

УДК 536.423.1

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОГО ВСКИПАНИЯ НА ДИНАМИКУ СТРУИ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА, ИНДУЦИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ ЖИДКОСТИ

© 2021 г. А. А. Чернов^{1,2,*}, академик РАН М. А. Гузев³, А. А. Пильник^{1,2}, Т. П. Адамова^{1,4}, А. А. Левин^{1,5}, В. М. Чудновский¹

Поступило 26.09.2021 г.

После доработки 26.09.2021 г.

Принято к публикации 20.10.2021 г.

Экспериментально исследован одиночный акт вскипания недогретой до температуры насыщения жидкости при воздействии на нее непрерывного лазерного излучения, передаваемого в рабочий объем посредством тонкого оптоволоконка. Показано, что образованный вблизи торца оптоволоконка паровой пузырек при схлопывании формирует горячую кумулятивную струю, вокруг которой наблюдается явление вторичного вскипания. Образующееся вокруг струи вторичное паровое включение имеет протяженную форму, движется и эволюционирует вместе с ней. Продемонстрировано существенное влияние данного включения на динамику распространения струи.

Ключевые слова: лазерно-индуцированное вскипание, паровой пузырек, кумулятивная струя

DOI: 10.31857/S2686740021060067

Известно, что кипение локально перегретой жидкости характеризуется не только ростом, но и последующим коллапсом паровых пузырьков. И, если их форма по каким-либо причинам теряет сферичность, в ряде случаев это приводит к генерации высокоскоростных струй жидкости, которые локально могут создавать большие гидродинамические давления. Это представляет большой практический интерес для различных приложений, например, для селективной очистки поверхностей [1], разрушения твердых тел [2] и жидкостей [3], в технологии струйной печати [4] и т.п. Следует также указать на перспективу использования теплового воздействия лазерного излу-

чения на биологические ткани для хирургического лечения различных заболеваний [5–9]. Передача излучения выполняется по тонкому оптоволокону, и с точки зрения физики механизм такого воздействия связан с образованием вблизи торца оптоволоконка паровых пузырьков, их дальнейшим коллапсом из-за общего недогрева жидкости [10], с последующим формированием горячих затопленных струй [11], посредством которых и осуществляется необходимое воздействие.

Несмотря на то, что образование микроструй в процессе кавитации уже давно исследуется (см., например, [12–15]), остается множество задач, требующих своего решения. В частности, не совсем ясны механизмы образования этих струй для различных физических систем. Исследованию динамики паровых пузырьков в различных метастабильных средах также посвящено большое количество работ [16–18]. Однако на сегодняшний день в литературе отсутствует полноценное описание процесса эволюции паровой фазы при кипении, в особенности лазерно-индуцированном, локально перегретой в условиях общего недогрева жидкости. В настоящей работе частично восполнен этот пробел описания: представлено экспериментальное исследование процесса вторичного вскипания жидкости вокруг горячих затопленных струй, образованных при коллапсе парового пузырька, индуцированного лазерным нагревом жидкости.

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁴ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

