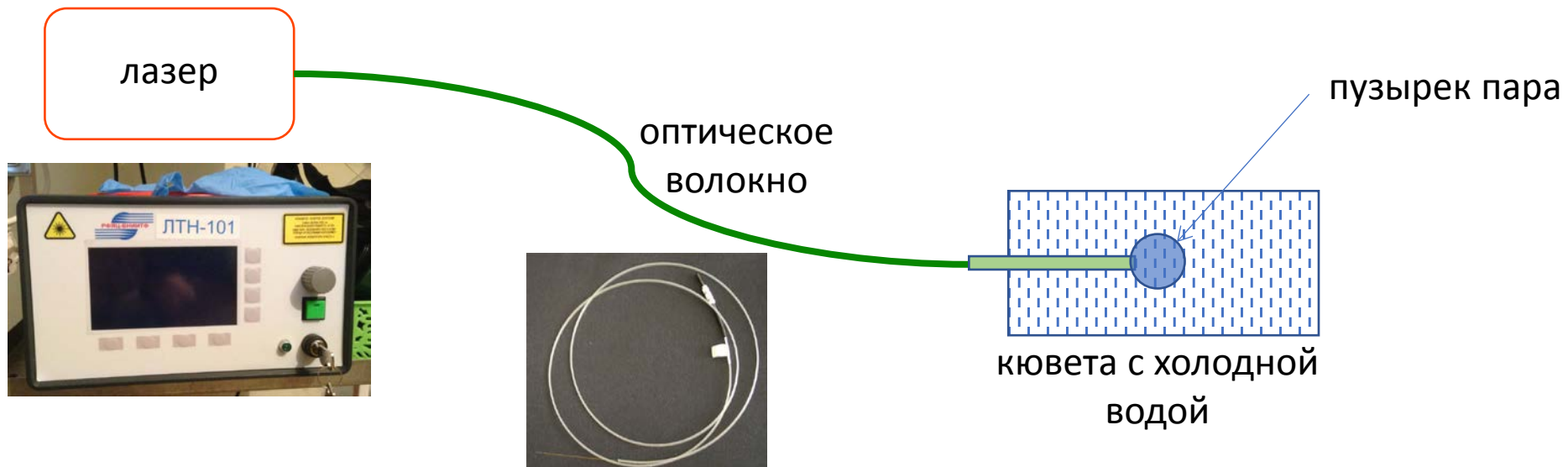


Выявление физических механизмов термокавитации вблизи оптического волокна с помощью методов численного моделирования

Фурсенко Р.В., Косяков В.А.

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН

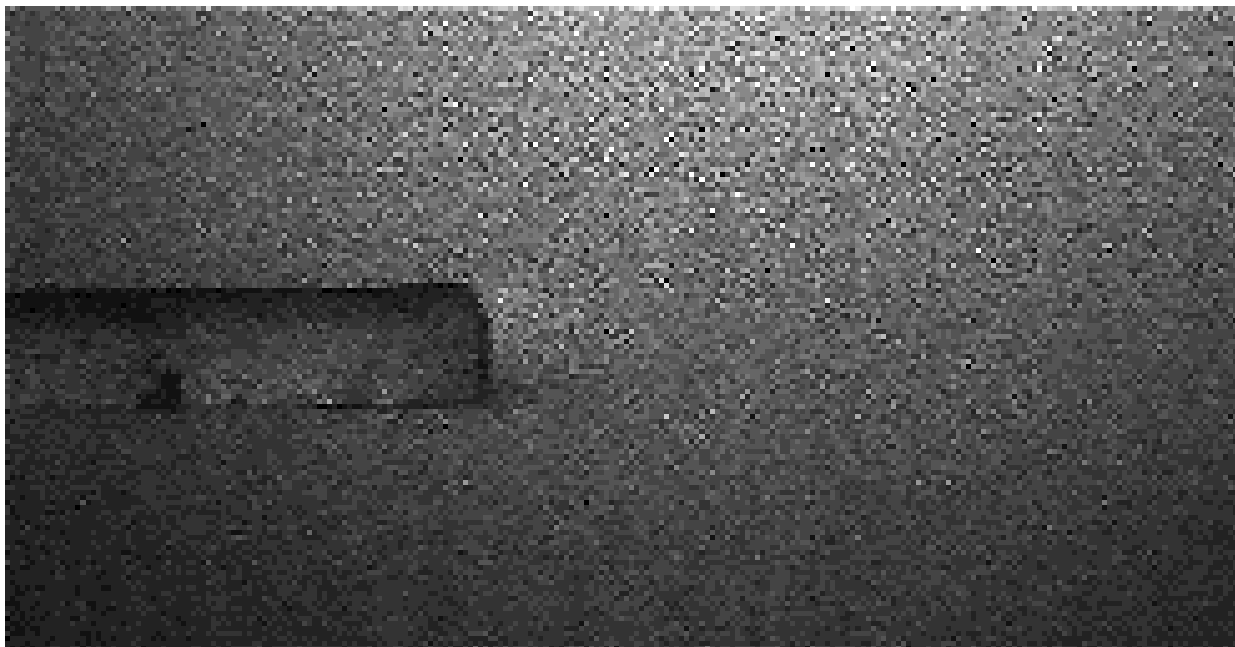
Физический процесс



Характерные значения:

Мощность лазера –	3, ..., 10 Вт
Длина волны излучения –	0.97, 1.47 мкм
Радиус волновода –	300 мкм
Размер пузырьков –	300, ..., 2000 мкм
Давление –	4, ..., 10 атм;
Скорость струи –	10, ..., 100 м/с

Физический процесс



- скорости струи (~ 10 м/с)
- повышенная температура струи ($\sim 40-60$ С)
- перепады давления (~ 3 atm)

Мощность –	6 Вт
Длина волны –	1.47 мкм
Радиус волновода –	300 мкм
Радиус пузыря –	2000 мкм

Приложения в медицине

лечение кист, варикоза, иссечение тканей, лечение ран, ...



Лазерный кавитатор

1. Физиологический раствор
2. Система для инфузии растворов
3. Оптическое волокно кварц-кварц
вторичное покрытие полиамид, диаметр
600 мкм
4. Лазерный аппарат - излучение 1.91
мкм, мощность 30 Вт
5. Стерильные силиконовые трубки



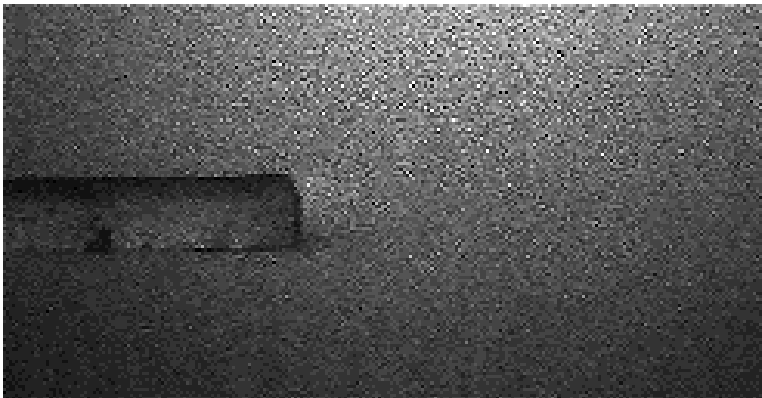
Схема очистки гнойной раны с использованием явления лазерной кавитации в трубке, размещённой в полость, заполненной физиологическим раствором. 1- медицинский лазер, 2- оптоволокно, 3- трубка с вставленным оптоволоком.

Вопросы

Механизмы образования струи?

Причины повышенной температуры струи?

Механизмы влияния стенок на характеристики струи?



Механизмы формирования струи. Причина коллапса

В предыдущих исследованиях уменьшение объема пузырька связывали в основном с **конденсацией** пара вследствие охлаждения жидкостью, окружающей пузырь.

В связи с чем в численном моделировании использовали несжимаемые математические модели, что давало хорошее **качественное согласие** с экспериментальными данными

Конденсация не является единственным возможным объяснением, **межфазное давление** так же может влиять на схлопывание пузыря и как следствие на формирование струи. Таким образом вопрос о механизмах отвечающих за формирование струи остается открытым.

