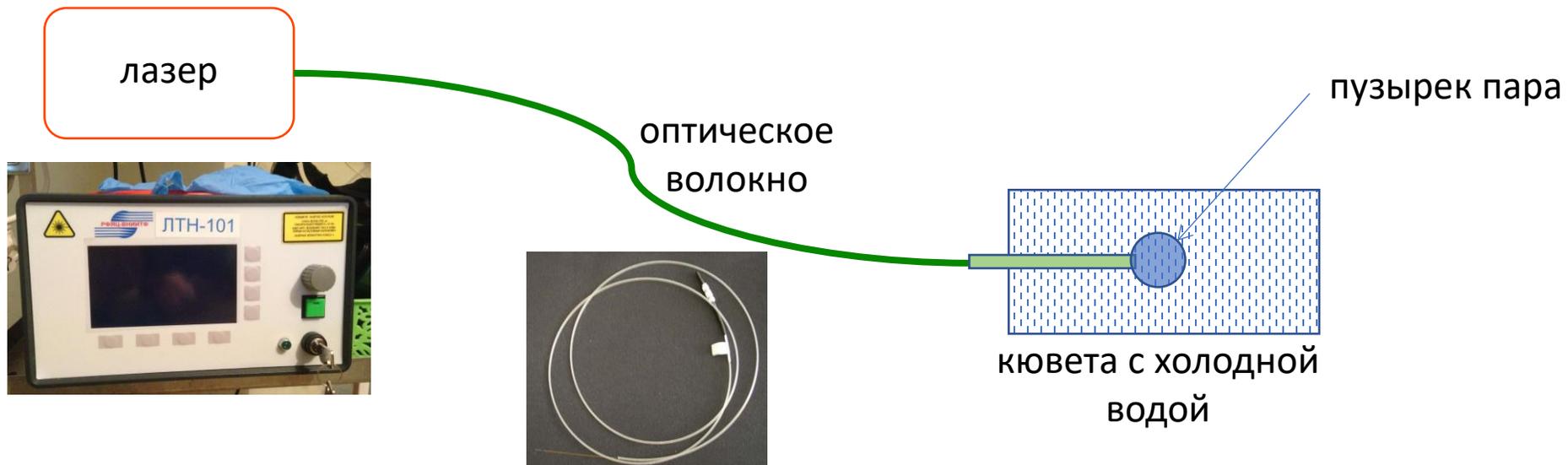


Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН

Использование математического моделирования
для выявления физических механизмов
кипения, вызванного лазерным излучением при
недогреве

Фурсенко Роман Викторович

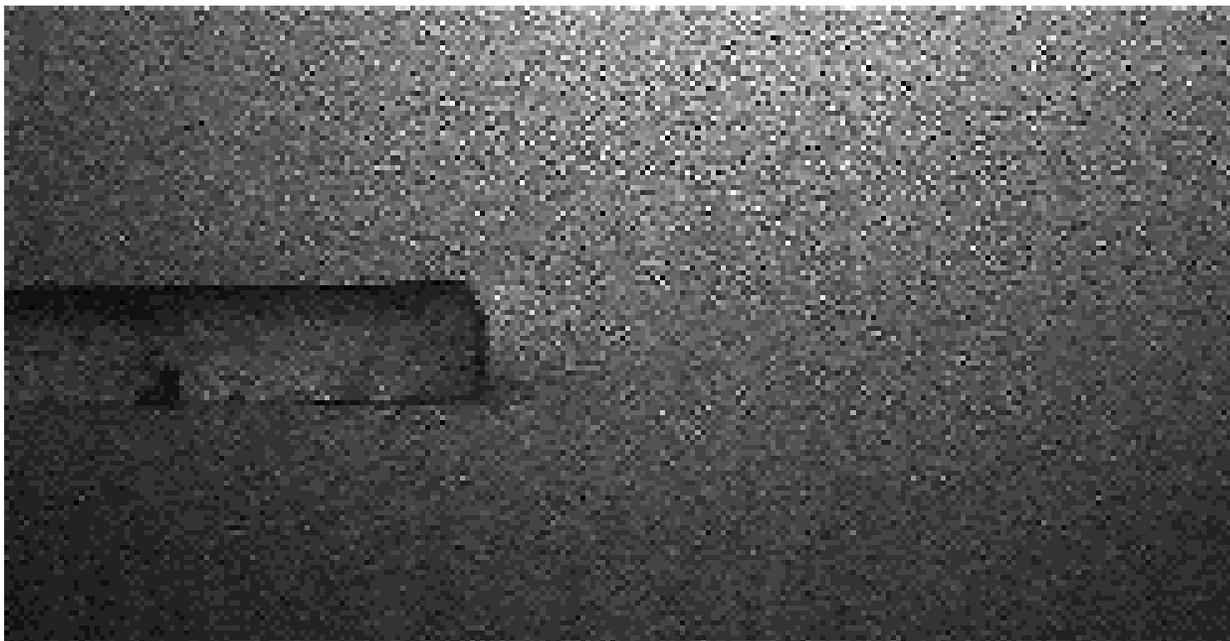
Физический процесс



Характерные значения:

Мощность лазера –	3, ..., 10
Вт	
Длина волны излучения –	0.97,
1.47 мкм	
Радиус волновода –	300 мкм
Размер пузырьков –	
300, ..., 2000 мкм	

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

Медицина (лечение кист, варикоза, иссечение тканей, лечение ран, ...)

Инженерия (очистка поверхностей, локальный нагрев, ...)

Приложения

Медицина (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

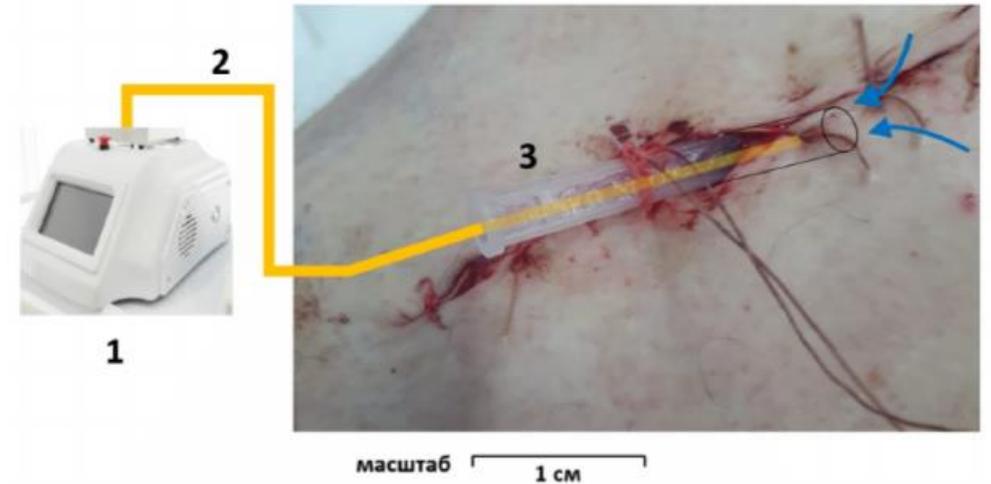


Схема очистки гнойной раны с использованием явления лазерной кавитации в трубке, размещённой в полость, заполненной физиологическим раствором. 1- медицинский лазер, 2- оптоволокно, 3- трубка с вставленным оптоволоконном.

История

О создании пузырька пара при нагревании жидкости лазером непрерывного действия впервые сообщили в 1987 году Растопов и Суходольский [1], которые назвали это термокавитацией.

Одними из первых о возможности использования лазерно-индуцированного кипения биологических жидкостей в медицинских технологиях сообщили В.М. Чудновский [2].

Высокую эффективность технологии недогретого кипения биологических жидкостей индуцированного коротковолновым инфракрасным излучением в лечении сосудистых аномалий показал И.А. Абушкин [3].

[1] Растопов С., Суходольский А., Докл. АН СССР, 1987. 295(5), 1108-1112.

[2] Chudnovskii V., et al, Quantum Electronics, 2017. 47(4), 361-370.

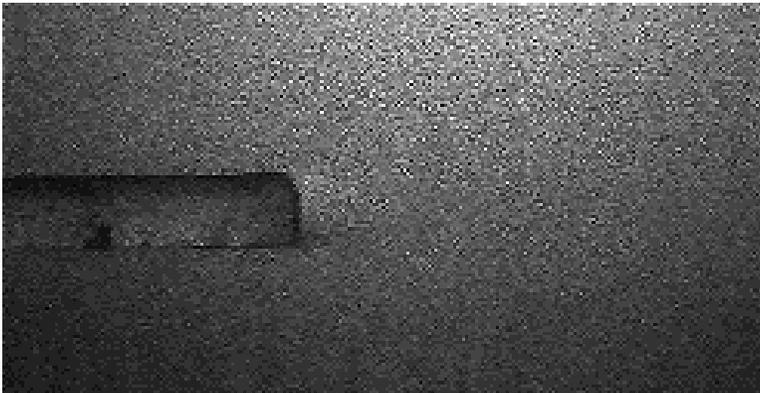
[3] Abushkin I., et al, Progress in Biomedical Optics and Imaging, 2019. С. 108761С.

Вопросы

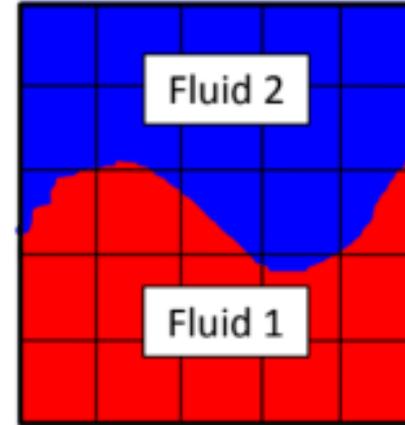
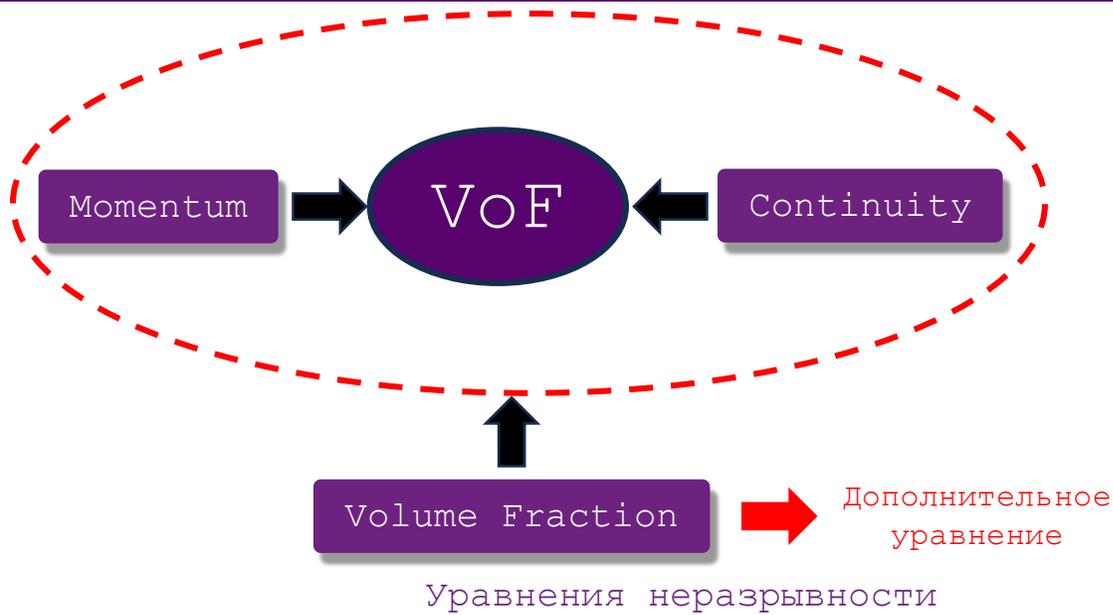
Механизмы образования струи?

Причины повышенной температуры струи?

Механизмы влияния стенок на характеристики струи?



Метод объема жидкости



0	0	0	0	0
0.05	0.1	0	0	0.05
0.8	0.97	0.45	0	0.6
1	1	0.99	0.9	1
1	1	1	1	1

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0,$$

Уравнение сохранения импульса

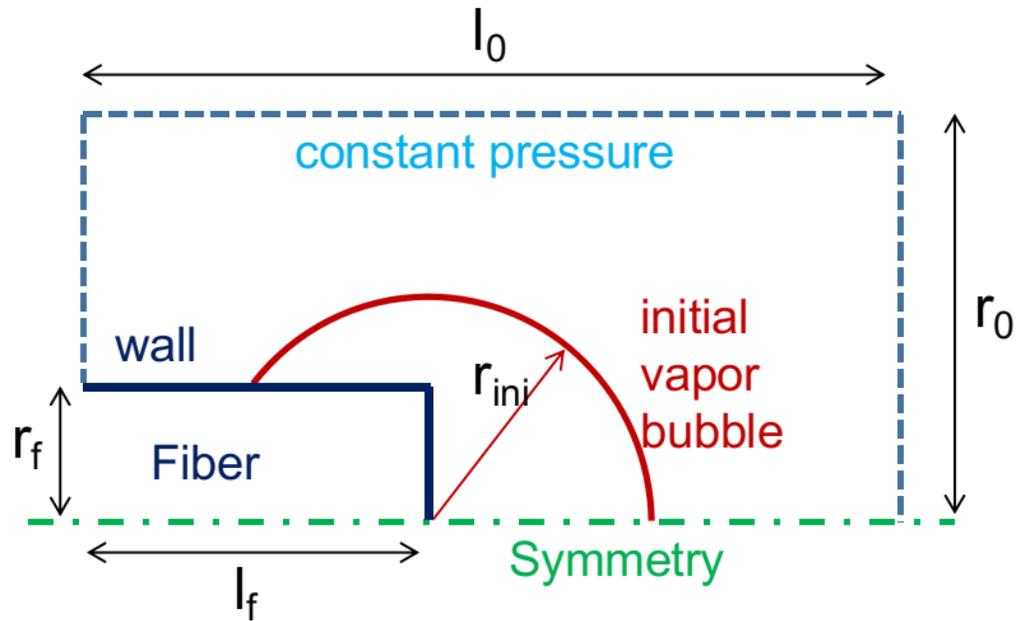
$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \vec{U}) I \right]$$

Уравнение для объемной доли

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

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

Механизмы формирования струи. Геометрические факторы



Предположения

- Мы предполагаем, что образование струи является результатом схлопывания газового пузырька
- Важную роль в этом процессе играет волокно
- Характер схлопывания пузырька не важен. Обычно мы предполагали конденсацию пара, но также проверялось всасывание газа
- Нас не интересует процесс образования газового пузырька

Цель — понять механику образования высокоскоростной струи воды после схлопывания пузырька вблизи микроволокна, погруженного в жидкость.

