

Моделирование лазерной кавитации в задачах хирургии

Дац Е.П, Гузев М.А., Чудновский В.М.

ИПМ ДВО РАН, Владивосток

Лазерная термокавитация как физический процесс

- явление роста и схлопывания паровых пузырьков в воде под действием быстрого лазерного нагрева. В результате данного процесса образуются микро-струи определенной температуры. Данное явление используется в хирургии для санации глубоких ран, температурного воздействия внутри полости кист, новообразований; обработки поверхностей.

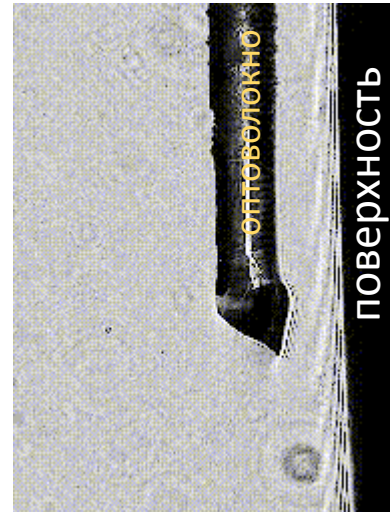
способы ввода оптоволоконна

перпендикулярно
поверхности



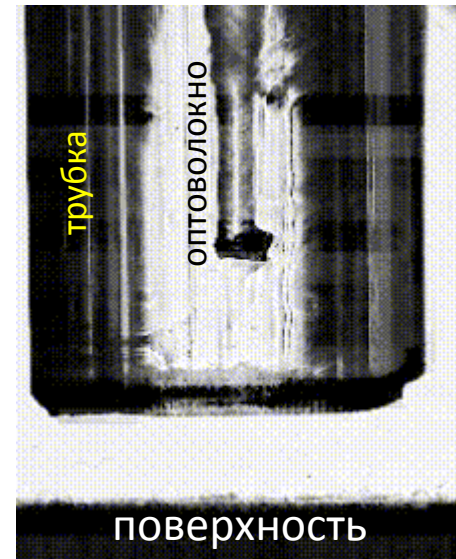
При коллапсе пузырька, струя бьет в направлении поверхности

параллельно
поверхности



На разных расстояниях от поверхности меняется направление струи.

внутри трубки



В результате коллапса происходит всасывание воды вблизи поверхности в трубку



кварцевое оптоволокно
диаметром 0,6 мм



Оптоволоконный лазер

Лазерная термокавитация в хирургии

Основная особенность кавитационных струй в процессе термокавитации – это их высокая температура относительно окружающей «холодной» жидкости. Способность кавитационных струй переносить тепло без существенного нагрева всей жидкости, сосредоточенной в объёме нашла применение в лазерной хирургии истинных кист, кисты Бейкера и при лазерном хирургическом лечении аномально изменённых кровеносных сосудов.

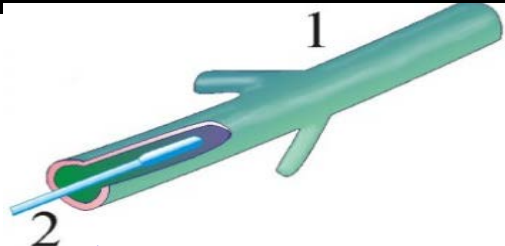
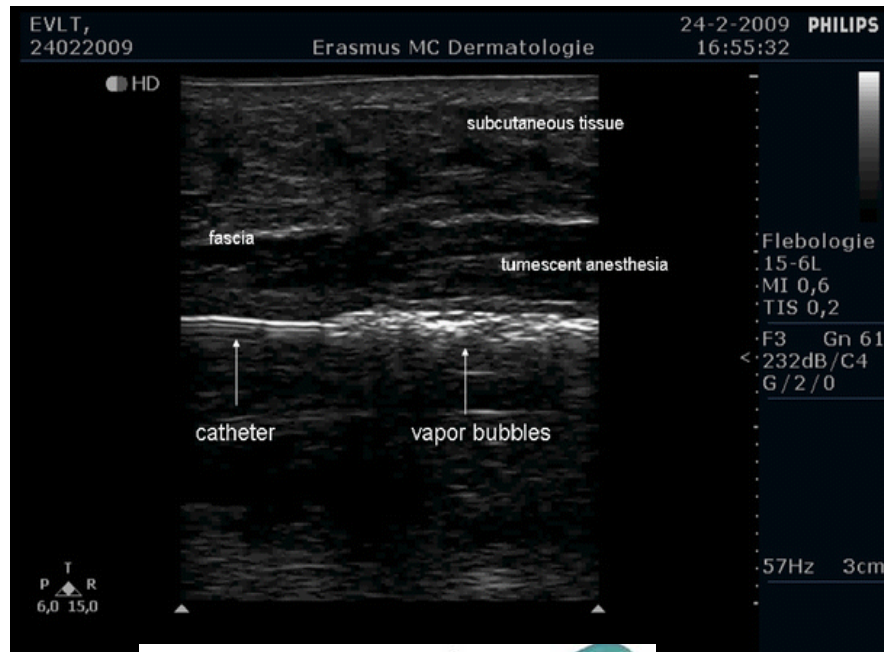