- Zhong X., et al, International Journal of Multiphase Flow, 2020. 132(10):103433
- Chudnovskii V., et al, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. 150:119286
- Fursenko R., et al, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. 163(10):120420
- Zhang J., et al, Journal of Hydrodynamics. 2022. 34(4):1-11

Постановка задачи

Уравнения для объемной доли

$$\frac{\partial \rho_l \alpha_l}{\partial t} + \nabla(\rho_l \alpha_l \vec{U}) = 0, \quad \frac{\partial \rho_g \alpha_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g \alpha_g \vec{U}) = \dot{m}$$

$$\rho = \rho_l \alpha_l + \rho_g \alpha_g, \quad \alpha_l + \alpha_g = 1$$

Уравнение сохранения импульса

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

Уравнения состояния

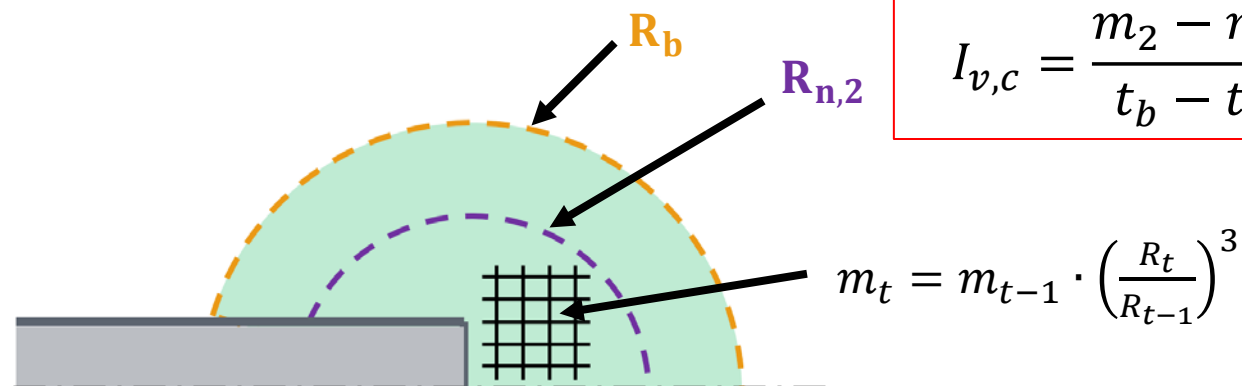
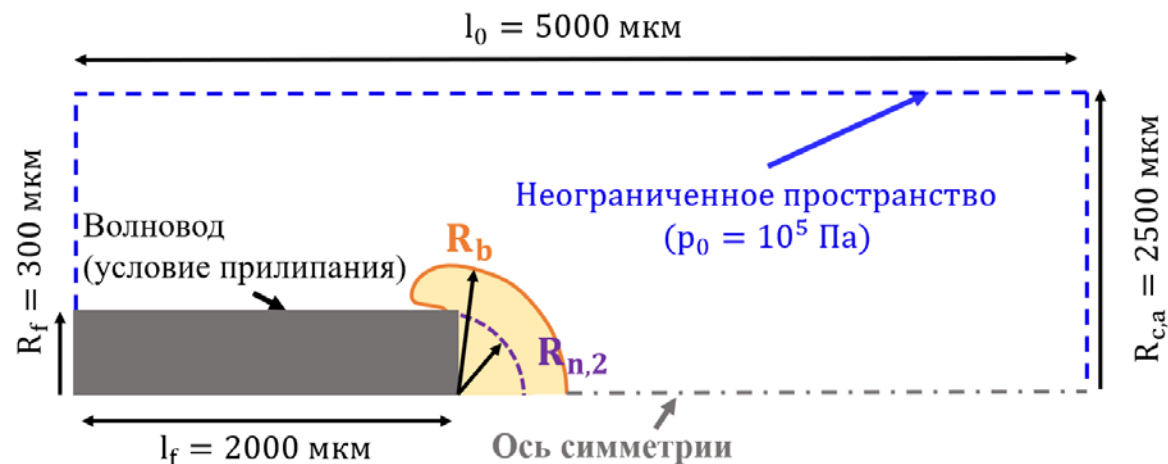
$$\rho_g = \rho_{g,0} \left(\frac{p_g}{p_{g,0}} \right)^{1/\gamma_g}, \quad \rho_l = \text{const}$$

Модель испарения/конденсации

$$R_n(t) = \begin{cases} R_{n,1}, & t < t_a \\ (t - t_a) \cdot \frac{R_{n,2} - R_{n,1}}{t_b - t_a} + R_{n,1}, & t_a \leq t < t_b \\ R_{n,2}, & t \geq t_b \end{cases}$$

$$m_{0,new} = m_0 \left(\frac{R_n(t)}{R_{n,1}} \right)^3, \quad \rho_{g,new}(x, t) = \frac{m_{0,new}}{m(t)} \rho_g(x, t)$$

OpenFOAM, Метод объема жидкости (VoF),
решатель compressibleInterFoam с модификацией



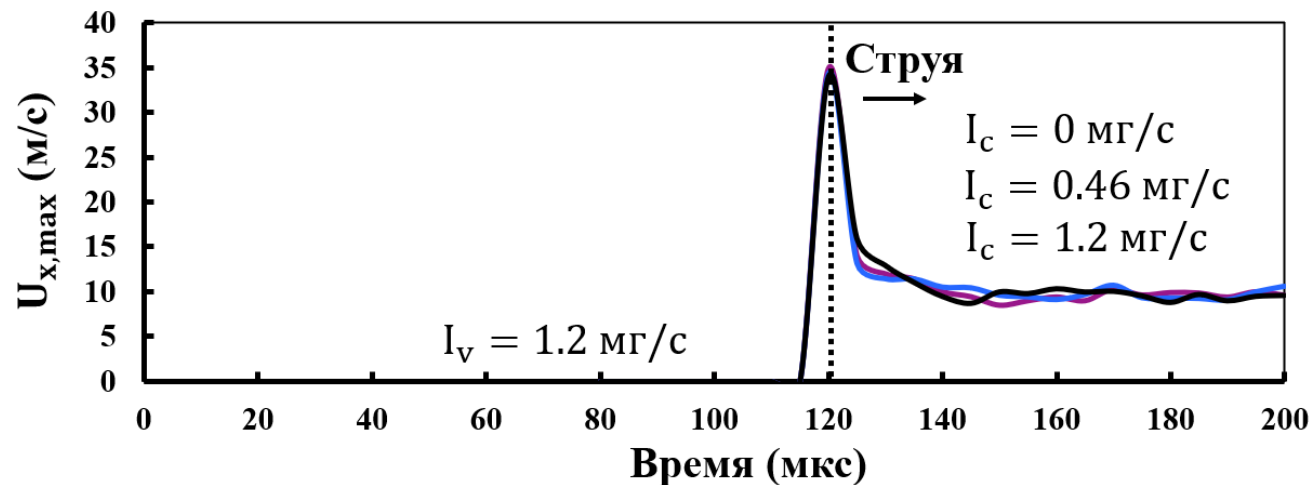
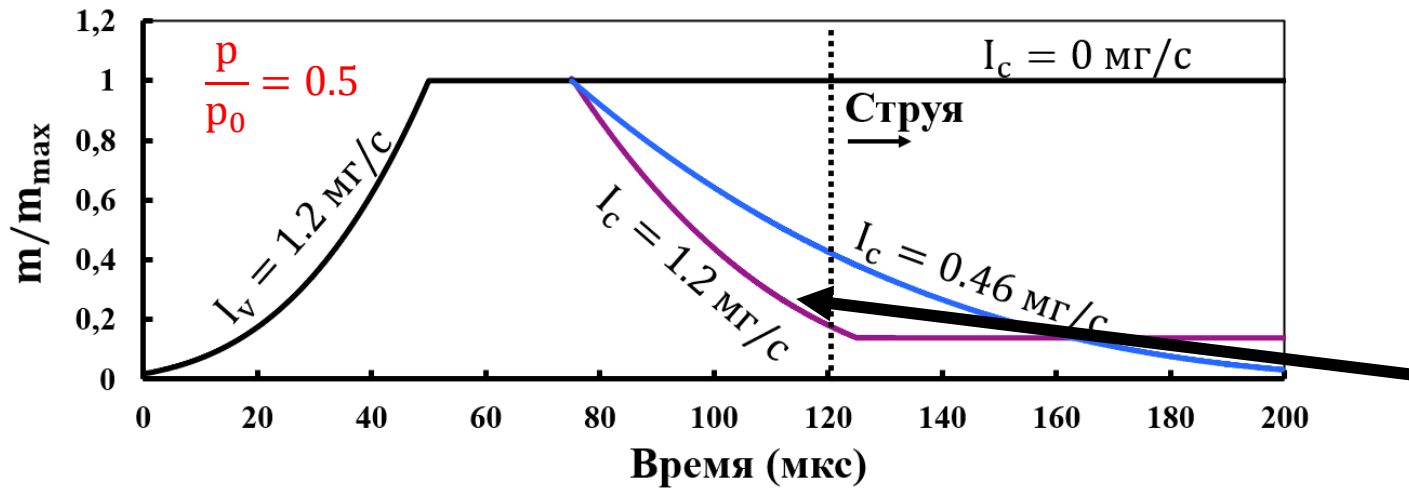
$$I_{v,c} = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a}$$

M. Koch, J. Rosselló, C. Lechner, W. Lauterborn, R. Mettin, Dynamics of a laser-induced bubble above the flat top of a solid cylinder—mushroom-shaped bubbles and the fast jet, Fluids 7 (2021) 2. doi:10.3390/fluids7010002.