Методы

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

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho c_p T) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h$$

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

for gas $\rho_g = p_{ref}/RT$

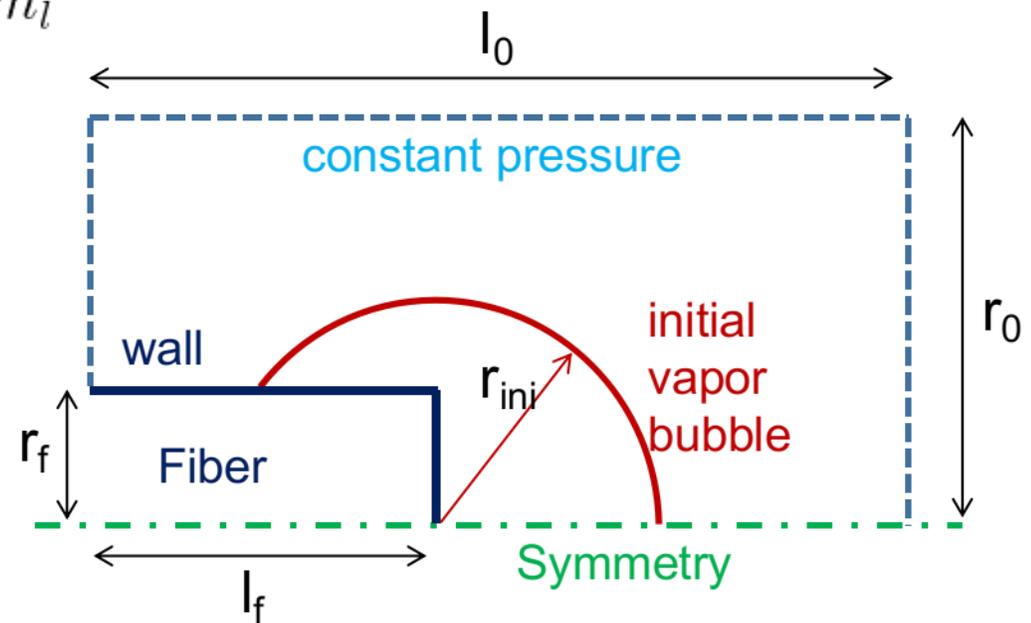
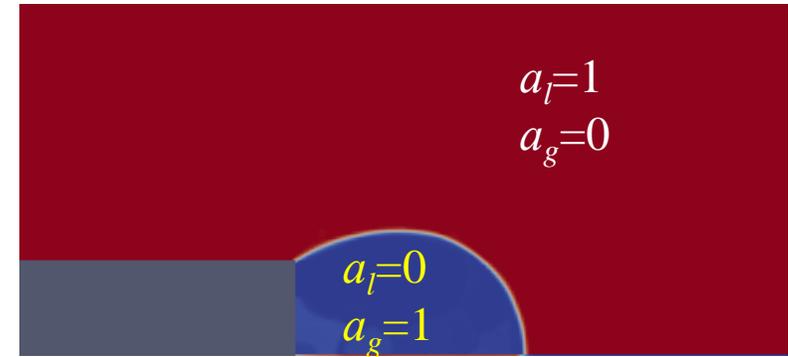
for liquid $\rho_l = const$

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l, \\ \mu &= \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l, \\ \lambda &= \alpha_g \lambda_g + \alpha_l \lambda_l, \\ c_p &= \alpha_g c_{p,g} + \alpha_l c_{p,l} \end{aligned}$$

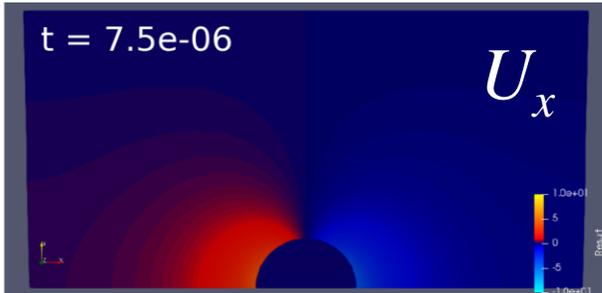
for $T < T_{sat}$:

$$\dot{m}_l = -\dot{m}_g = C \alpha_g \rho_g \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}}$$

$$S_h = -\dot{m}_g h_{lg}$$



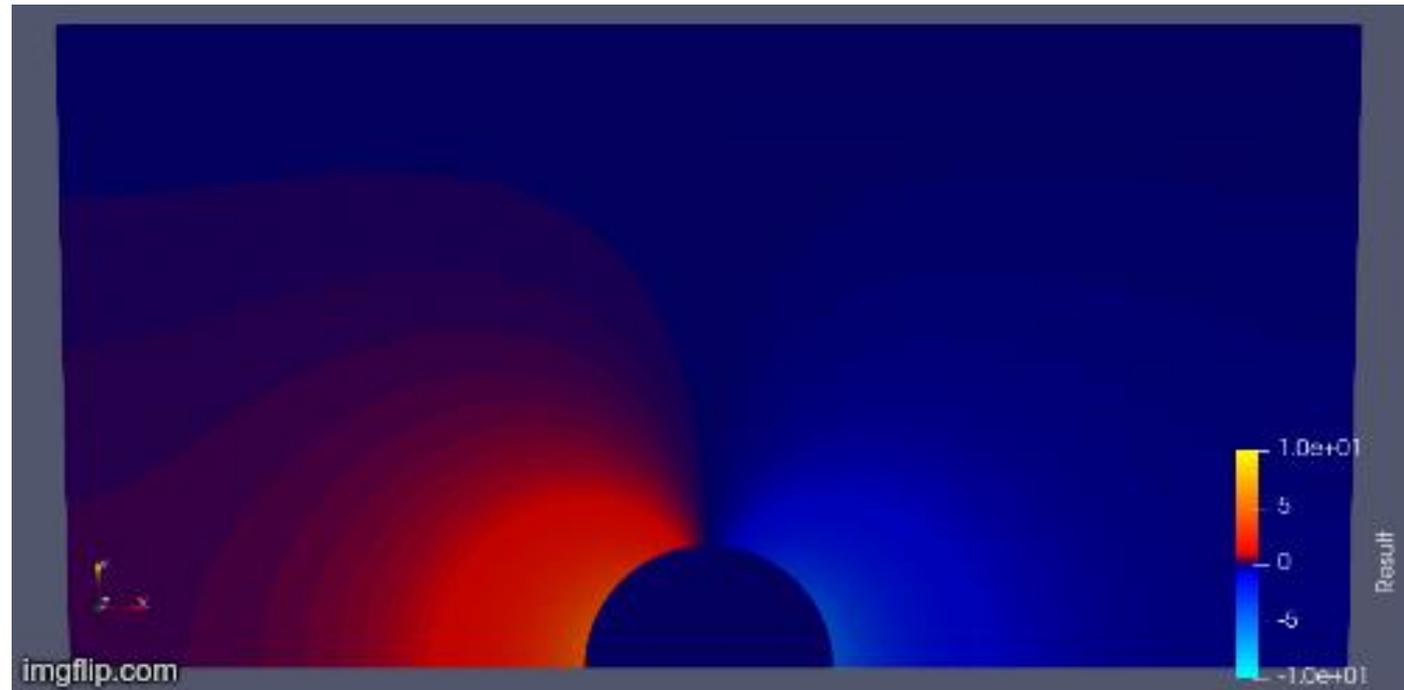
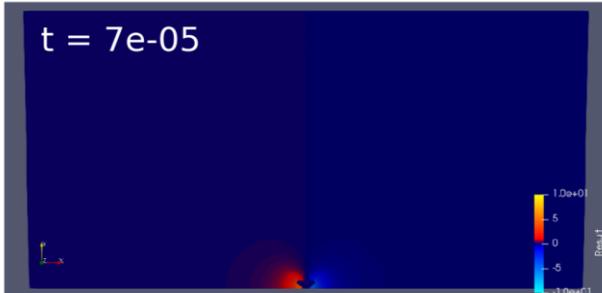
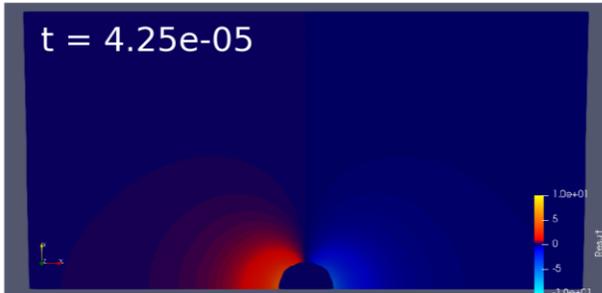
Схлопывание пузырька в свободном пространстве



x-component of
the velocity vector

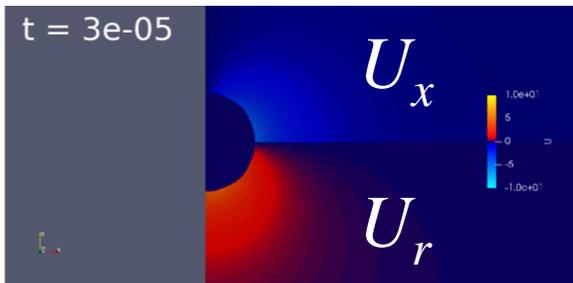
$$r_{ini}=0.4 \text{ mm}, T_{ini}=383 \text{ K}$$

- Процесс сферически симметричный
- Нет выделенного направления
- Струя не образуется



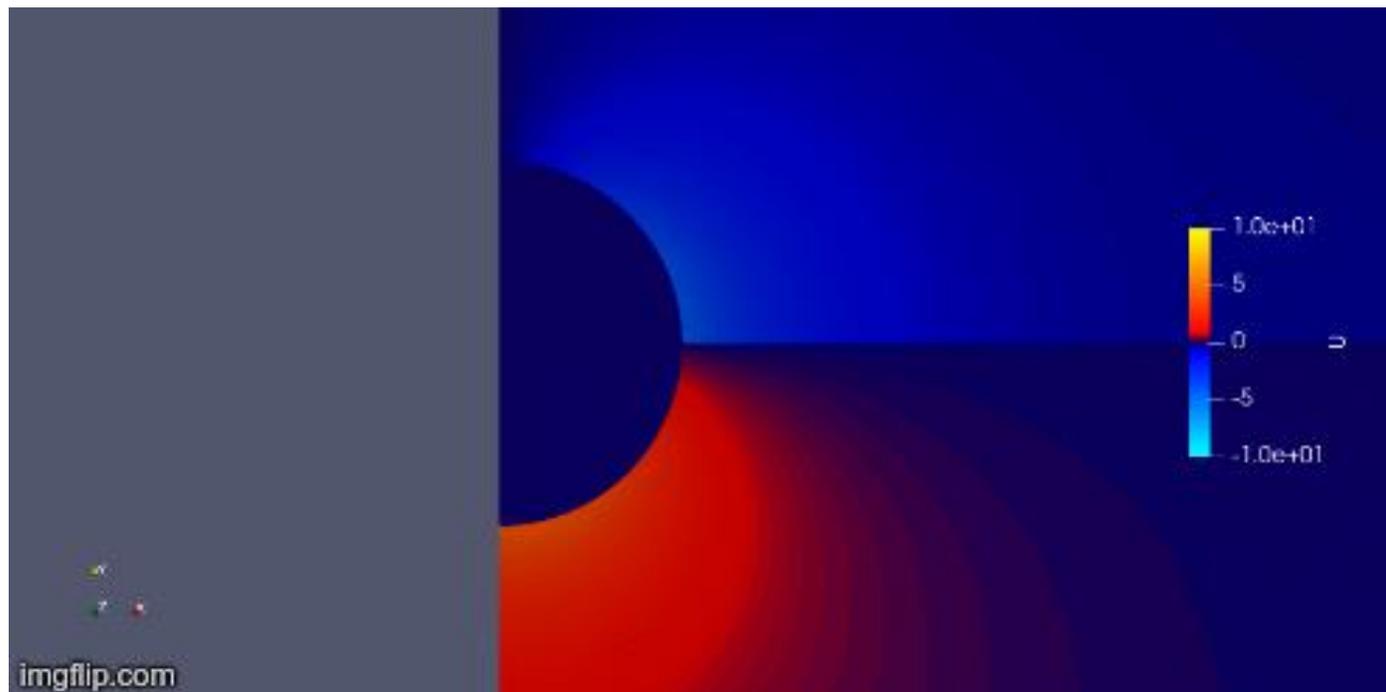
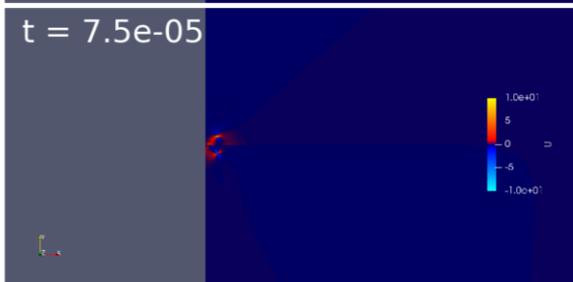
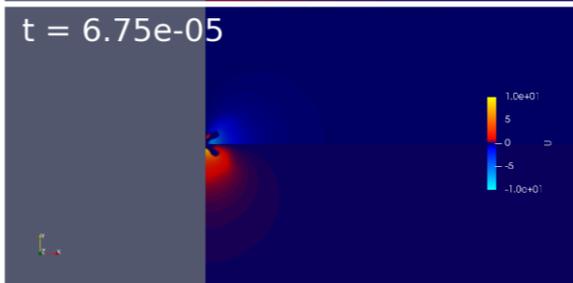
Схлопывание пузырька вблизи бесконечной стенки

Для сферически симметричного схлопывания этот случай должен совпадать со случаем «свободного пространства».



