

УДК 532.5

MSC2020 35Q79 + 76D07

© М. А. Гузев¹, Е. П. Дац¹, Ю. П. Пахалюк², В. М. Чудновский¹

Численное моделирование эволюции парового пузыря в условиях лазероиндуцированной кавитации

На основе модели парообразования-конденсации Ли получены численные решения, описывающие процесс роста и схлопывания пузырьков, формирующихся на торце оптоволокна при лазерном нагреве. Найдены параметры моделирования, при которых численные решения соответствуют наблюдаемым экспериментальным данным. При помощи численного моделирования объяснены особенности, связанные с динамикой роста-схлопывания кавитационного пузыря и формированием нагретых струй.

Ключевые слова: *лазеры, теплопроводность, кавитация, парообразование, конденсация*

DOI: <https://doi.org/10.47910/FEMJ202315>

Введение

Лазерная кавитация, или лазероиндуцированная кавитация, возникает при вскипании жидкости с недогревом, вызванном либо действием сфокусированного лазерного излучения, либо излучением, выходящим из торца кончика оптоволокна, погружённого в жидкость, по которому это излучение распространяется. При кипении с недогревом возникает паровой пузырёк, который не только нарастает, но по причине контакта с окружающей «холодной» жидкостью в какой-то момент прекращает свой рост, а затем схлопывается с ускорением (коллапс). Подобная динамика — рост и последующее схлопывание пузырька — собственно, и является причиной, по которой пузырёк является кавитационным. Хорошо известно, что кавитационные пузырьки (Cavitation bubbles) вблизи различных границ помимо акустических сигналов и ударных волн генерируют кумулятивные струи [1–3]. В совокупности эти

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

² Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, 690002, г. Владивосток, ул. Проспект Острякова, 2.

Электронная почта: guzev@iam.dvo.ru (М. А. Гузев), datsep@gmail.com (Е. П. Дац), yu_pa@bk.ru (Ю. П. Пахалюк), vm53@mail.com (В. М. Чудновский).

явления представляют большой практический интерес для селективной очистки и обработки поверхностей, а также для медицины. Использование оптоволоконно удобно для доставки лазерного излучения к различным объектам, поскольку оптоволоконно обладает большой гибкостью и способно проникать в узкие каналы, щели и иглы для перкутанного воздействия. Представленное исследование посвящено проблеме моделирования процесса лазерной кавитации при учете влияния температуры.

1. Математическая модель

Численное моделирование реализовано с использованием двухфазной модели гидродинамики Volume-Of-Fluid [1]. В качестве двух фаз используются вода и водяной пар. Для каждой фазы записан закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{U}) = \dot{m}_g, \quad \frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{U}) = \dot{m}_l, \quad (1)$$

где индексы g и l означают паровую и жидкую фазы, α_g и α_l — объемные доли паровой и жидкой фазы соответственно, $\alpha_g + \alpha_l = 1$. В модели используются уравнения Навье–Стокса и уравнение энергии, записанные для смешанной фазы:

$$\frac{\rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu \left(\vec{U} + \vec{U}^T \right) \right] + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

$$\frac{\rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho c_p T) = \nabla (\lambda \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

где S_h — скрытая теплота парообразования-конденсации. Плотность ρ , теплопроводность λ , динамическая вязкость μ , и удельная теплоемкость c_p в рамках используемого метода представлены зависимостями

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l, \quad \lambda = \alpha_g \lambda_g + \alpha_l \lambda_l, \quad \mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l, \quad c_p = \alpha_g c_{pg} + \alpha_l c_{pl}. \quad (4)$$

В качестве механизма образования пара используется модель испарения-конденсации [4], в которой скорость парообразования и конденсации пропорциональны разнице между текущей температурой и температурой насыщения T_{sat} :

$$\dot{m}_g = \gamma_g \alpha_l \rho_l \left(\frac{T - T_{sat}(p)}{T_{sat}(p)} \right), \quad T > T_{sat}(p),$$

$$\dot{m}_l = \gamma_l \alpha_g \rho_g \left(\frac{T_{sat}(p) - T}{T_{sat}(p)} \right), \quad T < T_{sat}(p),$$

где γ_g , γ_l — коэффициенты испарения/конденсации, определяемые из экспериментальных данных. Особенностью рассматриваемой в рамках настоящей работы модели является учет зависимости температуры насыщения T_{sat} от давления насыщения p_{sat} [5]. Учет данной зависимости позволил качественно и количественно описать динамику движения межфазной границы в соответствии с полученными ранее экспериментальными данными [2].