Квадратная сетка со стороной 2 мкм,
Адаптивный шаг по времени $\Delta t_{\min} = 1e-11$ с

Интенсивность испарения (высокая)

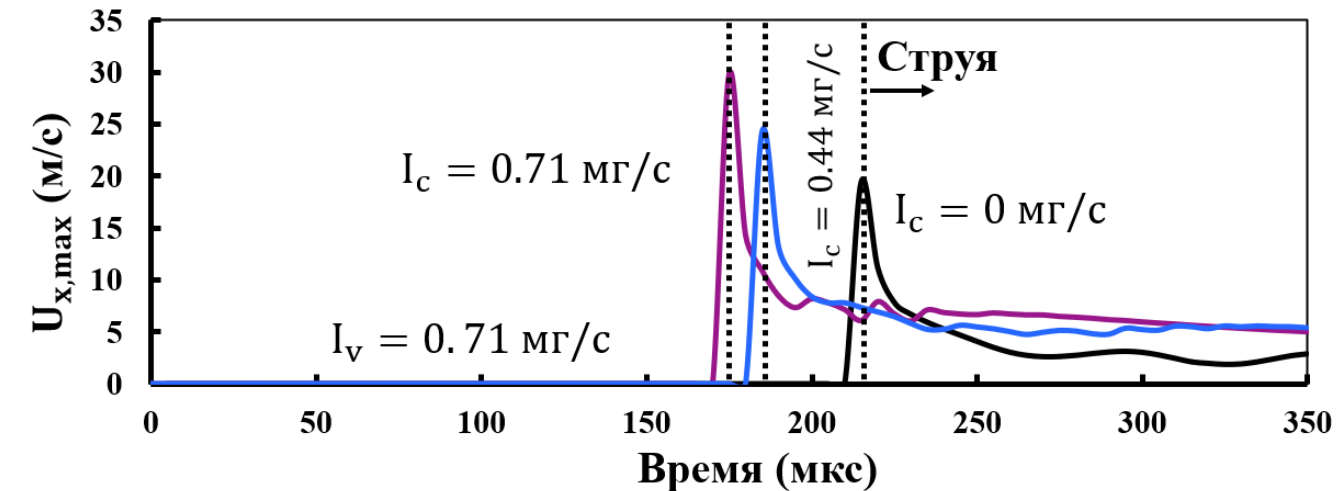
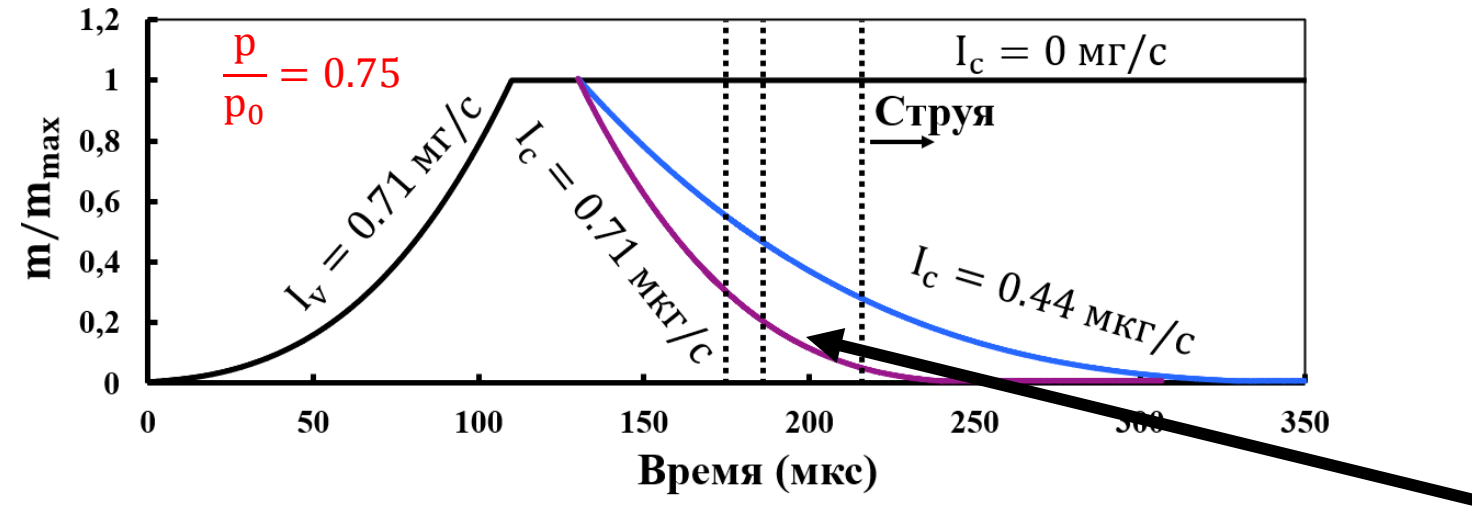
$$I_v = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a} = 1.2 \text{ мг/с}$$



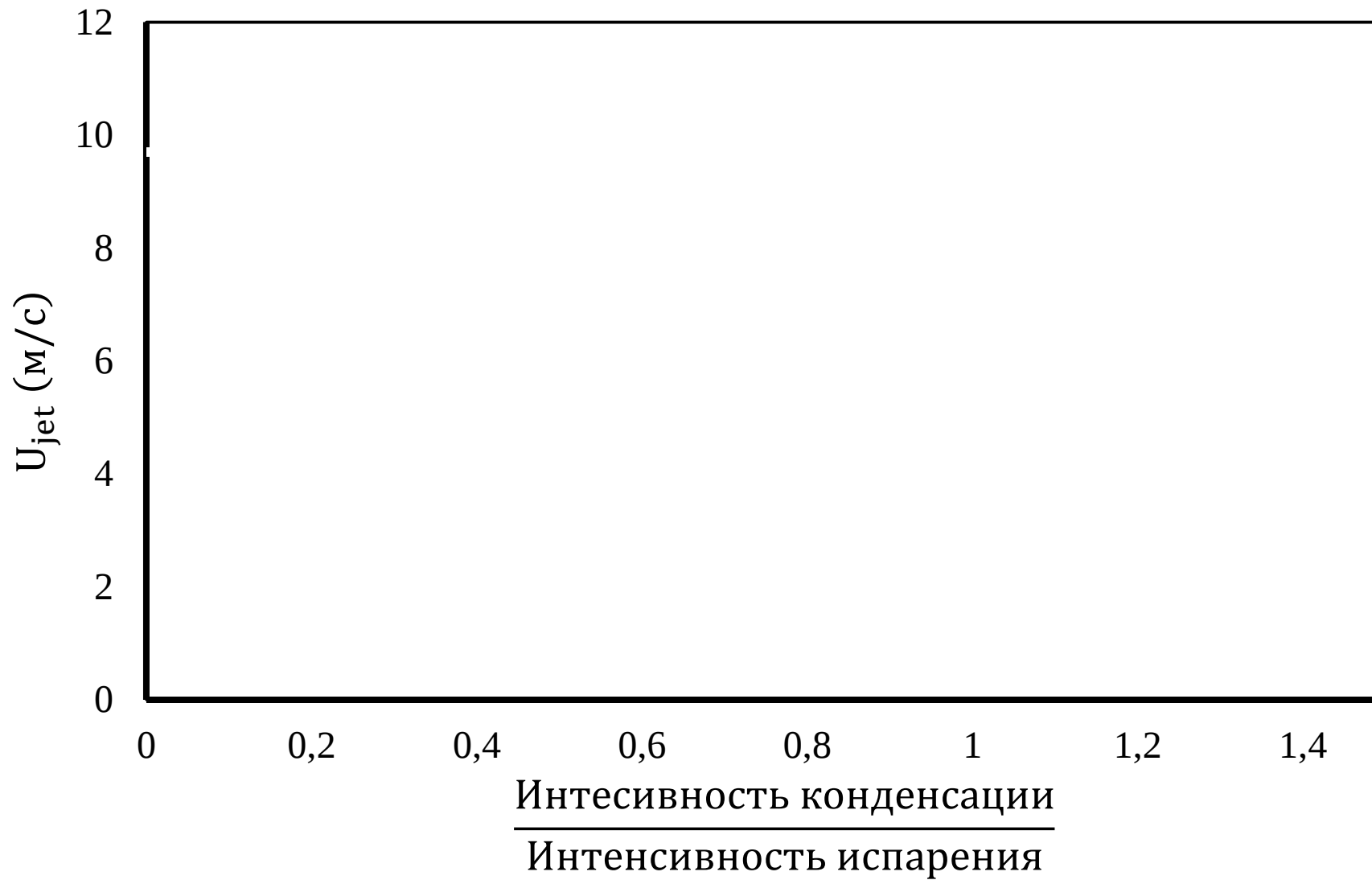
Формирование струи происходит независимо от интенсивности конденсации. Определяющим процессом для появления струи и ее динамики является перепад давления.

