

УДК 536.2

СЕЛЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ ОБОЛОЧЕК ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЕЙ, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ

© 2022 г. С. Н. Мокрин^{1,2,*}, академик РАН М. А. Гузев¹, Д. А. Терешко¹, А. В. Кулик^{1,2}, С. С. Минаев^{1,3}, И. А. Абушкин⁴, В. М. Чудновский^{1,5}

Поступило 26.05.2022 г.

После доработки 26.05.2022 г.

Принято к публикации 17.06.2022 г.

Исследуется способ селективного разогрева оболочки полости, заполненной жидкостью, с использованием разогретых затопленных струй, генерируемых при лазерном нагреве жидкости на торце оптоволокну, введенного в полость. Экспериментально показано, что струи, проходя сквозь “холодную” окружающую жидкость, при столкновении с оболочкой нагревают ее, тогда как температура окружающей жидкости поднимается незначительно. Численное моделирование данного процесса позволяет оценить время нагрева замкнутых оболочек до температуры тепловой модификации стенок патологических объектов и санации поверхностей в зависимости от мощности лазерного излучения. Полученный результат важно учитывать при проведении лазероиндуцированной прецизионной очистки и санации поверхностей в замкнутых объемах, при разработке медицинских технологий лазерного хирургического лечения патологически измененных сосудов, кист и других приложениях.

Ключевые слова: лазерное излучение, затопленная струя, кипение, пузырьки, полость, теплоперенос

DOI: 10.31857/S2686740022060128

В медицине и технике часто приходится решать задачи селективного разогрева замкнутых оболочек полостей, заполненных жидкостью. При этом необходимо нагреть оболочку так, чтобы температура жидкости, заполняющей объем полости, в процессе нагрева изменилась незначительно. Подобная ситуация распространена в хирургии, когда тепло используется, например, для лечения кист и сосудистых аномалий [1, 2]. Кисты – это патологические образования, имеющие стенку (замкнутую оболочку) и наполненные жидкостью. Для устранения кисты необходимо разогреть только ее внутреннюю оболочку. Если при нагреве кисты существенно увеличится тем-

пература жидкости, содержащийся в ней, то с большой вероятностью может образоваться ожог окружающих тканей и повреждение близлежащих анатомических структур. В технических приложениях нежелательный нагрев окружающей среды может возникнуть при проведении лазерной очистки поверхностей, когда одновременно необходимо провести санацию и стерилизацию этих поверхностей [3].

В данной работе для решения сформулированной проблемы предлагается использовать разогретые затопленные струи, генерируемые в заполненной жидкостью полости при кавитации, индуцированной лазерным нагревом жидкости в окрестности кончика оптоволокну, введенного в полость. Затопленные струи широко применяются в технике, микробиологии, медицине, биотехнологиях и др. [4–9]. Однако струи, нагретые до температуры, близкой к температуре насыщения, генерируются только при кавитации, возникающей при недогревом до температуры насыщения вскипании жидкости [10–12]. Явление кипения с недогревом – это кипение, локализованное в окрестности сосредоточенного разогретого нагревательного элемента, погруженного в окружающую относительно “холодную” жидкость [13]. Разогретые затопленные струи, генерируемые при кипении с недогревом, с большой скоростью

¹ Институт прикладной математики
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Россия

³ Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Центр медицинских лазерных технологий,
Челябинск, Россия

⁵ Тихоокеанский океанологический институт
им. В. И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

