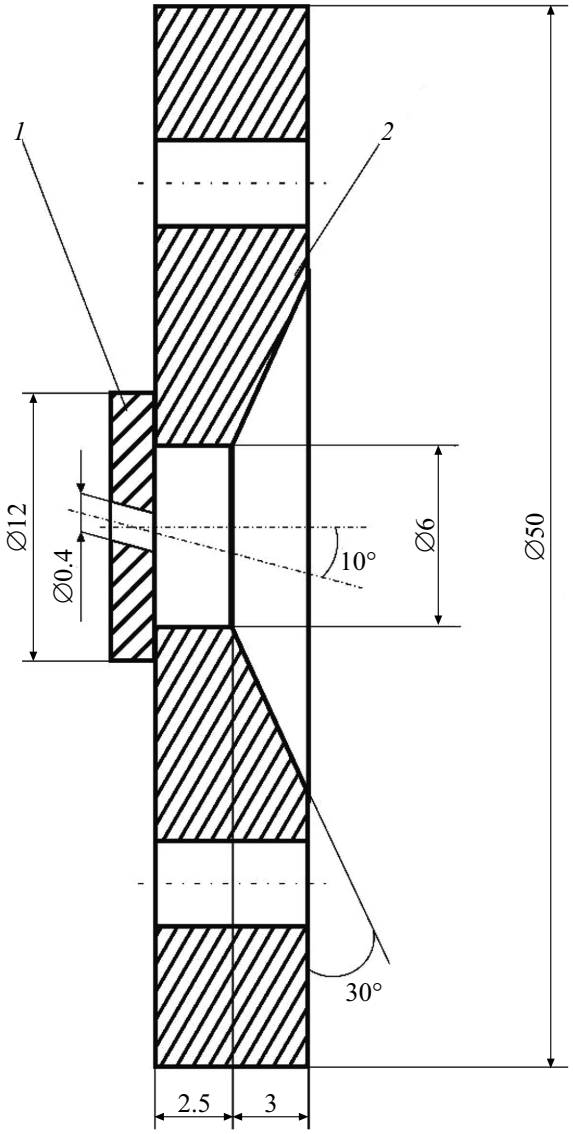


Рис. 1. Разрез короткого цилиндрического канала (*1*) и прижимного фланца (*2*), имеющего цилиндрическую и диффузорную части.

ская часть струи вблизи выходного сечения канала, а вниз по потоку происходило ее дробление на растянутые фрагменты и очень крупные капли. В интервале температур $120 < T_s < 160\,^{\circ}\mathrm{C}$ у потока изучаемой среды сплошная часть отсутствовала: струя полностью дробилась на отдельные части и крупные капли (рис. 2, *a*). С достижением температуры $T_s = 160\,^{\circ}\mathrm{C}$ наблюдались три важные особенности в истечении метастабильной жидкости: увеличение угла факела распыла (угол между видимыми границами) струи, отклонение оси струи от оси канала и уменьшение размеров капель, составляющих поток (рис. 2, *b*).

На рис. 3 представлены фотографии вскипевшей воды, хорошо отражающие значимое взаимное влияние термических и конструкционных условий на формирование распыления метастабильного вещества.

Так, при нагреве жидкости до температуры $T_s = 180\,^{\circ}\mathrm{C}$ наблюдается более объемная (по сравнению с предыдущими случаями) форма потока в виде конуса (рис. 3, *a*). Также становится заметным увеличение угла отклонения оси струи, которое составляло около $\theta = 10^{\circ}$.

Дальнейшее возрастание степени перегрева жидкости приводит к ее взрывному вскипанию. В объеме струи происходит экспоненциальный рост и интенсивное взаимодействие критических пузырьков пара, растягивающих жидкость на тонкие пленки, при разрыве которых возникают мельчайшие капли. В температурном интервале $T_s = 210{-}250\,^{\circ}\mathrm{C}$ у вскипающей струи жидкости были зафиксированы наибольшие значения угла раскрытия и угла отклонения (рис. 3, *b*, 4, *a*, *b*). На фотографиях вскипающих струй (рис. 3) хорошо заметно отклонение потока вверх, т. е. против силы тяжести (цилиндрический канал был установлен так, как показано на рис. 1), что связано с явлением отражения капель от поверхности прижимного фланца. Вследствие возрастания интенсивности фазовых превращений в объеме струи перегретой жидкости формировался капельный поток, состав которого менялся в зависимости от степени перегрева жидкости. С ростом температуры происходило значительное уменьшение размеров капель и резкое увеличение их числа, что приводило к усилению эффекта отражения частиц от фланца и большему отклонению струи.

