

УДК 532.1

DOI: 10.15372/PMTF202315318

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СХЛОПЫВАНИЯ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОМ КИПЕНИИ

В. А. Косяков^{*,**}, Р. В. Фурсенко^{*,**}, С. С. Минаев^{**},
В. М. Чудновский^{**}

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

** Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

E-mails: asenya777@yandex.ru, fursenko@itam.nsc.ru, minaevss@yahoo.com, vm53@mail.ru

Численно исследовано влияние различных физических механизмов на стадии схлопывания парового пузыря и последующего образования кумулятивной струи в процессе лазерно-индуцированного кипения вблизи торца тонкого волновода, погруженного в холодную жидкость. В зависимости от интенсивности испарения выделено и описано три режима процесса.

Ключевые слова: лазерно-индуцированное кипение, кумулятивная струя, двухфазное течение, испарение, конденсация

Введение. Проведенные в последнее время экспериментальные исследования [1] лазерно-индуцированного кипения вблизи торца тонкого оптоволокна, погруженного в холодную жидкость, свидетельствуют о возможности образования высокоскоростных струй. Лазерное излучение мощностью $3 \div 10$ Вт создает на торце тонкого волновода диаметром $0,2 \div 0,8$ мм удельный тепловой поток, составляющий десятки мегаватт на метр квадратный. Интенсивный подвод тепла приводит к испарению жидкости вблизи торца волновода и росту парового пузыря, диаметр которого в зависимости от длины волны и мощности лазерного излучения может достигать величины, равной нескольким калибрам волокна. За стадией роста парового пузыря следует стадия схлопывания, заканчивающаяся столкновением встречных потоков жидкости и формированием кумулятивной струи [2]. Скорость такой струи может достигать нескольких десятков метров в секунду, что делает возможным гидродинамическое рассечение тканей [3] и использование рассматриваемого процесса в малоинвазивной хирургии [4].

В работе [1] схлопывание парового пузыря объяснялось в основном конденсацией пара, обусловленной его охлаждением окружающей жидкостью. Однако схлопывание может происходить также за счет разности давлений в газовой и жидкой фазах, что характерно для кавитационных пузырьков. В настоящее время отсутствует теоретически обоснованное представление о том, какие физические механизмы определяют процесс схлопывания парового пузырька при лазерно-индуцированном кипении.

В данной работе проводится численный анализ процесса схлопывания парового пузыря в рамках упрощенной модели испарения и конденсации [5], позволяющей контролировать скорость этих процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-19-00189).

© Косяков В. А., Фурсенко Р. В., Минаев С. С., Чудновский В. М., 2023

1. Математическая модель. Рассматривается осесимметричная задача о росте и последующем схлопывании парового пузыря вблизи тонкого волновода, погруженного в жидкость. Для описания двухфазного течения используется метод объема жидкости [6, 7]. Описание геометрии расчетной области и система уравнений, описывающая законы сохранения массы и импульса газовой и жидкой фазы, приведены в работе [2]. Учитывается сжимаемость газовой фазы, жидкость считается несжимаемой.

Процессы испарения и конденсации описываются с помощью эмпирической модели, предложенной и апробированной в работах [5, 8]. В рамках этого подхода испарение и конденсация сводятся к увеличению или уменьшению массы газовой фазы в пузыре. Такой подход позволяет непосредственно контролировать скорость этих процессов путем варьирования времени t_v , t_c , в течение которого происходит изменение массы газовой фазы, и величины изменения этой массы m_v , m_c . Эти параметры считаются заданными и не зависящими от температуры, давления и других величин. Скорости испарения и конденсации в этом случае определяются по формулам $I_v = m_v/t_v$, $I_c = m_c/t_c$ и являются основными параметрами модели, варьируемыми в работе.

2. Результаты исследования и их обсуждение. Эмпирические константы модели испарения и конденсации могут быть выбраны с использованием характерных размеров парового пузыря и времени его роста и схлопывания. На рис. 1 приведены фотографии и результаты расчета формы пузыря в процессе лазерно-индуцированного кипения. Рис. 1, *a–d* соответствуют стадии роста парового пузыря в результате испарения жидкости, стадия схлопывания показана на рис. 1, *e–к*. Сжимаясь, пузырь вовлекает в движение прилега-