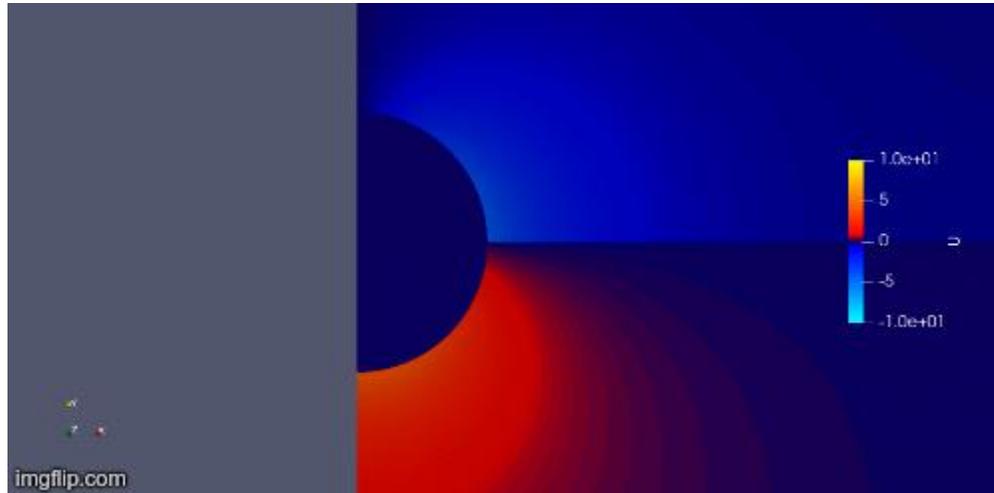
$r_{ini} = 0.4$ mm, $T_{ini} = 383$ K

- Процесс сферически симметричный
- Нет выделенного направления
- Струя не образуется



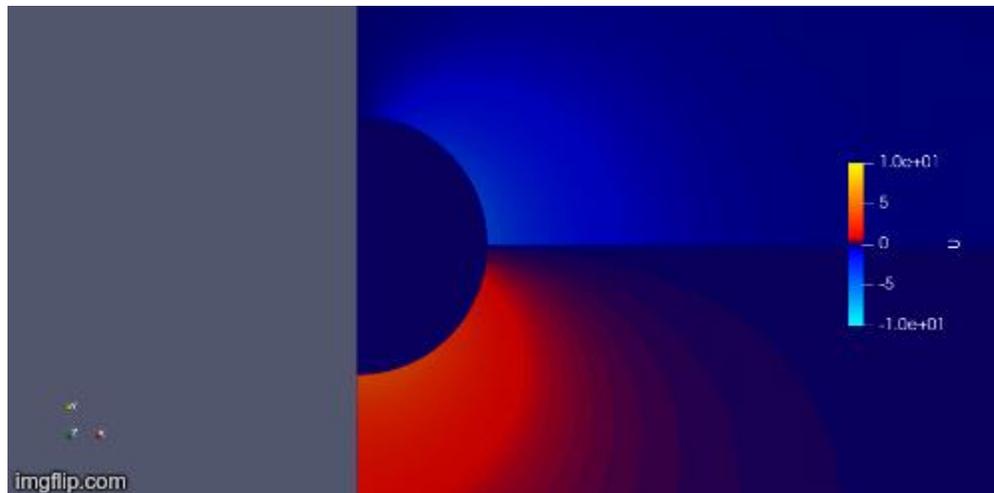
Волновод конечной толщины

infinite wall



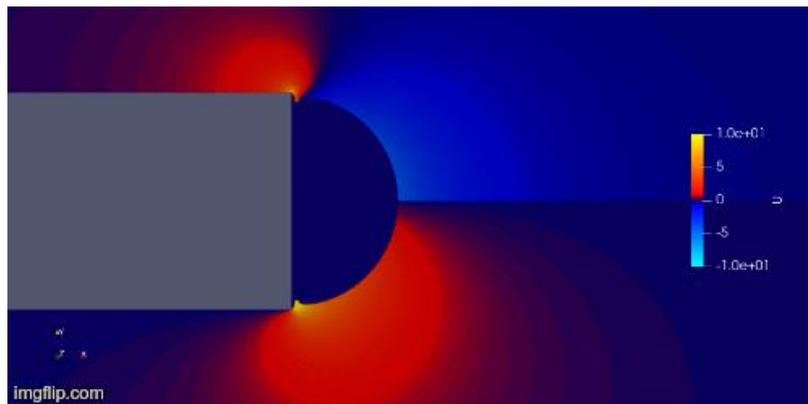
- Волокно конечной толщины вносит асимметрию
- Появляется преимущественное направление (осевое)
- Наблюдается образование высокоскоростной струи

$r_f = 0.8$ mm

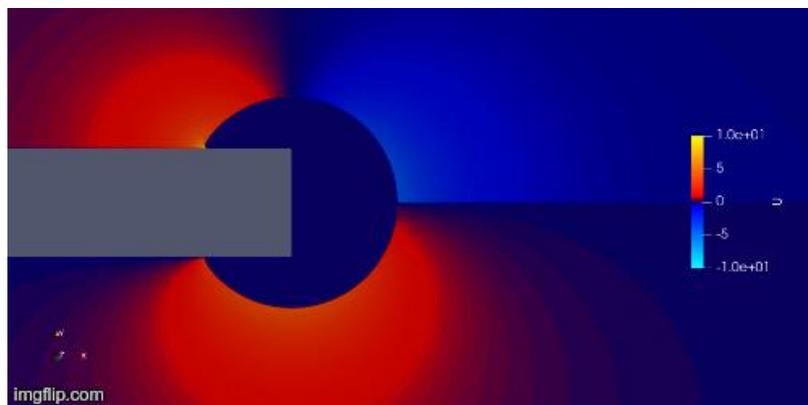


Влияние толщины волновода

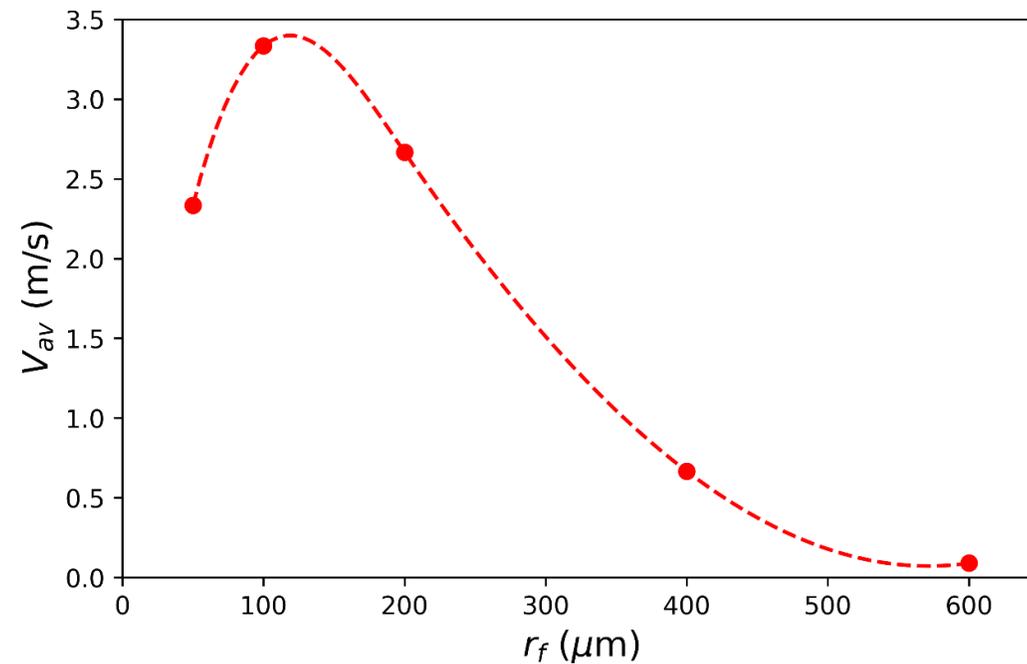
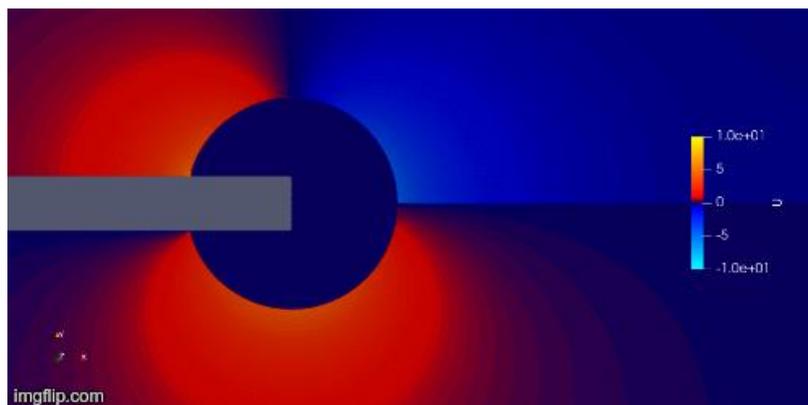
$r_f = 0.4 \text{ mm}$



$r_f = 0.2 \text{ mm}$

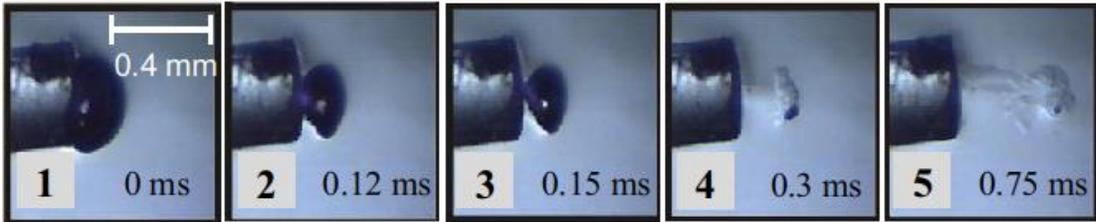


$r_f = 0.1 \text{ mm}$

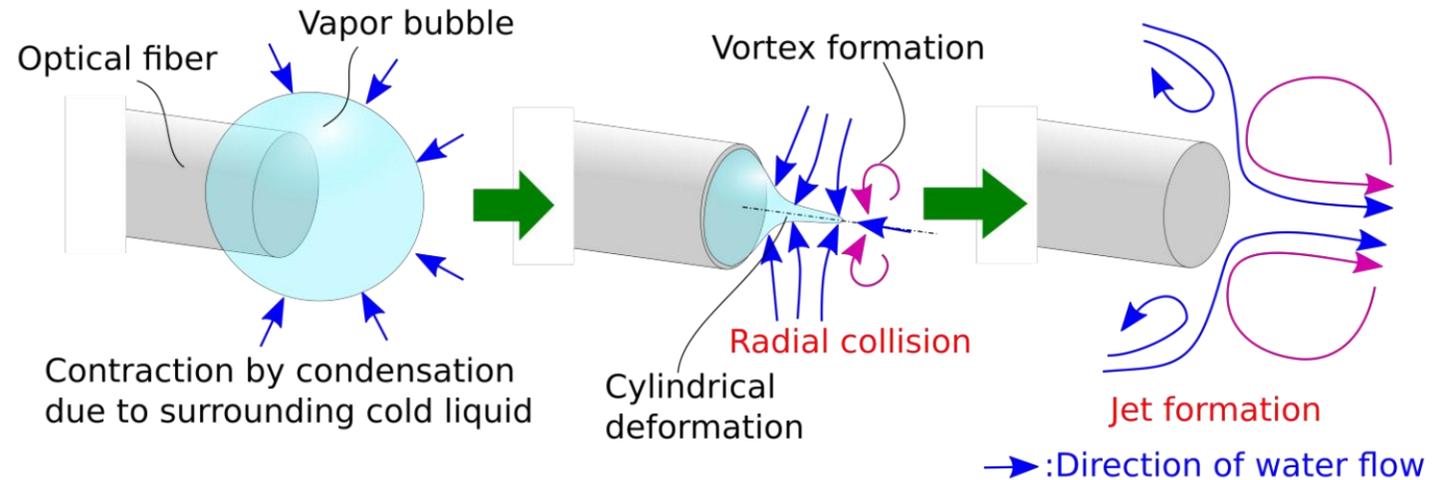
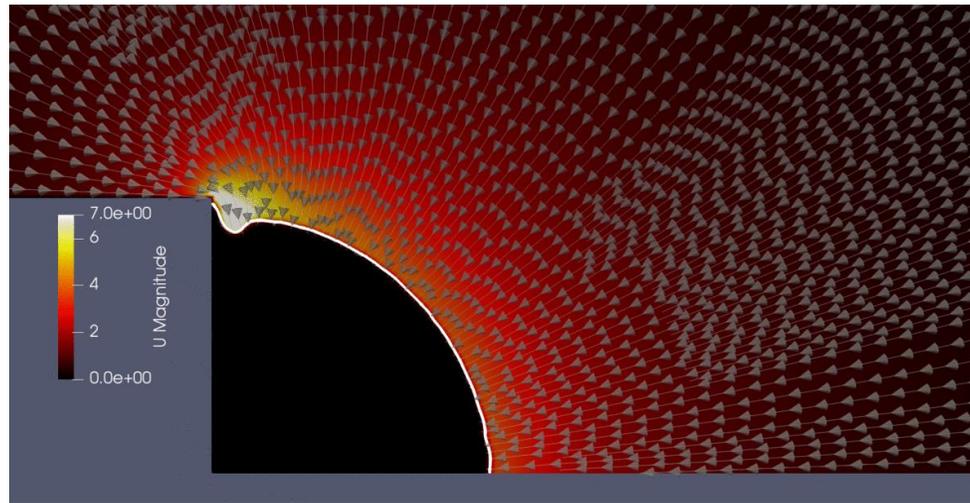


Зависимость средней скорости струи от радиуса волокна

Механизм формирования струи



photos by V.Chudnovskii



Выводы

- Сжатие пузырька вблизи волокна конечной толщины вызывает сферически асимметричный радиально сходящийся поток воды, коллапс которого приводит к образованию двух противоположно направленных кумулятивных струй
- Одна из этих струй рассеивается вблизи поверхности волокна, а другая распространяется от волокна в осевом направлении и порождает тороидальный вихрь
- Скорость струи зависит от радиуса волокна. Максимальная интенсивность струи достигается при определенном конечном значении толщины волокна, которое зависит от начального радиуса парового пузырька
- Описанный механизм, по-видимому, объясняет образование высокоскоростных струй жидкости, наблюдаемых в экспериментах с лазерно-индуцированным недогретым кипением

