

03

## Лазероиндуцированный режим сверхинтенсивного пузырькового кипения

© В.И. Юсупов,<sup>1</sup> В.М. Чудновский,<sup>2</sup> В.Н. Баграташвили<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт фотонных технологий ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, 108840 Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041 Владивосток, Россия  
e-mail: iouss@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 16 марта 2018 г. В окончательной редакции 18 июня 2018 г.)

Реализован режим сверхинтенсивного пузырькового кипения (СПК) в необезгаженной воде на торце лазерного волокна под действием 100 ns импульсного лазерного излучения. В качестве источника излучения использовался волоконный тулиевый лазер умеренной мощности с длиной волны 1.94  $\mu\text{m}$ . Процесс генерации пузырьковых микроструй вблизи торца лазерного волокна изучен с помощью скоростной съемки и акустических методов. Показано, что в режиме СПК, переход к которому носит пороговый характер, основная энергия сигнала акустической эмиссии находится в звуковом диапазоне от 10 до 30 kHz. При этом генерация акустического сигнала происходит по механизму термокавитации. В режиме СПК достигнуты рекордные значения тепловых потоков до 0.16 MW/cm<sup>2</sup>. Определены параметры образующихся конвективных потоков, микропузырьков и генерирующихся широкополосных акустических колебаний.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46958.114-18

В работе режим сверхинтенсивного пузырькового кипения (СПК) [1] с рекордными значениями тепловых потоков реализован на сосредоточенном источнике — торце лазерного волокна в необезгаженной жидкости при использовании импульсного лазерного излучения. Впервые режим теплообмена, названный СПК, был получен с помощью проволочного нагревателя [1]. Было установлено, что при стабилизации температуры нагревателя в режиме пузырькового кипения можно получить гигантские удельные тепловые потоки (в воде до 5 kW/cm<sup>2</sup>). В отличие от так называемого режима „микропузырькового кипения“ (МЕВ — microbubble emission boiling) [2,3] рекордные величины теплового потока в воде достигались без принудительной конвекции. При СПК образуются микроструи, состоящие из двухфазных потоков, направленных от поверхности нагревателя в объем жидкости в произвольных направлениях независимо от силы тяжести. При этом скорости потока в микроструях достигают 0.5 m/s [4]. Характерным для режима СПК [1,4] является генерация широкополосных акустических шумов, кавитационная эрозия поверхности нагревателя и пороговый по мощности характер возбуждения.

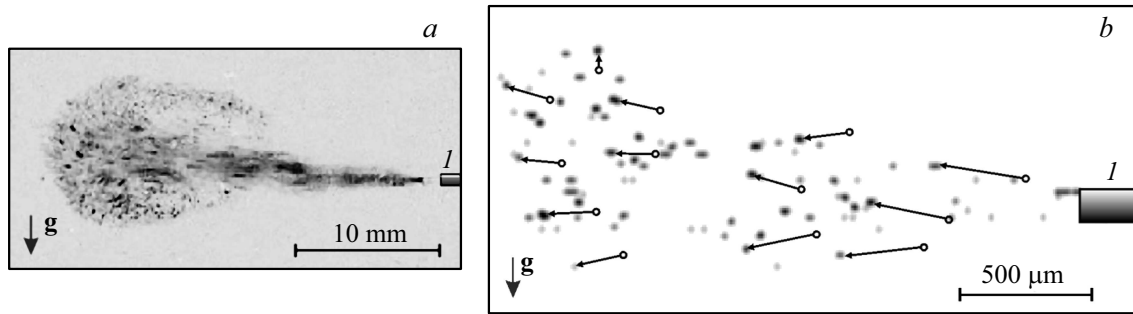
Недавно было экспериментально обнаружено возникновение режима СПК воды, инициированного нагревом торца оптического волокна непрерывным лазерным излучением [5]. Для создания квазиточечного источника тепла рабочий торец лазерного волокна покрывался тонким слоем углерода, в котором поглощалась значительная часть лазерной энергии. Величина отводимого от разогретого торца в воду удельного потока тепла при этом достигла  $\sim 7 \text{ kW/cm}^2$ , что больше величины, полученной на проволочном нагревателе [1,5]. Реализо-

ванный в необезгаженной жидкости на сосредоточенном источнике — торце лазерного волокна — режим СПК представляет исключительный интерес для развития новых медицинских лазерных технологий, основанных на лазерном конвекционном нагреве биологических тканей [6]. В настоящей работе лазероиндуцированный режим СПК получен в необезгаженной воде на торце волокна без поглощающего покрытия.

