

ЭФФЕКТ УСКОРЕННОГО ВСАСЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБКЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ КАВИТАЦИИ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

© 2023 г. В. М. Чудновский¹, академик РАН М. А. Гузев¹, Е. П. Дац^{1,*}, А. В. Кулик¹

Поступило 07.07.2023 г.

После доработки 07.07.2023 г.

Принято к публикации 21.08.2023 г.

Экспериментально и численно исследуются расширение и схлопывание кавитационного пузырька при лазерном нагреве и вскипании с недогревом воды в окрестности кончика оптоволокну (лазерном нагревательном элементе), установленного в заполненной водой стеклянной трубке с двумя открытыми концами. Кавитация, инициированная непрерывным лазерным излучением, сопровождается выталкивающим и втягивающим движением разогретой жидкости в трубке и за ее пределами. Впервые показано, что в трубке с установленным лазерным нагревательным элементом в потоке жидкости, движущемся за стенками пузырька, при его схлопывании на удаленном от торца полюсе поверхности пузырька возникает жидкая струя, направленная через пузырек к торцу оптоволокну. Струя ускоряет процесс всасывания жидкости в трубку.

Ключевые слова: лазер, кавитация, численное моделирование, двухфазная среда

DOI: 10.31857/S2686740023060056, **EDN:** AFIKMM

Лазерная (лазероиндуцированная) кавитация [1, 2] представляет собой паровую кавитацию, образующуюся при быстром лазерном нагреве и вскипании жидкости, находящейся в относительно “холодном” окружении, недогретом до температуры насыщения (кипение с недогревом). При лазерной кавитации возникающий при вскипании паровой пузырек сначала быстро увеличивается до некоторого максимального объема, а затем, вследствие контакта с “холодным” (недогретым) окружением, ускоренно схлопывается, что определяет его как кавитационный [3, 4]. Большой интерес представляет исследование лазерной кавитации в трубках, заполненных жидкостью, поскольку с этими исследованиями связаны технология струйной печати, создание микронасосов, очистка поверхности, технологии лазерной хирургии и др. [5–12]. В трубке лазерный нагрев можно осуществлять дистанционно, фокусируя излучение в нужном объеме, либо контактно, когда излучение доставляется через оптоволокну, кварцевый кончик которого погружен в жидкость, с которой он непосредственно контактирует. Лазерная кавитация с использованием дистанционной фокусировки излучения в жидкость активно исследуется

[5, 6, 8, 9, 14], чего нельзя сказать о методах контактной инициации с использованием непрерывного лазерного излучения, проводимого по оптоволокну, хотя использование оптоволокну очень удобно для доставки лазерного излучения к различным объектам [7]. Оптоволокну обладает большой гибкостью и способно проникать в узкие каналы, трубки, щели и иглы для перкутанного воздействия и таким образом позволяет генерировать кавитационные пузырьки в условиях, где использование других методов – “искрового” [13] и связанного с фокусировкой лазерного излучения [14] затруднительно либо неосуществимо. Кроме того, диаметр кварцевой жилы обычно применяемых оптических волокон мал и находится в пределах 0.1–1 мм, поэтому при конверсии лазерного излучения в тепло кварцевый кончик оптоволокну будет являться сосредоточенным нагревательным элементом нагревательного прибора – лазерного аппарата, излучающего через оптоволокну с рекордно большим тепловым потоком [3, 4].

Особенность лазерной кавитации, инициированной на лазерном нагревательном элементе в трубке, заключается в том, что зарождение и эволюция кавитационного пузырька происходят в окрестности двух поверхностей – цилиндрической поверхности кончика оптоволокну и внутренней цилиндрической поверхности трубки. Известно, что в свободном объеме лазерная кави-

¹Институт прикладной математики

Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: datsep@gmail.com

тация в окрестности кончика оптоволоконна приводит к генерации двух аксиальных кумулятивных струй, возникающих при схлопывании пузырька. Одна устремлена к торцу оптоволоконна, другая — в противоположном направлении, от торца в глубь жидкости [3, 4]. Эти струи возникают в результате столкновения и преобразования в аксиальные встречных радиальных потоков жидкости, движущейся за поверхностью схлопывающегося пузырька [3, 4]. Однако в трубке, из-за влияния на кавитационный пузырек внутренней замкнутой поверхности, радиальные встречные потоки вообще не возникают и существенным становится только аксиальное движение жидкости, движущейся за стенками кавитационного пузырька. При росте пузырек выталкивает жидкость из трубки, а при схлопывании всасывает и, если при этом возникнут струи, они, с одной стороны, будут иметь совершенно иную природу, с другой — изменять скорость всасывания жидкости в трубку. Важно, что при лазерном нагреве потоки жидкости, выходящие и входящие в трубку, будут со временем разогреваться, что в итоге может привести к необратимой денатурации белков и санации поверхности. Данное обстоятельство можно использовать как в технических приложениях, так и в медицинских технологиях.