Рис. 1. УЗ-изображение затопленной разогретой кавитационной струи в варикозно расширенной вене при лазерном хирургическом лечении варикоза и схема введения оптоволоконна 2 в вену 1.

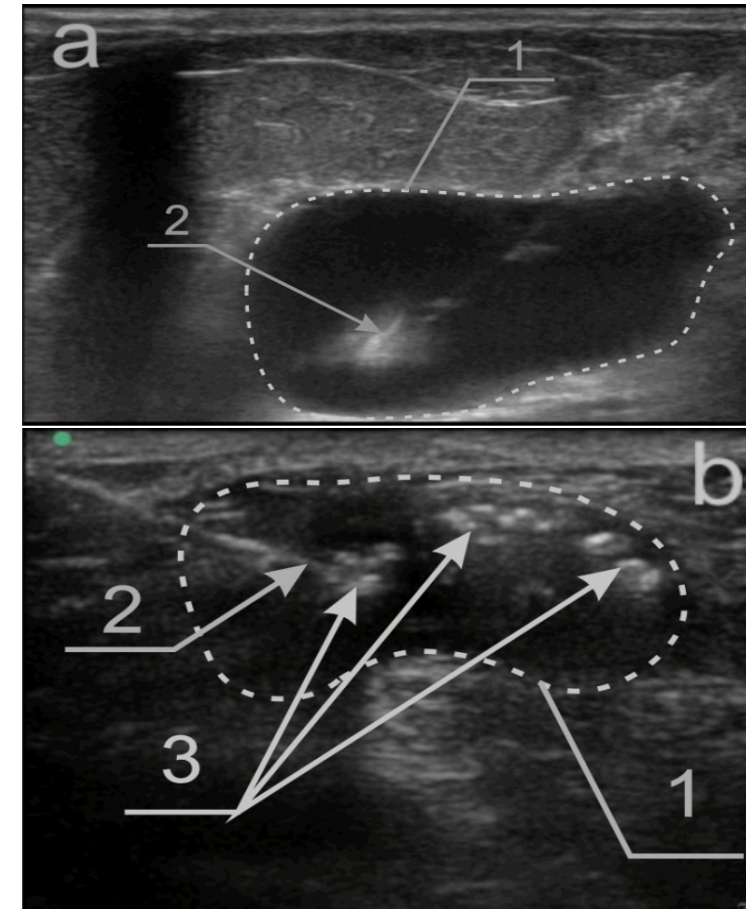


Рис. 2. УЗ- изображение кипения жидкости в кисте молочной железы (a) и кисте Бейкера (b). 1 граница кисты, 2 – оптоволоконно, 3 – парогазовые пузырьки.

Актуальность исследования

Существует большое количество экспериментальных результатов, описывающих процесс роста-схлопывания парового пузырька в результате **термокавитации**, предложены численные модели, описывающие динамику пузырька и последующее формирование кумулятивных струй.

