

03.5;06.4;09.5;14.2

Периодическая генерация затопленных струй при лазерном нагреве торца волокна

© В.И. Юсупов

Институт фотонных технологий ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Москва, Троицк, Россия
E-mail: iouss@yandex.ru

Поступило в Редакцию 8 июля 2022 г.

В окончательной редакции 30 июля 2022 г.

Принято к публикации 15 августа 2022 г.

Экспериментально обнаружено, что при нагреве торца оптического волокна с поглощающим покрытием непрерывным лазерным излучением с длиной волны $0.97 \mu\text{m}$ в воде периодически генерируются затопленные струи. Каждая такая струя образуется в результате схлопывания парогазового пузырька, возникающего из-за взрывного вскипания воды. Обсуждаются механизмы образования пузырьков и струй.

Ключевые слова: лазерное излучение, оптическое волокно, поглощающее покрытие, взрывное кипение, затопленная струя.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53588.19301

В последнее время значительно возрос интерес к изучению затопленных струй, вызванных кавитационным схлопыванием лазероиндуцированных парогазовых пузырьков (см. работы [1–4] и ссылки в них). Практический интерес связан с организацией эффективного охлаждения микро- и нанoeлектронных компонентов [5], селективной очисткой различных поверхностей [6], совершенствованием технологии биопечати [4,7], а также с различными медицинскими приложениями: от разрушения почечных камней [8] до хирургического лечения самых разных заболеваний [9].

Научными группами проведены детальные экспериментальные исследования и моделирование этапов формирования затопленных струй, образующихся в воде в результате поглощения в объеме жидкости непрерывного или импульсного лазерного излучения вблизи торца оптического волокна [1–3,10–13]. Показано, что на первом этапе из-за значительного перегрева происходит взрывное кипение воды, и перегретая область распадается на сжатый до высоких давлений пар и микрокапли жидкости. Это приводит к образованию быстрорастущего парогазового пузырька, который после достижения своего максимального размера схлопывается. В результате коллапса такого неравновесного пузырька в отсутствие симметрии происходит генерация затопленной струи, направленной от торца волокна в сторону свободной жидкости. Скорости таких струй составляют от нескольких сантиметров в секунду до нескольких десятков и сотен метров в секунду.

Определенный интерес связан с изучением возможности генерации затопленных струй при поглощении лазерного излучения не в объеме жидкости, а в тонком поглощающем слое на торце оптического волокна. Такие волокна с нанесенными поглощающими покрытиями используются, например, в ряде современных медицинских технологий для активизации гидродинамических процес-

сов [9,14]. В настоящей работе показано, что при нагреве торца оптического волокна с поглощающим покрытием непрерывным лазерным излучением в воде в результате взрывного кипения происходит периодическая генерация затопленных струй.

В экспериментах использовался волоконный лазерный аппарат ЛС-0.97 (ИРЭ-Полус, Россия) с длиной волны $\lambda = 0.97 \mu\text{m}$, состыкованный с оптическим волокном с диаметром светопроводящей кварцевой жилы $400 \mu\text{m}$. Торцевая поверхность волокна покрывалась тонким слоем аморфного углерода в результате кратковременного (в течение нескольких секунд) контакта торца с поверхностью древесины при мощности непрерывного лазерного излучения $P = 2 \text{ W}$. Такая процедура позволяла получать хорошо воспроизводимое покрытие, поглощающее $k = 30 \pm 5\%$ энергии лазерного излучения. Волокно вводилось горизонтально в прозрачную кювету размером $7 \times 5 \times 3 \text{ cm}$ с водой с температурой 22°C . Глубина погружения составляла 20 mm .

Динамические процессы в жидкости исследовались с помощью скоростной видеосъемки и регистрации широкополосных акустических сигналов. Для этого использовалась скоростная камера Fastcam SA-3 (Photron, Япония) при фронтальной подсветке (на просвет) со скоростью $20\,000 \text{ fps}$. Запись акустических сигналов в диапазоне от 0 до 500 kHz с широкополосного гидрофона 8100 (Брюль и Кьер) осуществлялась на запоминающий осциллограф GDS 72304 (GW Instek). Угол между осью волокна и осью гидрофона составлял 90° , а расстояние между торцом волокна и чувствительным элементом гидрофона — 15 mm .