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

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

Уравнения состояния

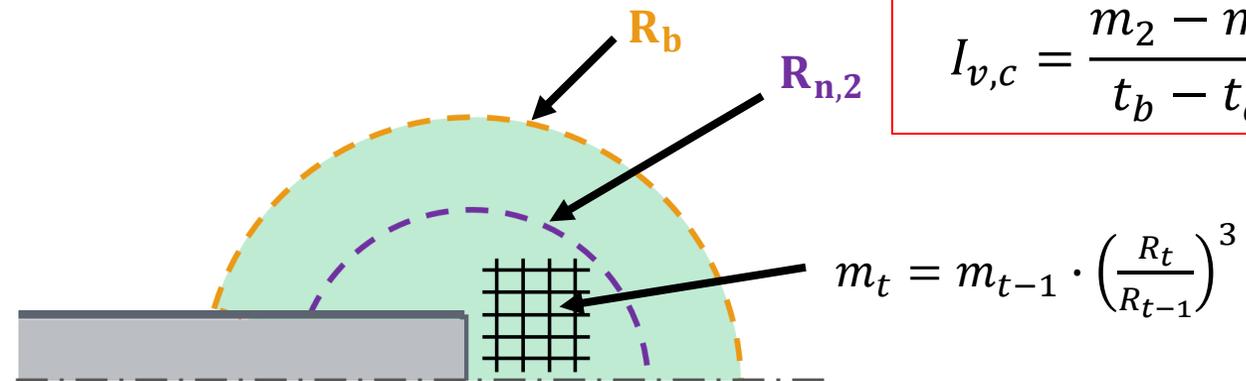
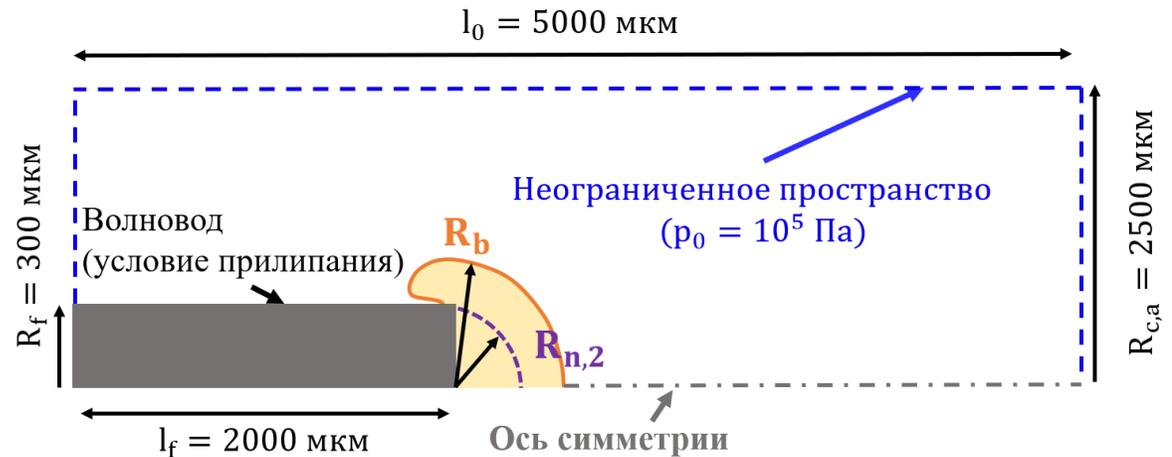
$$\rho_g = \rho_{g,0} \left(\frac{p_g}{p_{g,0}} \right)^{1/\gamma_g}, \quad \rho_l = const$$

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



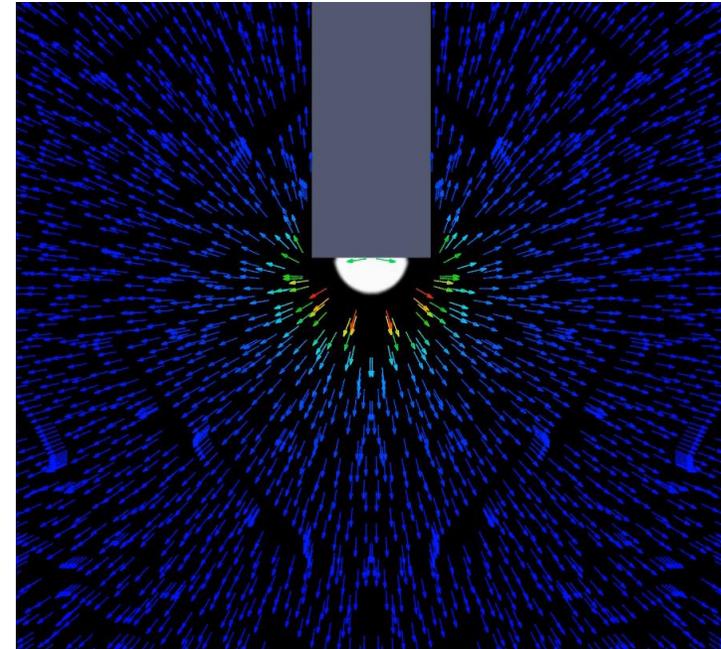
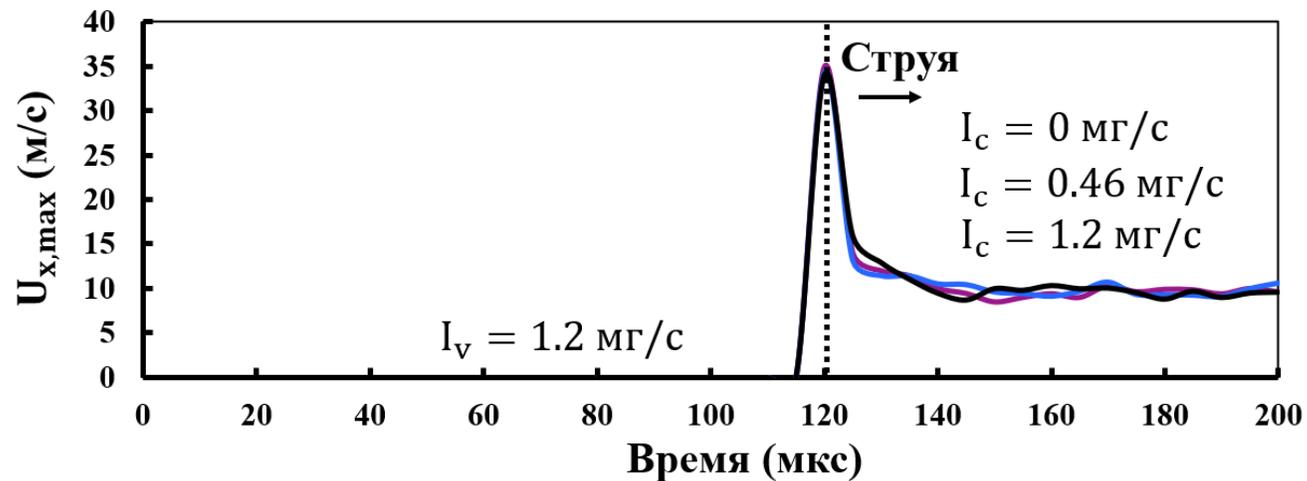
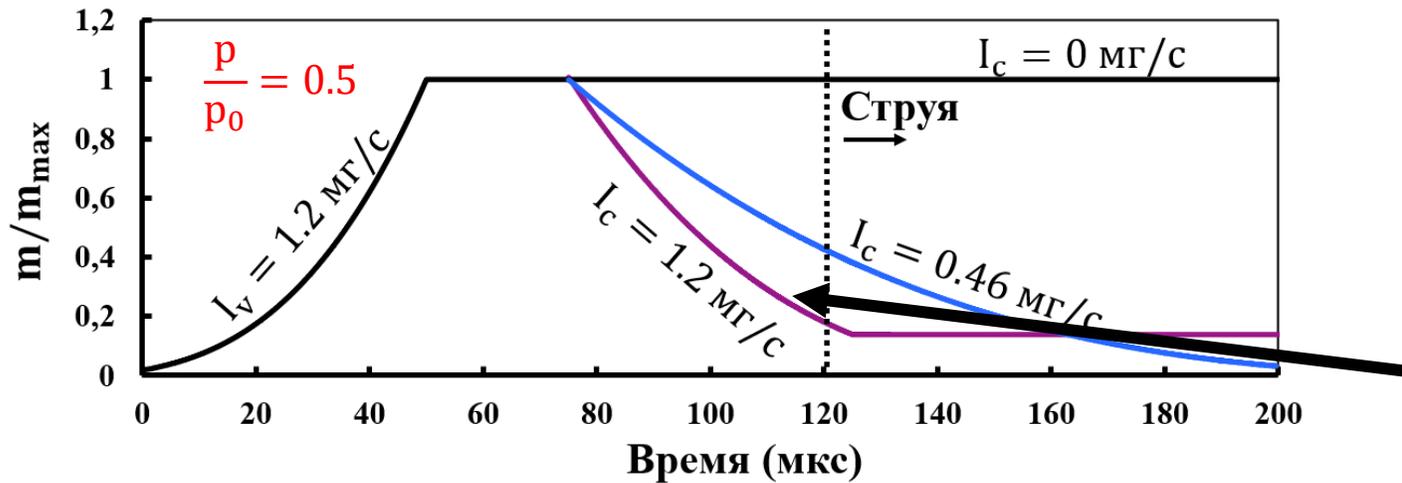
$$I_{v,c} = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a}$$

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)

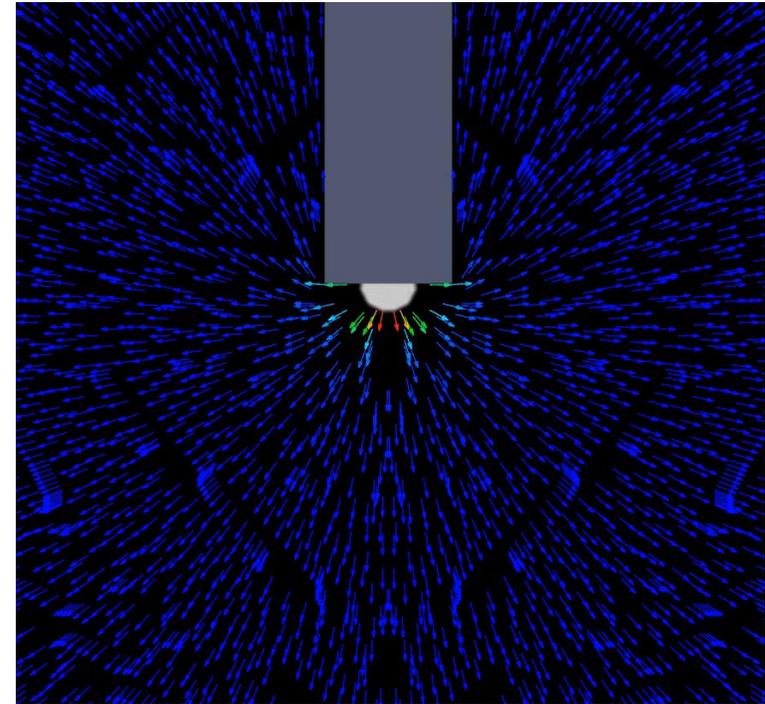
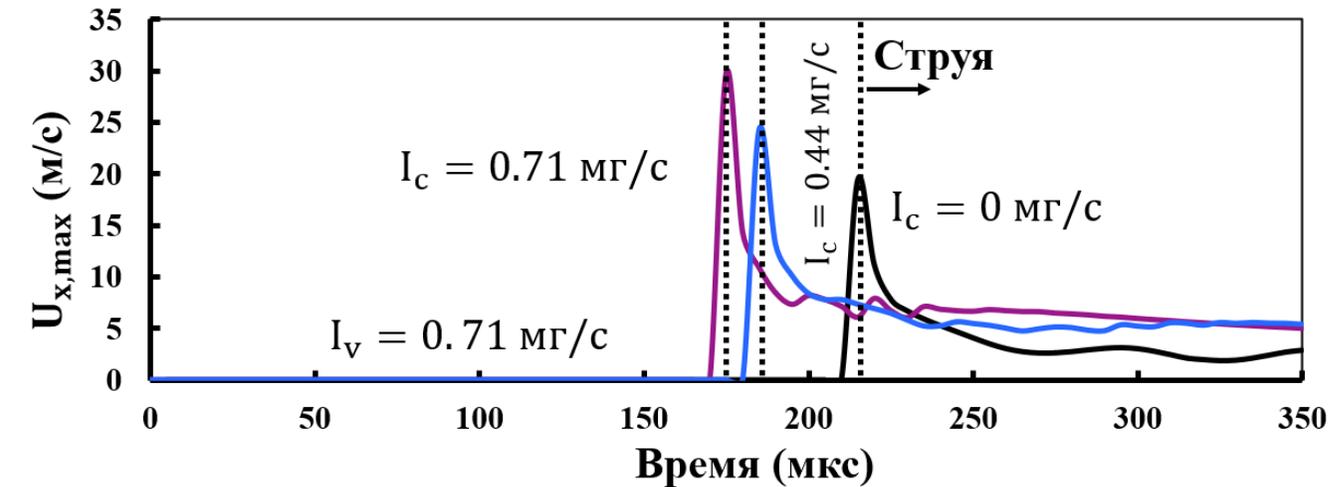
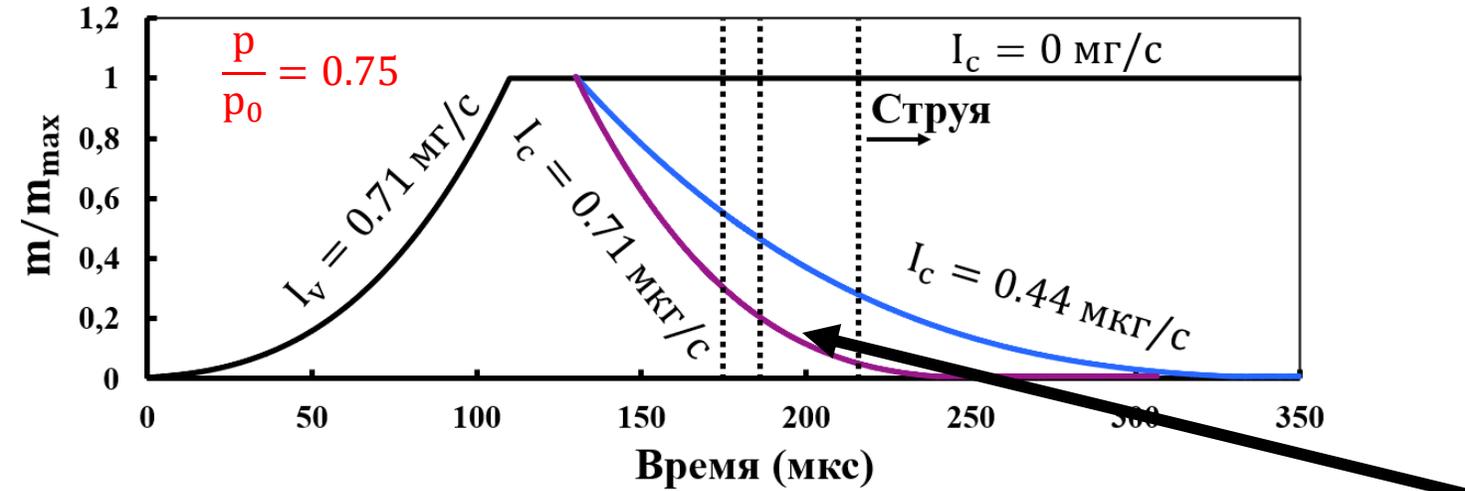
$$I_v = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a} = 1.2 \text{ мг/с}$$