⁵ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: a.chernov@g.nsu.ru

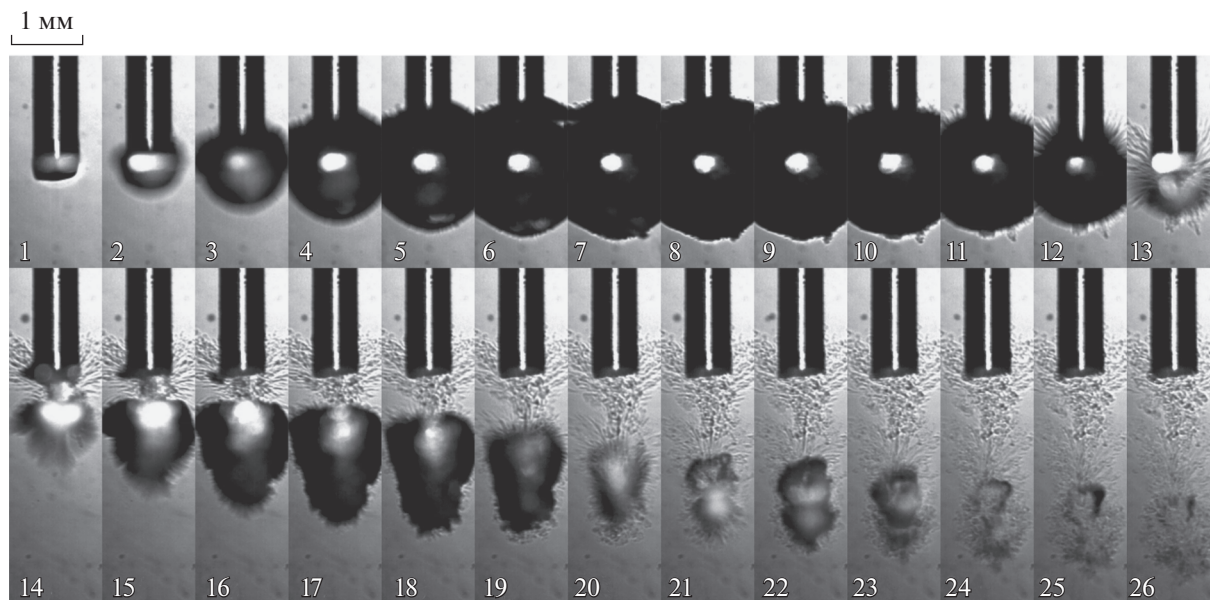


Рис. 1. Иллюстрация эволюции паровой фазы, образующейся в результате воздействия на жидкость лазерного излучения с длиной волны 1.94 мкм и мощностью 10 Вт. Съемка шпирен-методом. Временной интервал между кадрами 1/32 мс.

В экспериментах использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 1.94 мкм (ИРЭ-Полус, Россия) мощностью до 10 Вт, непрерывное излучение которого подавалось по вертикально ориентированному кварц–кварц полимерному волокну с диаметром жилы 600 мкм в оптическую кювету (стекло марки К-8 (SCHOTT GLASS BK7)), с внутренними размерами $16.5 \times 37 \times 20$ мм (ширина \times высота \times глубина) и толщиной стенки 3 мм, заполненную дистиллированной водой. Торцевое оптоволокно было погружено на глубину 15 мм и зафиксировано специальным держателем. Эксперименты проводились при нормальных условиях. Мощность излучения в эксперименте варьировалась в пределах от 3 до 10 Вт. Излучение с длиной волны 1.94 мкм очень хорошо поглощается водой (с коэффициентом поглощения $\sim 100 \text{ см}^{-1}$). Это приводит к интенсивному объемному тепловыделению в воде вблизи торца оптоволокна и, как следствие, к спонтанному образованию одиночного парового зародыша, который в процессе своей эволюции претерпевает стадии быстрого роста и последующего не менее быстрого схлопывания с генерацией горячей затопленной струи. Для фото- и видеорегистрации процессов, протекающих в кювете, использовалась высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM Mini UX100 (Япония) со скоростью съемки до 100000 fps. Программное обеспечение видеокамеры позволяло вести запись с контролем времени. Точность измерений составляла $\sqrt{2} \times$ размер пикселя, который равен 15 мкм.

На рис. 1 представлены покадровые иллюстрации всех стадий процесса вскипания недогретой до температуры насыщения жидкости при воздействии на нее лазерного излучения мощности 10 Вт: с момента образования зародыша паровой фазы до практически ее полного исчезновения. На рис. 2 более детально продемонстрирован процесс эволюции вторичного парового образования (раскадровка на рис. 2 соответствует кадрам 14–21 на рис. 1). Приведенные раскадровки получены при одинаковых условиях экспериментов, но с помощью двух разных методов видеофиксации – шпирен-метода (рис. 1) и “на просвет” (рис. 2). Каждый из них имеет свое преимущество. Если в первом методе хорошо отслеживается область нагретой жидкости, что видно по изменению ее коэффициента преломления, то во втором методе более четко видна структура паровой фазы.

