

## ВСКИПАНИЕ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КАНАЛ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

© 2021 г. К. А. Бусов\*, Н. А. Мажейко

ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

\*E-mail: kbusov@itp.uran.ru

Поступило в редакцию 26.02.2020 г.

После доработки 05.08.2020 г.

Принято к публикации 04.02.2021 г.

Представлены результаты экспериментального исследования динамики вскипания струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через короткий канал квадратного сечения в атмосферу. Прослежено изменение формы струи при различных степенях перегрева. Установлен эффект полного развала струи – конус с развернутым углом раскрытия. Обнаружена потеря устойчивости полного раскрытия струи при температуре  $T = 540$  К. Для различных режимов вскипания в безразмерных координатах получена зависимость изменения угла раскрытия струи от степени перегрева рабочей жидкости.

DOI: 10.31857/S0040364421020022

### ВВЕДЕНИЕ

В задачах регулируемого распыления до сих пор остаются не до конца изученными вопросы, связанные с дисперсионным составом капель, формообразованием, развитием и устойчивостью факела распыла вещества. Перегрев жидкости является одним из эффективных способов создания мелкодисперсной среды различной формы [1–6], состоящей из капель субмикронного размера [7]. Получение тонкого распыла определенной формы актуально для эффективной и безопасной работы различных технических устройств (струйный принтер, противопожарная техника, опреснительные установки, двигатели внутреннего сгорания и т.д.). Однако, несмотря на использование перегретых веществ во многих технических и энергетических приложениях, как показал анализ публикаций, вопрос о влиянии геометрии канала на струю вскипающей жидкости не изучен.

Экспериментальные исследования показали, что проявление различных эффектов в совокупности с интенсивным фазовым переходом может приводить к радикальным изменениям в структуре течения жидкости. Одним из ярких примеров подобного изменения в поведении потока является резкое увеличение угла раскрытия струи (от  $120^\circ$  до  $180^\circ$ ) перегретой жидкости при реализации взрывного вскипания [8, 9] и проявлении эффекта Коанда [10, 11]. Вследствие скачкообразного увеличения угла раскрытия струи происходит резкое уменьшение ее реактивной отдачи – снижение до нулевых, а в некоторых случаях и до отрицательных значений [12]. Данный характер резкого изменения угла раскрытия струи и ее реактивного усилия был зафиксирован при истечении перегретой жидкости через короткий цилин-

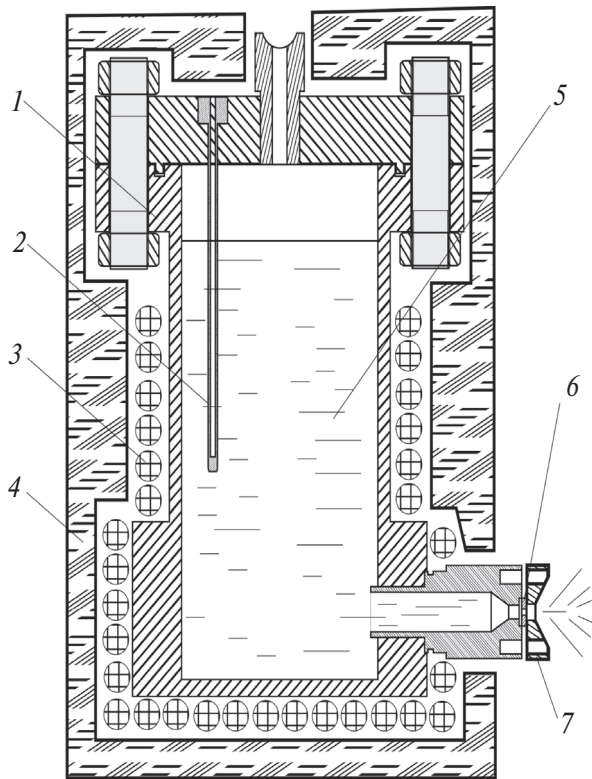
дрический канал, крепящийся к сосуду высокого давления посредством прижимного фланца, имеющего диффузорную часть. Именно при такой конструкции прижимного фланца были выявлены аномальные эффекты в поведении формы и реактивной отдачи струй вскипающих жидкостей. В случае использования короткого щелевого канала с применением диффузорного прижимного фланца резких изменений параметров истекающей струи зафиксировано не было [13].

Таким образом, одним из способов поиска необходимых и достаточных условий для проявления, усиления, ослабления или подавления тех или иных явлений, наблюдающихся при истечении струй перегретых жидкостей, является использование каналов различной геометрии.

