

03.4

Самопроизвольное (спонтанное) вскипание затопленных струй, генерируемых при коллапсе паровых пузырьков

© Т.П. Адамова^{1,2}, В.М. Чудновский¹, Д.С. Елистратов^{1,3}¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия³ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: t.adamova@nsu.ru

Поступило в Редакцию 12 августа 2021 г.

В окончательной редакции 20 сентября 2021 г.

Принято к публикации 20 сентября 2021 г.

Экспериментально обнаружен эффект вторичного спонтанного вскипания затопленных струй, образующихся при коллапсе паровых пузырьков в процессе объемного кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на торце лазерного оптоволоконка.

Ключевые слова: затопленная струя, кипение недогретой жидкости, лазер.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51873.18991

Неравновесные кавитационные сферически-симметричные пузырьки при схлопывании сжимаются до минимальных размеров и, если не разрушаются, вновь воспроизводят себя, совершая последовательно несколько циклов затухающих колебаний [1]. Это явление хорошо известно под названием „отскок“ [1,2]. Однако если форма неравновесного кавитационного пузырька не является сферически-симметричной, то коллапс таких пузырьков может привести к их распаду, при котором вместо „отскока“ наблюдается затопленная кумулятивная струя [3–12]. Эти струи, несмотря на их скромные размеры, локально могут создавать гигантские гидродинамические давления за счет своей высокой скорости. Такие струи представляют значительный практический интерес в различных направлениях, например в промышленной химии для селективной очистки поверхностей, а также в медицине для атравматичного санирования тканевых покровов или при хирургических вмешательствах, в том числе и при передаче тепла [3,12,13]. Нагретыми струи могут оказаться, когда образуются при коллапсе паровых пузырьков, возникших в результате кипения недогретой жидкости [11,12].

Кипение недогретой жидкости можно наблюдать при закаливании раскаленного металла в холодной воде или в начальные моменты вскипания воды в чайнике. При кипении такой жидкости паровые пузырьки растут и сразу же схлопываются, поскольку при соприкосновении с холодной жидкостью пар в пузырьке начинает конденсироваться [14]. В условиях, когда недогрев жидкости большой, коллапс пузырьков вблизи сосредоточенного нагревателя приводит к образованию разогретых затопленных струй с температурой, близкой к температуре кипения [3,11,12]. Возможна ситуация, когда разогретая струя, движущаяся с большой скоростью через окружающую ее холодную (недогретую) жидкость, вновь закипит. Подобное самопроизвольное вторичное вскипание мо-

жет произойти из-за понижения давления в движущейся жидкости согласно закону Бернулли. В этом случае снизится и температура кипения нагретой жидкости. Таким образом, при достаточно большой скорости струи возможен „отскок“ в виде воспроизводства кипения. Данное явление подобно явлению вскипания разогретой движущейся жидкости на изгибах труб.

В настоящей работе сообщается об экспериментальном наблюдении явления спонтанного вторичного вскипания в кумулятивной струе, образующейся при коллапсе парового пузырька на лазерном нагревательном элементе.

В экспериментах использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения $1.94 \mu\text{m}$, излучение которого проводилось по кварц-кварцевому полимерному волокну диаметром $600 \mu\text{m}$. Излучение с длиной волны $1.94 \mu\text{m}$ очень сильно поглощается в воде с коэффициентом поглощения $\sim 100 \text{cm}^{-1}$, что позволяет инициировать вблизи торца оптоволоконка объемное вскипание жидкости. Все эксперименты проводились на дистиллированной воде при температуре 30°C в кювете размером $16.5 \times 37 \times 20 \text{mm}$ с использованием скоростной видеокамеры Photron FASTCAM Mini UX100 со скоростью съемки до $100\,000 \text{fps}$. Исследовался элементарный акт вскипания — рост и схлопывание одиночного пузырька.

На рис. 1 показано формирование и развитие парового пузырька в процессе объемного вскипания недогретой воды перед торцом оптоволоконка. В период роста пузырек охватывает кончик оптоволоконка и после достижения максимального размера начинает схлопываться. Коллапс пузырька на торце оптоволоконка приводит к потере его сферичности, поскольку массы жидкости, двигавшиеся изначально к центру пузыря, вынуждены обтекать так называемый „обратный уступ“. Радиальные потоки устремляются навстречу друг другу, пузырек при этом сжимается, как показано на кадре 8 (рис. 1) и