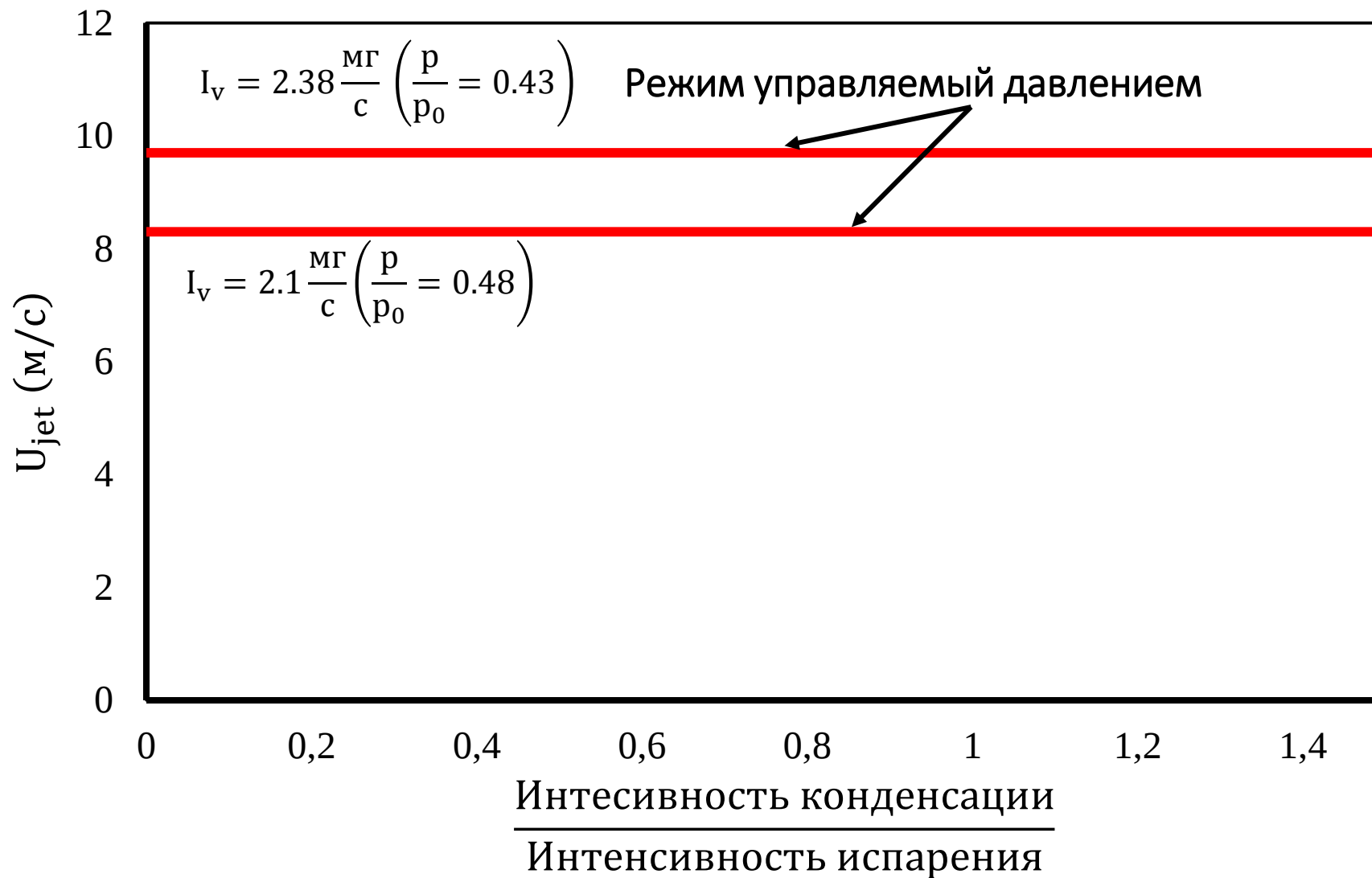
Интенсивность испарения (средняя)

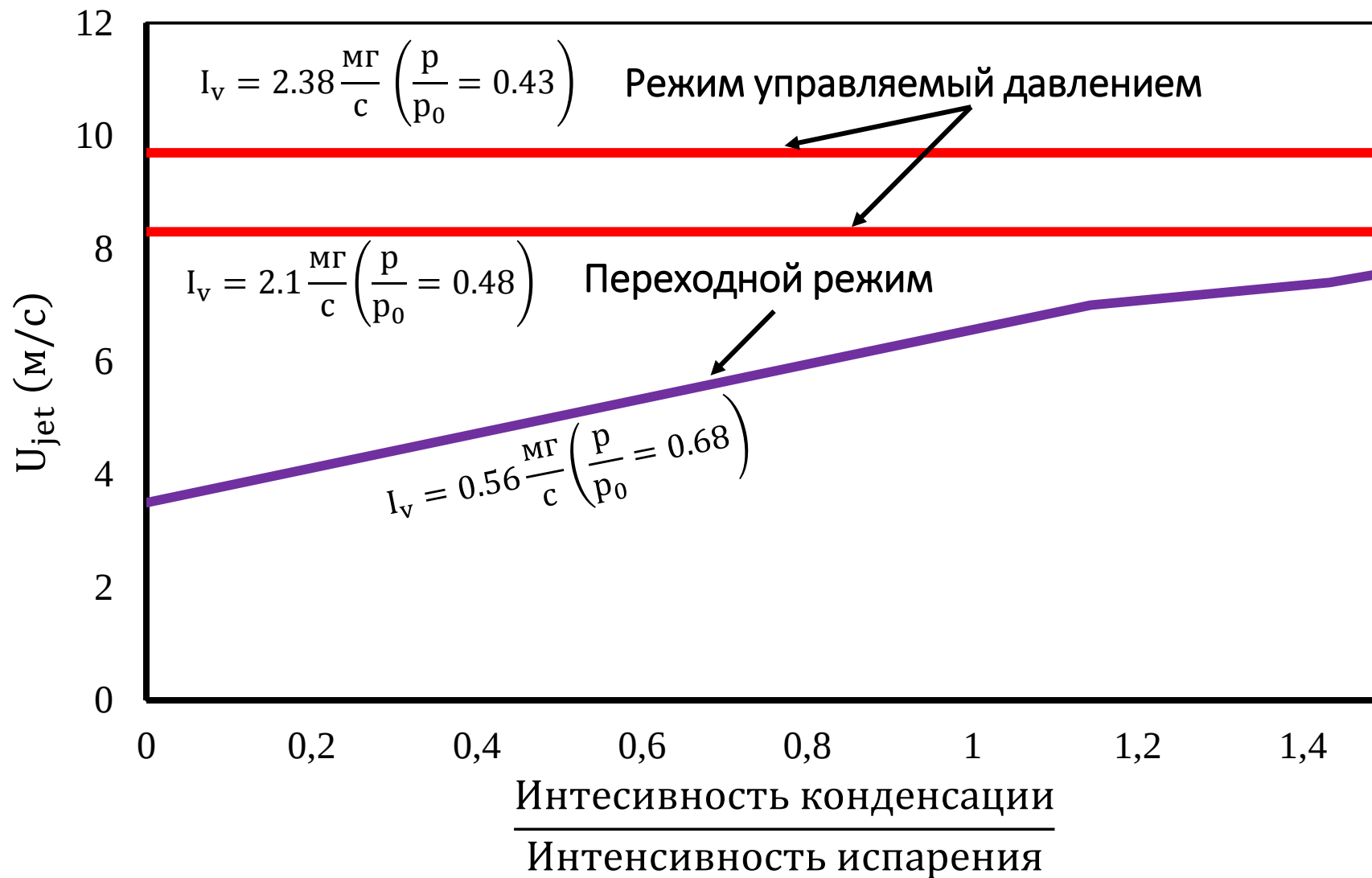
$$I_v = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a} = 0.71 \text{ мг/с}$$