Эксперименты показывают, что зародыш паровой фазы образуется по прошествии определенного времени после включения лазера. В течение этого времени происходит нагрев жидкости вблизи торца оптоволокна (со скоростью $\sim 10^4 \text{ К/с}$). Оно оказывается обратно пропорционально мощности излучения и много больше характерного времени последующей эволюции паровой фазы (к примеру, в эксперименте, представленном на рис. 1, оно составило ~ 3.5 мс). Образовавшийся вблизи торца оптоволокна пузырек (рис. 1, кадр 1) начинает расти за счет испарения локально перегретой жидкости. Это происходит до тех пор, пока перегрев жидкости на межфазной границе не станет равным нулю. В дальнейшем ка-

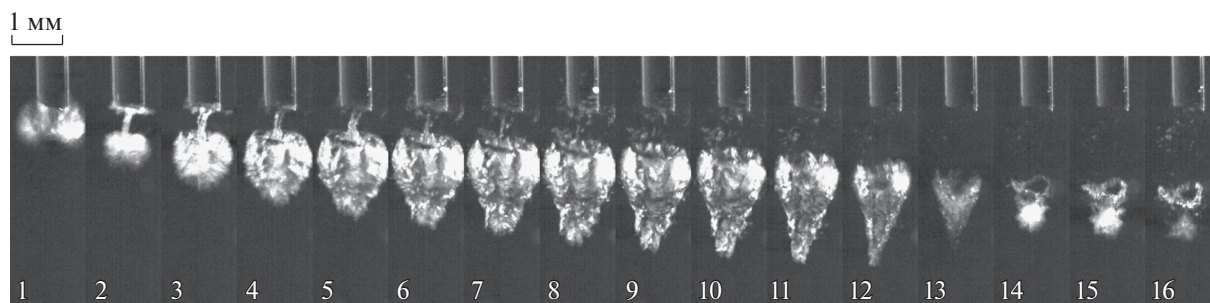


Рис. 2. Иллюстрация эволюции вторичного образования паровой фазы, образующейся в результате воздействия на жидкость лазерного излучения с длиной волны 1.94 мкм и мощностью 10 Вт. Съемка методом “на просвет”. Временной интервал между кадрами 1/64 мс.

кое-то время пузырек по инерции продолжает расти, но, окруженный “холодными” слоями жидкости, рано или поздно останавливается (рис. 1, кадр 8), после чего быстро коллапсирует (рис. 1, кадры 8–13). Конденсация пара в пузырьке приводит к тепловыделению. Все это сопровождается сложными динамическими процессами, с генерацией волн давления и разрежения. Отметим, что при достижении пузырьком своего максимального размера, его форма близка к сферической, а диаметр существенно превосходит диаметр оптоволоконка.

При коллапсе пузырек теряет сферичность, так как кончик оптоволоконка играет роль “обратного уступа” для натекающей на него жидкости. Вблизи поверхности оптоволоконка формируется перемычка (рис. 1, кадр 14; рис. 2, кадр 2), в процессе замыкания которой генерируются две кумулятивные струи [11]. Одна направлена на торец оптоволоконка, другая — от торца. Скорости этих струй определяются условиями обтекания обратного уступа (по большей части, скоростью и углом натекания жидкости на ось симметрии, где и происходит столкновение жидких масс). Струя, направленная к торцу оптоволоконка, сталкивается с его поверхностью, тогда как направленная от торца пронзает уже оторвавшийся от поверхности “породивший” ее пузырек, достигает его противоположной границы и становится затопленной.

В дальнейшем происходит “отскок” в виде вторичного вскипания (см. рис. 1, начиная с кадра 14, или рис. 2, на котором данный процесс снят с частотой, в два раза большей). Это происходит потому, что при коллапсе парового пузырька, сопровождаемого конденсацией пара, в небольшой области концентрируется практически вся запасенная за время ожидания появления парового зародыша тепловая энергия, в связи с чем жидкость в этой области оказывается в состоянии, близком к насыщенному. Поэтому, локальное понижение давления приводит к ее вторичному вскипанию. Отметим, что пульсации давления в

жидкости, сопровождающие рост и схлопывание пузырьков, вообще говоря, характерны для кавитационных процессов [19, 20].