*E-mail: msn_primat@mail.ru

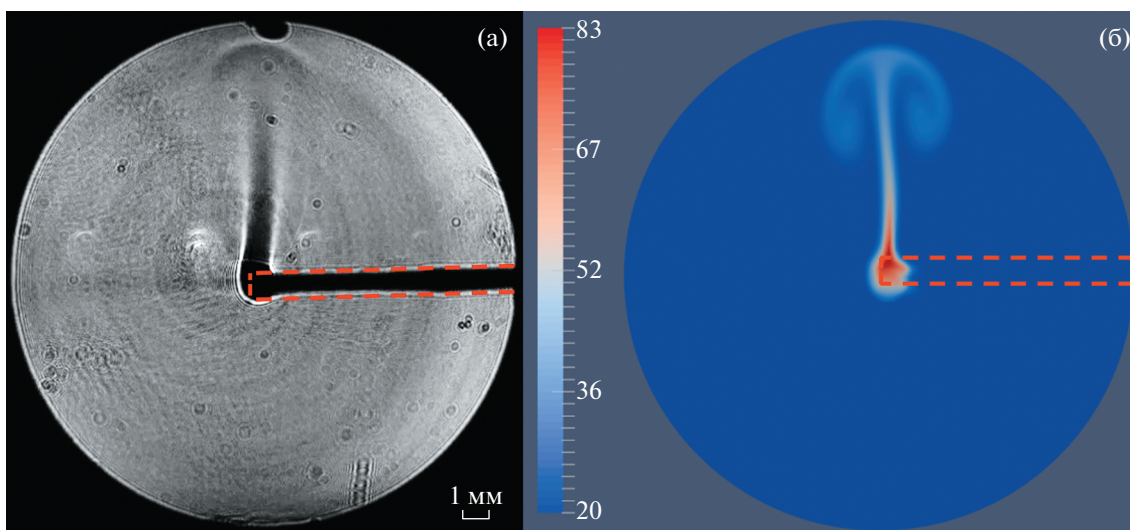


Рис. 1. Распространение струи нагретой жидкости, вызванное силой плавучести в режиме свободной конвекции. Мощность лазерного излучения 0.5 Вт. Диаметр оптоволоконка 600 мкм. а – Распространение нагретой жидкости, вызванное силой плавучести (эксперимент); б – поле температур, полученное в результате численного моделирования. Красной пунктирной линией выделено оптоволоконно.

распространяются от поверхности нагревательного элемента в глубь жидкости [10–12]. Эти струи, проходя сквозь “холодную” окружающую жидкость, будут сталкиваться с оболочкой и растекаться вдоль ее поверхности, передавая оболочке свое тепло. Поскольку скорость движения струи достаточно высока, а масса струи мала, то количество тепла, передаваемого в окружающую среду, должно быть незначительным по сравнению с теплоотдачей на границе. Таким образом, предложенный способ передачи тепла можно использовать для селективного разогрева замкнутых оболочек, заполненных жидкостью.

Для исследования данного способа эксперименты по инициации кипения с недогревом были проведены для воды в замкнутой кювете с использованием установки, описанной в работе [14]. Затопленные струи генерировались в окрестности сосредоточенного нагревательного элемента, представляющего собой кончик оптоволоконка, по которому распространяется лазерное излучение. Конверсия лазерного излучения в тепло приводила к нарастанию и последующему схлопыванию парового пузырька, который в процессе коллапса в окрестности торца оптоволоконка генерировал кумулятивную нагретую затопленную струю [10–12, 14]. Поскольку непосредственное измерение температуры оболочки кюветы в эксперименте сопряжено с техническими трудностями, было проведено численное исследование процесса, которое дополнило качественные результаты экспериментальных данных. При моделировании распределения тепла в жидкости, заполняющей кювету, использовалась система уравнений Навье–Стокса с учетом плавучести

совместно с уравнением теплопроводности [15]. Начально-краевая задача данной модели решалась методом конечных элементов при помощи свободно распространяемого программного пакета FreeFEM. Все параметры жидкости соответствовали характеристикам воды.

В эксперименте лазерное излучение подавалось в замкнутую кювету с водой по оптоволоконку таким образом, что кварцевый кончик оптоволоконка диаметром 600 мкм, в окрестности которого происходило вскипание воды, располагался в центре кюветы диаметром 26 мм. Паровой пузырек нарастал и схлопывался в результате разогрева торца оптоволоконка, покрытого тонким слоем оксида двухвалентного железа FeO, в котором излучение практически полностью поглощалось. На поверхности торца, покрытого слоем поглощающего излучение вещества, развивалось поверхностное вскипание воды, не зависящее от длины волны лазерного излучения [14]. Коллапс пузырька приводил к возникновению нагретых затопленных струй.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1а и рис. 2а. На рис. 1а показано распространение струи нагретой жидкости, вызванное силой плавучести в режиме свободной конвекции. Нагретая жидкость визуально определяется “на просвет” из-за различия коэффициентов преломления в нагретой и не нагретой жидкости. Конвекция наблюдается при мощности лазерного излучения 0.5 Вт. При повышении мощности лазерного излучения до 3 Вт вода в окрестности торца оптоволоконка вскипает, что сопровождается возникновением затопленной нагретой струи, распространяющейся от торца

