

УДК 532.5

MSC2020 35Q79 + 76D07

© Е. П. Дац^{1,2}, А. В. Кулик^{1,3}, М. А. Гузев¹, В. М. Чудновский¹

Численный и экспериментальный метод исследования кавитации при непрерывном лазерном нагреве воды

В работе представлены новые методы исследования процесса лазерной кавитации в окрестности торца оптоволокна, погруженного в воду. В рамках классических подходов механики сплошных сред предложена математическая модель для расчета температурного поля в процессе непрерывного лазерного воздействия. Предложен новый экспериментальный метод исследования непрерывного лазерного нагрева и лазерной кавитации, позволяющий одновременно наблюдать процесс нагрева воды и роста парового пузырька, возникающего при её перегреве. Представленные результаты численного расчета в рамках предложенной математической модели хорошо согласуются с наблюдаемыми экспериментальными данными и могут быть использованы для построения и верификации математических моделей межфазного тепломассообмена, вызванного локальным тепловым воздействием.

Ключевые слова: лазеры, парообразование, кавитация, численное моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.47910/FEMJ202514>

Введение

Лазерная кавитация — процесс быстрого роста и схлопывания парового пузырька в области локального теплового нагрева жидкой среды в результате поглощения лазерного излучения. Данное явление находит применение в хирургии благодаря возможности использования направленного быстрого теплопереноса жидкой среды в виде кавитационных микроструй.

Моделирование процесса лазерного нагрева жидкой среды необходимо для оценки уровня локального перегрева воды в зависимости от мощности лазерного излучения и времени его действия. Как правило, в работах, посвященных проблеме

¹ Институт прикладной математики ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7.

² Владивостокский государственный университет, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41.

³ Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

Электронная почта: datsep@gmail.com (Е. П. Дац), kulik_av@dvfu.ru (А. В. Кулик), guzev@iam.dvo.ru (М. А. Гузев), vm53@mail.com (В. М. Чудновский).

моделирования лазерной кавитации, температурное распределение задано в виде некоторой функции [1]. В представленной работе предложена математическая модель, позволяющая рассчитать процесс непрерывного лазерного нагрева и получить температурное поле, хорошо согласующееся с известными экспериментальными данными [2].

Экспериментальному исследованию лазерной кавитации за последнее время посвящено много работ, например [2–6], в которых можно выделить два метода наблюдения кавитации. В первом методе [1–3] съемка динамики парового пузырька осуществляется «на просвет», когда высокоскоростной камерой фиксируется тень, возникающая при изменении плотности жидкой среды в процессе кавитации. Этот метод является простым в реализации и позволяет качественно описать динамику парового пузырька и наблюданную в процессе кавитации кумулятивную струю. Второй метод [5, 6] заключается в непосредственном наблюдении парового пузырька — фиксации отражения подсвечивающего пузырек лазера в объектив высокоскоростной камеры. Метод «на отражение» является более сложным в реализации, так как требует тонких настроек оптики и необходимости использовать для формирования яркой картинки мощные подсвечивающие лазеры. Преимуществом метода является непосредственное наблюдение парового пузырька без искажения его размеров. При этом, в отличие от метода «на просвет», метод «на отражение» не позволяет наблюдать динамику кавитационной струи.

В настоящем исследовании впервые предложен новый метод, позволяющий объединить описанные выше экспериментальные методы: показано, что с использованием расположенного под определенным углом светоотражающего экрана можно одновременно наблюдать как отражение парового пузырька, так и его тень, отбрасываемую на экран. Для полученных в рамках предложенного метода экспериментальных данных сделано сравнение с результатами численного расчета, которое показывает хорошее согласование.

1. Математическая модель

Система уравнений включает в себя классические уравнения неразрывности, изменения импульса и энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{u}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) &= -\nabla p + \nabla \left[\mu \left(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) \right], \\ c_p \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} c_p \rho T) &= \nabla (\lambda \nabla T) + Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda(T)$, $c_p(T)$, $\rho(T)$, $\mu(T)$ — теплопроводность, теплоемкость, плотность и вязкость воды зависят от температуры согласно известным экспериментальным данным [7], Q — источник в уравнении энергии (1), задающий лазерный нагрев. Задача решается в цилиндрической системе координат в осесимметричной постановке при помощи системы Fluent 2021 (метод конечных объемов). На рис. 1 представлена схема расчетной области.



Рис. 1. Расчетная область.