Цель настоящего исследования заключается в анализе динамики вскипания и изучения изменения формы, угла раскрытия струи перегретой воды, истекающей через короткий квадратный канал с острыми входными и выходными кромками в атмосферу.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментального изучения струй перегретой воды использовался сосуд высокого давления, представляющий собой стальной стакан объемом  $V = 0.65$  л, разрез которого показан на рис. 1. Перевод нагретой жидкости в область газовых состояний осуществлялся методом резкого сброса давления ( $\sim 10^5$  МПа/с) при использовании короткого квадратного канала (рис. 2) со сторонами  $a = 0.6$  мм и длиной  $l = 0.7$  мм, изготовленного в титановой пластине.



**Рис. 1.** Разрез рабочей камеры: 1 – корпус, 2 – кожух для термопары, 3 – нагревательный элемент, 4 – теплоизоляционный материал, 5 – исследуемая жидкость, 6 – короткий квадратный канал, 7 – диффузорный прижимной фланец.

В таблице приведены данные исследований времени истечения холодной жидкости при различных начальных давлениях в рабочей камере, которые позволили определить площадь поперечного сечения канала с учетом шероховатости стенок. Для каждого эксперимента сосуд заполнялся одинаковым объемом жидкости  $V = 0.45$  л.

Массовый расход и удельный массовый расход жидкости вычислялись по следующим уравнениям:

$$G = \frac{\rho V}{t_0}, \quad g = \mu \sqrt{2\rho(p_0 - p_a)},$$

где  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$  – плотность жидкости,  $V = 0.45$  л – объем,  $t_0$  – время истечения жидкости,  $\mu = 0.6$  –

Расходные характеристики короткого квадратного канала

$p_0$ , МПа	$t_0$ , с	$G$ , г/с	$g$ , г/(мм <sup>2</sup> с)	$S$ , мм <sup>2</sup>
0.5	63	7.1	16.9	0.42
1	45	10.0	25.4	0.39
2	32	14.1	36.9	0.38
4	21	21.4	52.9	0.40
6	17	26.5	65.2	0.41
8	15	30.0	75.4	0.40

гидравлический коэффициент расхода,  $p_0$  – начальное давление в сосуде,  $p_a$  – атмосферное давление.

Площадь квадратного канала определялась как отношение массового расхода к удельному массовому расходу:  $S = G/g$ .

Стационарный режим истечения перегретой воды в зависимости от начальных условий (температура, давление) внутри рабочей камеры наблюдался в течение 10–135 с. Изменение времени истечения перегретой воды от изменения начального давления в сосуде показано на рис. 3. Результаты обобщены эмпирической формулой

$$t = 53.47 p^{-0.5}.$$

По полученным фото- и видеоматериалам производился анализ форм струй вскипающей воды при различных степенях перегрева. О механизмах парообразования в струях перегретых жидкостей изложено в работах [13–15]. Особое внимание в данных исследованиях уделено изменению угла раскрытия струи. Термодинамические параметры жидкости (температура, давление) соответствовали линии фазового равновесия. Форма струи перегретой жидкости достаточно чувствительна (рис. 4) к изменению начальных температуры и давления внутри сосуда и может быть использована в качестве индикатора степени пересыщения системы.

При относительно невысоких температурах ( $T < 420$  К) сохраняется сплошное жидкостное ядро струи, как у холодной жидкости (рис. 4а). Процесс разрушения потока в этом случае связан с капиллярной неустойчивостью или неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. При увеличении интенсивности испарения с поверхности струи (проявление механизма барокапиллярной неустойчивости [16]) жидкостная сердцевина разрушается и струя приобретает коническую форму (рис. 4б), состоящую преимущественно из крупных капель. Дальнейший рост перегрева приводит к более интенсивному рождению, росту и взаимодействию паровых пузырьков. Это находит отражение в монотонном увеличении угла факела распыления (рис. 4в–4д).

В температурном диапазоне от 480 до 540 К наблюдается полное раскрытие вскипающей струи, которое проявлялось и при истечении перегретой воды через цилиндрический канал. Однако при истечении через квадратный канал наблюдались четыре выделенные направления (рис. 4е). На рис. 5 схематично изображен вид сбоку полного развала вскипевшей струи. Из рис. 4е и 5 видно, что струя примыкает к внешней поверхности фланца и растекается только в радиальном направлении вследствие проявления интенсивного (взрывного) вскипания и эффекта Коанда.