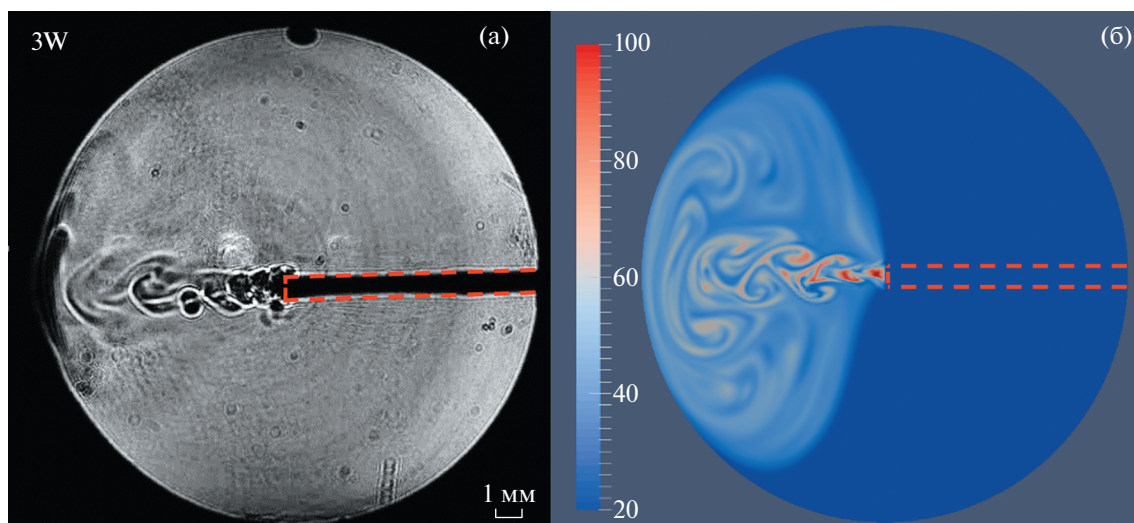


Рис. 2. Распространение нагретой жидкости при кипении с недогревом инициированного на торце оптоволоконка. Мощность лазерного излучения 3 Вт. Диаметр оптоволоконка 600 мкм. а – Нагретая затопленная струя, распространяющаяся от торца оптоволоконка к стенке кюветы (эксперимент); б – поле температур, полученное в результате численного моделирования. Красной пунктирной линией выделено оптоволоконко.