Однако на сегодняшний день не существует экспериментальных методов, позволяющих определить температуру жидкой среды, в которой происходит процесс кавитации. Экспериментально невозможно получить оценку температурного распределения на этапе лазерного нагрева и на этапе формирования кавитационной струи. **Данная температура является главной характеристикой, определяющей эффективность процесса.**

В представленном исследовании предложен численный способ расчета температурного поля жидкой среды в процессе лазерного нагрева и последующем формировании кавитационных струй

Моделирование лазерной кавитации. Разделение физических процессов

Экспериментальное наблюдение процесса лазерной кавитации позволяет выделить две стадии:

1. Нагрев жидкой среды в окрестности торца оптоволокну. (время процесса 50-100 мс)
2. Рост и схлопывание парового пузырька с последующим формированием затопленной струи (время процесса ~1 мс)

Два рассматриваемых последовательных процесса могут различаться на два порядка по времени (нагрев происходит в десятки раз медленнее, чем кавитация), поэтому численное моделирование должно также включать два этапа:

1. Моделирование нагрева жидкой среды в окрестности торца оптоволокну.
2. Моделирование роста-схлопывания парового пузырька

Для каждого из рассматриваемого процесса решается своя система уравнений.

Модель нагрева лазерным излучением

Многочисленные экспериментальные наблюдения лазерного нагрева вблизи торца оптоволокна показывают, рядом с торцом формируется слой перегретой жидкости, визуально соответствующий области, отбрасывающей тень в объектив видео-камеры

Уравнения

$$\frac{\partial \rho_l \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_l (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \mu_l \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{U}) I \right] + (\rho_l - \rho_0) \vec{g}$$

$$\frac{\partial \rho_l c_{pl} T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho_l c_{pl} T) = \nabla (\lambda_l \nabla T) + Q$$

Уравнение теплопроводности воды

$$\frac{\partial \rho_q c_{pq} T_q}{\partial t} = \nabla (\lambda_q \nabla T_q)$$

Уравнение теплопроводности оптоволокна

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{U}) = 0$$

Закон сохранения массы

$$Q = k Q_0 \exp(-k z)$$

Источник лазерного излучения

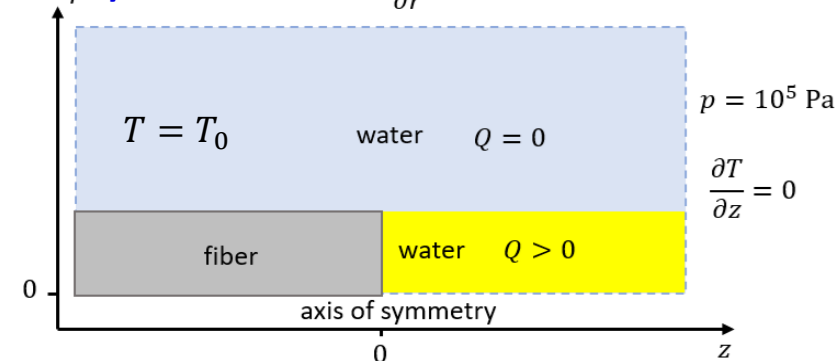
k – коэффициент поглощения излучения

z – расстояние до торца оптоволокна

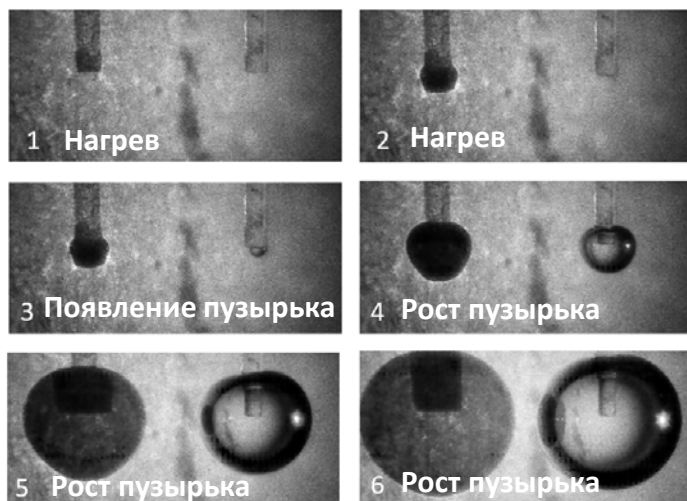
$\rho_l(T)$ – экспериментальная зависимость плотности воды от температуры