При температуре  $T = 540$  К проявлялся режим неустойчивого истечения – форма струи за короткие промежутки времени принимала или вид конуса с

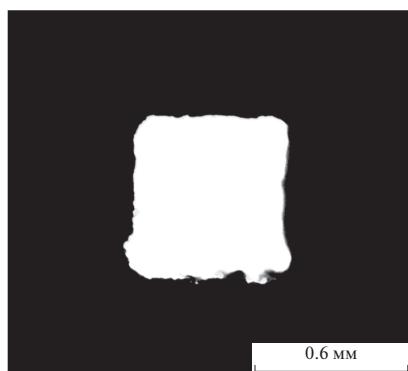


Рис. 2. Фотография канала квадратного сечения.

развернутым углом раскрытия (рис. 4е), или коническую форму с углом при вершине около  $30^\circ$  (рис. 2ж). Данное нерегулярное изменение формы вскипающей струи было замечено также в экспериментах с коротким цилиндрическим каналом при использовании пассивных завихрителей [17]. Подобные резкие изменения формы потока свидетельствуют о проявлении гигантских выбросов в системе и характеризуются низкочастотными пульсациями с обратно пропорциональной зависимостью от частоты [18–20]. Такого рода флуктуации возникают при переходных режимах системы от одного состояния к другому и могут интерпретироваться как неравновесные фазовые переходы [21]. Потеря устойчивости струи в окрестности  $T = 540$  К объясняется смещением сечения вскипания в глубь канала, что приводит к смене режимов, влияющих на формообразование потока. При приближении начальных параметров системы к условиям интенсивного гомогенного зародышеобразования никаких резких изменений в поведении вскипающего потока не наблюдается и струя перегретой жидкости принимает устойчивую форму конуса с небольшим углом раскрытия (рис. 4з).

Следует отметить, что квадратный канал имел шероховатую поверхность стенок (рис. 2). Проведенные экспериментальные исследования показали, что температурные границы, при которых происходит полное раскрытие струи, вытекающей через квадратный канал, полностью совпадают с температурными границами, при которых наблюдались идентичные изменения для струи, истекающей через цилиндрический канал. Имеющиеся неоднородности и дефекты квадратного канала, которые могли выступать в качестве готовых (легкоактивируемых) центров кипения, не оказали значительного влияния на процесс формообразования струи вскипающей воды. Таким образом, важным заключением является то, что интенсивный (взрывной) характер рождения и взаимодействия паровых зародышей в значительной степени перекрывает влияние других факторов, способных оказать какое-либо влияние на вскипающую струю жидкости, истекающей через рассматриваемый квадратный канал. Однако данный вывод не является общим для всех

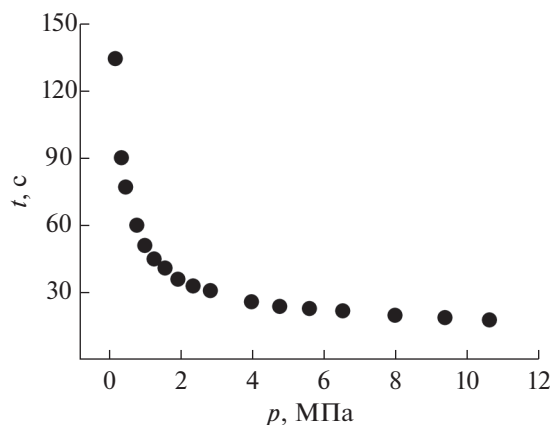


Рис. 3. Зависимость времени истечения фиксированного объема жидкости от начального давления.

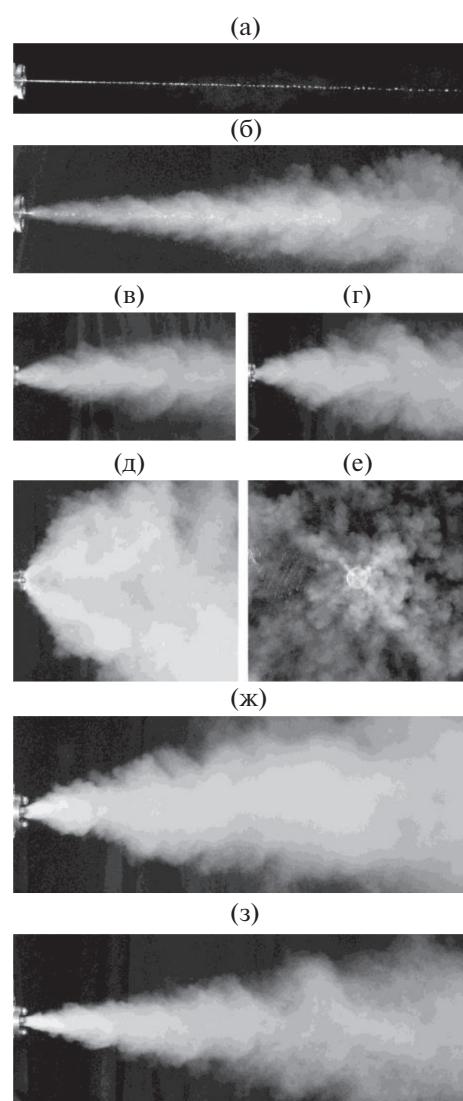
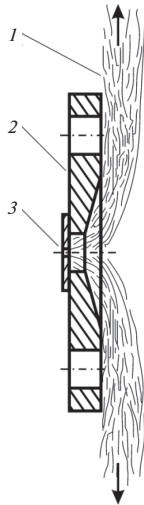