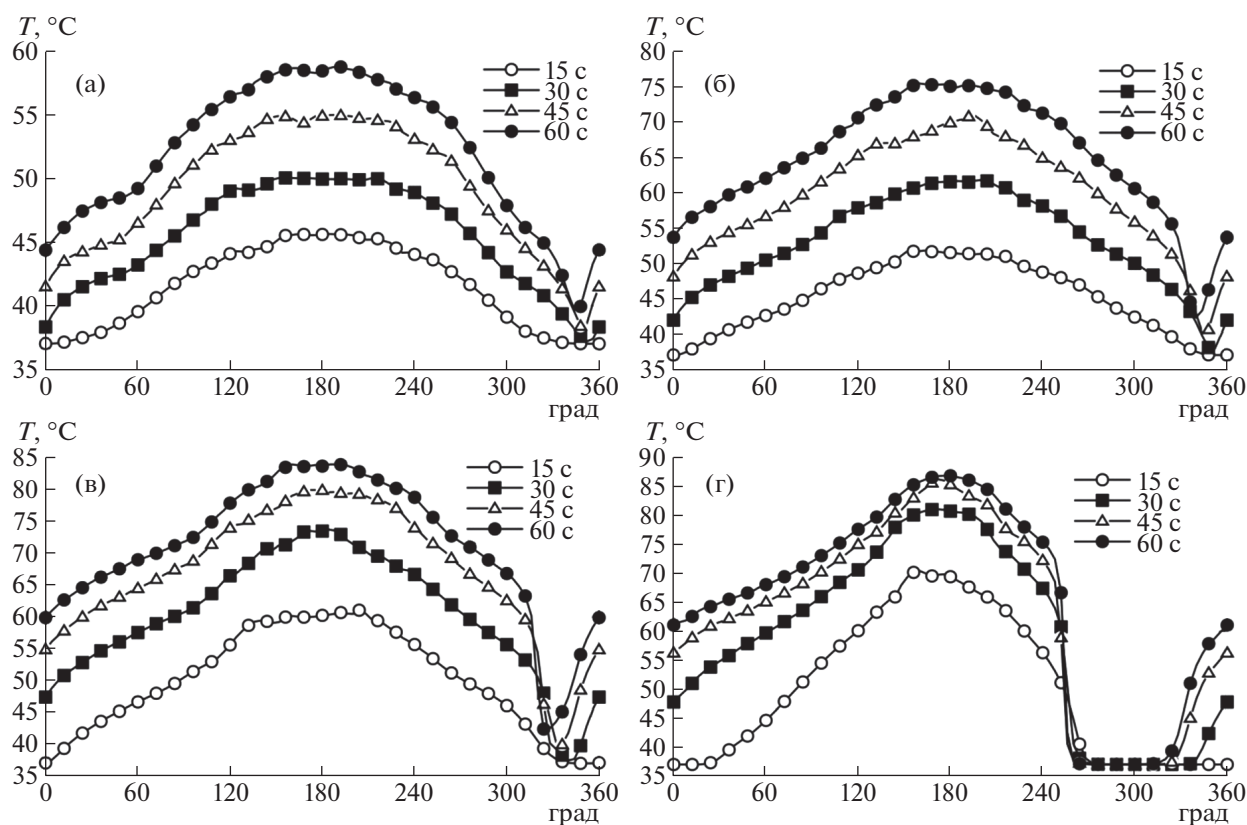


Рис. 3. Рассчитанный методом компьютерного моделирования профиль температуры, образованный вдоль границы области, размеры которой соответствуют размерам экспериментальной кюветы, в условиях, когда температура окружающей жидкости и коэффициент теплоотдачи на границе равны 37°C и $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ соответственно. Расчеты проведены для мощности лазерного излучения 1.5 Вт (а), 3 Вт (б), 5 Вт (в) и 7 Вт (г). На вертикальной оси показаны значения температуры в градусах Цельсия через 15, 30, 45 и 60 с от момента включения лазерного генератора. По горизонтальной оси указан угол в градусах, где 0° – начало оси оптоволоконка, 180° соответствует торцу оптоволоконка.

оптоволоконна к стенке кюветы, рис. 2а. Затопленная струя движется к стенке кюветы, сталкивается и растекается вдоль внутренней границы стенки (оболочки) кюветы.

На рис. 1б показано поле температур, рассчитанное для свободной конвекции, а на рис. 2б — для режима с образованием нагретой затопленной струи.

На рис. 3 показаны профили температуры внутренней границы замкнутой оболочки, размерами и формой совпадающей с экспериментальной кюветой, рассчитанные для кисты молочной железы, оболочку которой образует жировая ткань. Расчеты проведены для мощности лазерного излучения 1.5 Вт (рис. 3а), 3 Вт (рис. 3б), 5 Вт (рис. 3в) и 7 Вт (рис. 3г). Показаны значения температуры через 15, 30, 45 и 60 с от момента включения лазерного генератора. По оси абсцисс указан угол в градусах, где 0° соответствует началу оси оптоволоконна, 180° соответствует торцу оптоволоконна, а отсчет выполняется против часовой стрелки. В начальный момент температура среды совпадает с физиологической температурой 37°C . Результаты численного моделирования, полученные для разных значений мощности лазерного излучения в различные моменты времени лазерного нагрева от момента включения лазерного генератора, показывают, что стенка кисты достаточно быстро разогревается до температуры 70°C , при которой происходит необратимая денатурация основных белков, входящих в состав интимы стенки кисты. Термомодификация ткани стенки кисты приводит к ее последующему замещению фиброзной тканью. Асимметрия кривых на рис. 3 возникает вследствие учета в модели плавучести нагретой жидкости, наблюдаемой в эксперименте.