Особенностью модели является использование функции источника Q , которая соответствует закону Бугера – Ламберта – Бэра и для рассматриваемой задачи принимает вид:

$$Q = kQ_0 \exp(-kz). \quad (2)$$

Здесь Q_0 — плотность потока лазерного излучения на торце оптоволокна, z — расстояние от торца оптоволокна параллельно его оси до точки среды, k — коэффициент поглощения лазерного излучения в воде. Действие источника (2) ограничено цилиндрической областью, примыкающей к торцу оптоволокна (рис. 1). Такое ограничение связано с распространением лазерного излучения вдоль оси оптоволокна и слабым угловым рассеиванием относительно оси. Вне данной области функция Q равна нулю. Для используемых в эксперименте параметров оптоволоконного лазера коэффициент $k = 2850 \text{ м}^{-1}$ [8], $Q_0 = 1.77 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$.

2. Экспериментальный метод исследований

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки. В эксперименте используется непрерывное излучение оптоволоконного лазера «ЛАМИ-Гелиос» с длиной волны $\lambda = 1.47 \mu\text{м}$. Съемка выполнена при помощи скоростной видеокамеры «Photron Fastcam SA-Z». В качестве жидкой среды используется деаэрированная вода при начальной температуре $T_0 = 16^\circ\text{C}$. Вода находится в стеклянной кювете с размерами $125 \times 23 \times 41 \text{ мм}$. В эксперименте используется источник освещения — подсвечивающий лазер с длиной волны $\lambda = 0.52 \mu\text{м}$. В начале эксперимента кончик оптоволокна опускается в воду на расстоянии 1.5 мм от светоотражающего экрана. Угол между плоскостью экрана и осью объектива камеры составляет 45° . Луч подсвечивающего лазера направлен в центр экрана. Угол между осью объектива камеры и направлением луча подсвечивающего лазера составляет 90° . Расстояние от объектива камеры до светоотражающего экрана составляет 20 см.

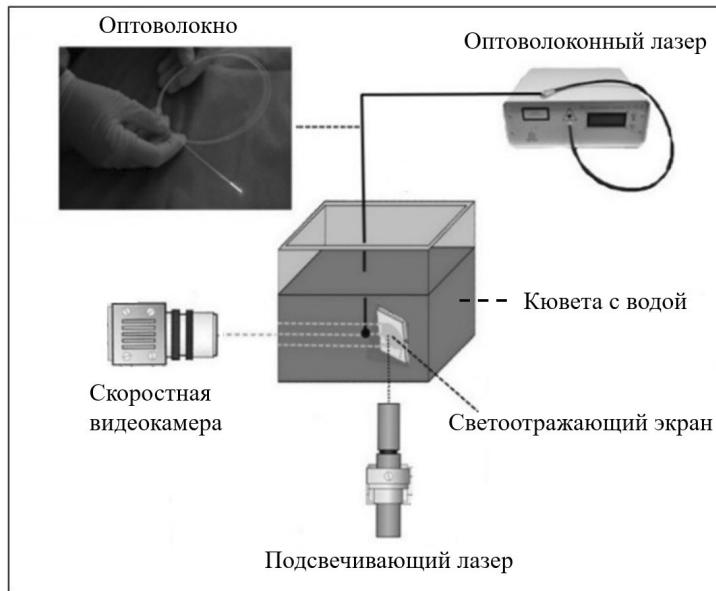


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для регистрации элементарного акта вскипания воды в окрестности кончика оптоволокна.

Непрерывное лазерное излучение, выходя из торца оптоволокна, поглощается водой, тем самым нагревая ее и, следовательно, изменяя ее плотность. Изменение плотности приводит к формированию тени на светоотражающем экране. Таким образом, в процессе лазерного нагрева появляется возможность наблюдать динамику области нагрева, где градиент плотности воды превышает некоторое значение, при котором происходит отклонение луча подсвечивающего лазера в направлении к светоотражающему экрану. В то же время светоотражающий экран служит источником света, что позволяет наблюдать формирующийся паровой пузырек при съемке «на отражение» (непосредственное наблюдение парового пузырька при отражении от него луча подсвечивающего лазера в объектив камеры). Отметим, что фокусное расстояние камеры и расстояние от торца оптоволокна до светоотражающего экрана подбирается таким образом, чтобы одновременно видеть и тень и сам пузырек.