Спустя время $t = 0.2 \text{ s}$ после включения лазерного излучения с мощностью $P = 4 \text{ W}$ появляется шумоподобный акустический сигнал, связанный с кипением воды на торце лазерного волокна с поглощающим покрытием (рис. 1, а). Как видно из представленного фрагмента это-

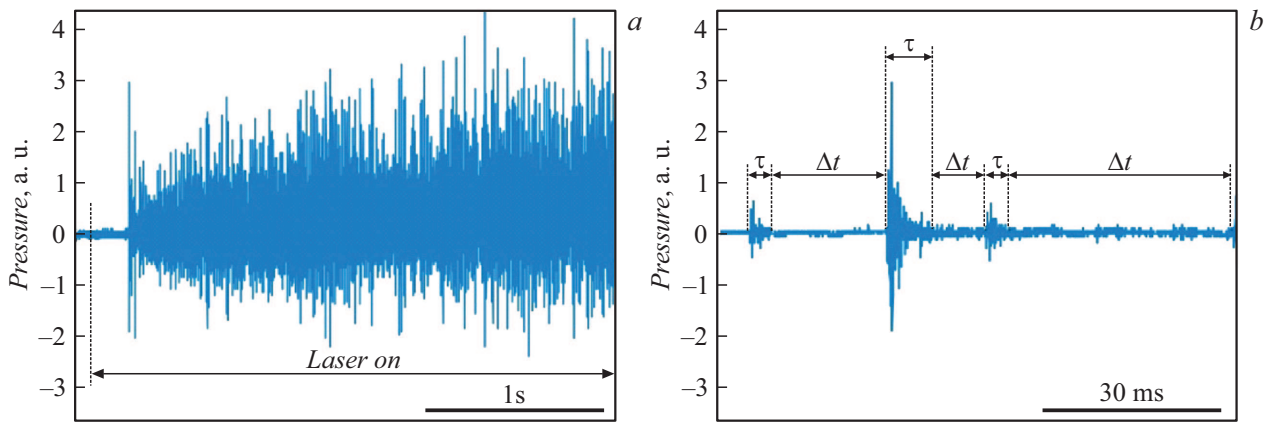


Рис. 1. Акустический сигнал, вызванный кипением воды на нагреваемом непрерывным лазерным излучением торце оптического волокна с поглощающим покрытием. *a* — появление и развитие сигнала после включения лазерного излучения, *b* — фрагмент акустического сигнала. Показаны длительности импульсных затухающих цугов (τ) и промежутков между ними (Δt). $P = 4$ W.

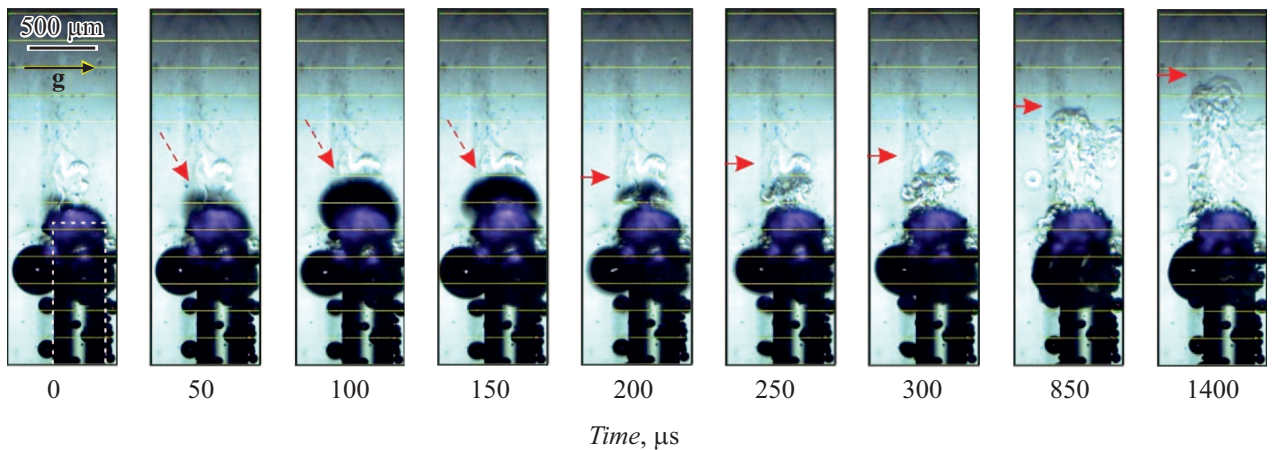


Рис. 2. Кадры скоростной съемки в момент образования затопленной струи при лазерном нагреве торца оптического волокна с поглощающим покрытием. Числа соответствуют времени (в μs). Наклонной стрелкой показан образующийся и схлопывающийся пузырек. Горизонтальной стрелкой отмечено положение переднего фронта затопленной струи. Светлой штриховой линией на первом кадре отмечены контуры торцевой части волокна. Вектор g — направление ускорения свободного падения. Горизонтальные линии расположены на расстоянии $200 \mu m$ друг от друга.