Эксперименты проводились в прозрачной кювете с водой при температуре 22°C. В качестве источника лазерного излучения использовался тулиевый лазер с длиной волны  $\lambda = 1.94 \mu\text{m}$ , длительностью импульсов  $\tau = 100 \text{ ns}$ , частотой следования импульсов 100 kHz и мощностью до 20 W (ИРЭ Полус), снабженным кварцевым волокном с диаметром светопроводящей сердцевины 125  $\mu\text{m}$ . Во всех экспериментах мощность лазерного излучения на выходе волокна составляла  $P = 20 \text{ W}$ . Инфракрасное излучение с длиной волны 1.94  $\mu\text{m}$  очень хорошо поглощается в воде (коэффициент поглощения  $\alpha$  составляет 92 cm<sup>-1</sup> [7]). Гидродинамические процессы вблизи погруженного в воду торца волокна регистрировались высокоскоростной камерой Fastcam SA-3 (Photron, Япония) на скорости 10 000 кадров/с; акустические сигналы в диапазоне от 0 до 200 kHz — гидрофоном 8100 (Брюль и Кьер) и запоминающим осциллографом GDS 72304 (GW Instek).

При включении лазера вблизи торца лазерного волокна появляется струя, состоящая из большого количества микропузырьков (рис. 1).

На кадре скоростной съемки (см. рис. 1, b) видно, что микропузырьки (диаметром от 10 до 50  $\mu\text{m}$ ) рождаются у торца лазерного волокна, а скорость их перемещения с удалением от торца уменьшается по экспоненциаль-

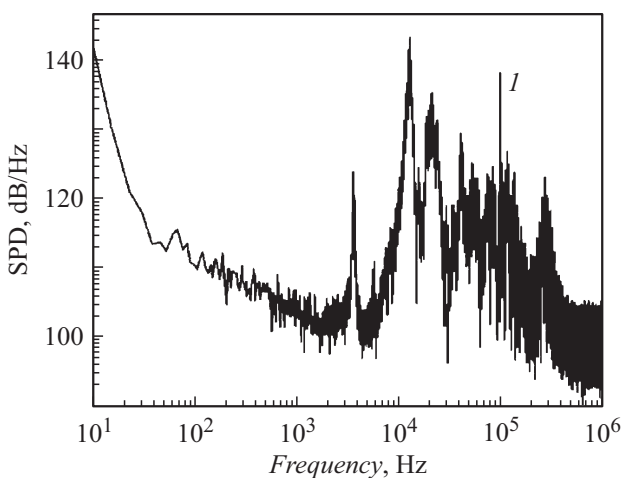


**Рис. 1.** Генерация микропузырьков вблизи торца лазерного волокна. *a* — область с микропузырьками через 1 s после включения лазера; *b* — распределение микропузырьков и их перемещение вблизи торца. Кружками со стрелками показаны предыдущие положения микропузырьков за 3 ms до этого момента. *l* — торец лазерного волокна (изображен схематично). Стрелкой показано направление силы тяжести.

ному закону. Величина отводимого от торца волокна в воду удельного потока тепла при этом составляет  $0.16 \text{ MW/cm}^2$ , что значительно больше величин, достигнутых ранее в [1,5].

Эксперименты показали, что при превышении порогового уровня ( $P \sim 0.4 \text{ W}$ ) резко возрастает мощность генерируемых акустических сигналов. При этом в режиме СПК ( $P > 0.4 \text{ W}$ ) основная энергия сигнала акустической эмиссии находится в звуковом диапазоне от 10 до 30 kHz (рис. 2). На спектре сигнала отчетливо выделяется узкий пик *I*, соответствующий частоте генерации лазерных импульсов 100 kHz.

Мы полагаем, что механизм генерации акустического сигнала связан с термокавитацией [8]. При излучении лазерного импульса вблизи торца лазерного волокна в воде благодаря хорошему поглощению лазерного излучения формируется небольшая по объему нагретая область. Оценим ее геометрические параметры. Толщина слоя воды, в котором поглощается 95% энергии лазерного импульса, составляет  $h = -\ln(0.05)/a \approx 325 \mu\text{m}$ , где  $a = 92 \text{ cm}^{-1}$  — коэффициент поглощения. По фор-



**Рис. 2.** Спектральная плотность мощности акустического сигнала при генерации СПК. *I* — пик, соответствующий частоте лазерных импульсов.

ме такая область из-за расходимости лазерных лучей (числовая апертура волокна  $NA = 0.22$ ) представляет собой усеченный конус. Объем такой области составляет  $V \sim 0.01 \text{ mm}^3$ , при этом в ней за один лазерный импульс поглощается  $E = 0.95P/F = 190 \mu\text{J}$ , где  $P$  — мощность излучения,  $F = 100 \text{ kHz}$  — частота импульсов. Легко оценить, что без учета теплопередачи к концу лазерного импульса (100 ns) при  $P = 20 \text{ W}$  средняя температура этого небольшого объема жидкости увеличится на несколько градусов. При этом вода вблизи торца волокна из-за экспоненциального уменьшения интенсивности лазерного излучения нагреется сильнее. Такой периодический нагрев воды с частотой излучения лазерных импульсов (100 kHz) за счет термоупругих напряжений приведет к генерации акустических волн на частоте 100 kHz, что и наблюдается в эксперименте (*I* на рис. 2). Эффективность механизма такой генерации звука не будет высокой, поскольку в нашем случае длительность лазерного импульса  $\tau = 100 \text{ ns}$  превышает характерное время  $t_s$  распространения упругих колебаний через нагретый объем жидкости [9]:  $t_s = 1/(\mu_a c_s) \approx 70 \text{ ns}$ , где  $c_s = 1480 \text{ m/s}$  — скорость звука в воде. В условиях слабой теплопередачи температура области вблизи торца волокна с каждым последующим импульсом будет увеличиваться и всего через несколько импульсов может приблизиться к критической температуре воды  $T_c \approx 647 \text{ K}$ . Это приведет к взрывному кипению воды с образованием быстро расширяющегося парогазового пузырька [6,8]. В этом случае генерация звука будет происходить уже по механизму термокавитации [6,8,10], и она будет существенно более эффективной, уступая по эффективности случаю оптического пробоя [11]. Если следовать этой модели, то генерация самого мощного акустического пика  $\sim 10 \text{ kHz}$  (рис. 2) происходит при последовательном нагреве среды сериями из десяти лазерных импульсов.