На рис. 3 показан результат использования представленного метода: на каждом кадре пунктирная линия разделяет правую часть кадра, на которой показано изображение кончика оптоволокна и пузырька в отражённом свете, и левую часть, на которой показана их тень. Скорость видеосъёмки составляет 252000 кадров в секунду, начальная температура воды 16^0C , диаметр оптоволокна $600 \mu\text{m}$. Кадр 1 (рис. 3) соответствует моменту начала работы лазера ($t_1=0 \text{ мс}$). В кадре 2, соответствующем моменту времени $t_2 = 68.47 \text{ мс}$, слева показана тень, отбрасываемая кончиком оптоволокна и областью разогретой под торцом оптоволокна воды. В кадре 3 (рис. 3) показан момент появления на торце оптоволокна парового пузырька. Время между

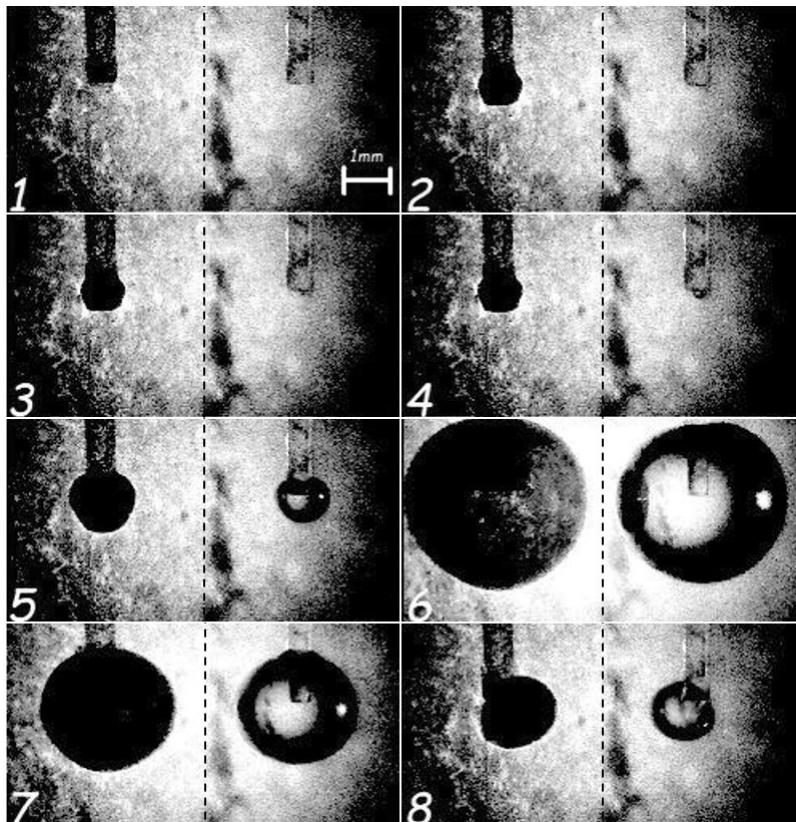


Рис. 3. Одномоментное изображение парового пузырька (слева от пунктирной линии), а также тень области нагрева воды и тень пузырька (справа от пунктирной линии) в различные моменты времени.

кадрами 2–3 и 3–4: $\Delta t_{23} = 5 \mu\text{s}$, $\Delta t_{34} = 5 \mu\text{s}$, между кадрами 4–5: $\Delta t_{45} = 35 \mu\text{s}$, между кадрами 5–6: $\Delta t_{56} = 340 \mu\text{s}$.

Кадры 3–6 демонстрируют рост парового пузырька и его тени, что позволяет оценить толщину слоя разогретой воды, распределённой по поверхности пузырька в его динамике. Динамика роста парового пузырька свидетельствует о процессе поверхностного кипения, так как пузырек возникает из маленького зародыша и далее растет, сохраняя свою гладкую форму поверхности. Кадр 6 соответствует максимальному размеру пузырька. Далее пузырёк начинает схлопываться (кадры 7, 8). Время между кадрами 6 и 7: $\Delta t_{67} = 234 \mu\text{s}$; между кадрами 7 и 8: $\Delta t_{78} = 50 \mu\text{s}$. В данном эксперименте время нагрева воды (кадры 1–2 рис. 3) приблизительно в 170 раз больше времени роста пузырька от момента его появления до достижения максимального размера. Средняя скорость роста пузырька между кадрами 4 и 5: $V \approx 9.1 \text{ м/с}$, а между кадрами 5 и 6: $V \approx 2.2 \text{ м/с}$.

3. Сравнение численных и экспериментальных данных

В начальный момент времени в расчетной области задана температура $T = T_0$, атмосферное давление $p = 10^5$ Па и нулевая скорость $\vec{u} = 0$. На границе расчетной области Γ_1 задано условие прилипания ($\vec{u} = 0$) и равенство нулю нормальной компоненты вектора теплового потока $\partial T / \partial n = 0$. На границе Γ_2 задано равенство давления атмосферному $p = 10^5$ Па и начальная температура $T = T_0$. Результаты расчетов и сопоставление с экспериментальными данными представлено на рис. 4. На рис. 4А показана тень, формирующаяся в результате нагрева воды при экспери-