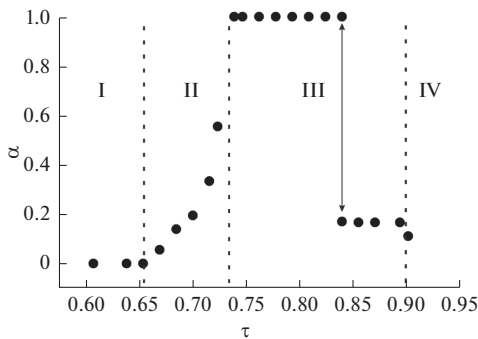
Рис. 4. Изменение формы струи вскипающей воды при различных температурах: (а) –  $T < 420$  К, (б) –  $T = 430$ , (в) – 440, (г) – 450, (д) – 460, (е) –  $475 < T < 540$  (вид спереди), (ж) –  $540 < T < 570$ , (з) – 580.



**Рис. 5.** Полное раскрытие струи (вид сбоку) перегретой воды: 1 – струя вскипевшей жидкости, 2 – прижимной фланец, 3 – короткий квадратный канал; стрелки – направление движения струи.

каналов, имеющих шероховатости. Так, например, исследования, проведенные с щелевым каналом, показали, что переход от единичных и не взаимодействующих центров кипения к интенсивному гетерогенному зародышеобразованию происходил при более низких температурах вследствие облегченного вскипания на неоднородностях канала [13].

На рис. 6 в безразмерных координатах показано изменение угла раскрытия струи при различных режимах кипения. В качестве масштаба для угла раскрытия струи выбран развернутый угол ( $\alpha = \beta/\beta_{\max}$ ,  $\beta_{\max} = 180^\circ$ ), для температуры – температура термодинамической критической точки воды ( $\tau = T/T_c$ ,  $T_c = 647 \text{ К}$ ). Смена одного режима вскипания другим находит отражение в изменении угла раскрытия вскипающей струи. При малых перегревах ( $\tau < 0.65$ , область I) поток имеет вид не вскипающей среды с



**Рис. 6.** Зависимость угла раскрытия струи от температуры (в приведенных координатах); I, II, III, IV – условные области малых, умеренных, высоких и предельных перегревов соответственно; стрелка – неустойчивость течения при максимальном раскрытии вскипающей струи.

нулевым углом раскрытия. Для умеренных перегревов ( $0.65 < \tau < 0.75$ , область II) наблюдается постепенное увеличение угла до  $\beta = 100^\circ$ , сменяющееся резким скачком до  $\beta_{\max} = 180^\circ$  при переходе в область высоких перегревов ( $0.75 < \tau < 0.9$ , область III). При  $\tau = 0.84$  проявляется неустойчивый полный развал вскипающего потока, вследствие захода сечения вскипания в глубь канала. С дальнейшим увеличением интенсивности вскипания в потоке перегретой жидкости не происходит каких-либо существенных изменений. Угол раскрытия струи остается неизменным. Обращает на себя внимание скачкообразный переход от развернутого угла раскрытия струи к конусу с углом  $\beta = 30^\circ$ , который происходит без промежуточного монотонного уменьшения угла раскрытия. В условиях глубокой метастабильности (реализация механизма интенсивного гомогенного зародышеобразования в струе перегретой жидкости) форма струи становится похожа на форму газовой струи с углом раскрытия  $\sim 20^\circ$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное экспериментальное исследование вскипания струи перегретой воды, истекающей через короткий квадратный канал с острыми входными и выходными кромками, позволило проследить изменение формы вскипающей струи в широком температурном интервале, включая область взрывного вскипания. Экспериментальным путем установлено полное раскрытие вскипающей струи при реализации механизма ударного режима вскипания и проявлении эффекта Коанда в случае использования диффузорного прижимного фланца. При полном развале струи становится заметным анизотропное распределение массы истекающей среды – наблюдаются четыре выделенные области струи. В случае же истечения перегретой воды через короткий цилиндрический канал наблюдался изотропный полый конус с развернутым углом раскрытия [17].