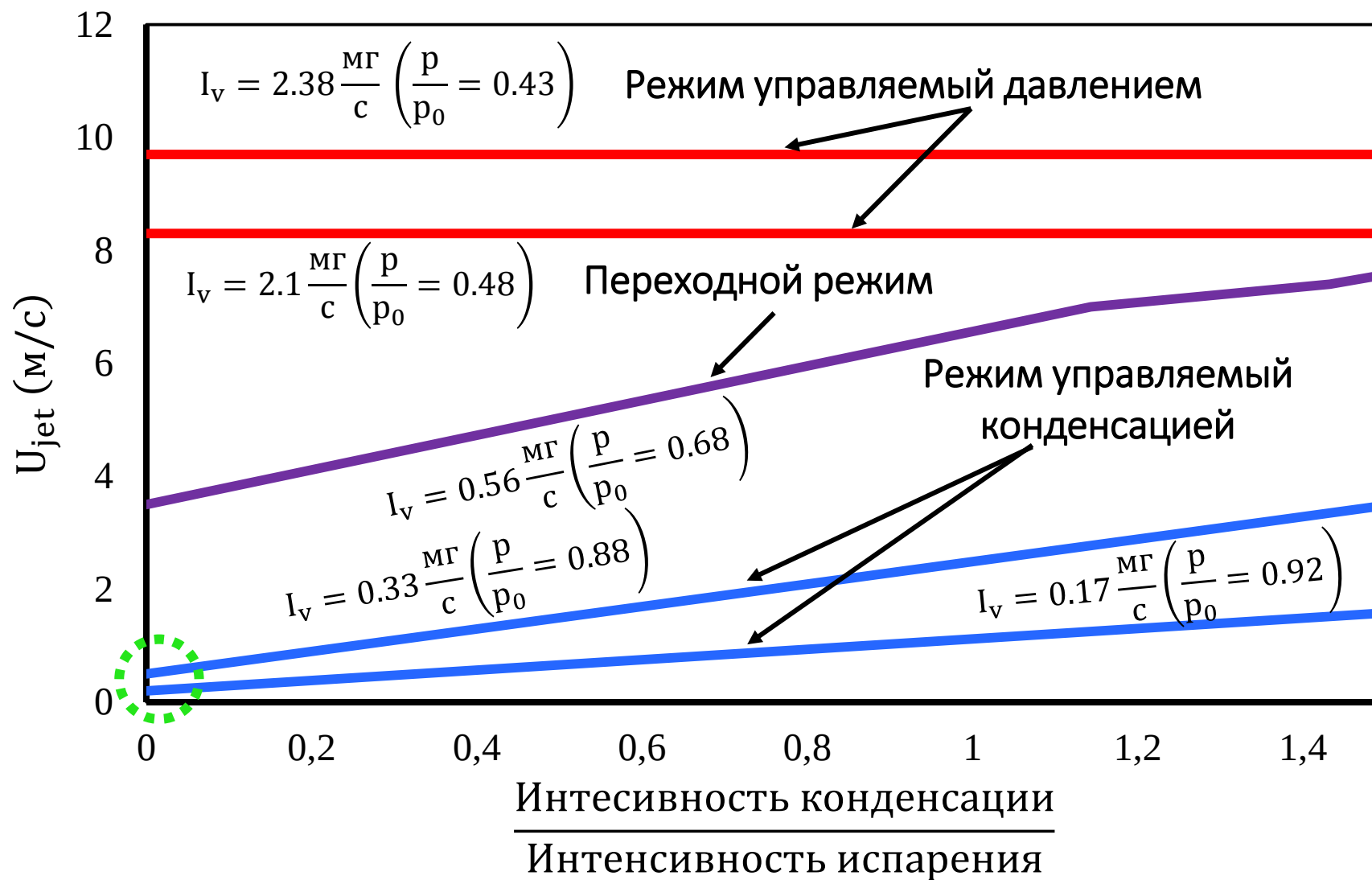


Конденсация увеличивает скорость струи, а также в некоторых случаях может уменьшать время за которое пузырь коллапсирует.

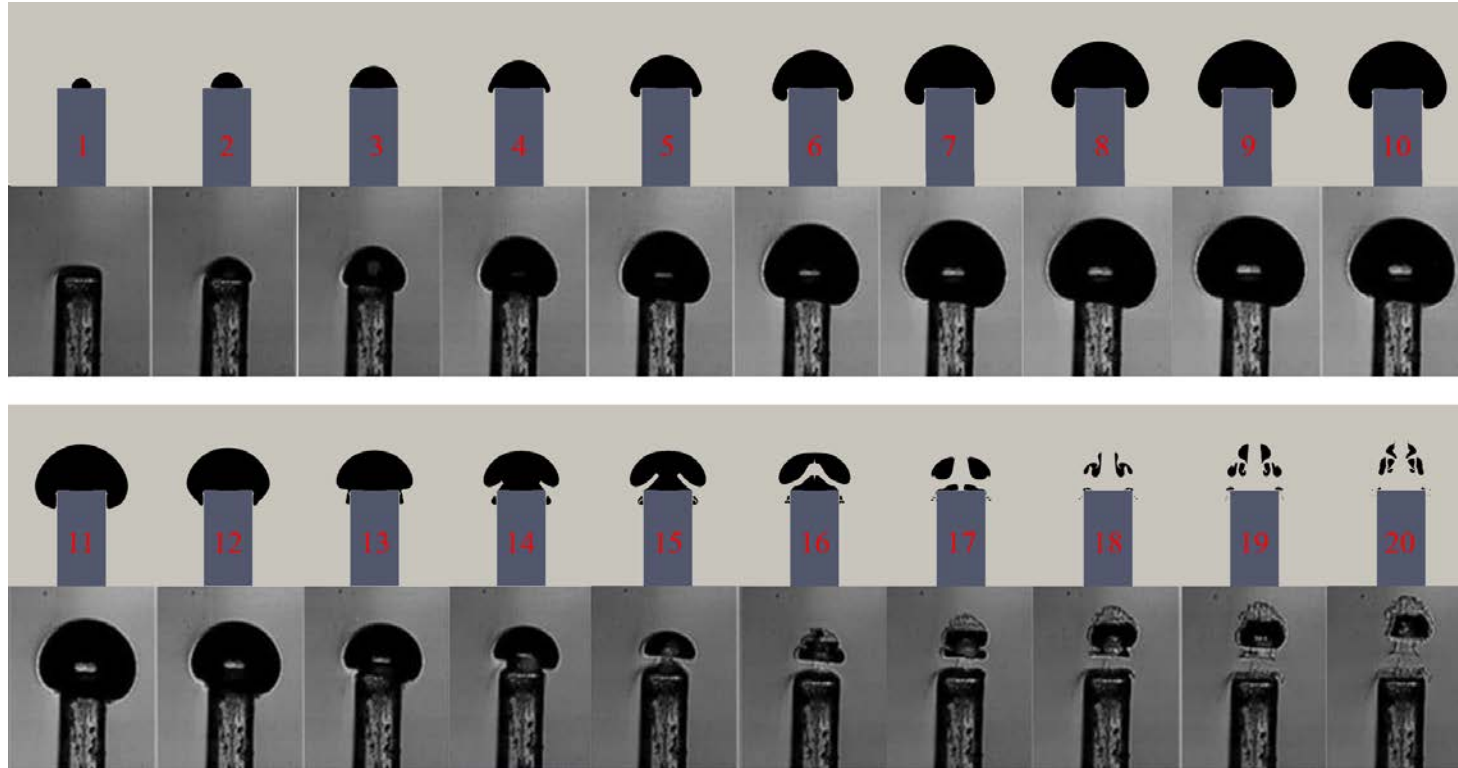






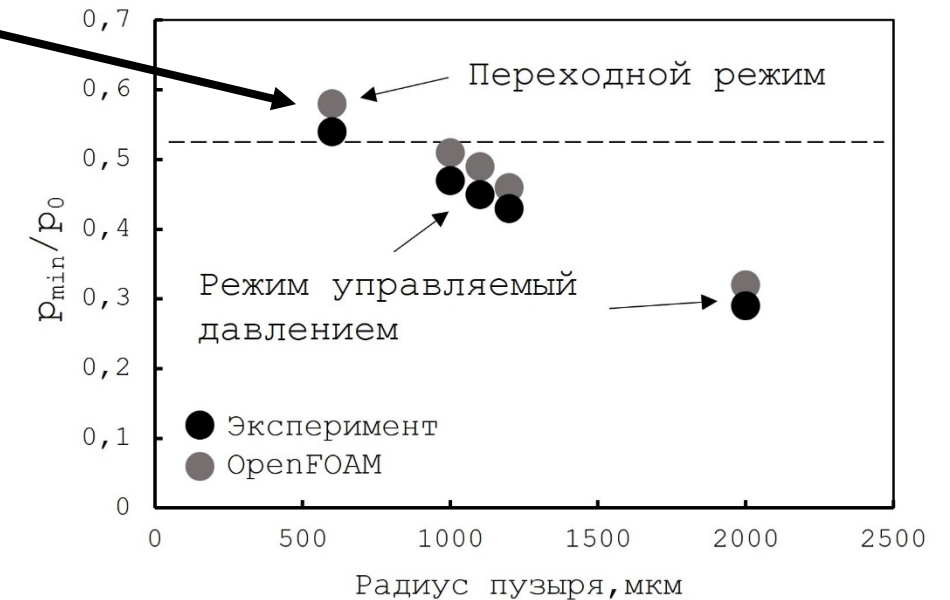


Сравнение с экспериментом



$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_L R} + \frac{\Delta P(t)}{\rho_L} = 0$$

Эксперимент $\rightarrow R(t), \dot{R}(t), \ddot{R}(t) \rightarrow$
 $\rightarrow$ Rayleigh-Plesset Equation $\rightarrow$
 $\rightarrow$ Давление внутри пузырька



$\Delta = 16.67$ мкс;

Различие объема при максимальном расширении < 5%;

Скорость струи:

Эксп. - 10 м/с; Расчет - 12.5 м/с

Основные результаты

- В зависимости от интенсивности испарения возможна реализация одного из трех режимов лазерно-индуцированного недогретого кипения
 - ❖ Режим обусловленный давлением
 - ❖ Переходной режим
 - ❖ Режим обусловленный конденсацией

- Динамика пузыря на стадии роста определяет поведение пузыря на стадии схлопывания и какой режим в итоге реализуется

- Адекватное описание режима, обусловленного давлением, требует учета сжимаемости газа, тогда как часть переходного режима и режима, обусловленного конденсацией, может быть описана в рамках моделей несжимаемого газа

Причины повышенной температуры струи

В последние годы увеличился интерес к использованию таких струй в различных медицинских приложениях: проведение хирургических операций, перфорация, санация и нагрев биологических тканей.

В эксперименте довольно трудно определить, каковы тепловые характеристики струи, на всем этапе ее существования.