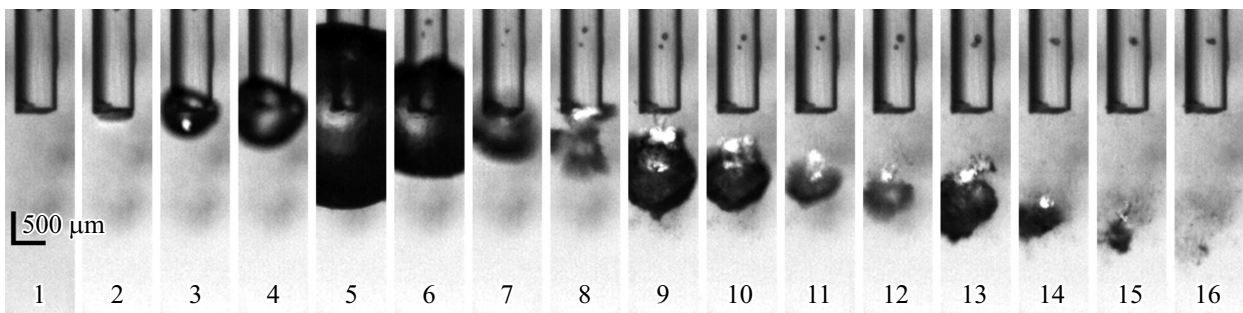


Рис. 1. Формирование и развитие парового пузырька при вскипании недогретой дистиллированной воды под действием непрерывного лазерного излучения с длиной волны $1.94\ \mu\text{m}$ и мощностью $10\ \text{W}$. Диаметр оптоволоконна $600\ \mu\text{m}$. Цифрами обозначены номера кадров. Средний интервал между кадрами $0.04\ \text{ms}$.

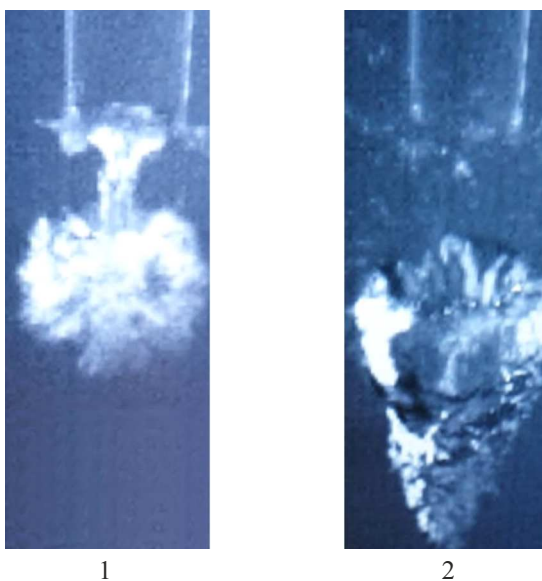


Рис. 2. Начало процесса вторичного вскипания воды вблизи торца оптоволоконна (кадр 1) и интенсивное кипение жидкости в затопленной струе, движущейся от торца оптоволоконна (кадр 2). Интервал между кадрами $0.04\ \text{ms}$.

кадре 1 (рис. 2). Затем радиальные потоки сталкиваются и трансформируются в аксиальные струи, направленные в противоположные стороны: к торцу и от торца оптоволоконна. Струя, направленная к торцу, сталкивается с его поверхностью, тогда как струя, направленная от торца, формирует затопленную кумулятивную струю, распространяющуюся в глубь жидкости (кадры 9–11 на рис. 1) [11].

Образованные струи являются нагретыми, так как вблизи границы раздела фаз вода нагрета и первой входит в формирующийся поток. Нагретая вода может образовываться как вследствие конденсации пара, так и в результате того, что часть воды, нагретая лазерным излучением, не испарилась, а осталась в жидком состоянии на границе пузырька. При схлопывании пузырька

эти слои в первую очередь будут вовлечены в струйное течение [12].

Как видно из рис. 1, струя жидкости в изучаемых условиях инициирует процесс вторичного вскипания. Кадр 8 на рис. 1 и кадр 1 на рис. 2 демонстрируют начало вскипания жидкости, а кадры 9–15 (рис. 1) и кадр 2 (рис. 2) — типичную картину кипения движущейся жидкости. Определяемая на кадрах 8 и 9 (рис. 1) и кадре 1 (рис. 2) перемишка, вероятно, также представляет собой вскипевшую в струйном потоке жидкость. Видно, что вторичный, вновь образованный пузырек (кадр 2 на рис. 2) частично состоит из множества мелких пузырьков. При коллапсе вторичного пузырька также образуются противоположно направленные затопленные струи, которые могут складываться с первоначальными, формируя поток нагретой жидкости.