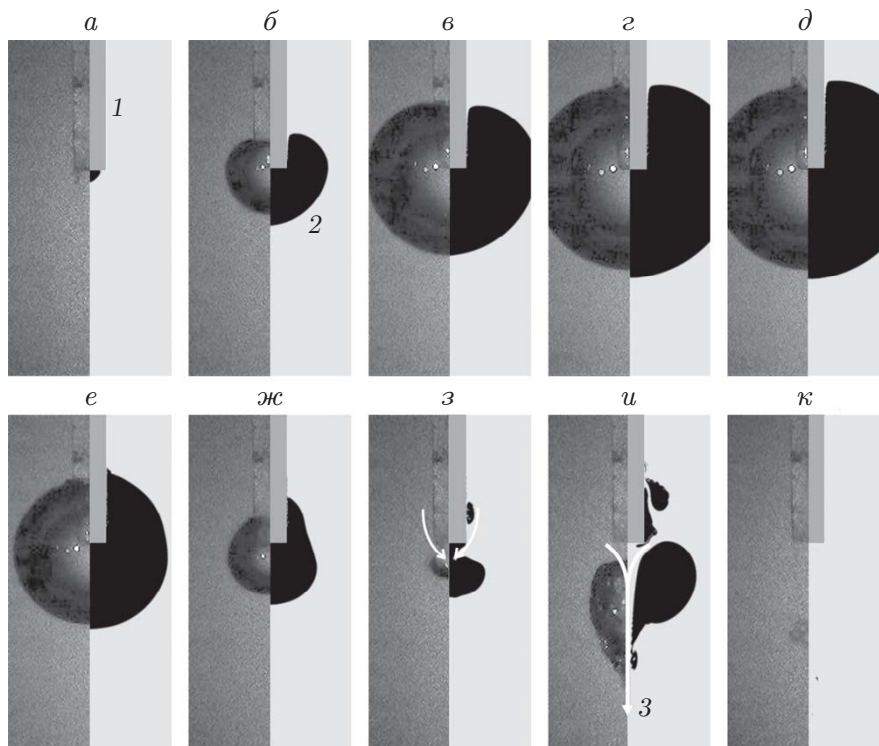


Рис. 1. Фотографии (*слева*) и результаты расчета формы (*справа*) пузыря при лазерно-индуцированном кипении (диаметр оптоволоконка 0,6 мм, $t_0 = 0$, временной интервал между кадрами 60 мкс):

a–d — стадия роста парового пузыря, *e–к* — стадия схлопывания парового пузыря;
1 — волновод, 2 — пузырь, 3 — струя