Не было до конца ясно, почему при недогретом кипении образующаяся струя обладает повышенной температурой.

Постановка задачи

Уравнения для объемной доли

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

$$\rho = \rho_l \alpha_l + \rho_g \alpha_g, \quad \alpha_l + \alpha_g = 1$$

Уравнение сохранения импульса

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

Уравнение энергии

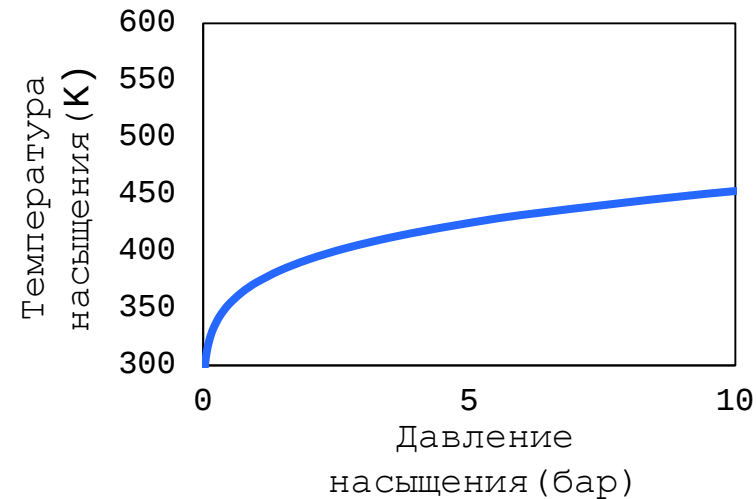
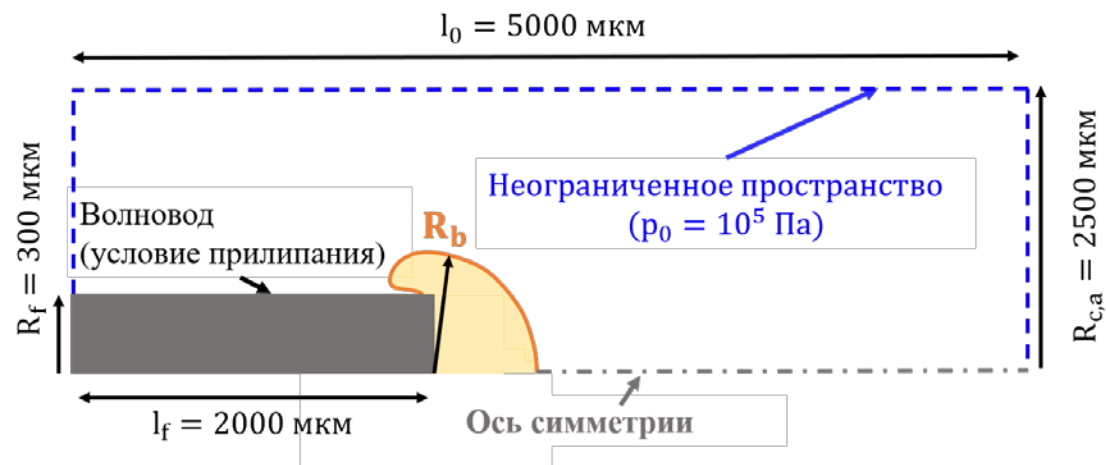
$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla(\vec{U}(\rho E + p)) = \nabla(k \nabla T) + S_h$$

Уравнения состояния

$$\rho_g = p/RT, \quad \rho_l = \text{const}$$

Модель испарения/конденсации (Lee)

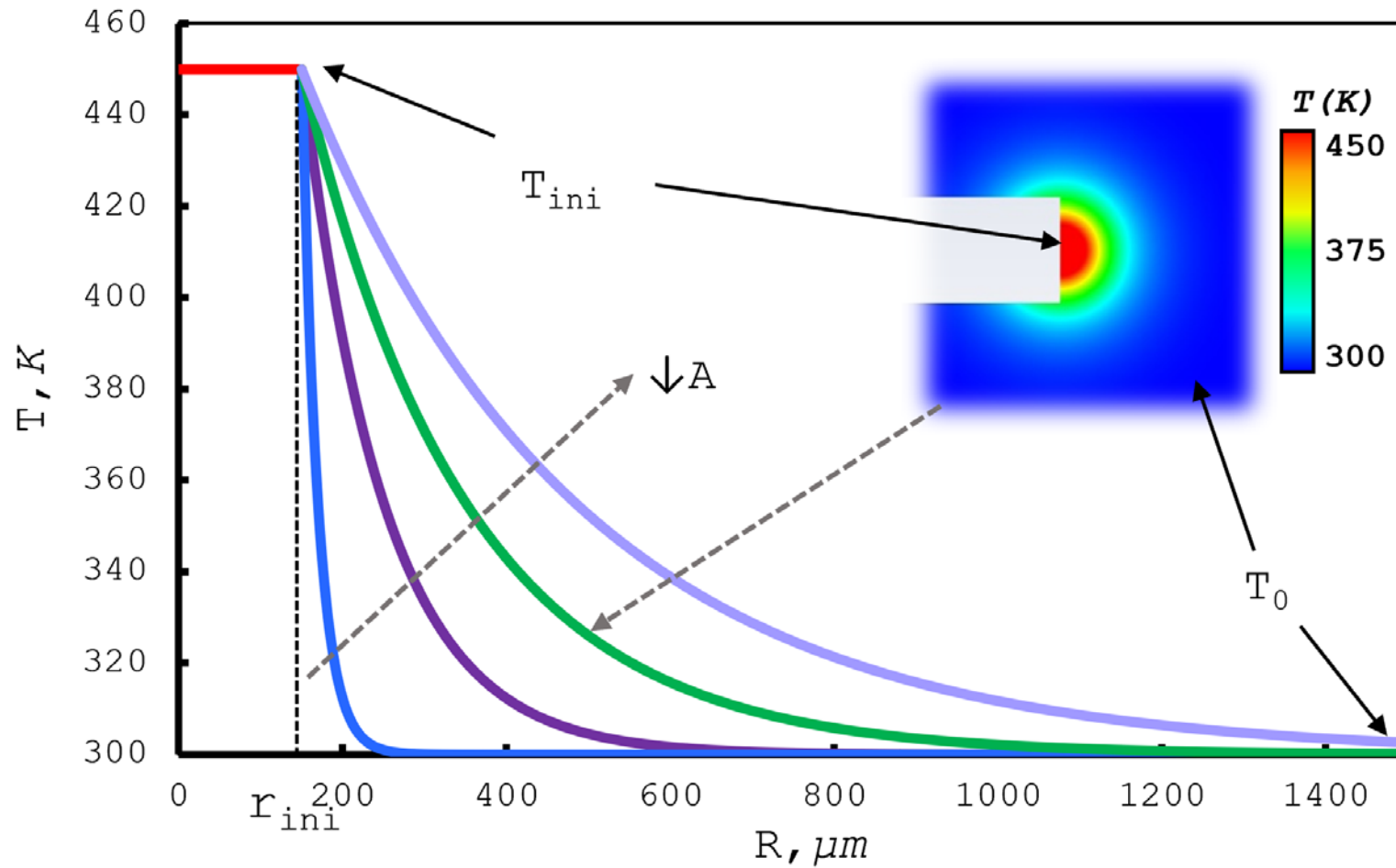
$$\dot{m}_{l,g} = \text{coeff} \cdot \left(\rho_{l,g} \alpha_{l,g} \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \right)$$