Данное экспериментальное исследование, как и результаты предшествующих работ, подтверждает вывод о корреляции между формообразованием и механизмами зародышеобразования в струе перегретой жидкости. При малой интенсивности фазового перехода струя имеет или стержневой вид, как у не вскипающей струи, или коническую форму с небольшим углом раскрытия. При высокой интенсивности рождения и взаимодействия паровых зародышей наблюдаются большие углы раскрытия конуса струи, включая и развернутый угол.

Резкие изменения формы вскипающей струи от конического вида к полному развалу и обратно происходят в очень узком температурном диапазоне. Первый скачок (резкое увеличение угла раскрытия) связан с переходом от единичных и не взаимодействующих центров кипения к интенсивному зародышеобразованию, проявляющемуся на легко активируемых многочисленных включе-

ниях (растворенный газ, дефекты поверхности, различного рода частицы). Второй скачок (резкое уменьшение угла раскрытия) связан со смещением сечения вскипания в глубь канала, обусловленным увеличением скорости зародышеобразования с ростом температуры.

Результаты проделанной работы могут быть полезны для построения теоретических моделей и использоваться в устройствах, обеспечивающих тонкодисперсное распыление.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-1933.2020.8), РФФИ (грант № 19-08-00091).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Surtaev A.S., Tsoi A.N., Mazheiko N.A., Busov K.A., Skokov V.N. Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets // J. Eng. Thermophys. 2013. V. 22. № 3. P. 174.
2. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Busov K.A. Recoil Force and Spray Angle of a Plane Jet of Superheated Water // Interfacial Phenom. Heat Transfer. 2017. V. 5. № 3. P. 201.
3. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 125.
4. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Surtaev A.S., Zhukov V.E. Peculiarities of Superheated Liquid Discharging under Strong and Weak Nonequilibrium Conditions // J. Eng. Thermophys. 2010. V. 19. № 4. P. 289.
5. Поляев В.М., Кичатов Б.В., Бойко И.В. Истечение перегретой струи воды в атмосферу // ТВТ. 1998. Т. 36. № 1. С. 102.
6. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Виноградов А.В., Бусов К.А., Коверда В.П. Динамические характеристики вскипающих струй перегретых водных растворов // Теплоэнергетика. 2010. № 8. С. 69.
7. Zalkind V.I., Zeigarnik Yu.A., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Shchigel' S.S. Superheated Water Atomization: A Possibility of Obtaining Sprays of Droplets of Micron Diameters // High Temp. 2018. V. 56. № 1. P. 153.
8. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
9. Скрипов В.П., Синицын Е.Н., Павлов И.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
10. Reba I. Applications of the Coanda Effect // Sci. Amer. 1966. V. 214. № 6. P. 84.
11. Panitz T., Wasan D.T. Flow Attachment to Solid Surfaces: the Coanda Effect // AIChE J. 1972. V. 18. № 1. P. 51.
12. Исаев О.А., Неволин М.В., Скрипов В.П., Уткин С.А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. № 5. С. 1028.
13. 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.
14. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N. Jet of Boiling-up Water Injected by a Short Slit Nozzle // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 130. P. 523.
15. Busov K.A., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A. et al. Atomization of a Sheet Jet of Superheated Water Using a Passive Swirler // Microgravity Sci. Technol. 2020. V. 32. P. 99.
16. Павлов П.А., Исаев О.А. Барокапиллярная неустойчивость поверхности свободной струи перегретой жидкости // ТВТ. 1984. Т. 22. № 4. С. 745.
17. Бусов К.А., Решетников А.В., Мажейко Н.А., Капитунов О.А. Исследование влияния пассивного завихрителя на истечение перегретой жидкости // ПМТФ. 2019. Т. 60. № 1. С. 62.
18. Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. 1/f-шум в критическом неравновесном фазовом переходе // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. № 9. С. 739.
19. Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. 1/f-шум при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель // ЖЭТФ. 1998. Т. 113. № 5. С. 1748.
20. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V., Surtaev A.S. Dynamics of Transition Processes and Structure Formation in Critical Heat-mass Transfer Regimes During Liquid Boiling and Cavitation // J. Eng. Thermophys. 2009. V. 18. № 1. P. 20.
21. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.