Цель работы — исследовать динамику и нагрев жидкости при лазерной кавитации, инициированной непрерывным лазерным излучением на лазерном нагревательном элементе, установленном в стеклянной трубке, заполненной жидкостью.

В работе экспериментально и численно исследуются расширение и схлопывание кавитационного пузырька при лазерном нагреве и вскипании с недогревом воды в окрестности кончика оптоволоконна (лазерном нагревательном элементе), установленного в заполненной водой стеклянной трубке с двумя открытыми концами. Показано, что в трубке с установленным лазерным нагревательным элементом в потоке жидкости, движущемся за стенками пузырька, при его схлопывании на удаленном от торца полюсе поверхности пузырька возникает жидкая струя, направленная через пузырек к торцу оптоволоконна. Эта струя ускоряет процесс всасывания жидкости в трубку.

В экспериментах использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 1.47 мкм, излучение которого проводилось по кварц-кварц-полимерному волокну диаметром 600 мкм. Использовалось непрерывное излучение с мощностью 6 Вт. Оптоволоконно помещалось в центр стеклянной трубки с открытыми концами длиной 80 мм, заполненной недеаэрированной дистиллированной водой. Трубка устанавливалась вертикально в стеклянной кювете с размерами

$12.5 \times 2.3 \times 4.1$ см, также заполненной недеаэрированной водой. Наружный диаметр трубки 5 мм, внутренний 3.3 мм. Расстояние от кварцевого кончика оптоволоконна до внутренних стенок трубки 1.35 мм. Расстояние от торца оптоволоконна до нижней границы трубки 7.5 мм, а от нижней границы до дна кюветы 3 мм. Излучение с длиной волны 1.47 мкм хорошо поглощается в воде с коэффициентом поглощения $\sim 25 \text{ см}^{-1}$ [15], что позволяет инициировать вблизи торца оптоволоконна объемное вскипание жидкости. Все эксперименты проводились при температуре 300 К с использованием скоростной видеокамеры PHOTRON FASTCAM SA-Z со скоростью съема до 10^5 кадров в секунду. Исследовался элементарный акт вскипания — динамика роста и схлопывания одиночного пузырька в трубке. Численное моделирование реализовано в коммерческом пакете Ansys Fluent 2021 с использованием метода “Volume of Fluid”, в котором рассматривается двухфазная среда “вода—пар”. В качестве механизма межфазного массообмена используется модель испарения-конденсации Ли [16], в которой скорость парообразования и конденсации пропорциональна разнице между текущей температурой и температурой насыщения. Параметры моделирования выбирались из условий эксперимента, а также таким образом, чтобы динамика межфазной границы в численном расчете соответствовала динамике роста/схлопывания пузырька в эксперименте. Моделирование осуществлено в двумерной осесимметричной постановке, где ось симметрии соответствует оси симметрии оптоволоконна. Сходимость численного решения проверялась на равномерных сетках с квадратными элементами различного размера (1, 2, 4 мкм) при помощи сопоставления динамики поверхности пузырька с одномерным решением уравнения Рэлея—Плессета [1], описывающего закон движения радиуса кавитационного пузырька в вязкой несжимаемой жидкости.