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

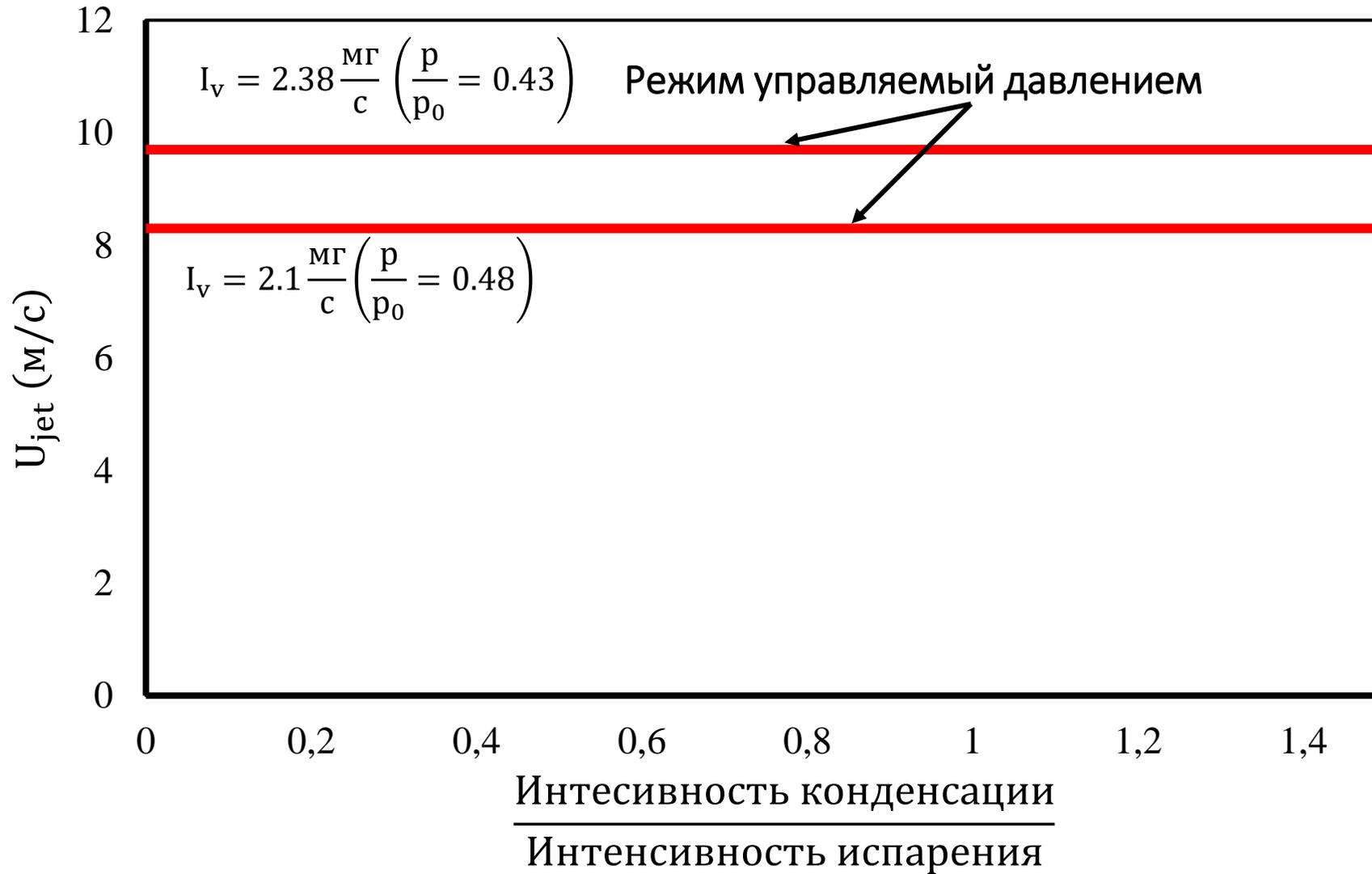
Интенсивность испарения (средняя)

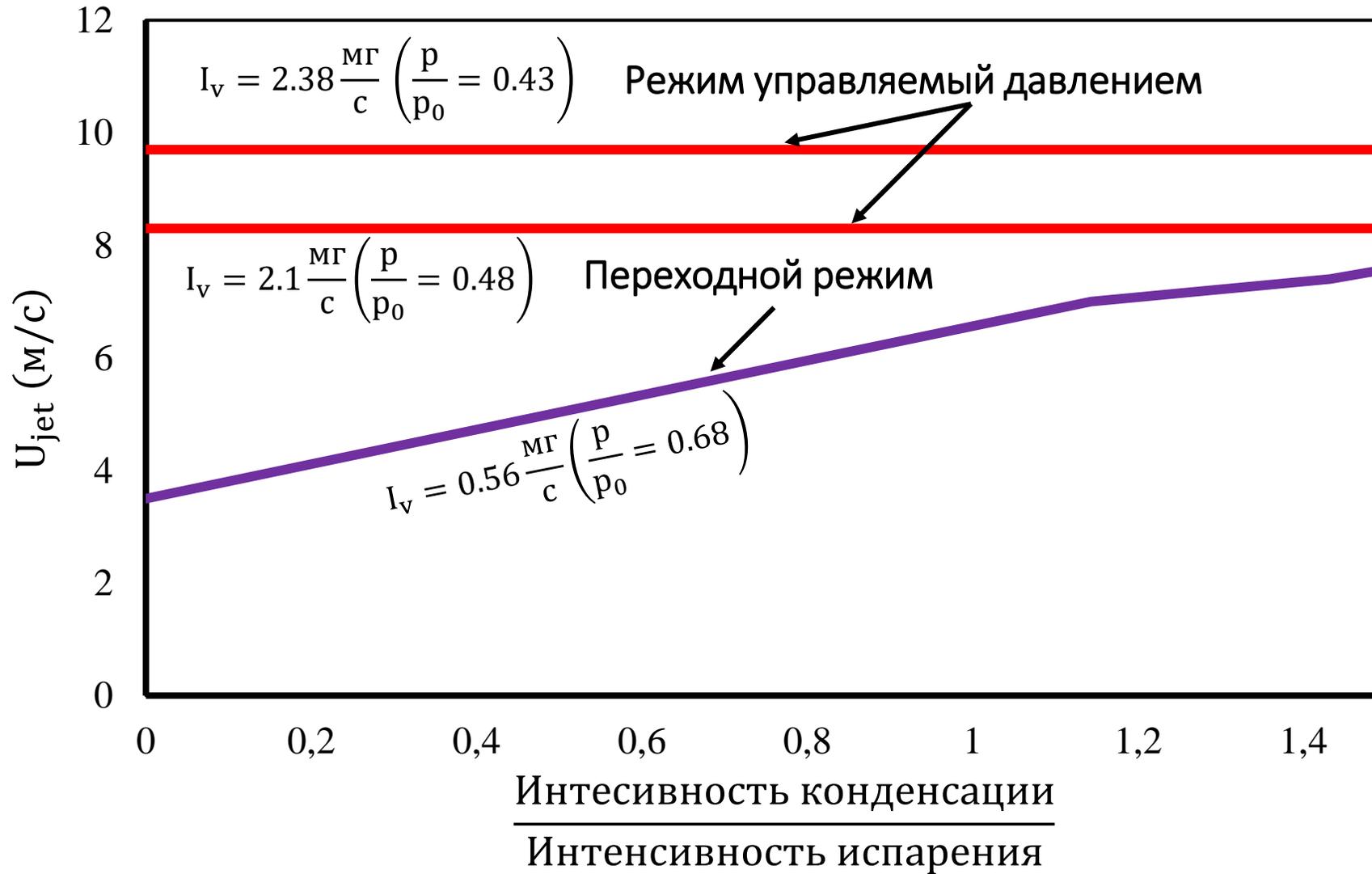
$$I_v = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a} = 0.71 \text{ мг/с}$$

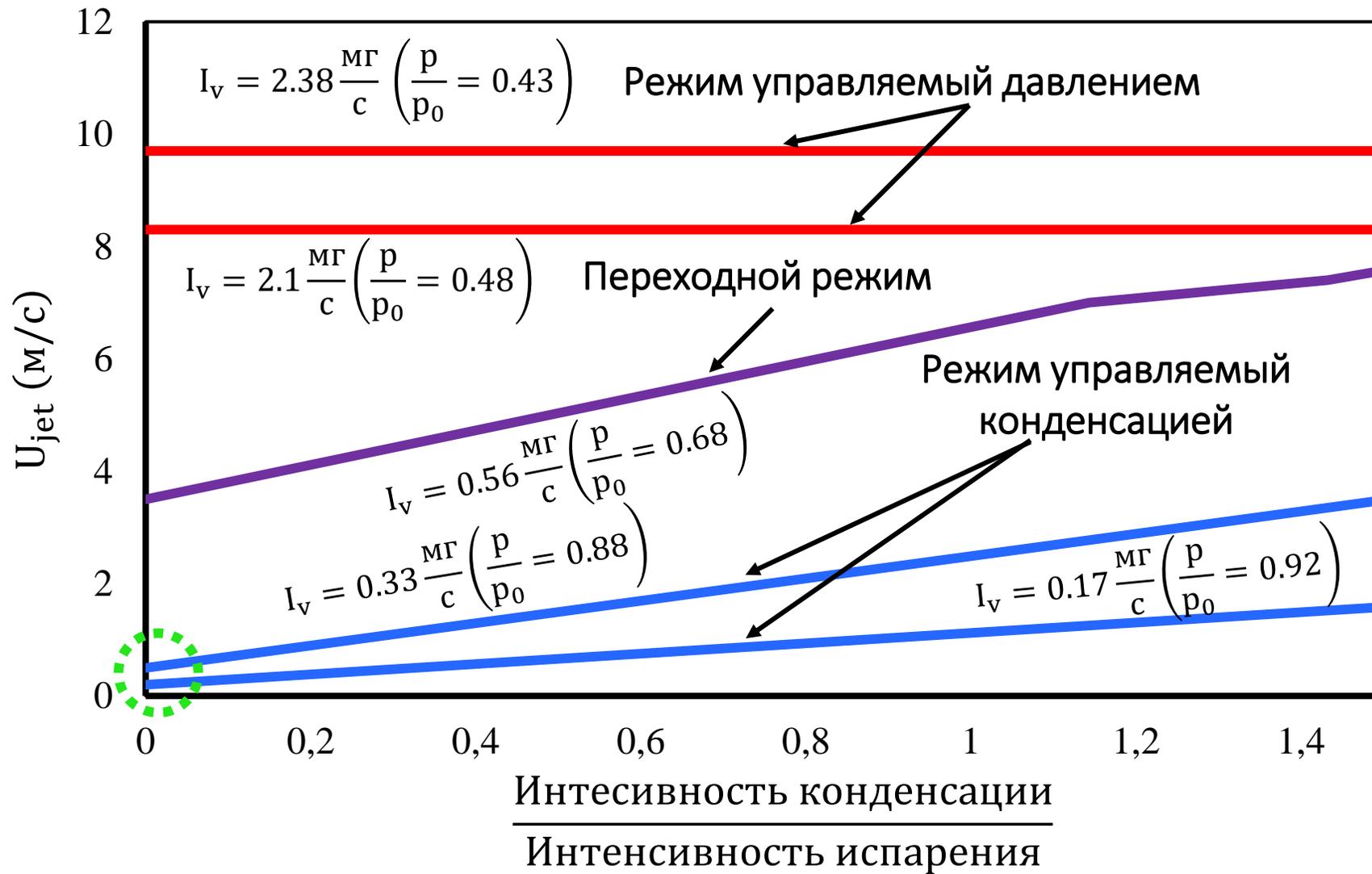


Конденсация увеличивает скорость струи, а также в некоторых случаях может уменьшать время за которое пузырь коллапсирует.