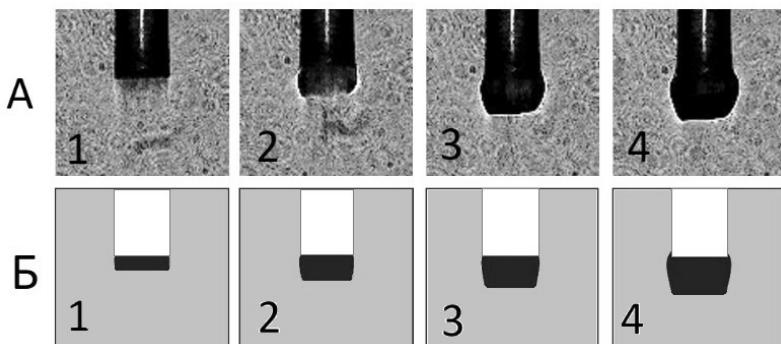


Рис. 4. Нагрев воды в окрестности торца оптоволокна: эксперимент (А) и расчет (Б), времена кадров соответствуют значениям $t_1 = 10$ мс, $t_2 = 15$ мс, $t_3 = 30$ мс, $t_4 = 45$ мс.

менальной съемке «на просвет». На рис. 4Б показана область, в которой значения градиента температур превышают $5 \cdot 10^5$ К/м, что соответствует значениям градиента плотности, при котором происходит отклонение подсвечивающего лазера от объектива фотокамеры. Форма данной области качественно совпадает на разных временных отрезках с наблюдаемыми экспериментальными данными. Несмотря на прямолинейное распространение лазерного луча от торца оптоволокна, форма тени выпукла, что объясняется эффектом теплового расширения воды, который учитывается в процессе моделирования.

Заключение

Полученные результаты исследования лазерной кавитации позволяют определить размеры области нагрева воды и момент возникновения парового пузырька. Наблюдаемая картина роста парового пузырька в области перегрева соответствует процессу поверхностного парообразования. Распространение перегретой области соответствует результатам численного моделирования лазерного нагрева в рамках закона Бугера – Ламберта – Бэра. С помощью представленного экспериментального метода можно одновременно визуализировать процесс нагрева воды и определять размеры парового пузырька в процессе кавитации, что может быть использовано для верификации моделей межфазного массообмена.

Список литературы

- [1] Kosyakov V. A., Fursenko and Chudnovsky R. V. V. M., “Numerical study of the temperature of cumulative jet formed as a result of laser-induced subcooled boiling at the end of the waveguide”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2025.
- [2] Кулик А. В., Мокрин С. Н., Краевский А. М., Минаев С. С., “Features of dynamics of a jet flow generated on a laser heater by surface boiling of liquid”, *Technical Physics Letters*, 2022.
- [3] Чернов А. А., Левин А. А., Адамова Т. П., “Исследование роста и последующего коллапса парового пузырька, образованного в результате воздействия на недогретую жидкость лазерного излучения”, *Теплофизика и аэромеханика*, 2023.
- [4] Reuter F., Ohl C.-D., “Supersonic needle-jet generation with single cavitation bubbles”, *Appl. Phys. Lett.*, 2021.
- [5] Koch M., J., Lechner C., Reuter F., “Dynamics of a Laser-Induced Bubble above the Flat Top of a Solid Cylinder—Mushroom-Shaped Bubbles and the Fast Jet”, *Fluids*, 2022.
- [6] Zhang Y., Qiu X., Zhang X., Tang N., “Collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near the edge of a rigid wall”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020.
- [7] *Engineering Toolbox [online]*, 2001, <https://www.engineeringtoolbox.com>.
- [8] Deng R., He Y., Qin Y., Chen Q., “Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900 - 2500 nm)”, *Journal of Remote Sensing*, 2012.

Поступила в редакцию
22 сентября 2025 г.

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

Dats E. P.^{1,2}, Kulik A. V.^{1,3}, Guzev M. A.¹, Chudnovskii V. M.¹ Numerical and experimental method for studying cavitation during continuous laser heating of water. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2025. V. 25. No 2. P. 211–217.

¹ Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

² Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russiz

ABSTRACT

This paper presents new methods for studying laser cavitation near the tip of an optical fiber immersed in water. Using classical approaches in continuum mechanics, a mathematical model is proposed for calculating the temperature field during continuous laser exposure. A new experimental method for studying continuous laser heating and laser cavitation is proposed, allowing for the simultaneous observation of water heating and the growth of a vapor bubble that occurs during its overheating. The numerical simulation results presented within the proposed mathematical model are in good agreement with observed experimental data and can be used to construct and verify mathematical models of interphase heat and mass transfer caused by localized thermal exposure.

Key words: *lasers, evaporation, cavitation, numerical simulation*.