Результаты эксперимента по лазерной кавитации в окрестности торца оптоволоконна, помещенного в стеклянную трубку, показаны на рис. 1. Вскипание воды происходит перед торцом волокна, установленного вертикально. В период роста пузырек приобретает форму вертикально вытянутого сфероида, охватывает кончик оптоволоконна, и после достижения максимального размера через 0.55 мс начинает схлопываться. При схлопывании на нижнем полюсе пузырька формируется аксиальная струя жидкости, направленная к торцу оптоволоконна (рис. 1, 0.8–1.05 мс), в которой средняя скорость движения переднего фронта ($v \approx 4 \text{ м/с}$) превосходит среднюю скорость движения межфазной границы на остальных участках поверхности пузырька ($v_1 \approx 3.3 \text{ м/с}$). Кадры 0.85–

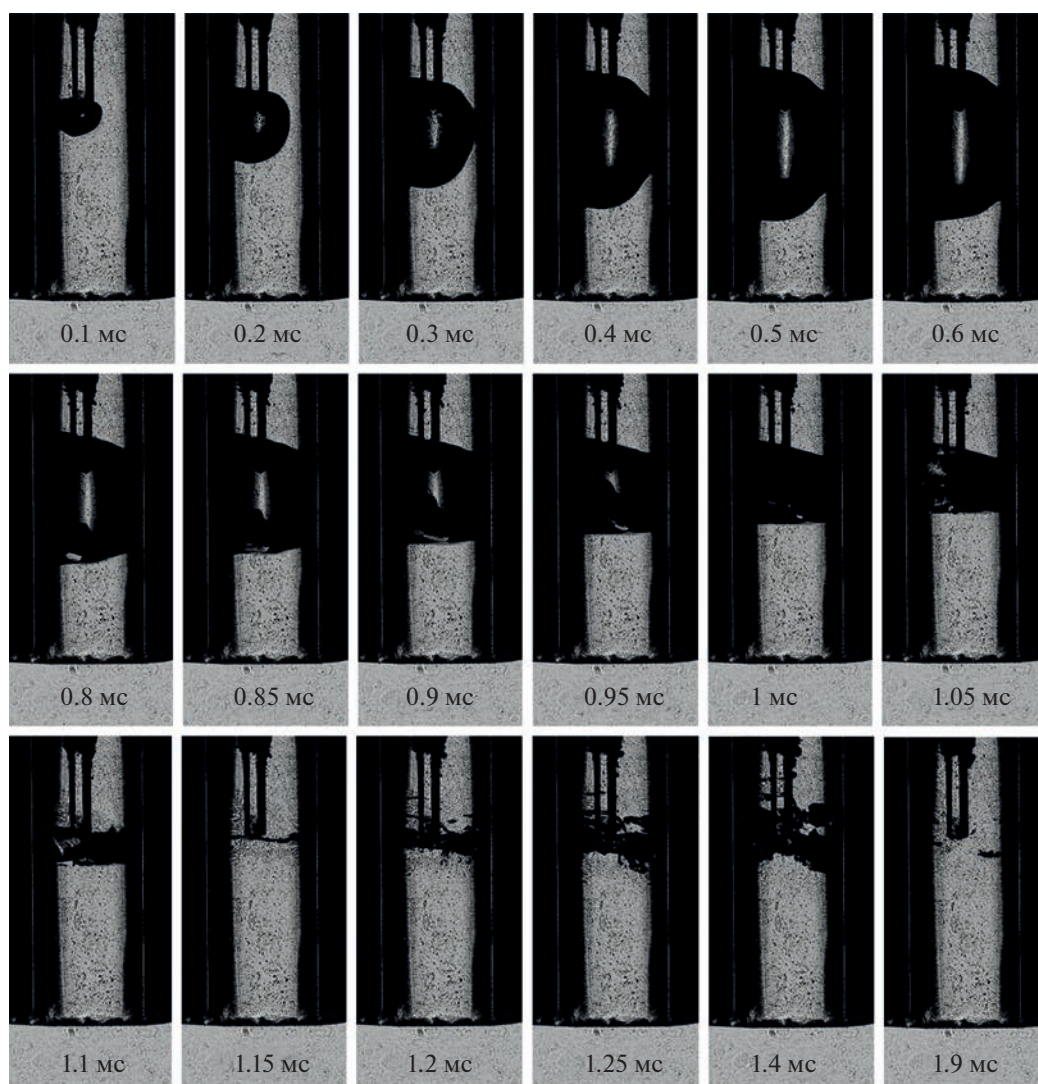


Рис. 1. Рост и схлопывания парового пузырька, возникающего на торце оптоволокну, помещенного в стеклянную трубку. Диаметр оптоволокну 0.6 мм. Временные интервалы обозначены в миллисекундах от начала момента роста.