Проведенные эксперименты показали, что при нагреве тонкого слоя воды вблизи рабочего торца волокна лазерным излучением кипение воды переходит в режим, имеющий все признаки СПК [1,5]:

- 1) большая величина удельного теплового потока;
- 2) характерные звуковые эффекты;
- 3) гидродинамические возмущения большего по сравнению с размерами нагревателя масштаба;
- 4) критическая зависимость возникновения режима от мощности.

Важно, что при лазерном нагреве, так же как и в случае проволочных нагревателей, происходит кавитационная эрозия поверхности твердого тела.

Хорошо известно, что проблема возникновения ограничения теплоотдачи от проволочного нагревателя связана с тем, что при определенной его температуре режим „пузырькового кипения“ переходит в режим „пленочного кипения“. В результате эффективность нагревателя резко падает [1]. Использование лазерного излучения позволяет преодолеть эту проблему, поскольку оно легко проходит сквозь парогазовые пузырьки и пленку и полностью поглощается в жидкости за ними. В нашем случае при лазерной мощности 20 W мы получили рекордные значения тепловых потоков до 0.16 MW/cm<sup>2</sup>.

Отметим, что в настоящей работе не рассматривался вопрос о том, где именно происходит изначальная нуклеация в жидкости: вблизи торца волокна (гомогенная нуклеация) или на его поверхности (гетерогенная нуклеация). С одной стороны, поверхностная температура из-за теплопроводности кварца может быть ниже, чем в ближайших слоях воды, нагреваемых лазерным излучением. С другой стороны, по сравнению с гетерогенной (на поверхности торца) для гомогенной нуклеации требуются значительно большие перегревы [12].

Таким образом, экспериментально обнаружено возникновение режима СПК воды, инициированного 100 ns импульсным лазерным нагревом тонкого слоя воды вблизи торца оптического волокна.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (Государственное задание ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН в части лазероиндуцированной термокавитации), грантов РФФИ № 17-02-00832 в части транспорта, № 18-02-00165 в части гетерогенного кипения, № 18-29-06056 в части сверхкритических флюидов.

## Список литературы

- [1] Zhukov S.A., Afanas'ev S.Yu., Echmaev S.B. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. N 18. P. 3411–3427.
- [2] Kumagai S., Kawabata K., Katagari T., Shimada R. // Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf. Kyongju, Korea. 1998. Vol. 2. P. 279.
- [3] Kumagai S., Uhara T., Nakata T., Izumi M. // Proc. 5th ASME/JSME Joint Eng. Conf. San Diego, 1999. AJTE 99–6430.
- [4] Zeigarnik Y.A., Platonov D.N., Khodakov K.A., Shekhter Y.L. // High Temperature. 2011. Vol. 49. N 4. P. 566–570.
- [5] Чудновский В.М., Юсупов В.И., Жуков С.А., Ечмаев С.Б., Баграташвили В.Н. // ДАН. Т. 473. № 5. С. 533–535.
- [6] Чудновский В.М., Юсупов В.И., Дыдыкин А.В., Невожай В.И., Кисилев А.Ю., Жуков С.А., Баграташвили В.Н. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 4. С. 361–370.
- [7] Deng R., He Y., Qin Y., Chen Q., Chen L. // Yaogan Xuebao — J. Remote Sensing. 2012. Vol. 16. N 1. P. 192–206.
- [8] Rastopov S.F., Sukhodolsky A.T. Sound generation by thermocavitation induced CW-laser in solutions. Proc. SPIE. 1991. Vol. 1440. P. 127.
- [9] Gregoric P., Jezersek M., Mozina J. // J. Biomed. Optics. 2012. Vol. 17. N 7. P. 075006.
- [10] Юсупов В.И., Коновалов А.Н., Ульянов В.А., Баграташвили В.Н. // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 5. С. 531–539.
- [11] Буланов А.В., Нагорный И.Г., Соседко Е.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 117–120.
- [12] Novak B.R., Maginn E.J., McCreedy M.J. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. N 8. P. 085413.