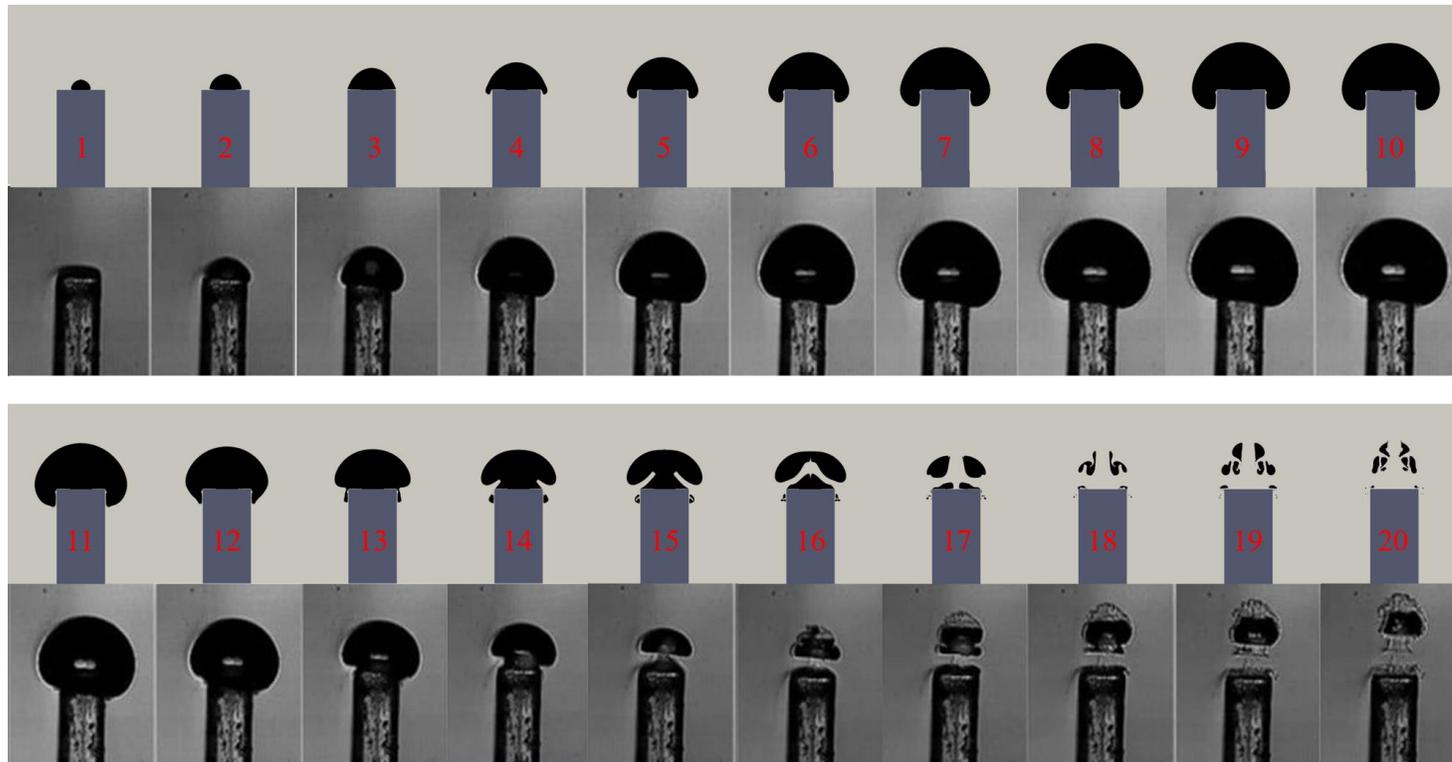






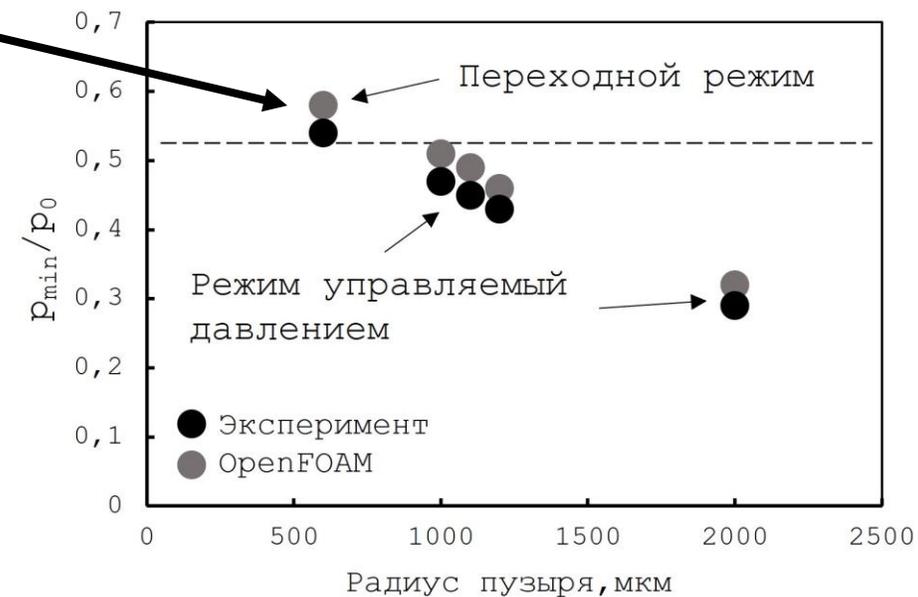


Сравнение с экспериментом



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

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.

Существует также пробел в знаниях о том, почему при недогретом кипении образующаяся струя обладает повышенной температурой.

- Chudnovskii V., et al, Sovr Tehn v med. 2016. 8(2): 6-13.
- Chudnovskii V., et al, Acoust Soc Am. 2023. Mar;153(3):1525.

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

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

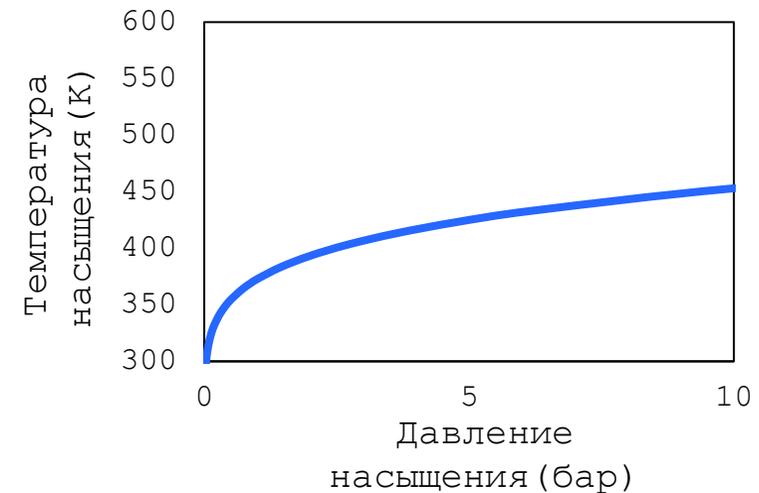
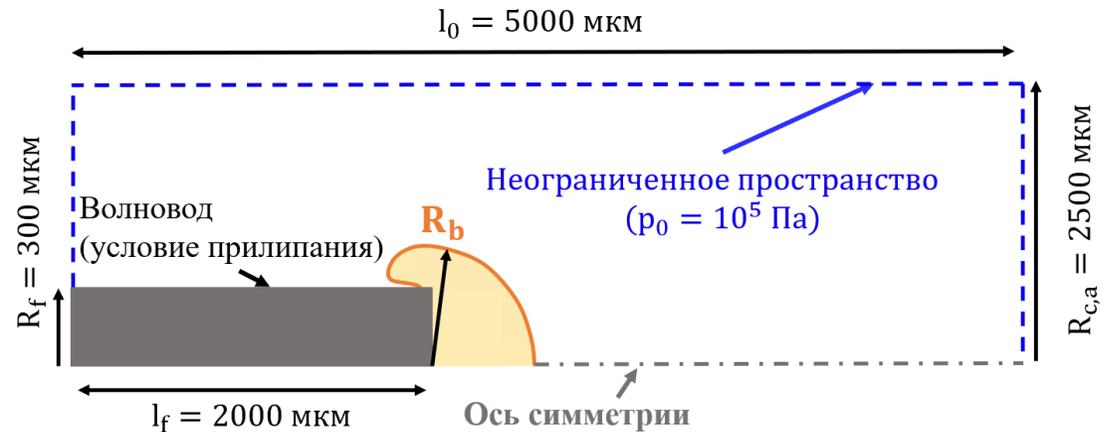
Уравнения состояния

$$\rho_g = p/RT, \quad \rho_l = const$$

Модель испарения/конденсации (Lee)

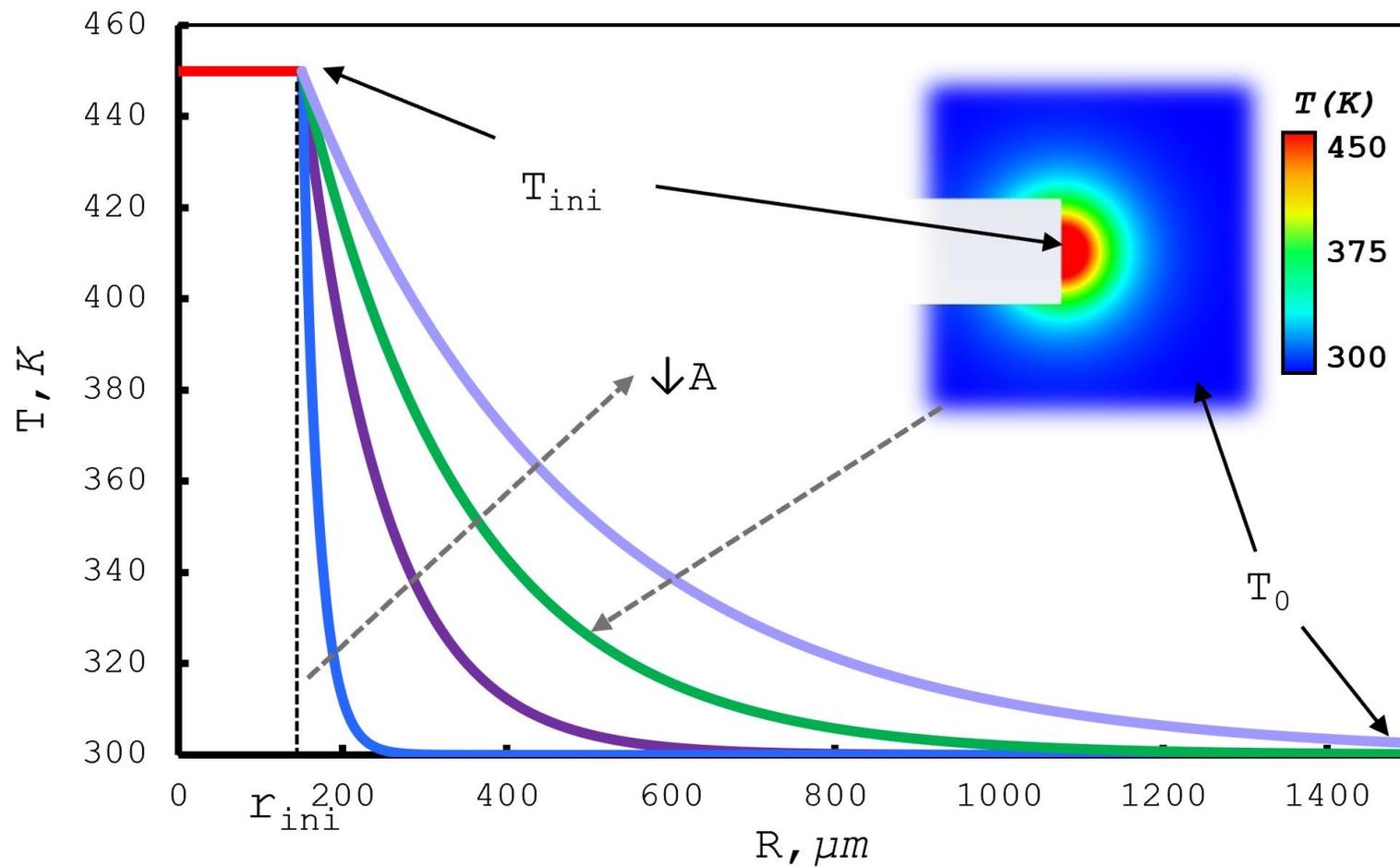
$$\dot{m}_{l,g} = coeff \cdot \left(\rho_{l,g} \alpha_{l,g} \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \right)$$

Fluent, Метод объема жидкости (VoF),
Model Lee



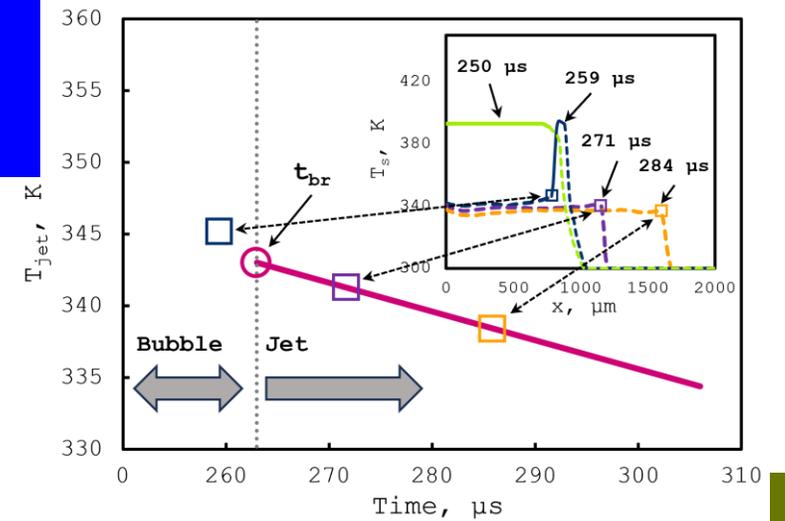
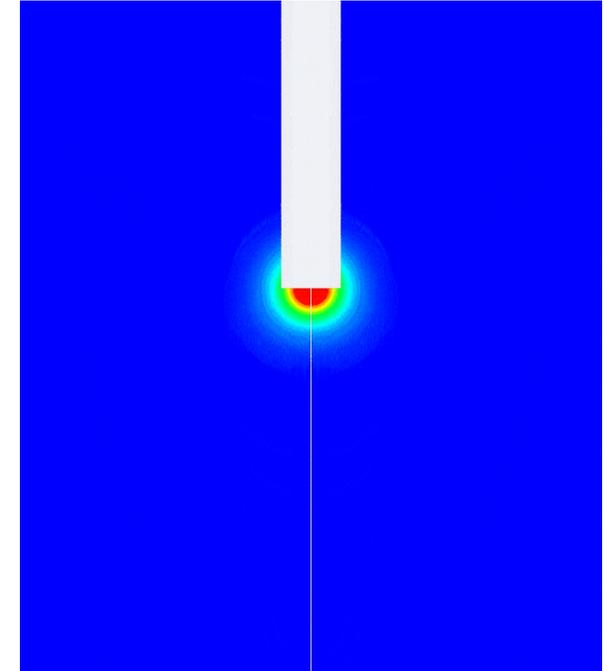
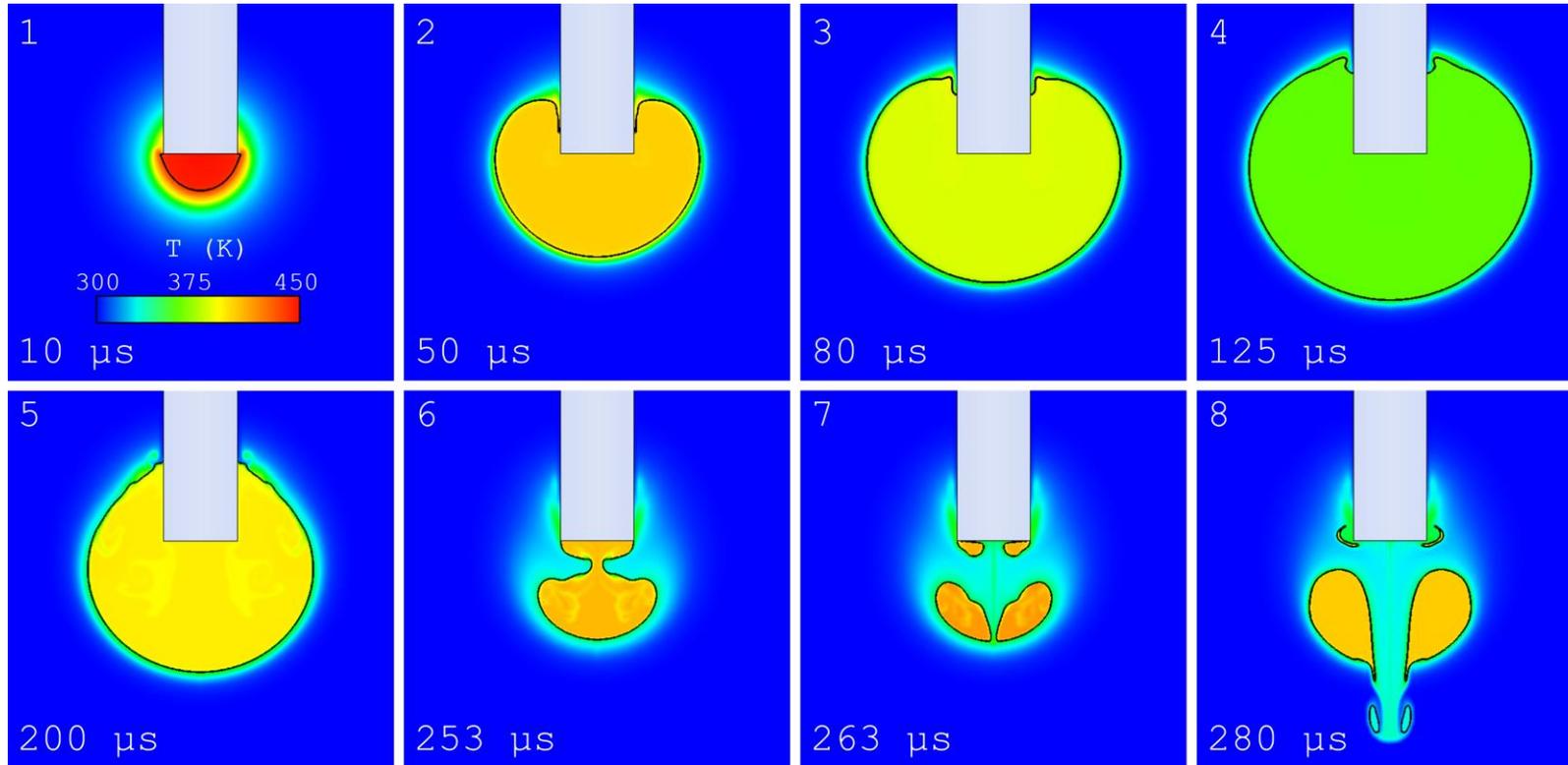
Квадратная сетка со стороной 3 мкм,
Адаптивный шаг по времени $\Delta t_{min} = 1e-9$ с