Граничные условия

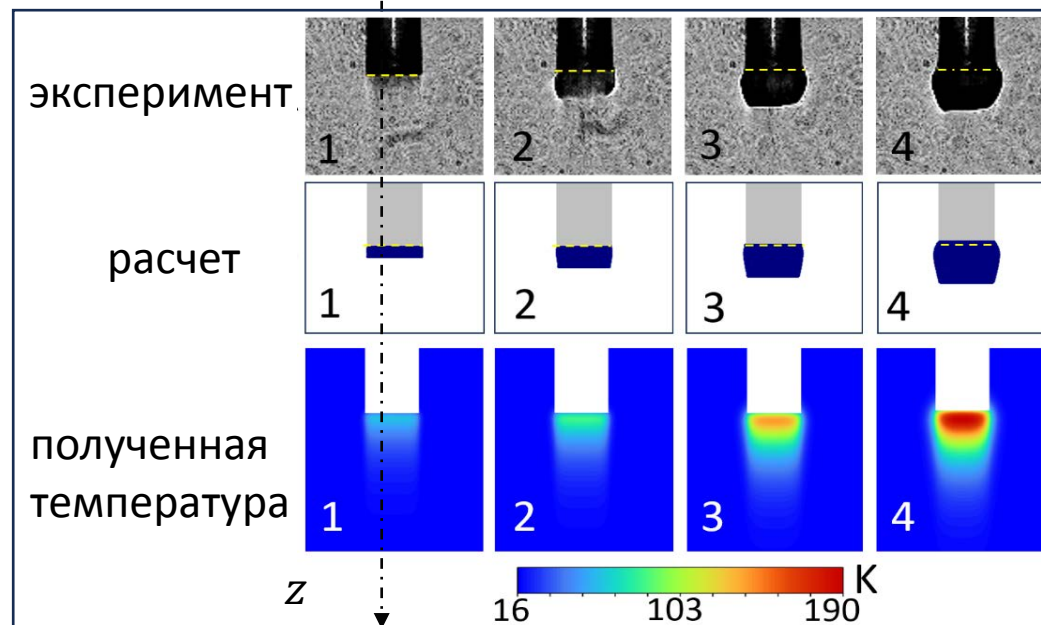
Уравнение изменения импульса $p = 10^5 \text{ Pa}$ $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$



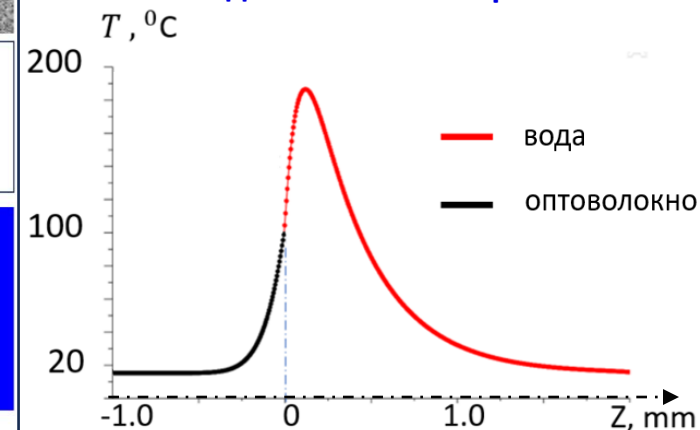
Наблюдаемая темная область, соответствует поверхности, на которой достигается некоторое значение температурного градиента (происходит преломление света, и образуется тень)



Съемка роста пузырька



Температурный профиль вдоль оси симметрии



Моделирование процесса роста-схлопывания парового пузырька

Двухфазная среда

$$\begin{aligned}\rho &= \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l & \lambda &= \alpha_g \lambda_g + \alpha_l \lambda_l \\ \mu &= \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l & c_p &= \alpha_g c_{pg} + \alpha_l c_{pl} \\ \alpha_g + \alpha_l &= 1\end{aligned}$$

α_g - Объемная доля жидкой фазы

α_l - Объемная доля жидкой фазы

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{U}) = \dot{m}_l$$

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{U}) = \dot{m}_g$$

$$\rho_g = \frac{Mp}{RT}$$

$\rho_l(T)$ - экспериментальная зависимость
плотности воды от температуры

В качестве начальных условий рассматриваемой задачи используются распределения скоростей и температуры, полученные на предыдущем этапе моделирования нагрева