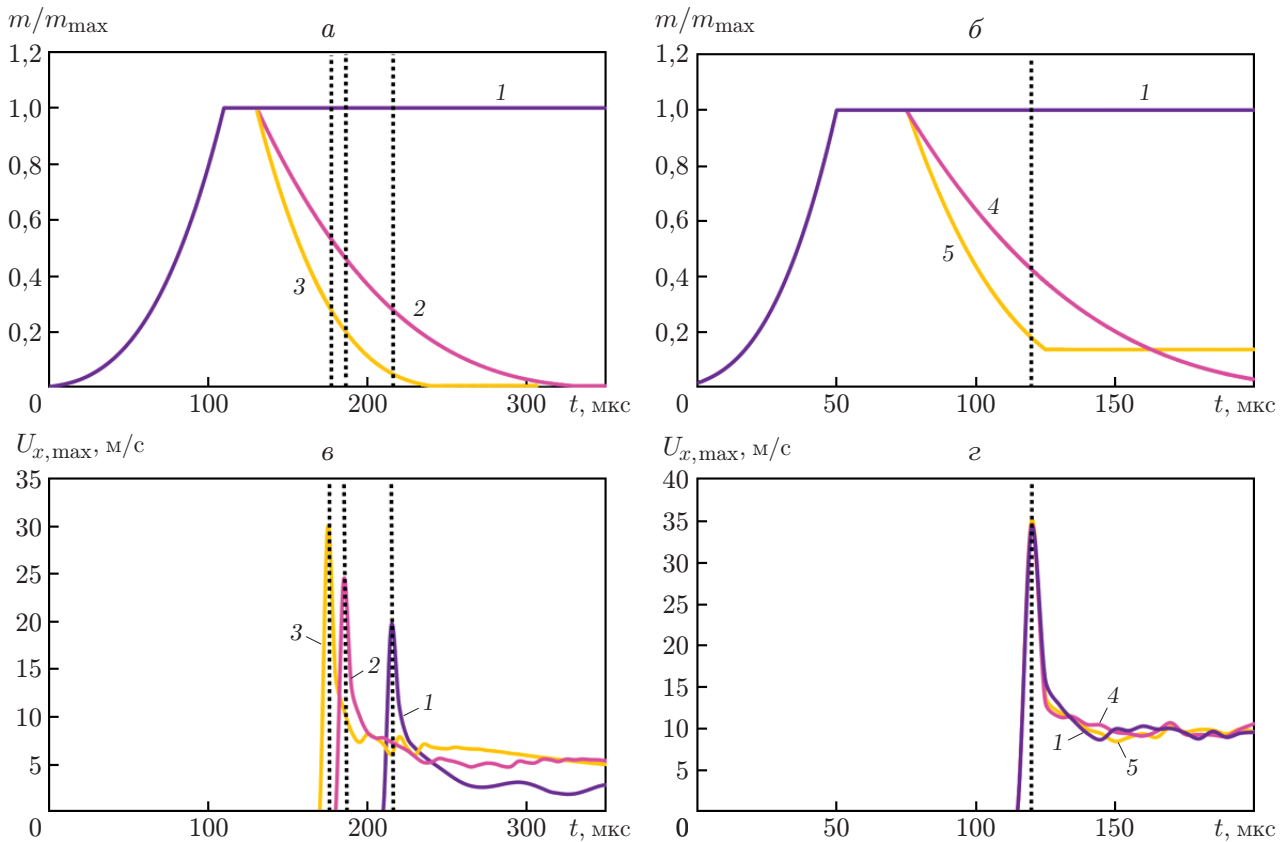


Рис. 2. Зависимости от времени безразмерной массы газовой фазы m/m_{\max} (а, б) и максимальной аксиальной скорости жидкости на оси симметрии волновода $U_{x,\max}$ (в, г) при различных значениях скорости конденсации I_c : а, в — $I_v = 0,71$ мг/с, б, г — $I_v = 1,2$ мг/с; 1 — $I_c = 0$, 2 — $I_c = 0,44$ мг/с, 3 — $I_c = 0,71$ мг/с, 4 — $I_c = 0,46$ мг/с, 5 — $I_c = 1,2$ мг/с; пунктирные линии — момент времени, в который формируется струя

ющие к нему слои жидкости, в конце этой стадии формируются встречно направленные потоки (стрелки на рис. 1,з), столкновение которых на оси симметрии приводит к образованию кумулятивной струи (см. рис. 1,у).

Для выявления физических механизмов, оказывающих преобладающее влияние на стадии схлопывания пузыря и формирования струи, проведены расчеты в широком диапазоне скоростей испарения и конденсации. На рис. 2 представлены временные зависимости безразмерной массы газовой фазы m/m_{\max} и максимальной аксиальной скорости жидкости на оси симметрии волновода $U_{x,\max}$. На рис. 2,а,в показаны результаты моделирования при умеренной скорости испарения ($I_v = 0,71$ мг/с). В этом случае по окончании расширения парового пузыря давление в газовой фазе p оказывается меньше давления в жидкости ($p/p_0 = 0,75$) вследствие неравновесности стадии роста. Расчеты показывают, что такой перепад давлений приводит к схлопыванию пузыря даже в случае отсутствия конденсации (кривая 1 на рис. 2). Схлопывание пузыря завершается образованием кумулятивной струи. Момент образования струи соответствует моменту, когда значение $U_{x,\max}$ достигает максимума (см. рис. 2,в). Из рис. 2,в следует, что при умеренных скоростях испарения скорость конденсации существенно влияет как на момент образования струи, так и на ее скорость.

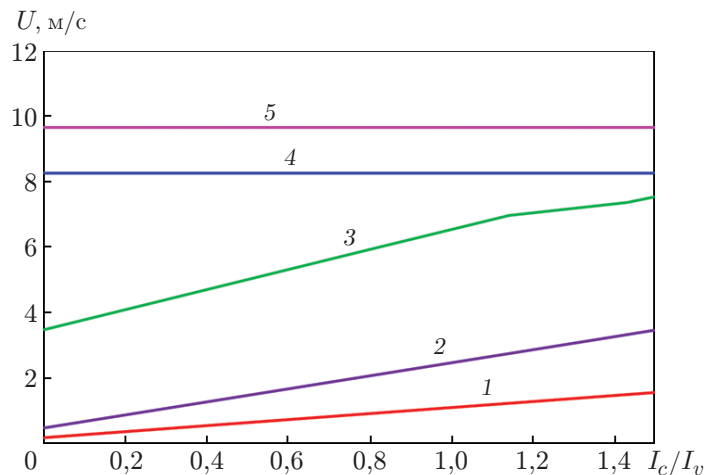


Рис. 3. Зависимость средней скорости струи U от безразмерной скорости конденсации I_c/I_v при различных значениях скорости испарения I_v :
 1 — $I_v = 0,17$ мг/с, 2 — $I_v = 0,33$ мг/с, 3 — $I_v = 0,56$ мг/с, 4 — $I_v = 2,10$ мг/с, 5 — $I_v = 2,38$ мг/с

Зависимости, характерные для больших скоростей испарения, представлены на рис. 2, б, г ($I_v = 1,2$ мг/с). В этом случае перепад давлений в газовой и жидкой фазах по окончании стадии роста пузыря больше, чем в случае умеренных скоростей испарения, и при рассматриваемых значениях параметров составляет $p/p_0 = 0,5$. Как и в случае $I_v = 0,71$ мг/с, схлопывание пузыря и образование струи возможны даже в отсутствие конденсации ($I_c = 0$), однако существенное различие заключается в отсутствии влияния скорости конденсации на момент образования струи и ее скорость (см. рис. 2, е).