Начальное распределение температуры

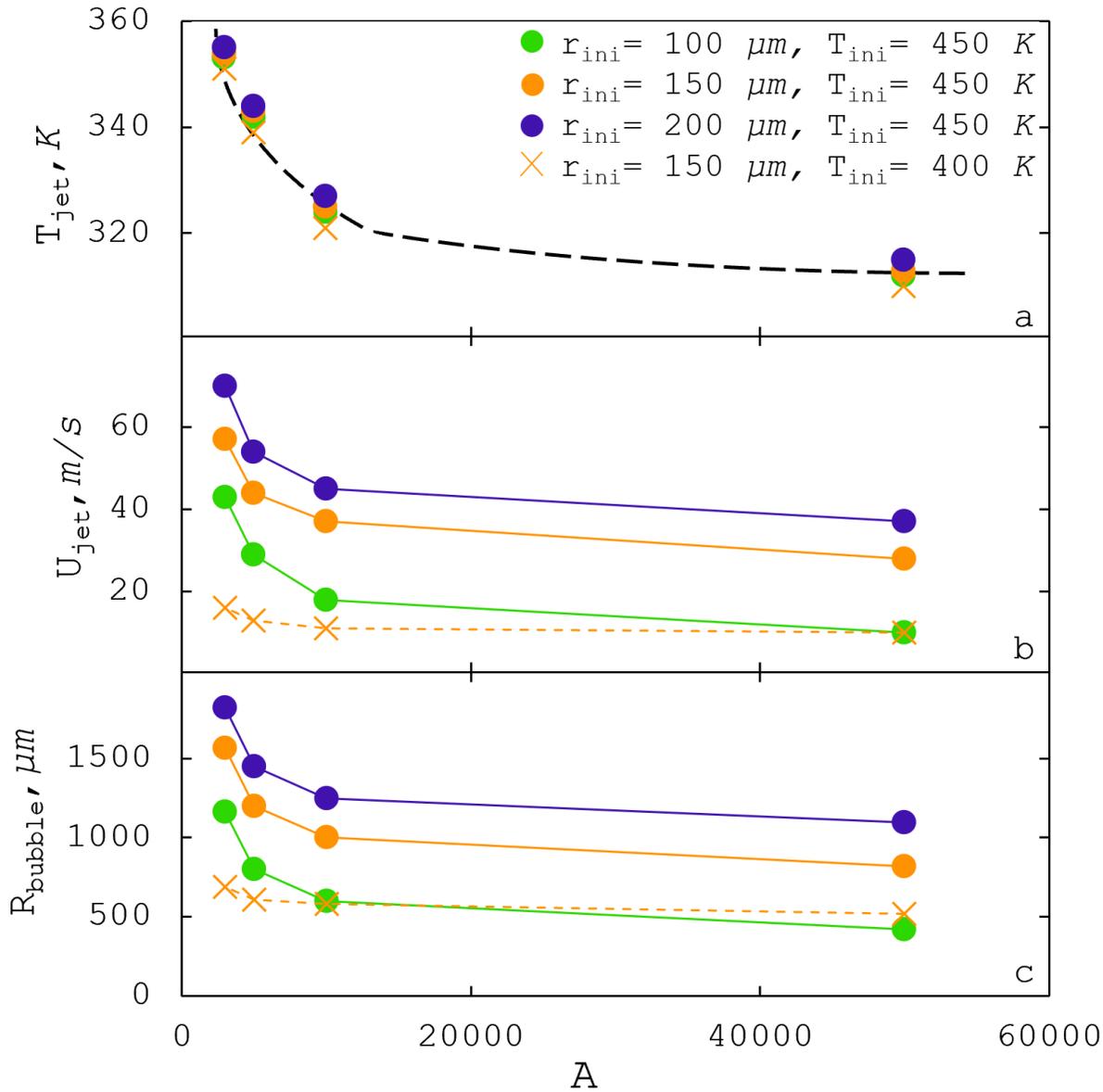


$$T = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot \exp(-A \cdot (r - r_{ini}))$$

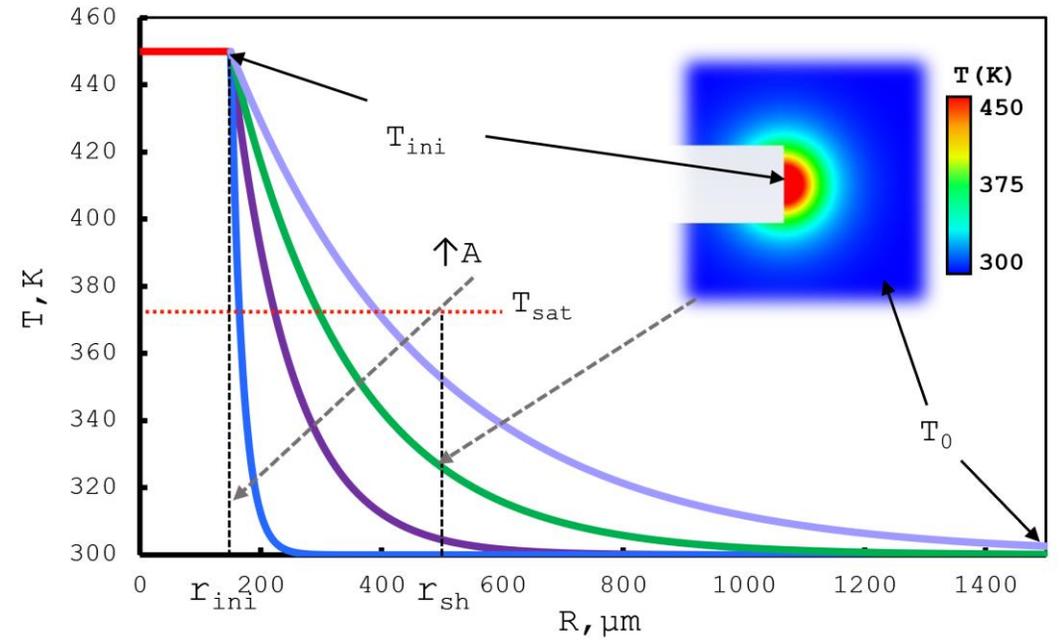
Механизм образования струи



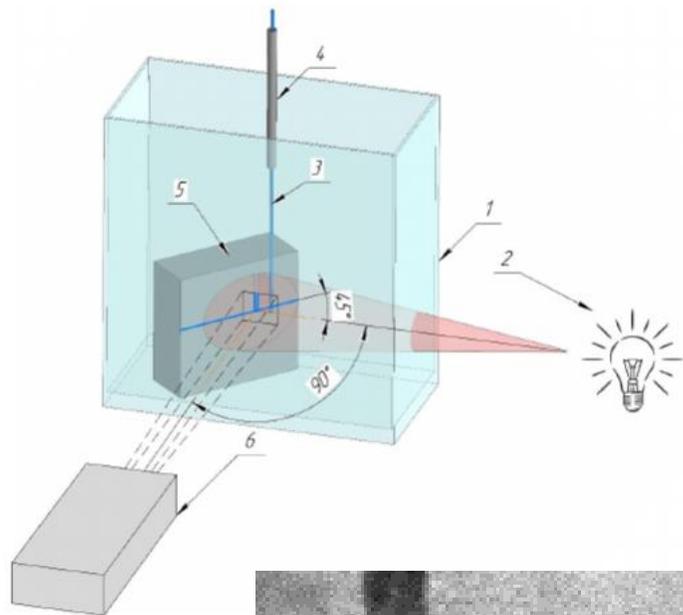
Параметрическое исследование



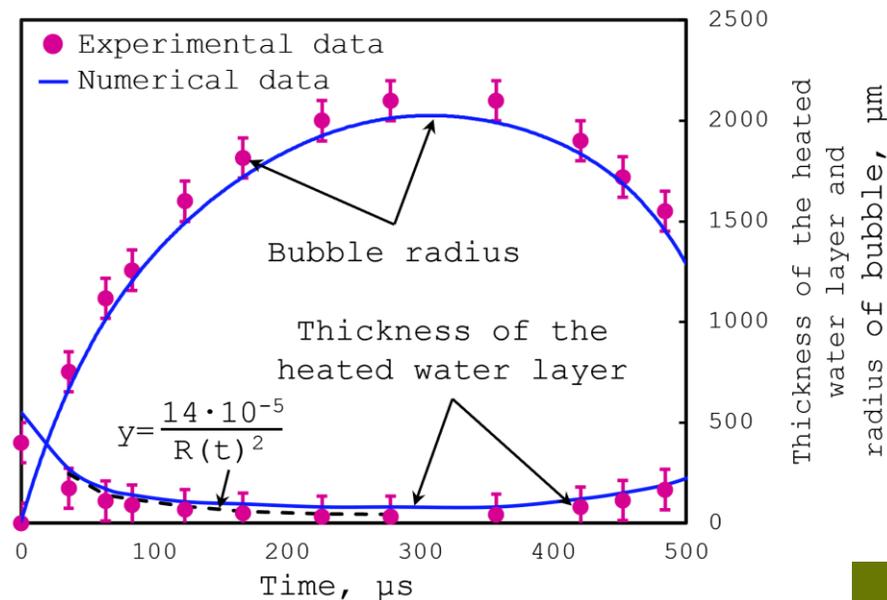
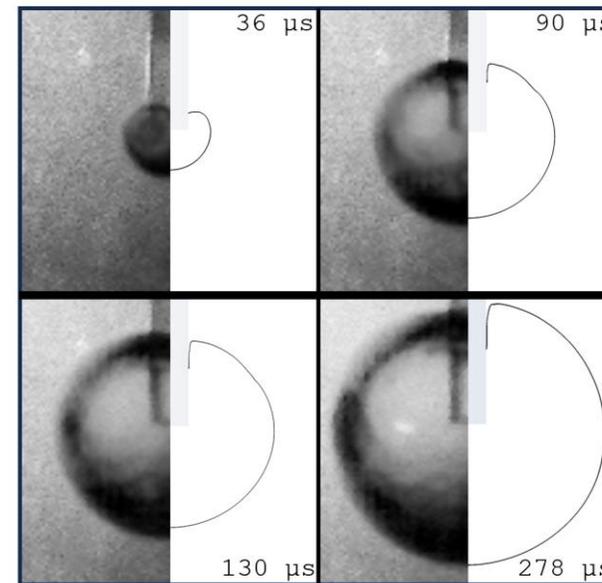
$$T = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot \exp(-A \cdot (r - r_{ini}))$$



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.