Fluent, Метод объема жидкости (VoF),
Model Lee

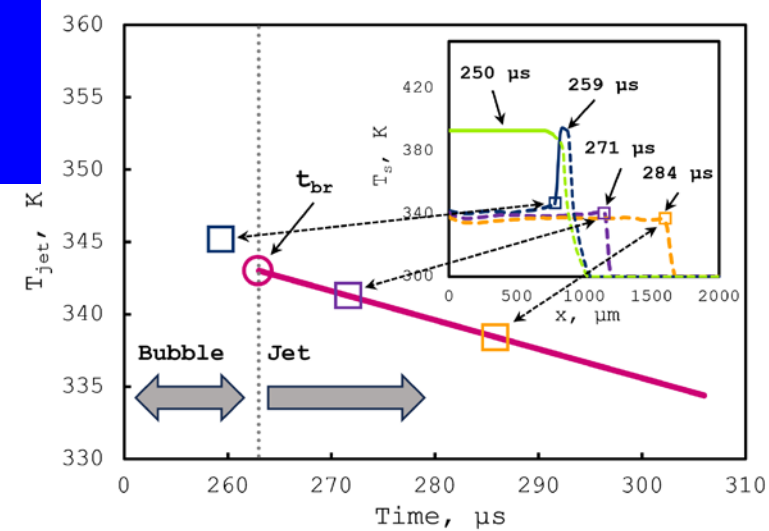
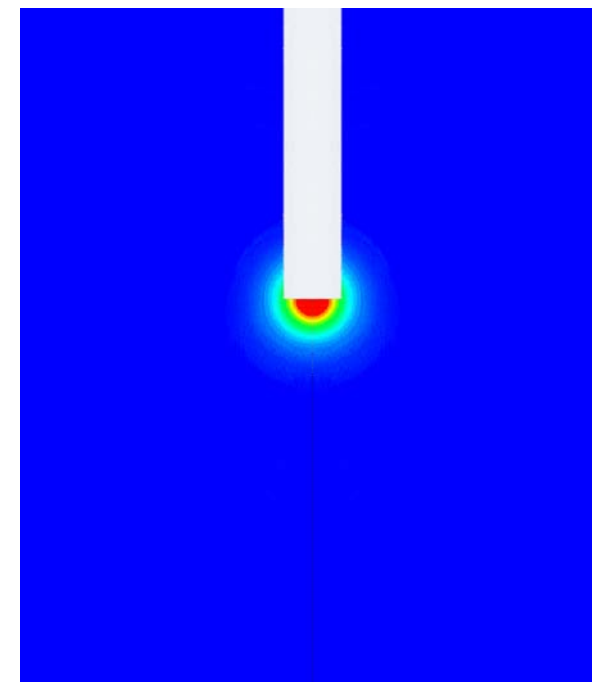
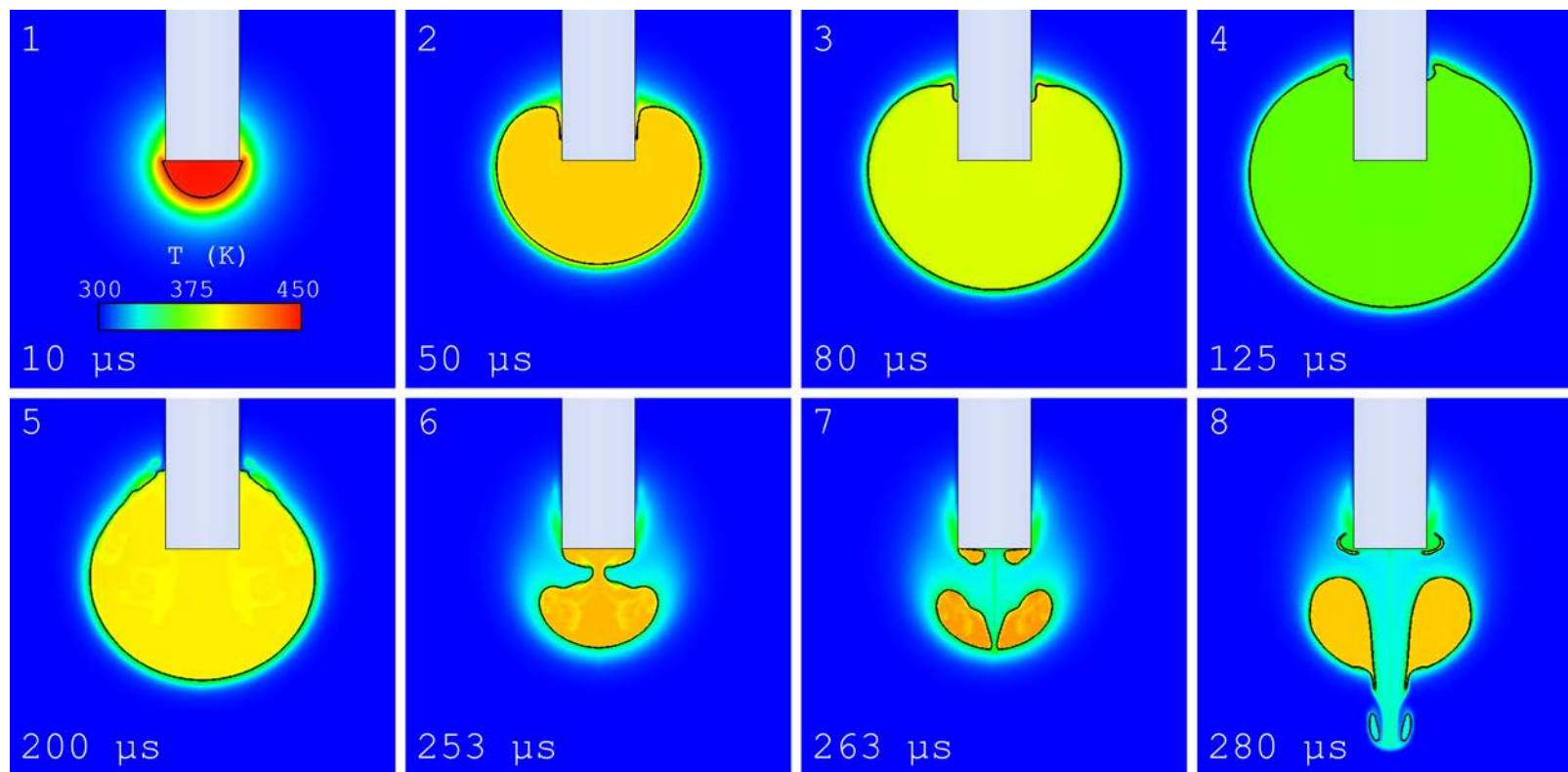
Квадратная сетка со стороной 3 мкм,
Адаптивный шаг по времени $\Delta t_{\min} = 1e-9$ с

Начальное распределение температуры

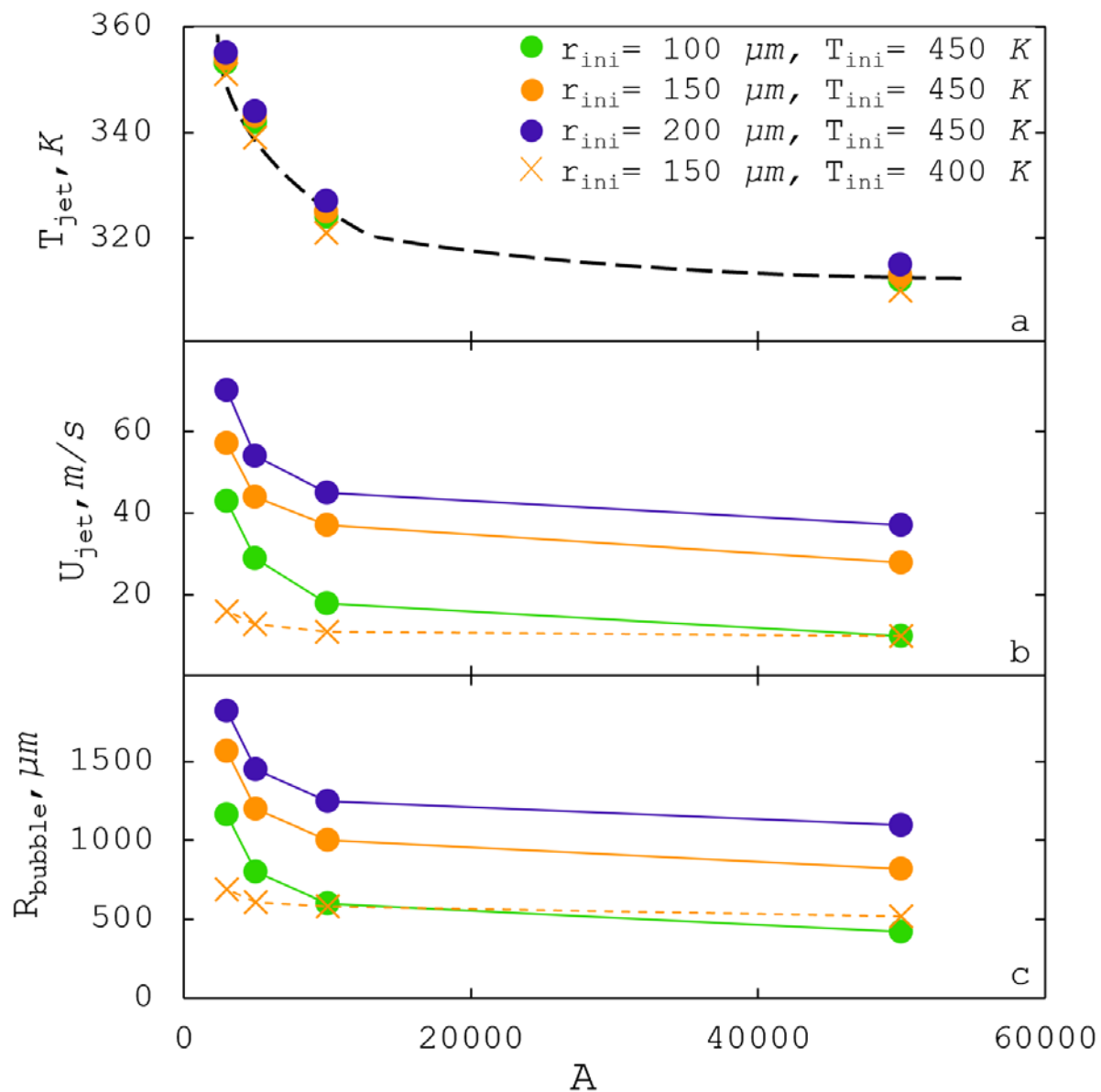


$$T = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot \exp(-A \cdot (r - r_{ini}))$$