Скорость струи сильно зависит от расстояния относительно торца оптоволоконна. В начальный момент времени ее значение $\sim 27 \pm 1\ \text{m/s}$. Если оценить падение давления в струе по закону Бернулли, то давление получается отрицательным ($\sim 2.5\ \text{atm}$). Очевидно, закон Бернулли для оценки падения давления в струе в данной задаче можно использовать только в качестве нулевого приближения, но с уверенностью можно сказать, что давление понижается настолько, что вскипание воды происходит при температурах, существенно меньших 100°C .

Дополнительной причиной снижения давления в нагретой затопленной струе, приводящей к ее вскипанию, могут служить акустические волны, генерируемые при коллапсе парового пузырька. Исследование таких волн проведено в работе [15]. Были зарегистрированы волны с амплитудой более $12\ \text{atm}$. Анализ результатов этой работы показывает, что если бы среда была неограниченной, то вклад акустических волн в механизм спонтанного вскипания разогретых затопленных струй был бы несуществен. Однако в проведенных экспериментах волны давления отражались от стенок и, возвращаясь, могли оказывать влияние на коллапс пузырька. Но для подтверждения данной гипотезы требуются детальные численные расчеты.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность В.А. Буланову за полезную дискуссию и обсуждение результатов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00122).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.В. Рождественский, *Кавитация* (Судостроение, Л., 1977).
- [2] Б.М. Дорофеев, *Теплофизика высоких температур*, **23** (3), 586 (1985). [B.M. Dorofeev, *High Temp.*, **23** (3), 479 (1985).].
- [3] В.М. Чудновский, В.И. Юсупов, *Письма в ЖТФ*, **46** (20), 31 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.20.50153.18426 [V.M. Chudnovskii, V.I. Yusupov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (10), 1024 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020100211].
- [4] A. Vogel, V. Venugopalan, *Chem. Rev.*, **103** (2), 577 (2003). DOI: 10.1021/cr010379n
- [5] V. Robles, E. Gutierrez-Herrera, L.F. Devia-Cruz, D. Banks, S. Camacho-Lopez, G. Aguilar, *Phys. Fluids*, **32** (4), 042005 (2020). DOI: 10.1063/5.0007164
- [6] R. Dijkink, S. Le Gac, E. Nijhuis, A. van den Berg, I. Vermes, A. Poot, C.-D. Ohl, *Phys. Med. Biol.*, **53** (2), 375 (2008). DOI: 10.1088/0031-9155/53/2/006
- [7] S.D. George, S. Chidangil, D. Mathur, *Langmuir*, **35** (31), 010139 (2019). DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b03293
- [8] K.F. Chan, T.J. Pfefer, J.M.H. Teichman, A.J. Welch, *J. Endourology*, **15** (3), 257 (2001). DOI: 10.1089/089277901750161737
- [9] В.П. Минаев, Н.В. Минаев, В.И. Юсупов, А.М. Дымов, Н.И. Сорокин, В.Ю. Лекарев, А.З. Винаров, Л.М. Рапопорт, *Квантовая электроника*, **49** (4), 404 (2019). [V.P. Minaev, N.V. Minaev, V.I. Yusupov, A.M. Dymov, N.I. Sorokin, V.Yu. Lekarev, A.Z. Vinarov, L.M. Rapoport, *Quantum Electron.*, **49** (4), 404 (2019). DOI: 10.1070/QEL16809].
- [10] Ф.В. Бункин, М.И. Трибельский, *УФН*, **130** (2), 193 (1980). DOI: 10.3367/UFNr.0130.198002a.0193 [F.V. Bunkin, M.I. Tribel'skii, *Phys. Usp.*, **23** (2), 105 (1980). DOI: 10.1070/PU1980v023n02ABEH004904].
- [11] V.M. Chudnovskii, A.A. Levin, V.I. Yusupov, M.A. Guzev, A.A. Chernov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **150**, 119286 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286
- [12] R.V. Fursenko, V.M. Chudnovskii, S.S. Minaev, J. Okajima, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **163**, 120420 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120420
- [13] C.-D. Ohl, M. Arora, R. Dijkink, V. Janve, D. Lohse, *Appl. Phys. Lett.*, **89** (7), 074102 (2006). DOI: 10.1063/1.2337506
- [14] A.A. Chernov, A.A. Pil'nik, I.V. Vladyko, S.I. Lezhnin, *Sci. Rep.*, **10** (1), 16526 (2020).
- [15] В.И. Юсупов, А.Н. Коновалов, В.А. Ульянов, В.Н. Баграташвили, *Акуст. журн.*, **62** (5), 531 (2016). DOI: 10.7868/S0320791916050191 [V.I. Yusupov, A.N. Konovalov, V.A. Ul'yanov, V.N. Bagratashvili, *Acoust. Phys.*, **62**, (5), 537 (2016). DOI: 10.1134/S1063771016050183].