го сигнала (рис. 1, *b*), он состоит из довольно коротких импульсных постепенно затухающих цугов различной амплитуды и длительности ($\tau \sim 4-8$ ms), разнесенных во времени на промежуток Δt , обычно превышающий или значительно превышающий τ .

На рис. 2 показаны кадры скоростной съемки, иллюстрирующие момент образования и схлопывания пузырька в воде на торце оптического волокна с поглощающим покрытием, нагреваемого непрерывным лазерным излучением. На кадрах видна рабочая часть волокна, окруженного со всех сторон парогазовыми пузырьками. Как показали наблюдения, эти пузырьки являются стационарными. Их образование связано с выделением растворенных в воде газов, вызванным нагревом волокна.

На первых трех кадрах (рис. 2) видно, что в этот промежуток времени вблизи торца волокна происходит рост пузырька (отмечен наклонной стрелкой). При

$t = 100 \mu s$ его сечение представляет собой эллипс с осями $\sim 480 \mu m$ (вдоль оптической оси) и $\sim 630 \mu m$ (поперек оптической оси). Затем пузырек начинает уменьшаться и при $t = 200 \mu s$ схлопывается, выбрасывая в сторону свободной жидкости затопленную струю грибовидной формы. Диаметр основания („ножки“) этого грибовидного образования составляет $\sim 140 \mu m$, диаметр „шляпки“ $\sim 400 \mu m$, а высота $\sim 230 \mu m$.

Последующие кадры ($t > 200 \mu s$) иллюстрируют распространение фронта затопленной струи (горизонтальные стрелки) от торца волокна. По кадру с $t = 200 \mu s$ можно оценить, что начальная скорость струи на удалении $\sim 200 \mu m$ от торца составляет ~ 7 m/s, затем она постепенно уменьшается до 0.5 m/s на удалении от него ~ 1 mm ($t = 1.4$ ms).

Подобные растущие и затем схлопывающиеся пузыри, но гораздо большего размера регистрируются у торца

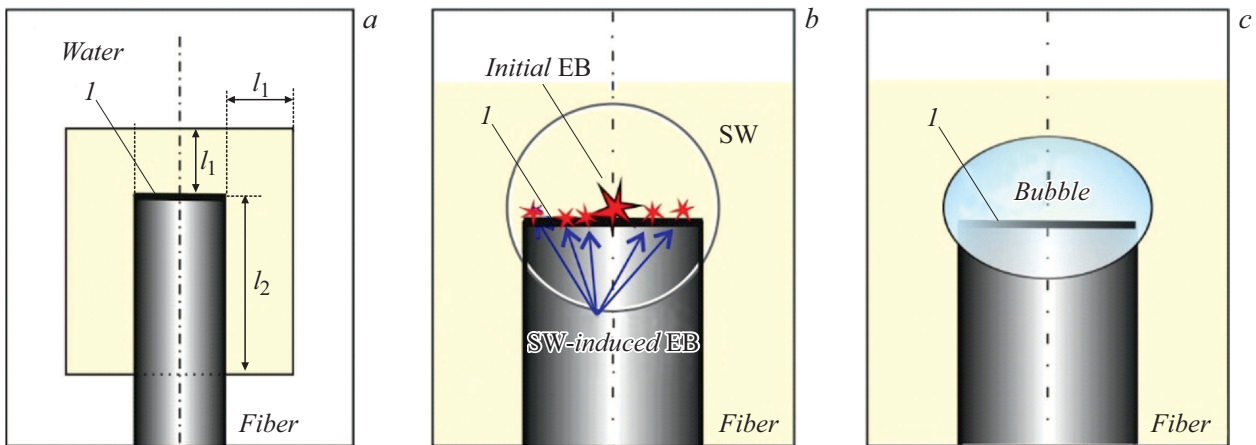


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая процессы у торца волокна, предшествующие образованию первого пузырька после включения лазера. *a* — область перегретой воды (выделенная заливкой область), *b* — начальное взрывное кипение (*Initial EB*), сопровождающееся генерацией ударной волны (*SW*), и индуцированные *SW* взрывные кипения (*SW-induced EB*), *c* — образовавшийся пузырек перед началом схлопывания. Стрелкой с цифрой *l* показано тонкое поглощающее покрытие на торце волокна.