Уравнение изменения импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \mu \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{U}) \right] + \vec{F}_V$$

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho c_p T) = \nabla (\lambda \nabla T) - L \dot{m}_g$$

Модель испарения/конденсации

$$\dot{m}_g = -\dot{m}_l = \gamma_g \alpha_l \rho_l \sqrt{\frac{T_{sat}(P_0)}{T_{sat}(P)}} \left(\frac{T - T_{sat}(P)}{T_{sat}(P)} \right), \quad \text{при } T > T_{sat}, \quad \alpha_g > \varepsilon_g$$

$$\dot{m}_l = -\dot{m}_g = \gamma_l \alpha_g \rho_g \sqrt{\frac{T_{sat}(P_0)}{T_{sat}(P)}} \left(\frac{T_{sat}(P) - T}{T_{sat}(P)} \right), \quad \text{при } T < T_{sat}, \quad \alpha_l > \varepsilon_l$$

γ - коэффициенты, определяемые
из экспериментальных данных

L - теплота парообразования/конденсации

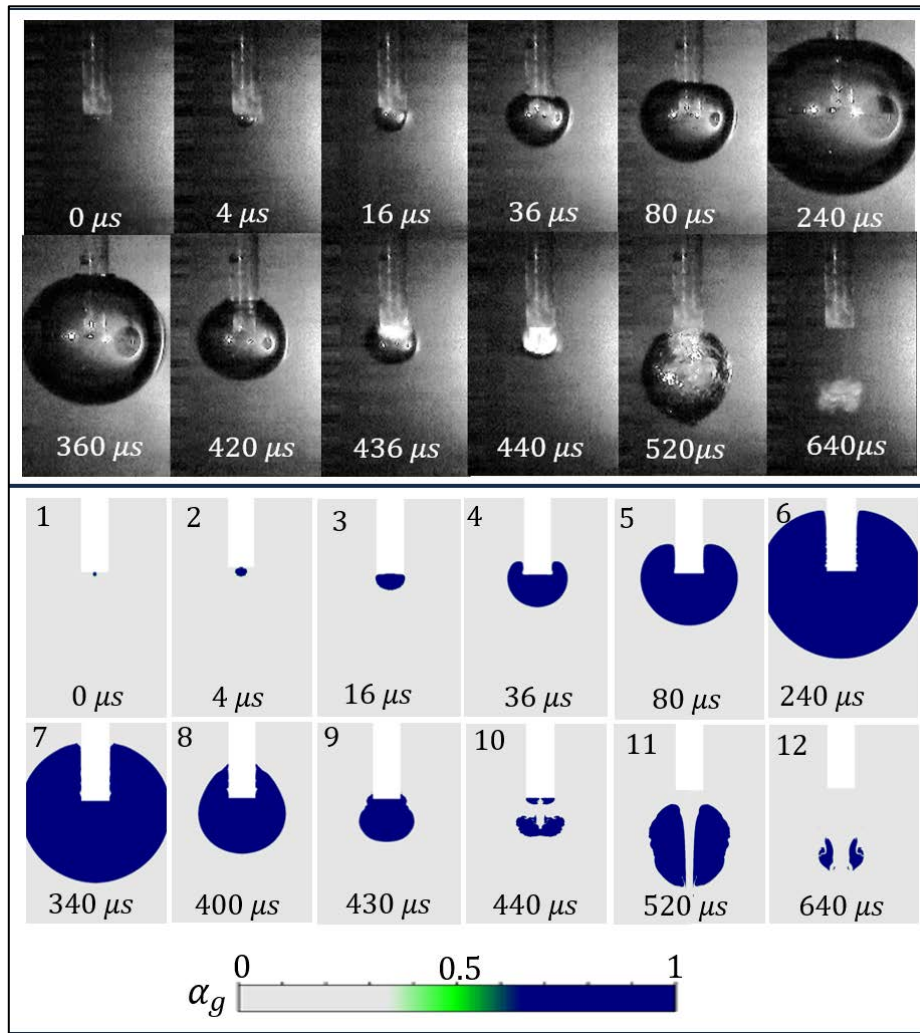
$T_{sat}(p)$ - температура насыщения,
зависящая от давления