2. Постановка задачи

Решение задачи реализовано в осесимметричной постановке, где пространственными переменными являются радиальная и аксиальная координаты. Ось симметрии расчетной области совпадает с осью симметрии волновода и начального пузырька. В качестве начального условия используется поле температур, задаваемое в виде

$$T(r, z) = 450 \text{ K} \quad \text{при} \quad \sqrt{(z - h)^2 + r^2} < r_0,$$

$$T(r, z) = 300 \text{ K} \quad \text{при} \quad \sqrt{(z - h)^2 + r^2} > r_0,$$

где h — длина оптоволокна, r_0 — начальный радиус пузырька. Предполагается, что внутри пузырька в начальный момент отсутствуют неконденсируемые газы, а при конденсации весь пар переходит в жидкую фазу. Таким образом, начальная температура для газовой фазы составляет 450 К, для жидкой фазы — 300 К. Оценка начального распределения температуры в паровой фазе сделана исходя из зависимости температуры насыщения от давления насыщения [5]. Уровень давления насыщения в начальные моменты времени в пузырьке определяется через решение уравнение Рэлея – Плессета [6] при подстановке функций радиуса, скорости и ускорения межфазной границы, определяемых из эксперимента [2]. Начальный радиус пузырька $r_0 = 0.15$ мм, радиус торца оптоволокна = 0.3 мм. Для коэффициентов массообмена в модели Ли выбраны значения, определенные из результатов экспериментальных данных $\gamma_g = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $\gamma_l = 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Расчет проведен в среде ANSYS FLUENT 2021. Расчет выполнен на равномерной квадратной сетке с размером элемента $2 \cdot 10^{-6}$ м.

На рис. 1. Представлена схема расчетной области с соответствующими граничными условиями: в частности, на границах расчетной области (на внешней границе жидкой фазы, оси симметрии и на поверхности оптоволокна) заданы нулевые тепловые потоки, на границах оптоволокна — условие прилипания, на границах жидкой фазы — нулевое избыточное давление.

3. Результаты расчетов

Процесс расширения парового пузырька связан с интенсивным парообразованием в заданной области, имеющей начальный объем и температуру $T > T_{sat}$. Начальный объем пузырька и температура выбраны таким образом, чтобы последующая динамика роста соответствовала экспериментальным данным, полученным ранее для рассматриваемой геометрической конфигурации [2]. В результате перехода жидкости в пар формируется высокий уровень давления внутри пузырька, из-за чего наблюдается процесс быстрого роста. На рис. 2. показана эволюция парового пузырька в процессе испарения-конденсации. Процесс парообразования на начальной стадии способствует формированию высокого давления внутри пузырька, из-за чего пузырек начинает увеличиваться в размерах. Увеличение в размерах сопровождается постепенным падением давления внутри пузырька. В процессе роста также наблюдается сначала ускорение, потом замедление движения межфазовой границы. Из-за быстрого расширения пузырька давление слоя жидкости перед границей

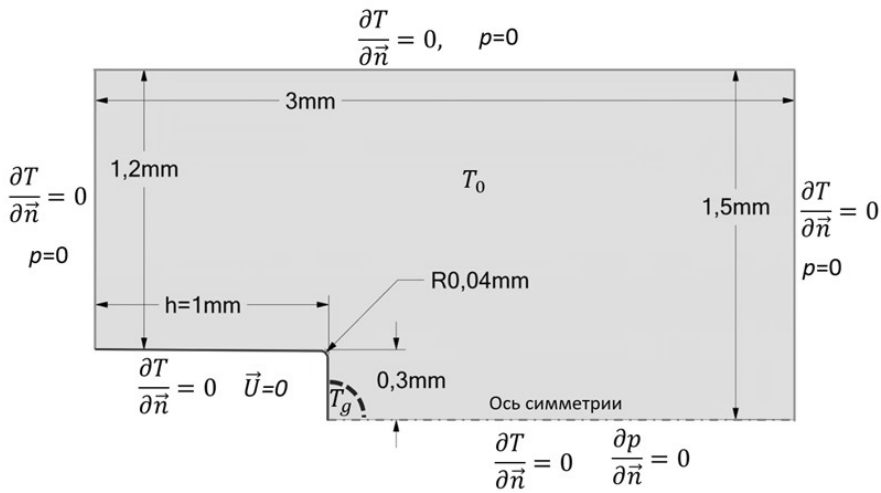


Рис. 1. Схема расчетной области с начальными и граничными условиями.