волокна в случае, когда лазерное излучение сильно поглощается в воде [9] или водном растворе красителя [13]. В случае непрерывного лазерного воздействия инициация таких гидродинамических процессов связана с механизмом термокавитации [15]. В результате поглощения лазерной энергии температура небольшого объема воды может значительно превысить ее температуру насыщения (100°C при $p = 1 \text{ atm}$), что и приводит к взрывному кипению воды. Хорошо известно, что такие процессы сопровождаются генерацией импульсных акустических сигналов [16].

Отметим, что в эксперименте оптическое волокно вводится в кювету горизонтально, что является типичным, например, при моделировании похожих воздействий в медицине [17]. В такой геометрии возникающая конвекция будет приводить к образованию более крупных стационарных пузырьков на верхней поверхности волокна, а также к отклонению вверх возникающих у торца затопленных струй. Судя по рис. 2, справа от волокна более крупные стационарные пузырьки действительно обнаруживаются, а влияние конвекции на направление струи является несущественным.

В результате поглощения лазерного излучения в поглощающем слое на торце волокна этот тонкий слой становится источником нагрева. Перераспределение выделяемого тепла между поглощающим слоем, волокном и окружающей водой определяет гидродинамические процессы вблизи торца волокна с поглощающим покрытием. Оценим величину подъема температуры ΔT в области торца волокна к началу возникновения интенсивных акустических сигналов ($t = 0.2 \text{ s}$ на рис. 1). Будем считать, что к этому моменту времени нагреются объемы воды и кварцевого волокна (рис. 3, *a*) с толщинами вдоль оптической оси $l_1 = \sqrt{\pi\alpha_1 t}$ и $l_2 = \sqrt{\pi\alpha_2 t}$, где $\alpha_1 = 0.14 \text{ mm}^2/\text{s}$ и $\alpha_2 = 1.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ — коэффициенты температуропроводности для воды и кварца соответственно.

Кроме того, на толщину l_1 нагреется объем воды в виде полого цилиндра длиной $l_1 + l_2$ вокруг этих нагретых областей волокна и воды (рис. 3, *a*). В этом случае

$$\Delta T = \frac{kPt}{\pi R^2 (C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2) + \pi (2Rl_1 + l_1^2) (l_1 + l_2) C_1 \rho_1} \approx 121^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $k = 0.30 \pm 0.05$ — доля поглощенной энергии, $P = 4 \text{ W}$ — мощность, $R = 200 \mu\text{m}$ — радиус волокна, $C_1 = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ и $C_2 = 1050 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ — теплоемкости воды и кварца соответственно, $\rho_1 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ и $\rho_2 = 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$ — плотности воды и кварца соответственно.

Нужно учитывать, что полученная по формуле (1) оценка относится к средней температуре в выделенном объеме воды (рис. 3, *a*). Поскольку температура при удалении от торца волокна уменьшается, ее значение на самом торце с поглощающим покрытием будет выше. Столь существенный перегрев относительно температуры равновесия жидкость–пар при максимально достижимом в опытах перегреве в 210°C (см. работу [18] и ссылки в ней) сопровождается взрывным вскипанием воды [19]. Вероятность такого процесса увеличивается с увеличением перегрева, который будет максимальным вблизи оптической оси у поверхности тонкого поглощающего слоя на торце оптического волокна (рис. 3, *b*). Возникшая в результате начального взрывного кипения ударная волна (*SW* на рис. 3, *b*) может инициировать [20] процесс взрывного кипения вдоль поверхности торца волокна (рис. 3, *b*). Выделившийся в этом объеме пар приведет к образованию быстро расширяющегося пузырька эллипсоидальной формы (рис. 3, *c*). Через $\sim 200 \mu\text{s}$ с момента образования такой пузырек схлопывается с выбросом затопленной струи (рис. 2). Согласно численным расчетам [2], на начальных этапах форма такой струи

представляет собой грибовидное образование, которое и зарегистрировано в момент времени $t = 200 \mu\text{s}$ (рис. 2).