\vec{F}_V - объемная сила поверхностного натяжения (н/м³)

ε - минимальная доля фазы,
при которой возможен процесс массообмена (поверхностное кипение)
В расчетах используется значение $\varepsilon = 0.01$

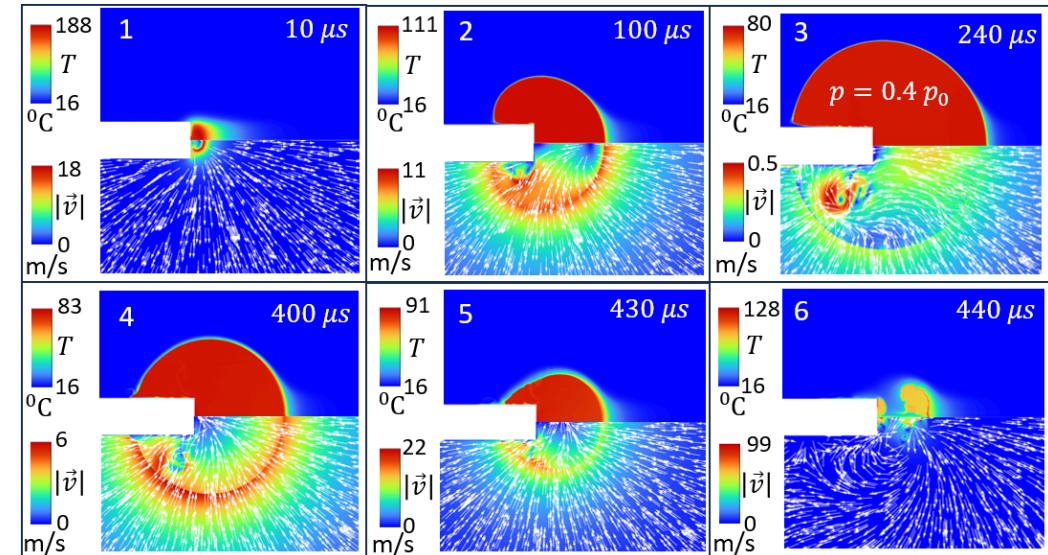
Результаты численного моделирования

Паровая фаза, сравнение с экспериментом

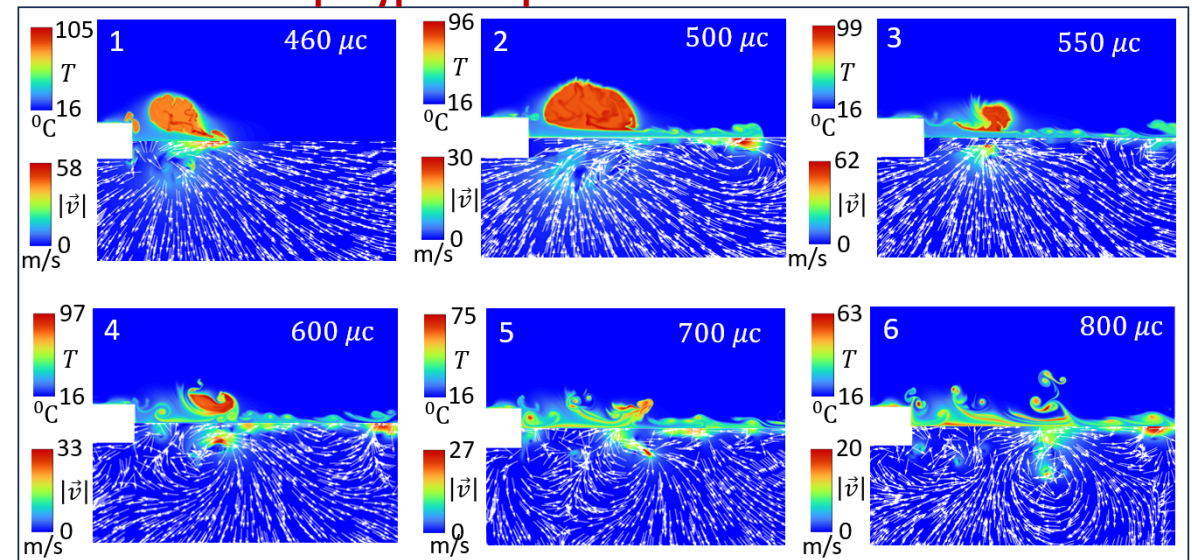


Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Поле температур и скоростей на этапе роста пузырька