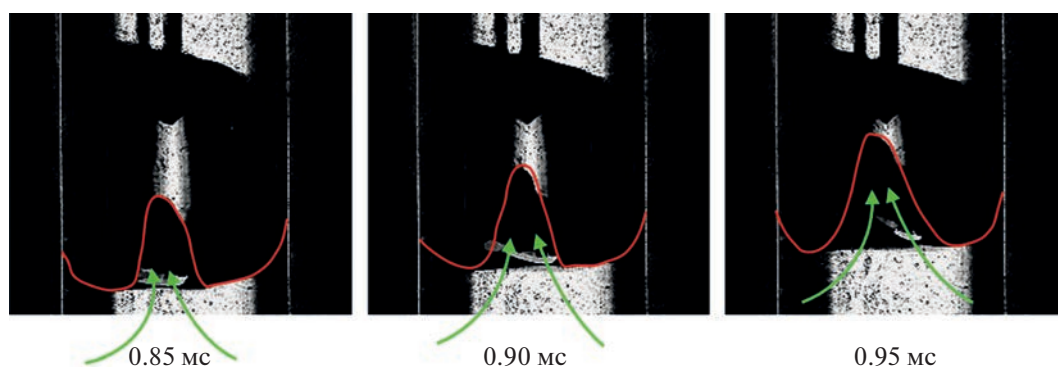


Рис. 2. Струя, распространяющаяся через схлопывающийся пузырек и направленная к торцу оптоволокну в различные моменты времени.

0.95 мс детально показаны на рис. 2, откуда получаем, что средняя скорость движения объема жидкости, сосредоточенной в струе, $V \approx 7.63$ мл/с.

Коллапс пузырька сопровождается ускоренным встречным движением жидкости сверху и снизу. В терминальной стадии коллапса пузырька

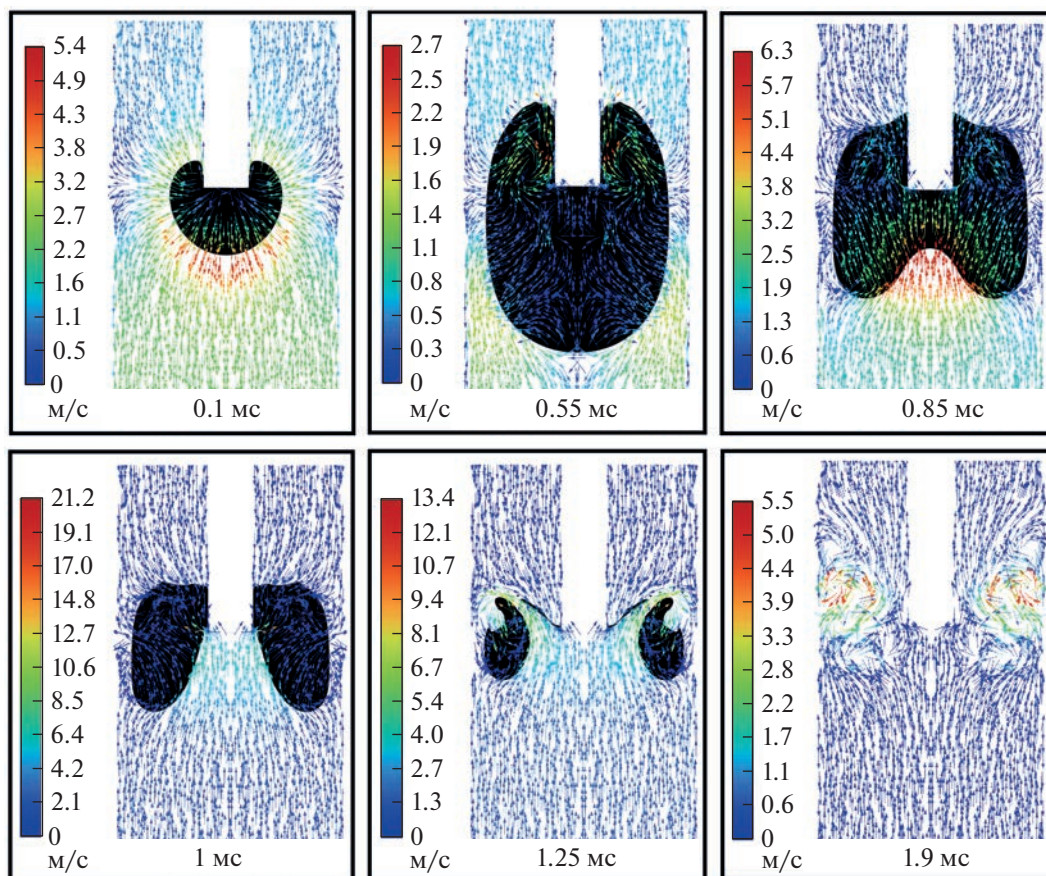


Рис. 3. Поле скоростей в процессе моделирования роста схлопывания пузырька в трубке. Черным цветом отмечена газовая фаза.