Из рис. 1, кадры 14–26, и рис. 2, кадры 2–16, видно, что новое включение паровой фазы локализовано вокруг образовавшейся при коллапсе первичного пузырька кумулятивной струи, движется и эволюционирует вместе с ней, имеет вытянутую и ориентированную в сторону распространения струи форму. Подобно первичному пузырьку оно сначала растет (рис. 2, кадры 2–10), потом коллапсирует (рис. 2, кадры 10–16). Характерные значения числа Вебера в рассматриваемом процессе $We > 100$, что говорит о гидродинамической неустойчивости данного включения. По виду оно напоминает виноградную гроздь, так как образовано из множества мелких пузырьков, которые, по всей видимости, вырастают из несконденсировавшихся фрагментов схлопнувшегося начального пузырька. Не исключено, что происходит образование и новых центров паровой фазы. Очевидно, что эволюция вновь образованного парового включения и сформированной при коллапсе начального пузырька струи неразрывно связаны. Данное включение существенно снижает сопротивление движению струи, аналогично тому, как снижает сопротивление движению подводных аппаратов барботирование газа, создающего пузырьковую завесу (так называемая суперкавитация) [21]. На рис. 3 представлена зависимость координаты фронта струи от времени (с момента ее формирования). Сопоставляя динамику струи с эволюцией вторичного парового включения, можно заметить, что в среднем струя имеет большую скорость при увеличении объема включения (кадры 14–17 на рис. 1; временной интервал от 0 до 0.09 мс на рис. 3) и меньшую — при его коллапсе (кадры 17–21 на рис. 1; временной интервал от 0.09 до 0.22 мс на рис. 3).

В связи с тем, что струя, образующаяся при коллапсе первичного парового пузырька, формируется в процессе конденсации пара в пузырьке и из нагретых слоев жидкости, непосредственно

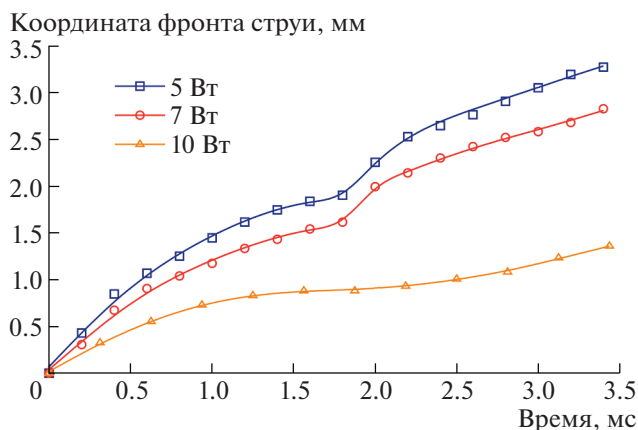


Рис. 3. Зависимость координаты фронта струи от времени для различных мощностей лазера.