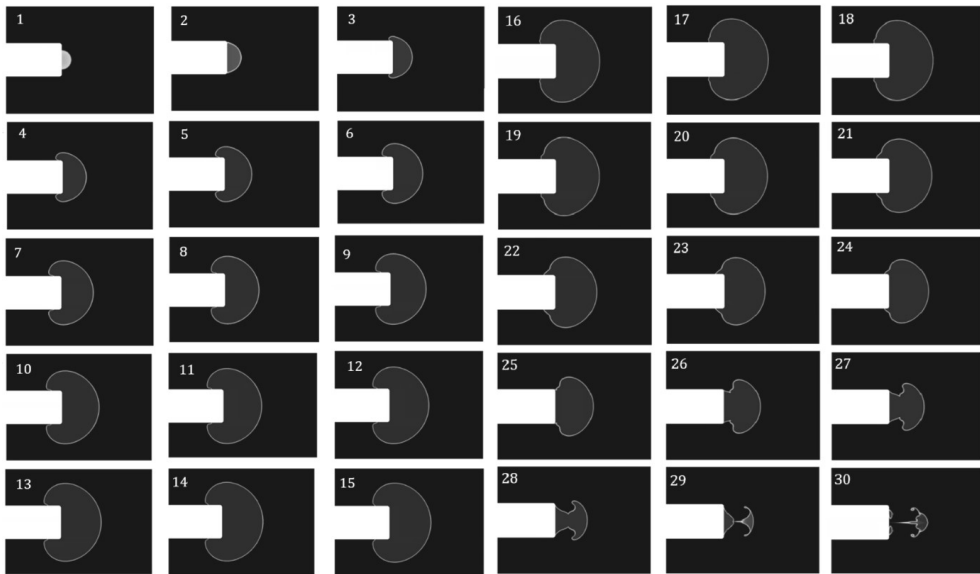


Рис. 2. Динамика парового пузырька при моделировании процесса лазерной кавитации. Начальный размер области нагрева $r_0 = 0.15$ мм, начальная температура газа $T_g = 450$ К, воды $T_0 = 300$ К. Интервал между кадрами $4 \mu\text{s}$.

пузырька сначала увеличивается, затем выравнивается до начального атмосферного давления. Когда в процессе эволюции значения давлений внутри и снаружи пузырька выравниваются, он продолжает расширяться, поскольку в этот момент вектор скоростей воды вблизи его стенок имеют ненулевые значения и направлены от центра пузырька. Начиная с этого момента, давление снаружи пузырька все более превышает давление внутри, что и приводит к постепенному прекращению расширения пузыря и началу его сжатия. Расчетно установлено, что минимальная скорость движения стенок пузырька наблюдается вблизи поверхности оптоволокна, что обусловлено силами вязкости воды. По мере уменьшения давления внутри пузырька процесс расширения сменяется процессом сжатия, из-за чего объем пузырька уменьшается — происходит схлопывание. Поскольку процесс схлопывания начинается с областей примыкания пузырька к боковой поверхности волновода, здесь в течение времени схлопывания формируются максимальные значения скорости движения жидкой фазы и, как следствие, сил инерции, направленных к оси симметрии пузырька. Формирующийся в результате данного процесса поток жидкости сначала направлен к торцу волновода, а после отражения от торца движется в противоположную сторону. Локальное увеличение значений давления приводит к повторному формированию областей с газовой фазой, температура которых значительно ниже температуры парообразования. Следовательно, можно сделать вывод о том, что вторичные эффекты, связанные с повторным возникновением и схлопыванием пузырьков в рамках одного акта вскипания имеют динамический характер и связаны с локальным увеличением и уменьшением давления в областях формирования микроструй.

Заключение

В работе рассмотрено численное решение задачи об эволюции парового пузырька, возникающего на кончике оптоволокна в результате процесса лазерной кавитации. Использование представленной модели, основанной на зависимости процесса парообразования-конденсации от разности между текущей температурой и температурой насыщения, позволило качественно и количественно описать результаты экспериментальных данных. Оценки параметров, связанных с процессом лазерной кавитации, имеют важное практическое значение при разработке методики лечения в медицине и при разработке новых методов очистки поверхностей.

Список литературы

- [1] Р. В. Фурсенко, В. М. Чудновский, С. С. Минаев, Дж. Окадзима, “Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **163** (2020), 120420.
- [2] А. В. Кулик, С. Н. Мокрин, А. М. Краевский, С. С. Минаев, М. А. Гузев, В. М. Чудновский, “Features of dynamics of a jet flow generated on a laser heater by surface boiling of liquid”, *Technical Physics Letters*, **48** (2022), 60–63.
- [3] В. М. Чудновский, В. И. Юсупов, “Submerged Jet Generation by Laser Heating of a Liquid Surface”, *Technical Physics Letters*, **46** (2020), 1024–1027.

- [4] W. H. Lee, “A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling.”, *Technical Report LA-UR 79-975*, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.
- [5] W. Wagner, A. PruB,, “The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2002.
- [6] M. Plesset, A. Prosperetti, “Bubble Dynamics and Cavitation”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **9** (1977), 145–185.

Поступила в редакцию
09 октября 2023 г.

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

*Guzev M. A.*¹, *Dats E. P.*¹, *Pakhalyuk Yu. P.*², *Chudnovskii V. M.*¹ Numerical modeling of the evolution of a vapor bubble under conditions of laser-induced cavitation. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2023. V. 23. No 2. P. 178–183.

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

² Pacific State Medical University of the Ministry of Health of Russia

ABSTRACT

Based on the Lee vaporization-condensation model, numerical solutions were obtained that describe the process of growth and collapse of bubbles formed at the end of an optical fiber during laser heating. The simulation parameters are found for which the numerical solutions correspond to the observed experimental data. Using numerical modeling, the features associated with the dynamics of the growth-collapse of a cavitation bubble and the formation of heated jets are explained

Key words: *lasers, heat conduction, cavitation, evaporation, condensation.*