Важно отметить факт отсутствия полного раскрытия струи, которое имело место для указанного интервала температур в случае использования прямого цилиндри-



Рис. 2. Формы струи воды при небольших степенях перегрева, соответствующие температурам в рабочей камере $T_s = 140$ (*a*) и $160\,^{\circ}\mathrm{C}$ (*b*).

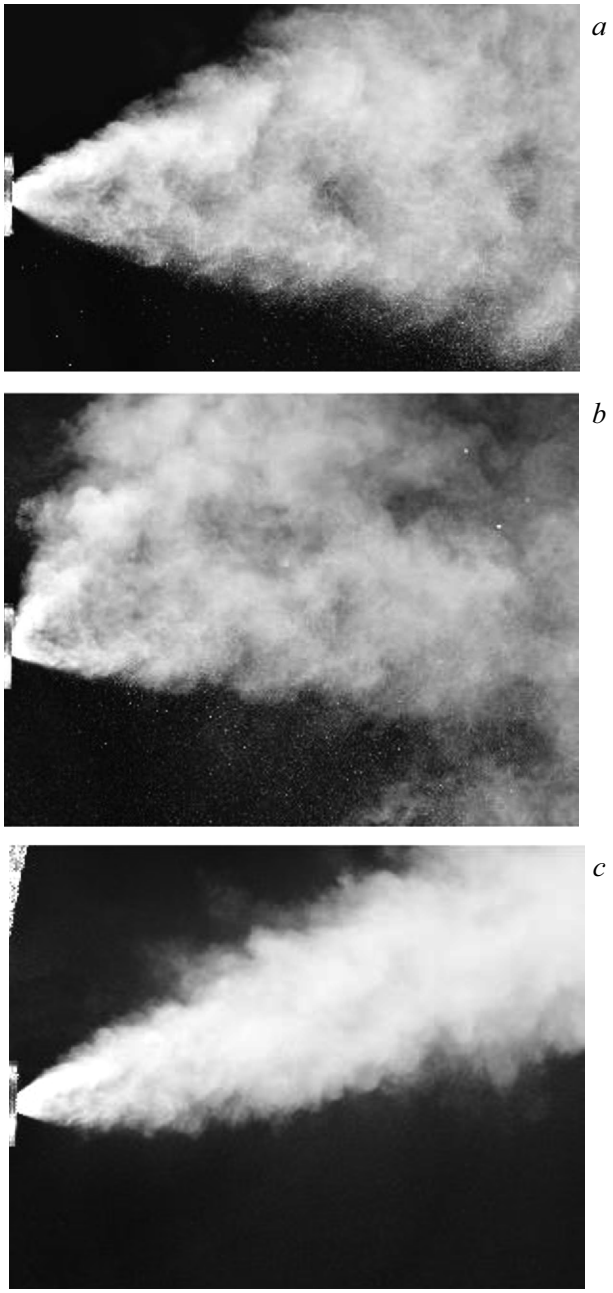


Рис. 3. Струи перегретой воды при высоких температурах: $T_s = 180$ (a), 210 (b) и 310 °C (c).

ческого канала, нормально просверленного в стальной пластине [10,13,14].

В диапазоне температур $T_s = 260-310$ °C, когда вступал в силу механизм гомогенной нуклеации [1], вскипание происходило в непосредственной близости от выходной кромки канала. При интенсивном фазовом переходе жидкость–пар возникал факел распыла, имеющий достаточно большой угол раскрытия (около $\alpha = 100°$), из-за чего происходило непосредственное взаимодействие движущегося объемного потока с цилиндрической частью прижимного фланца. Вследствие данного взаимодействия наблюдалось уменьшение угла раскрытия конуса струи вскипевшей жидкости (рис. 3, c) и уменьшение угла отклонения ее оси от оси цилиндрического канала (рис. 4, a, b).

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование вскипающей струи дистиллированной воды, истекающей через прямой наклонный цилиндрический канал, позволило получить новые важные данные об изменении формы, угла раскрытия и угла отклонения потока вскипающей воды в очень широком диапазоне температур. Принципиальной новизной настоящего исследования является обнаружение явления более значительного отклонения (относительно оси цилиндрического канала) оси струи сильно перегретой жидкости при ее истечении через наклонный канал с прижимным фланцем (рис. 1) в сравнении со случаем истечения жидкости через каналы с косым срезом [15].

Показано, что достижение необходимых термодинамических условий в эксперименте и использование деталей определенной формы значительно влияют на формообразование потока, что открывает широкие возможности для прикладных аспектов в вопросах регулируемого распыления.