происходит столкновение струи с торцом оптоволоконна, а также жидкости, движущейся во встречном направлении. В этот момент пузырек сжимается до минимальных размеров (рис. 1, 1.15 мс). Однако последующая эволюция приводит к воспроизведению горизонтально вытянутого пузырька — «отскоку» и вторичному разрушению пузырька (рис. 1, 1.2–1.9 мс).

На рис. 3 показано поле скоростей, полученное в результате численного моделирования процесса роста и схлопывания пузырька на кончике оптоволоконна в трубке. Вводимые параметры для численного моделирования соответствуют экспериментальным значениям. На стадии роста пузырек выталкивает жидкость в направлении из трубки, тогда как при схлопывании пузырька жидкость, наоборот, втекает в трубку. Видно, что при коллапсе на нижнем полюсе пузырька формируется направленная к торцу оптоволоконна струя (рис. 3, 0.85 мс), в которой скорость движения жидкости превосходит скорость движения межфазной границы на остальных участках поверхности пузырька. Максимальная скорость

движения жидкости наблюдается в момент удара (рис. 3, 1 мс) переднего фронта жидкой струи о торец оптоволоконна. Далее в пространстве между торцом оптоволоконна и внутренней стенкой трубки возникает вихрь, вращение которого частично обусловлено как столкновением, так и встречным движением жидкости при схлопывании пузырька, принявшего тороидальную форму. В дальнейшем в окрестности торца оптоволоконна возникает тороидальный вихрь, способный формировать стационарное течение вдоль трубки. Анализ динамики изменения поля скоростей жидкости в период роста-схлопывания пузырька в трубке показывает, что к моменту достижения максимального размера пузырька, согласно рис. 3, жидкость вытекает из пространства между радиальной поверхностью пузырька и внутренней стенкой трубки, поэтому давление здесь на поверхность пузырька минимально, тогда как на полюсах давление жидкости на пузырек остается максимальным. Таким образом, струя формируется вдоль оси, соединяющей аксиально расположенные полюса поверх-

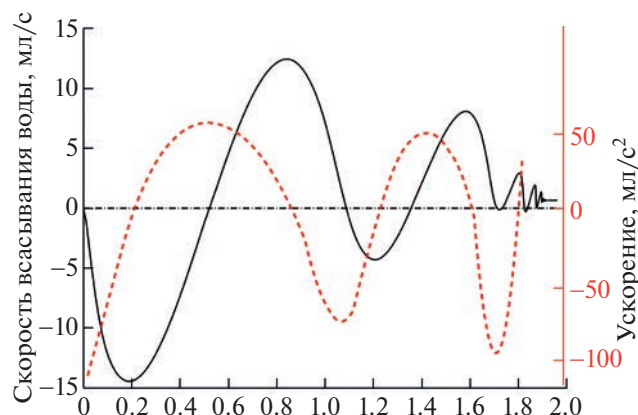


Рис. 4. Изменение объемной скорости и ускорения через нижний торец трубки. Отрицательные значения обозначают скорость выталкивания объема воды в процессе роста пузырька, положительные — скорость всасывания воды при его схлопывании.

ности пузырька в направлении от полюса пузырька к торцу оптоволоконка.

Зависимость полученной численно объемной скорости и ускорения движения воды через нижний торец трубки от времени показана на рис. 4. Отрицательные значения соответствуют вытал-

киванию объема воды из трубки при росте пузырька, положительные — всасыванию воды в трубку при схлопывании пузырька. Из графика следует, что скорость всасывания воды в трубку максимальна в период образования и движения струи (0.8–1 мс) и достигает значений ~12.5 мл/с. Большое ускорение получает вытекающая из