Поле температур и скоростей на этапе схлопывания

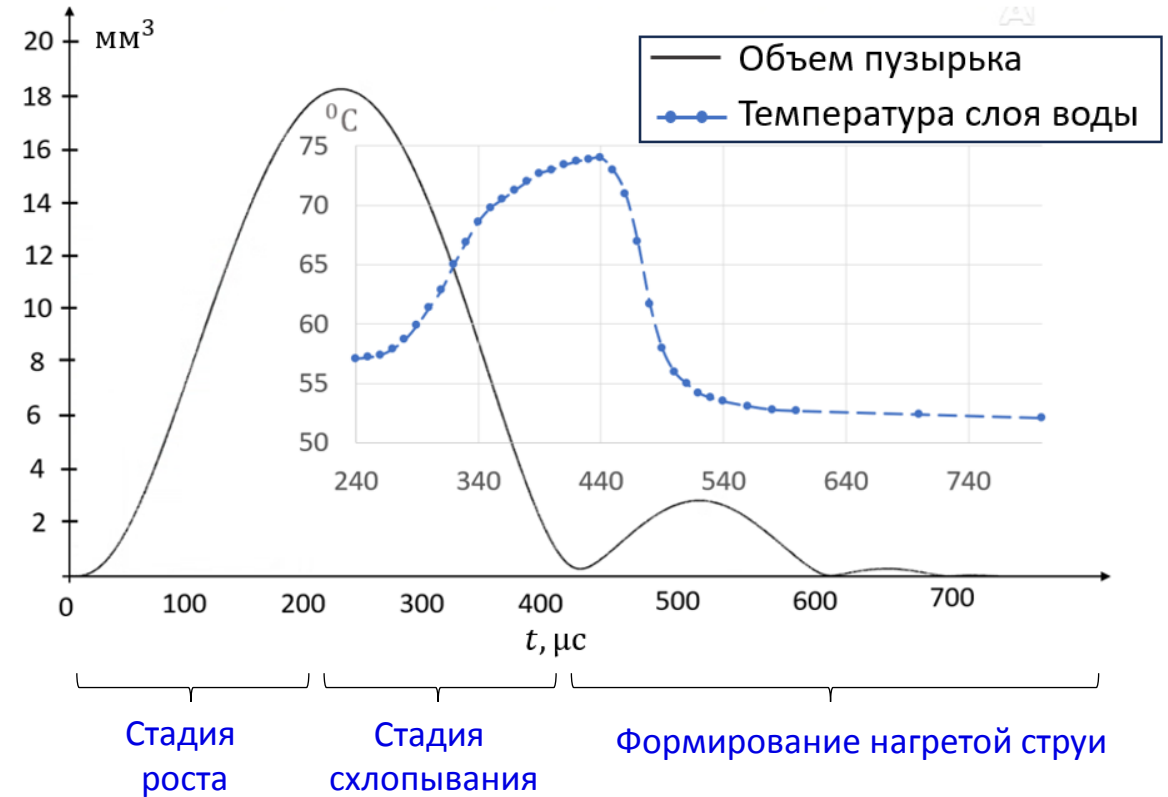


На поверхности пузырька образуется слой нагретой воды, который при схлопывании формирует нагретую затопленную струю

Результаты численного моделирования

Динамика смоделированного физического процесса соответствует наблюдаемым экспериментальным данным

Нагретый слой воды вокруг пузырька при схлопывании формирует кумулятивную струю и определяет ее среднюю температуру (при начальной температуре 18 градусов, средняя температура затопленной струи ~ 53 градуса. При начальной температуре 37 градусов, средняя температура затопленной струи ~ 70 градусов)



Температура затопленной струи слабо зависит от мощности лазерного излучения, определяется начальной температурой и коэффициентом поглощения среды

Спасибо за внимание