На рис. 3 приведены зависимости средней скорости струи U от безразмерной скорости конденсации I_c/I_v при различных значениях интенсивности испарения I_v . При больших скоростях испарения скорость кумулятивной струи, формирующейся в результате схлопывания парового пузыря, не зависит от скорости конденсации (кривые 4, 5). При уменьшении параметра I_v влияние скорости конденсации на скорость струи возрастает. Чем больше скорость конденсации, тем больше скорость схлопывания пузыря и, следовательно, тем больше скорость образующейся струи (кривая 3). При этом даже в случае отсутствия конденсации возможно формирование достаточно интенсивных струй, например, для кривой 3 $U = 4$ см/с при $I_c = 0$. Наконец, при малых значениях скорости испарения процесс роста пузыря близок к равновесному и перепад давления в момент окончания этой стадии оказывается незначительным. В результате в случае отсутствия конденсации схлопывание пузыря становится невозможным и кумулятивная струя не формируется (кривые 1, 2). В диапазоне скоростей испарения $I_v = 0,17 \div 0,33$ мг/с наличие конденсации является необходимым условием для схлопывания пузыря и формирования струи.

Таким образом, можно выделить три режима лазерно-индуцированного кипения, различающихся физическими механизмами, преобладающими на стадиях схлопывания парового пузыря и последующего образования кумулятивной струи. В случае высокой интенсивности испарения время схлопывания пузыря и скорость струи полностью определяются перепадом давления, достигнутым в конце стадии роста. При этом конденсация не оказывает влияния на характеристики процесса. Основной причиной существенного перепада давления в газовой и жидкой фазах в конце стадии роста является неравновесность этой стадии, приводящая к инерционному расширению парового пузыря и разрежению находящегося в нем газа. При этом, как показали расчеты, влияние поверхностного натяжения

в данном режиме несущественно. При низкой интенсивности испарения, наоборот, конденсация является основным механизмом, вызывающим коллапс пузыря, а перепад давлений в газовой и жидкой фазах незначителен. Для умеренных скоростей испарения характерен переходный режим, при котором и конденсация, и перепад давления влияют на характеристики рассматриваемого процесса.

Расчеты в рамках упрощенной модели испарения и конденсации позволяют определить, какой режим лазерно-индуцированного кипения реализуется в эксперименте. Для этого следует подобрать эмпирические константы, позволяющие численно определить характерные времена и скорости экспериментально наблюдаемого процесса и исследовать влияние интенсивности конденсации и перепада давления в газовой и жидкой фазах на время схлопывания пузыря и скорость струи. Например, для случая, представленного на рис. 1, результаты такого исследования позволяют сделать вывод, что процесс лазерно-индуцированного кипения происходит в режиме, полностью определяемом перепадом давления.

Заключение. Проведенное параметрическое исследование показало, что в зависимости от скорости испарения можно выделить три режима лазерно-индуцированного кипения: режимы, при которых схлопывание парового пузыря обусловлено перепадом давления в газовой и жидкой фазах и конденсацией, а также переходный режим, в котором наблюдается влияние обоих этих механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chudnovskii V., Levin A., Yusupov V., et al.** 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. Heat Mass Transfer. 2020. V. 150. 119286.
2. **Fursenko R., Chudnovskii V., Minaev S., Okajima J.** Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 163. 120420.
3. **Minaev V. P., Minaev N. V., Yusupov V. I., et al.** Effect of laser-induced hydrodynamic dissection of biotissue in operative urology // Quant. Electron. 2019. V. 49. P. 404–408.
4. **Yusupov V., Chudnovskii V.** The origin of loud claps during endovenous laser treatments // J. Acoust. Soc. Amer. 2023. V. 153, N 3. P. 1525–1533.
5. **Koch M., Rosselló J., Lechner C., et al.** 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.
6. **Deshpande S. S., Anumolu L., Trujillo M. F.** Evaluating the performance of the two-phase flow solver interfoam // Comput. Sci. Discovery. 2012. V. 5, N 1. 014016.
7. **Солтани Д., Шафаи М.** Исследование спутной струи при наличии продольных возмущений // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 1. С. 70–77.
8. **Kosyakov V. A., Fursenko R. V., Chudnovskii V. M., Minaev S. S.** Physical mechanisms controlling a vapor bubble collapse and formation of a liquid jet during a laser-induced subcooled boiling near the end face of a thin waveguide // Intern. Comm. Heat Mass Transfer. 2023. V. 148. 107053.

*Поступила в редакцию 30/V 2023 г.,
после доработки — 21/VI 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*