прилегающих к межфазной границе, жидкость в струе обладает существенно более высокой по сравнению с начальной температурой (судя по всему, близкой к температуре насыщения). И все же, вопрос о реальном распределении температуры вокруг пузырька остается открытым, так как ввиду пространственной сосредоточенности (характерные размеры составляют доли миллиметра) и малых характерных времен процесса (менее 1 мс) извлечение сведений в ходе физического эксперимента в известной степени затруднительно. Таким образом, можно лишь предположить, что струя уносит существенную долю запасенной на стадии нагрева до момента образования парового зародыша тепловой энергии. Пульсации давления, появляющиеся в системе при росте и коллапсе паровой фазы, также постепенно затухают. А значит, образующееся после “отскока” паровое включение имеет меньшие размеры, чем размеры первичного пузырька. Дальнейшее рассеяние тепловой энергии ведет к полному прекращению циклических фазовых превращений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-19-00122).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ohl C.-D., Arora M., Dijkink R., Janve V., Lohse D.* Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 89. № 7. P. 074102.
2. *Cui P., Zhang A.-M., Wang S., Khoo B.C.* Ice breaking by a collapsing bubble // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. V. 841. P. 287–309.
3. *Gonzalez Avila S.R., Ohl C.-D.* Fragmentation of acoustically levitating droplets by laser-induced cavitation bubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. V. 805. P. 551–576.
4. *Serra P., Piqué A.* Laser-Induced Forward Transfer: Fundamentals and Applications // *Advanced Materials Technologies*. 2019. V. 4. № 1. P. 1800099.
5. *Vogel A., Venugopalan V.* Mechanisms of Pulsed Laser Ablation of Biological Tissues // *Chemical Reviews*. 2003. V. 103. № 2. P. 577–644.
6. *Zhang X., Chen C., Chen F., Zhan Z., Xie S., Ye Q.* In vitro investigation on Ho:YAG laser-assisted bone ablation underwater // *Lasers in Medical Science*. 2016. V. 31. № 5. P. 891–898.
7. *George S.D., Chidangil S., Mathur D.* Minireview: Laser-Induced Formation of Microbubbles—Biomedical Implications // *Langmuir*. 2019. V. 35. № 31. P. 10139–10150.
8. *Robles V., Gutierrez-Herrera E., Devia-Cruz L.F., Banks D., Camacho-Lopez S., Aguilar G.* Soft material perforation via double-bubble laser-induced cavitation microjets // *Physics of Fluids*. 2020. V. 32. № 4. P. 042005.
9. *Beck R.J., Bitharas I., Hand D.P., Maisey T., Moore A.J., Shires M., Thomson R.R., West N.P., Jayne D.G., Shephard J.D.* Dynamics of picosecond laser ablation for surgical treatment of colorectal cancer // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. № 1. P. 20261.
10. *Chernov A.A., Pil'nik A.A., Vladyko I.V., Lezhnin S.I.* New semi-analytical solution of the problem of vapor bubble growth in superheated liquid // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. № 1. P. 16526.
11. *Chudnovskii V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A.* The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 150. P. 119286.
12. *Padilla-Martinez J.P., Berrospe-Rodriguez C., Aguilar G., Ramirez-San-Juan J.C., Ramos-Garcia R.* Optic cavitation with CW lasers: A review // *Physics of Fluids*. 2014. V. 26. № 12. P. 122007.
13. *Mohammadzadeh M., Gonzalez-Avila S., Liu K., Wang Q., Ohl C.-D.* Synthetic jet generation by high-frequency cavitation // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. V. 823. P. R3.
14. *Brujan E.-A., Takahira H., Ogasawara T.* Planar jets in collapsing cavitation bubbles // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. V. 101. P. 48–61.
15. *Surtaev A., Serdyukov V., Malakhov I., Safarov A.* Nucleation and bubble evolution in subcooled liquid under pulse heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 169. P. 120911.
16. *Prosperetti A.* Vapor bubbles // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2017. V. 49. № 1. P. 221–248.
17. *Zudin Y.B.* Non-equilibrium Evaporation and Condensation Processes. Springer, 2019.
18. *Чернов А.А., Гузев М.А., Пильник А.А., Владыко И.В., Чудновский В.М.* Новый подход к аналитическому описанию роста парового пузырька в перегретой жидкости // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2020. Т. 495. № 1. С. 73–77.
19. *Накоряков В.Е., Донцов В.Е., Чернов А.А.* Образование газовых гидратов в газожидкостной смеси за

- ударной волной // Доклады Академии наук. 2006. Т. 411. № 2. С. 190–194.
20. Донцов В.Е., Чернов А.А. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 6. С. 764–768.
21. Ahn B.-K., Jeong S.-W., Kim J.-H., Shao S., Hong J., Arndt R.E. A. An experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. V. 9. № 2. P. 227–237.

THE INFLUENCE OF SECONDARY BOILING ON THE DYNAMICS OF A JET FORMING DURING COLLAPSE OF A VAPOR BUBBLE INDUCED BY LASER HEATING OF A LIQUID

A. A. Chernov^{a,b}, Academician of the RAS M. A. Guzev^c, A. A. Pil'nik^{a,b}, T. P. Adamova^{a,d},
A. A. Levin^{a,e}, and V. M. Chudnovskii^a

^a Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

^b Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

^c Institute of Applied Mathematics, Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

^d Nikolaev Institute of Inorganic chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

^e Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

A single act of boiling up of a liquid subcooled to the saturation temperature is experimentally investigated when it is exposed to continuous laser radiation transmitted to the working volume by means of a thin optical fiber. It is shown that a vapor bubble formed near the end of the optical fiber upon collapse forms a hot cumulative jet, around which the phenomenon of secondary boiling is observed. The secondary vapor inclusion formed around the jet has an extended shape, moves and evolves along with it. The significant influence of this inclusion on the dynamics of the jet propagation has been demonstrated.

Keywords: laser-induced boiling, vapor bubble, cumulative jet