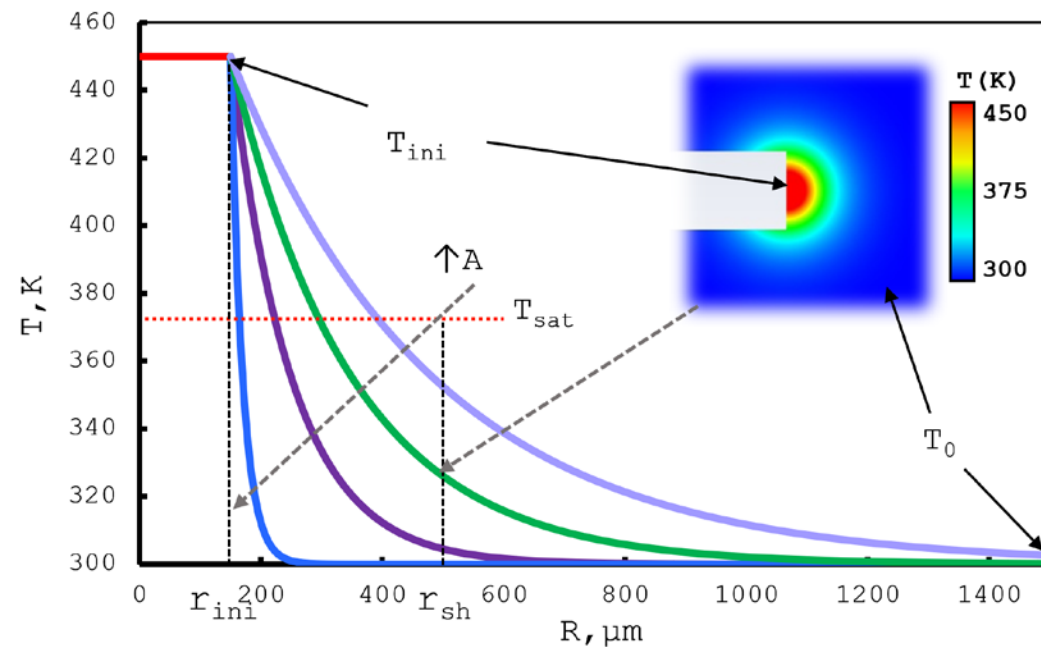
Механизм образования струи



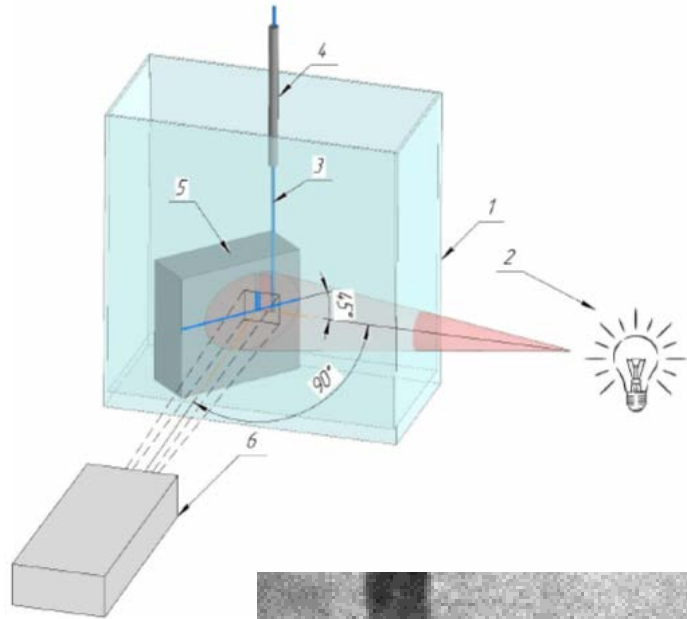
Параметрическое исследование



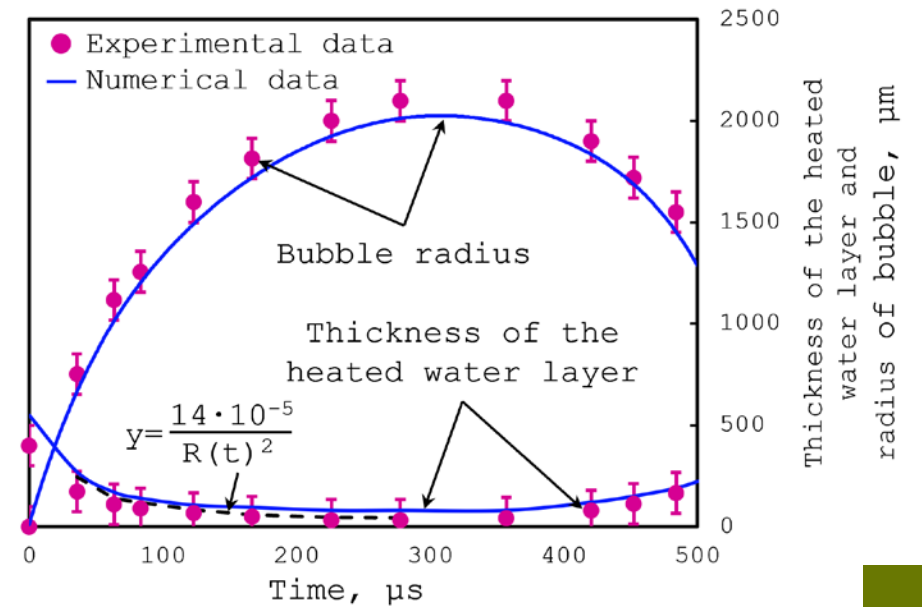
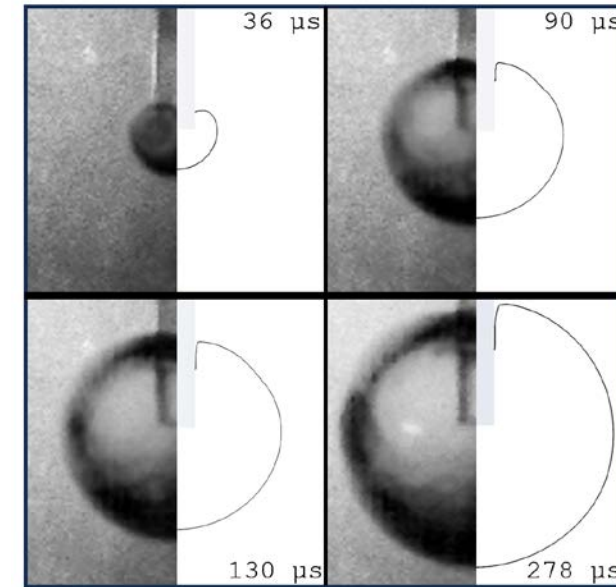
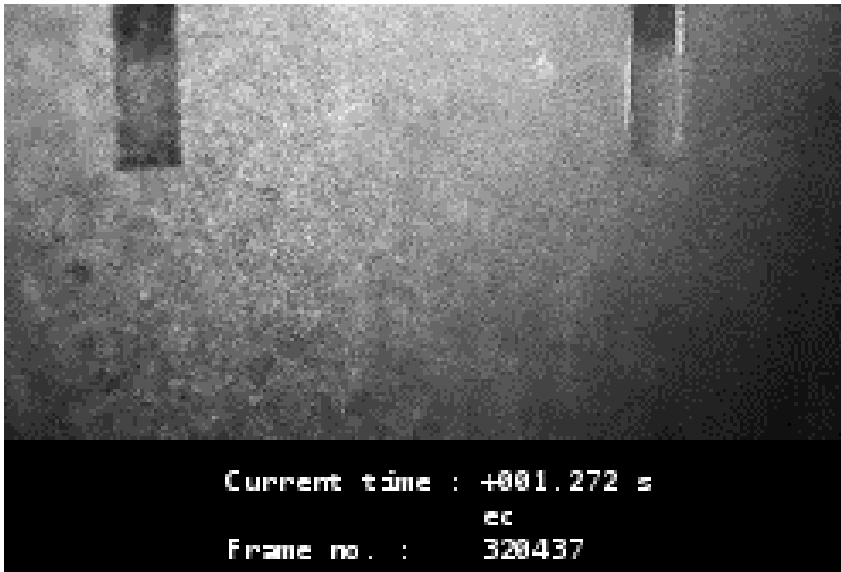
$$T = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot \exp(-A \cdot (r - r_{ini}))$$



Сравнение с экспериментом



- 1- Кварцевая кювета,
- 2- точечный источник света,
- 3- оптоволоконно,
- 4- направляющая оптоволоконна,
- 5- экран,
- 6- высокоскоростная камера Photron Fastcam SA-Z.



Основные результаты

- Вода с температурой насыщения и выше т.е. перегретое ядро и часть области с градиентом температуры влияет на рост пузырька и как следствие на скорость струи. При чем варьирование размера и температуры этой области существенно влияет на итоговый размер пузырька и интенсивность струи, в то время как температура струи не претерпевает значительных изменений.
- При образовании пузырька пара вокруг него формируется слой из нагретой, но не испарившейся воды, который при образовании струи смешивается с окружающей водой и определяет итоговую температуру струи.