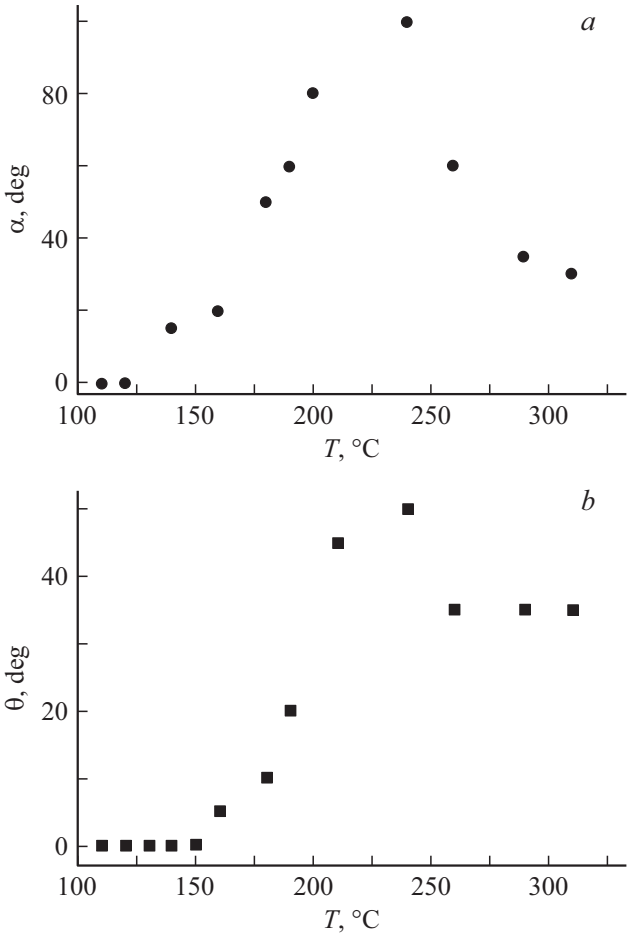


Рис. 4. Зависимость угла раскрытия (a) и угла отклонения (b) вскипающей струи жидкости от температуры.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01039 (https://rscf.ru/project/25-29-01039/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] В.П. Скрипов, *Метастабильная жидкость* (Наука, М., 1972). [V.P. Skripov, *Metastable liquid* (Wiley, N.Y., 1974).].
[2] 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
[3] Е.Н. Синицын, В.П. Скрипов, ЖФХ, **42** (4), 844 (1968).
[4] F.D. Becchetti, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **784**, 518 (2015). DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.030
[5] D.V. Volosnikov, I.I. Povolotskiy, P.V. Skripov, Appl. Therm. Eng., **236** (3), 121532 (2023). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121532
[6] P.V. Skripov, S.B. Rutin, L. Chen, J. Supercrit. Fluids, **218** (1), 106516 (2025). DOI: 10.1016/j.supflu.2025.106516
[7] E.V. Lipnyagov, M.A. Parshakova, Int. J. Heat Mass Transf., **196** (5), 123254 (2022). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123254
[8] E.V. Lipnyagov, M.A. Parshakova, Int. J. Heat Mass Transf., **218** (9), 124811 (2024). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124811
[9] V.G. Baidakov, A.M. Kaverin, A.S. Pankov, Int. J. Heat Mass Transf., **221** (1), 125050 (2024). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125050
[10] О.А. Исаев, М.В. Неволин, В.П. Скрипов, С.А. Уткин, ТВТ, **26** (5), 1028 (1988). [O.A. Isaev, M.V. Nevolin, V.P. Skripov, S.A. Utkin, High Temp., **26** (5), 878 (1988).].
[11] K.A. Busov, Int. Commun. Heat Mass Transf., **136**, 106199 (2022). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106199
[12] K.A. Busov, N.A. Mazheiko, V.A. Shurupov, J. Eng. Thermophys., **34** (3), 567 (2025). DOI: 10.1134/S1810232825700055
[13] K.A. Busov, N.A. Mazheiko, O.A. Kapitunov, V.N. Skokov, V.P. Koverda, Int. J. Heat Mass Transf., **157**, 119711 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119711
[14] К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, Письма в ЖТФ, **49** (21), 18 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.21.56458.19698 [K.A. Busov, N.A. Mazheiko, Tech. Phys. Lett., **49** (11), 15 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.11.57190.19698].
[15] Б.П. Жилкин, Л.В. Плотников, Н.С. Кочев, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, К.А. Бусов, ТВТ, **57** (3), 431 (2019). DOI: 10.1134/S0040364419030220 [B.P. Zhilkin, L.V. Plotnikov, N.S. Kochev, A.V. Reshetnikov, N.A. Mazheiko, K.A. Busov, High Temp., **57** (3), 393 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19030209].