Таким образом, нагретые затопленные струи переносят тепло от торца лазерного оптоволоконна к стенкам замкнутой оболочки через окружающую жидкость, имеющую значительно более низкую температуру в сравнении с температурой струи. При столкновении с оболочкой нагретая жидкость растекается по ее внутренней поверхности и, как показывают результаты численного моделирования, достаточно быстро и эффективно передает тепло к стенке кюветы. В зависимости от мощности излучения, менее чем за одну минуту лазерного нагрева температура стенки замкнутой оболочки с диаметром полости 26 мм на фронтной струи повышается до температуры достаточной для санации поверхности и тепловой деградации патологических образований, содержащих жидкость.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mohamad Feras Marqa, Serge Mordon, Nacim Betrouni.* Laser interstitial thermotherapy of small breast fibroadenomas: Numerical simulations // *Lasers in Surgery and Medicine.* 2012. V. 44 (10). P. 832–839. <https://doi.org/10.1002/lsm.22097>
2. *Абушкин И.А., Денис А.Г., Романова О.А., Привалов В.А., Васильев И.С., Лаппа А.В.* Инфракрасная лазерная термотерапия в лечении артериовенозных мальформаций. Избранные страницы сосудистой хирургии // *Материалы XXXI Международной конференции Российского общества ангиологов и сосудистых хирургов.* 25–26 ноября 2015 г. Москва. Ангиология и сосудистая хирургия. 2015. Т. 21. № 4 (приложение). С. 3–4.
3. *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. <https://doi.org/10.1063/1.2337506>
4. *Koch M., Rossello J.M., Lechner C., Lauterborn W., Mettin R.* Dynamics of a Laser-Induced Bubble above the Flat Top of a Solid Cylinder—Mushroom-Shaped Bubbles and the Fast Jet // *Fluids.* 2022. V. 7. 2. <https://doi.org/10.3390/fluids7010002>
5. *Kadivar E., el Moctar O., Skoda R., Loschner U.* Experimental study of the control of cavitation-induced erosion created by collapse of single bubbles using a micro structured riblet. *Wear* 2021. V. 486–487. 204087. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204087>
6. *Dijkink R., Le Gac S., Nijhuis E., van den Berg A., Vermees I., Poot A., Ohl C.-D.* Controlled cavitation—cell interaction: trans-membrane transport and viability studies, *Phys. Med. Biol.* 2007. V. 53. P. 375. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/2/006>
7. *Oyarte Gálvez L., Fraters A., Offerhaus H.L., Versluis M., Hunter I.W., Fernández Rivas D.* Microfluidics control the ballistic energy of thermocavitation liquid jets for needle-free injections // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 127. P. 104901. <https://doi.org/10.1063/1.5140264>
8. *Afanador-Delgado S., Marañón-Ruiz V., Sevilla-Escoboza R., Chiu R.* Synthesis of SiO_2 nanoparticles assisted by thermocavitation in natural dye (*Hibiscus sabdariffa* L.) // *Opt. Laser Technol.* 2022. V. 147. P. 107559. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107559>
9. *Bin Zhang, Darren Banks, Vicente Robles, Luis Felipe Devia, Cruz Guillermo Aguilar.* High resolution optical investigation of laser intensity and solution temperature effects on thermocavitation. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2022. V. 136. P. 110683. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110683>
10. *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. of Heat and Mass Transfer.* 2020. V. 150. P. 119286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286> 0017-9310
11. *Fursenko R.V., Chudnovskii V.M., Minaev S.S., Okajima J.* Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liq-

- uid // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120420.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120420> 0017-9310/©2020
12. Chudnovskii V.M., Guzev M.A., Yusupov V.I., Fursenko R.V., Okajima J. Study of methods for controlling direction and velocity of liquid jets formed during subcooled boiling // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 173. P. 121250.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121250>
 13. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. Киев: Наукова думка, 1980. 316 с.
 14. Кулик А.В., Мокрин С.Н., Краевский А.М., Минаев С.С., Гузев М.А., Чудновский В.М. Особенности динамики струйного потока, генерируемого при поверхностном кипении жидкости на лазерном нагревателе // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. Вып. 2. С. 20–23.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.02.51944.18949>
 15. Jaluria Y. Natural Convection: Heat and Mass Transfer. N.Y.: Pergamon, 1980. 326 p.

SELECTIVE LASER HEATING OF CLOSED CAVITY SHELLS FILLED WITH LIQUID

**S. N. Mokrin^{a,b}, Academician of the RAS M. A. Guzev^a, D. A. Tereshko^a, A. V. Kulik^{a,b},
 S. S. Minaev^{a,c}, I. A. Abushkin^d, and V. M. Chudnovsky^{a,e}**

^a *Institute of Applied Mathematics of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^b *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

^c *P.N. Lebedev Physical Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d *Center for Medical Laser Technologies, Chelyabinsk, Russia*

^e *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

A method for selective heating of a cavity shell filled with liquid using heated submerged jets generated by laser heating of a liquid at the end of an optical fiber introduced into the cavity is investigated. It is experimentally shown that the jets, passing through the “cold” surrounding liquid, collide with the shell and heat it, while the temperature of the surrounding liquid rises insignificantly. Numerical simulation of this process allows us to estimate the heating time of closed shells to the temperature of thermal modification of the walls of pathological objects and sanitation of surfaces depending on the power of laser radiation. It is important to consider the obtained result during laser-induced precision cleaning and sanitation of surfaces in closed volumes, when developing medical technologies for laser surgical treatment of pathologically altered vessels, cysts, and other applications.

Keywords: laser radiation, submerged jet, boiling, bubbles, cavity, heat transfer