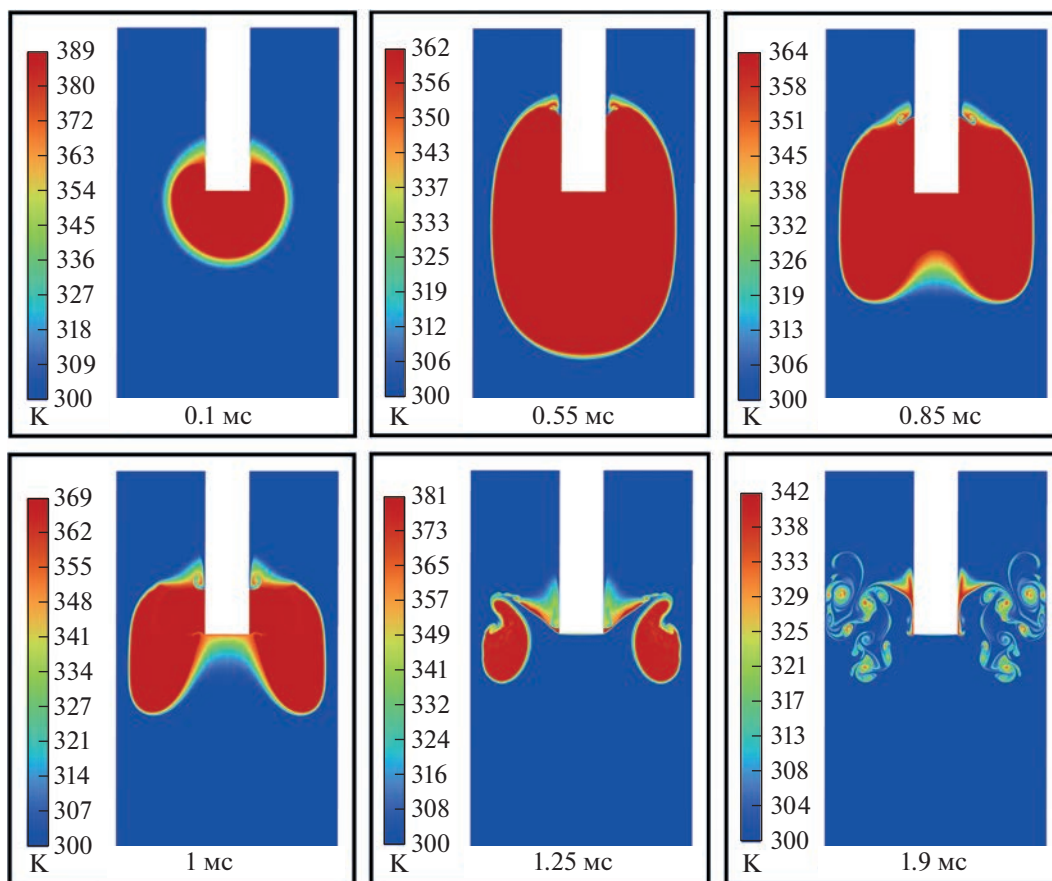


Рис. 5. Распределение температуры в процессе моделирования роста-схлопывания парового пузырька.

трубки жидкость при первом расширении парового пузырька. При этом скорость выхода воды из трубки превосходит скорость всасывания воды при его схлопывании, тогда как в последующих циклах (отскоках) скорость всасывания воды превосходит ее выброс, и жидкость преимущественно периодически втекает в трубку. В конце устанавливается небольшой стационарный поток, направленный снизу вверх через трубку. Этот поток обеспечивает тороидальный вихрь, показанный на рис. 3 (1.9 мс).

Результаты расчета температуры двухфазной среды показаны на рис. 5. Из рисунка следует, что через 1.9 мс в момент исчезновения паровой фазы температура жидкости вблизи внутренней поверхности трубки достигает 325 К (повышается на 25 градусов). При многократном повторении данного процесса жидкость нагреется до температур, при которых произойдет необратимая денатурация всех белков, находящихся на поверхности, т.е. произойдет санация поверхности.