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (20-14-00286) и частичной поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН в части термокавитации.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.A. Chernov, A.A. Pil'nik, A.A. Levin, A.S. Safarov, T.P. Adamova, D.S. Elistratov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **184**, 122298 (2022). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122298
- [2] M. Koch, J.M. Rosselló, C. Lechner, W. Lauterborn, R. Mettin, *Fluids*, **7** (1), 2 (2021). DOI: 10.3390/fluids7010002
- [3] V.M. Chudnovskii, M.A. Guzev, V.I. Yusupov, R.V. Fursenko, J. Okajima, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **173**, 121250 (2021). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121250
- [4] В.М. Чудновский, В.И. Юсупов, *Письма в ЖТФ*, **46** (20), 31 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.20.50153.1842 [V.M. Chudnovskii, V.I. Yusupov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (10), 1024 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020100211].
- [5] S. Fan, F. Duan, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **150**, 119324 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119324
- [6] W.D. Song, M.H. Hong, B. Lukyanchuk, T.C. Chong, *J. Appl. Phys.*, **95** (6), 2952 (2004). DOI: 10.1063/1.1650531
- [7] V.S. Cheptsov, S.I. Tsykina, N.V. Minaev, V.I. Yusupov, B.N. Chichkov, *Int. J. Bioprint.*, **5** (1), 165 (2019). DOI: 10.18063/ijb.v5i1.165
- [8] V.Yu. Lekarev, A.M. Dymov, A.Z. Vinarov, N.I. Sorokin, V.P. Minaev, N.V. Minaev, S.I. Tsykina, V.I. Yusupov, *Appl. Sci.*, **10** (21), 7480 (2020). DOI: 10.3390/app10217480
- [9] В.М. Чудновский, В.И. Юсупов, А.В. Дыдыкин, В.И. Невожай, А.Ю. Кисилёв, С.А. Жуков, В.Н. Баграташвили, *Квантовая электроника*, **47** (4), 361 (2017). [V.M. Chudnovskii, V.I. Yusupov, A.V. Dydykin, V.I. Nevozhai, A.Y. Kisilev, S.A. Zhukov, V.N. Bagratashvili, *Quantum Electron.*, **47** (4), 361 (2017). DOI: 10.1070/QEL16298].
- [10] V.M. Chudnovskii, A.A. Levin, V.I. Yusupov, M.A. Guzev, A.A. Chernov, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **150**, 119286 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286
- [11] A.A. Levin, A.S. Safarov, V.M. Chudnovskii, A.A. Chernov, *Interfacial Phenom. Heat Transf.*, **8** (1), 25 (2020). DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020032806
- [12] A. Vogel, V. Venugopalan, *Chem. Rev.*, **103** (2), 577 (2003). DOI: 10.1021/cr010379n
- [13] J.P. Padilla-Martinez, C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J.C. Ramirez-San-Juan, R. Ramos-Garcia, *Phys. Fluids*, **26** (12), 122007 (2014). DOI: 10.1063/1.4904718
- [14] A.V. Belikov, A.V. Skrypnik, *Lasers Surg. Med.*, **51** (2), 185 (2019). DOI: 10.1002/lsm.23006
- [15] S.F. Rastopov, A.T. Sukhodol'sky, *Phys. Lett. A*, **149** (4), 229 (1990). DOI: 10.1016/0375-9601(90)90334-K
- [16] V.I. Yusupov, A.N. Kononov, V.A. Ul'yanov, V.N. Bagratashvili, *Acoust. Phys.*, **62** (5), 537 (2016). DOI: 10.1134/S1063771016050183
- [17] В.П. Минаев, Н.В. Минаев, В.Ю. Богачев, К.А. Капериз, Д.А. Федоров, В.И. Юсупов, *Квантовая электроника*, **50** (8), 793 (2020). [V.P. Minaev, N.V. Minaev, V.Yu. Bogachev, K.A. Kaperiz, D.A. Fedorov, V.I. Yusupov, *Quantum Electron.*, **50** (8), 793 (2020). DOI: 10.1070/QEL17226].
- [18] А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин, П.В. Скрипов, *Письма в ЖТФ*, **46** (12), 47 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49529.1824 [A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, P.V. Skripov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (6), 617 (2020). DOI: 10.1134/S106378502006019X].
- [19] S.B. Rutin, P.V. Skripov, *Thermochim. Acta*, **562**, 70 (2013). DOI: 10.1016/j.tca.2013.03.030].
- [20] D.L. Frost, *Exp. Fluids*, **8** (3), 121 (1989). DOI: 10.1007/BF00195785