Эффект выталкивания и последующего всасывания разогретой жидкости в трубку может иметь большое практическое значение в технических и медицинских приложениях. Например, этот эффект может быть полезен для санации поверхности и при лечении ран.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 22-19-00189).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhong X., Eshraghi J., Vlachos P., Dabiri S., Ardekani A.M. A model for a laser-induced cavitation bubble // Intern. J. Multiphase Flow. 2020. V. 132. 103433. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103433>
2. Zhang Jy., Du Yx., Liu Jq. et al. Experimental and numerical investigations of the collapse of a laser-induced cavitation bubble near a solid wall // J. Hydrodyn. 2022. V. 34. P. 189–199. <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0017-4>
3. 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 // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2020. № 150. P. 119286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286>
4. Fursenko R.V., Chudnovskii V.M., Minaev S.S., Okajima Junnosuke. Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120420. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120420>
5. Tao Lü, Wei Zhang, Fang Chen, Zhongchi Liu. Microliquid jet induced by tunable holmium laser: a potential microsurgery scalpel // Microfluid Nanofluid. 2016. V. 20. P. 10. <https://doi.org/10.1007/s10404-015-1692-z>
6. Ohl C.-D., Arora M., Dijkink R., Janve V., Lohse D. Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 074102.
7. Christos B., Ioannis K., Efthymis S., Ioanna Z. Laser-induced forward transfer of silver nanoparticle ink: time-resolved imaging of the jetting dynamics and correlation with the printing quality // Microfluid Nanofluid. 2014. V. 16. P. 493–500.
8. Robles V., Gutierrez-Herrera E., Devia-Cruz L.F., Banks D., Camacho-Lopez S., and Aguilar G. Soft material perforation via double-bubble laser-induced cavitation microjets // Phys. Fluids. 2020. V. 32. P. 042005. <https://doi.org/10.1063/5.0007164>
9. George S.D., Chidangil S., Mathur D. Minireview: Laser-induced formation of microbubbles – biomedical implications // Langmuir. 2019. V. 35. 010139.
10. Abushkin I.A., Chudnovskii V.M., Guzev M.A., Polyayev Yu.A., Garbuzov R.V. Laser Interstitial Thermotherapy in Surgical Treatment of Vascular Anomalies // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2023. V. 174. № 3. January. <https://doi.org/10.1007/s10517-023-05716-2>
11. Yusupov V., Chudnovskii V. The origin of loud claps during endovenous laser treatments // The Journal of the Acoustical Society of America. 2023. V. 153. P. 1525–1533. <https://doi.org/10.1121/10.0017436>
12. Chan Kin Foong, Pfefer T. Joshua, Teichman Joel M.H., Welch Ashley J. A Perspective on Laser Lithotripsy: The Fragmentation Processes // J. Endourology. 2001. P. 257–273. <https://doi.org/10.1089/089277901750161737>
13. Wanga Shi-Ping, Wang Qianxi, Zhanga A-Man. Eleanor Stride. Experimental observations of the behaviour of a bubble inside a circular rigid tube // Intern. J. Multiphase Flow. 2019. V. 121. P. 103096. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103096>
14. Horvat Darja, Orthaber Uroš, Schillec Jörg, Hartwigc Lars, Löschner Udo, Vrecko Andrej, Petkovšek Rok. Laser-induced bubble dynamics inside and near a gap between a rigid boundary and an elastic membrane // Intern. J. Multiphase Flow. 2018. V. 100. P. 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.12.010>
15. Deng R., He Y., Qin Y., Chen Q., Chen L. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900–2500 nm) // Yaogan Xuebao – Journal of Remote Sensing. 2012. V. 16. № 1. P. 192–206.
16. Lee W.H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling T. Veziroglu (Ed.). Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications. V. 1. Hemisphere Publishing, 1980. P. 407–432.

THE EFFECT OF ACCELERATED ABSORPTION OF LIQUID IN A TUBE DURING LASER CAVITATION ON A LASER HEATING ELEMENT

V. M. Chudnovskii^a, Academician of the RAS M. A. Guzev^a, E. P. Dats^a, and A. V. Kulik^a

^aInstitute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

The expansion and collapse of a cavitation bubble during laser heating and subcooled boiling of water in the vicinity of the tip of an optical fiber (laser heating element) installed in a water-filled glass tube with two open ends is studied experimentally and numerically. Cavitation, initiated by continuous laser radiation, is accompanied by the pushing and pulling movement of the heated liquid in the tube and outside it. For the first time, it has been shown that in a tube with an installed laser heating element in a liquid flow moving behind the walls of the bubble, when it collapses at the pole of the bubble surface remote from the end, a liquid jet appears, directed through the bubble to the end of the optical fiber. The jet speeds up the process of sucking liquid into the tube.

Keywords: laser, cavitation, numerical modeling, two-phase medium