Механизмы влияния стенок на характеристики струи

В предыдущих работах основное внимание было сконцентрировано на конфигурации волновода в свободном пространстве

С точки зрения медицинского применения вызывает интерес влияние различных геометрических конфигураций на формирование кумулятивной струи

Конфигурация волновода помещенного внутрь трубки была до этого момента не исследована, хотя в медицинском приложении наиболее интересна

- Brujan E., et al, *Fluid Mech.* 2001. 433, 251-281
- Koukouvinis P, et al, *Physics of Fluids.* 2016. 28:052103
- Bing H., et al, *Fluids.* 2018. 72:101016
- Quang-Thai Nguyen et al, *Physics of Fluids.* 2023. 35 (1):013306

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

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

Уравнения состояния

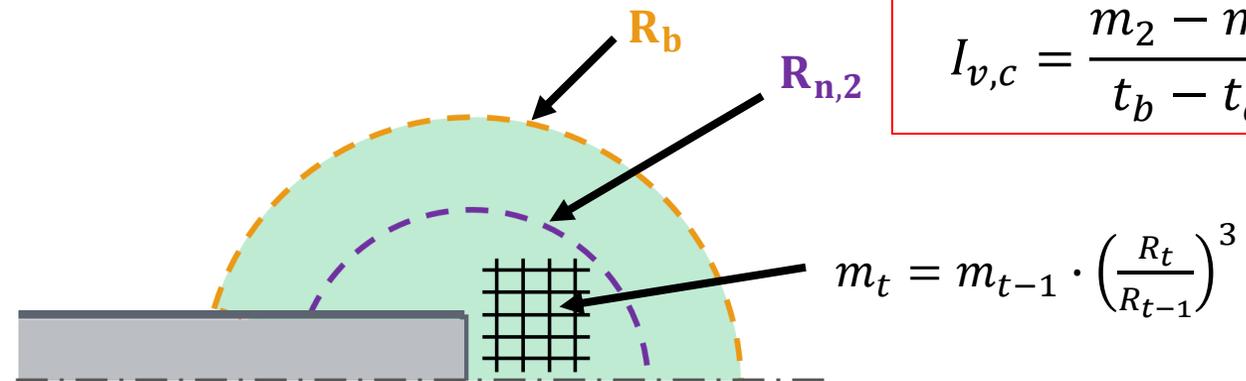
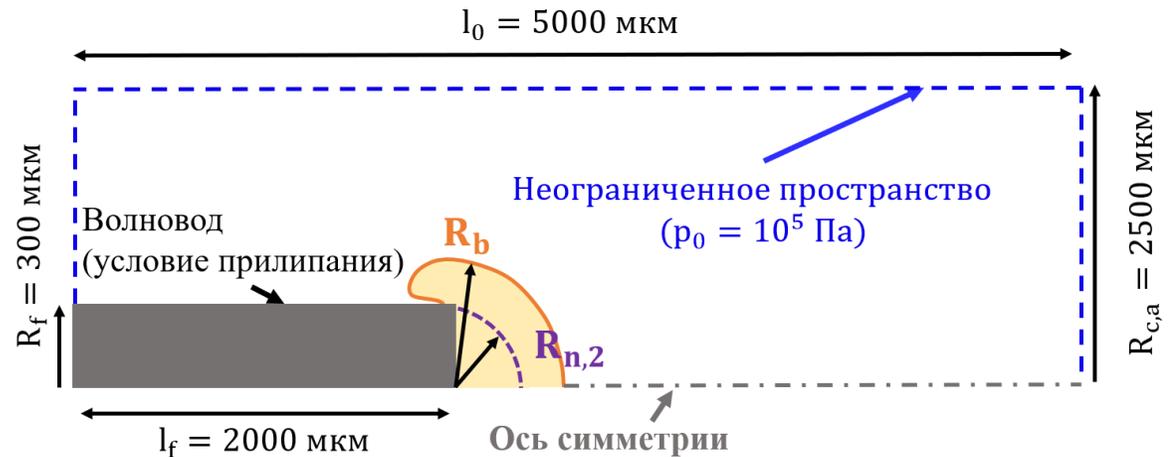
$$\rho_g = \rho_{g,0} \left(\frac{p_g}{p_{g,0}} \right)^{1/\gamma_g}, \quad \rho_l = const$$

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



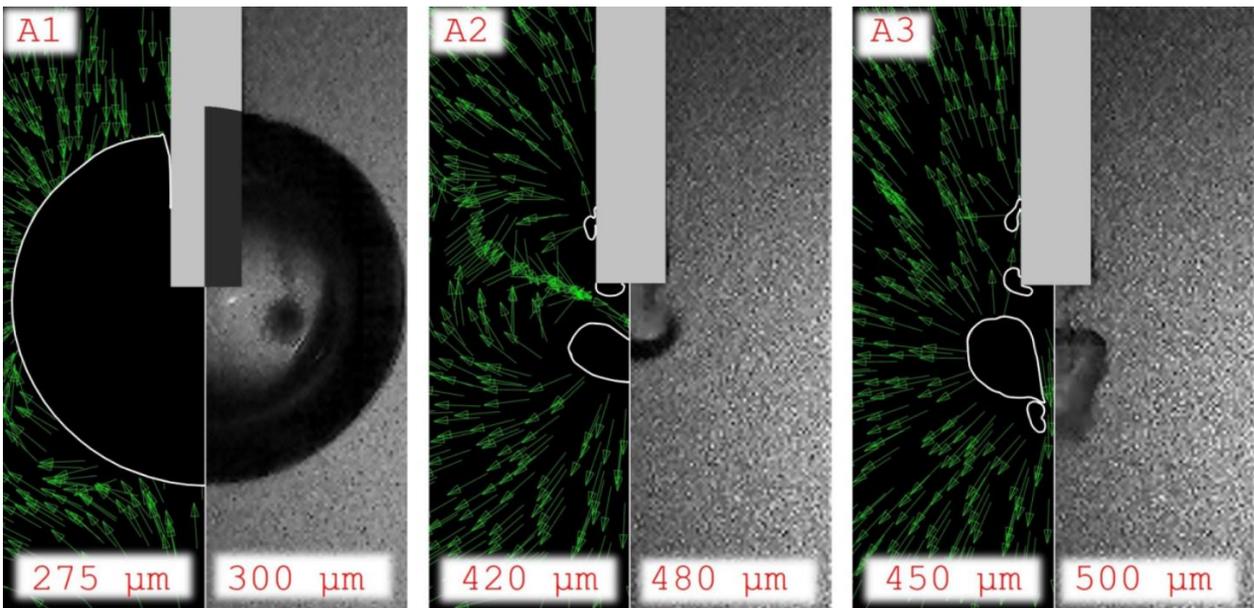
$$I_{v,c} = \frac{m_2 - m_1}{t_b - t_a}$$

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.

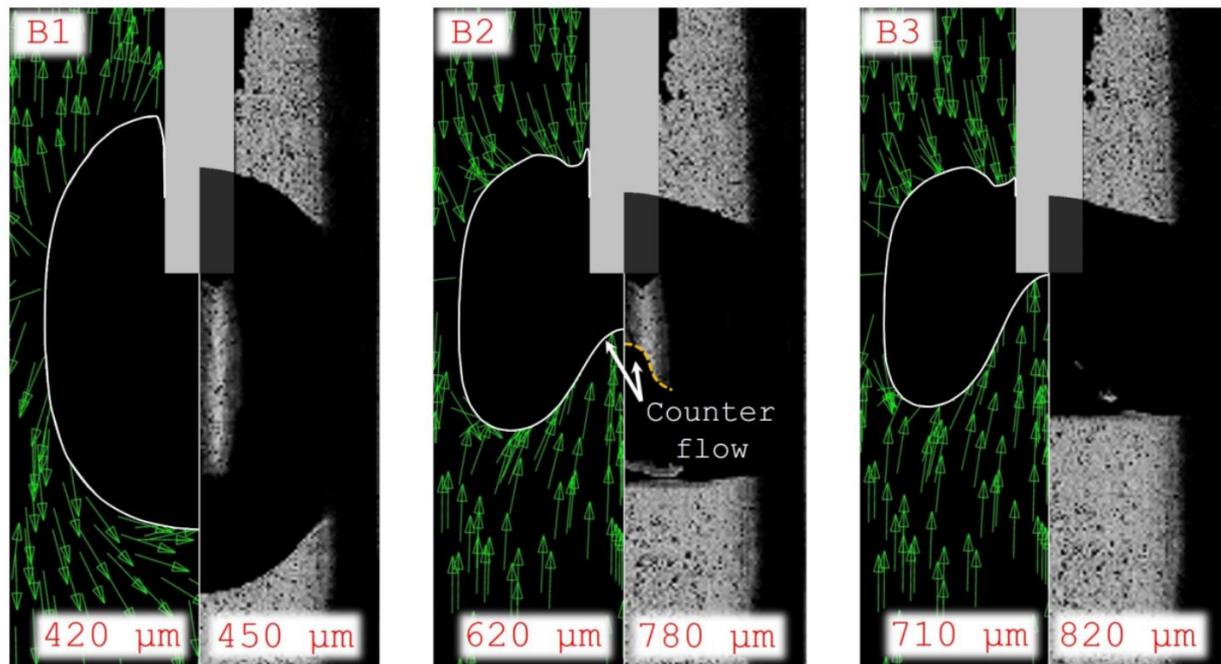
Квадратная сетка со стороной 2 мкм,
Адаптивный шаг по времени $\Delta t_{min} = 1e-11$ с

Влияние трубки

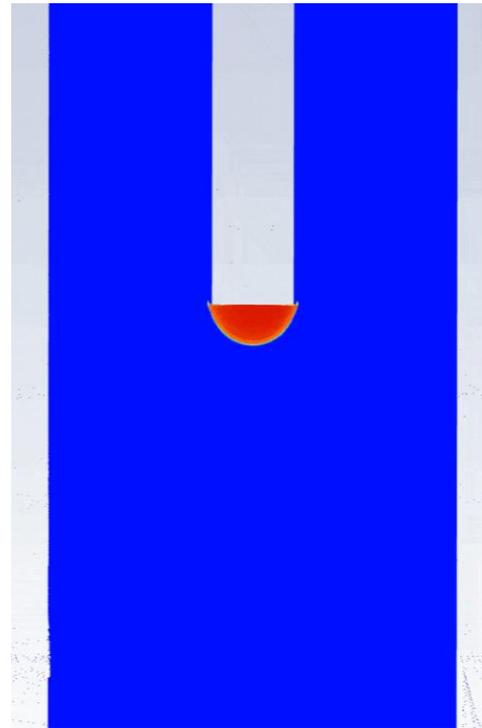
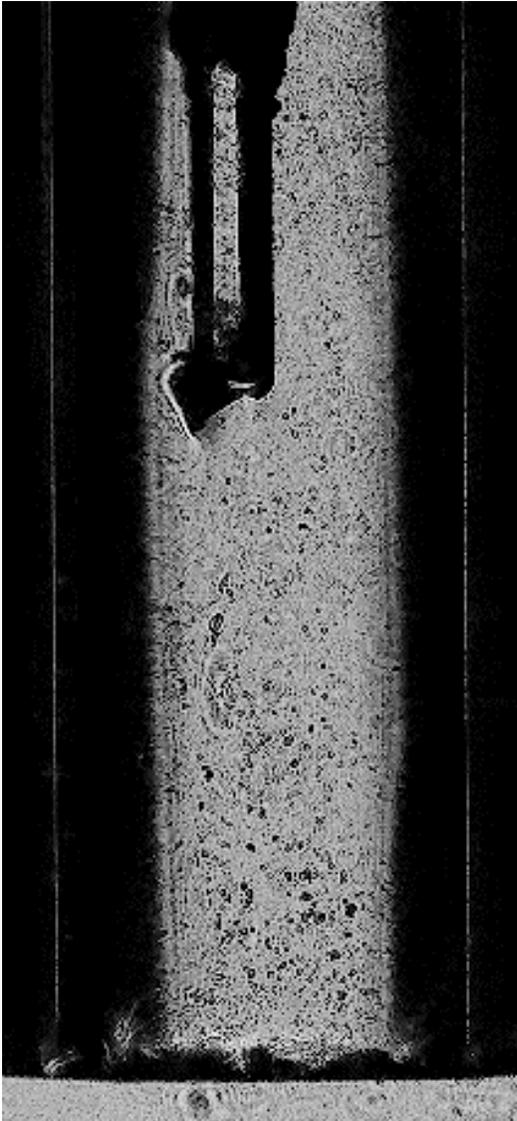
В свободном пространстве



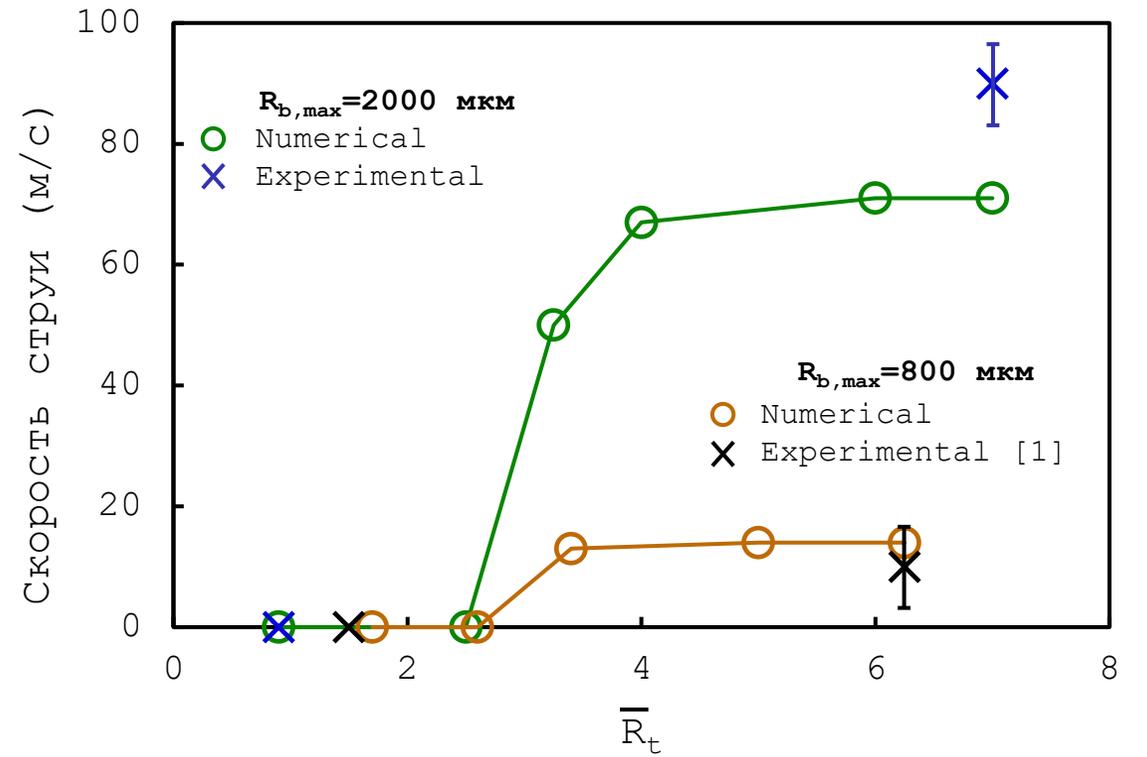
В трубке



Влияние трубки



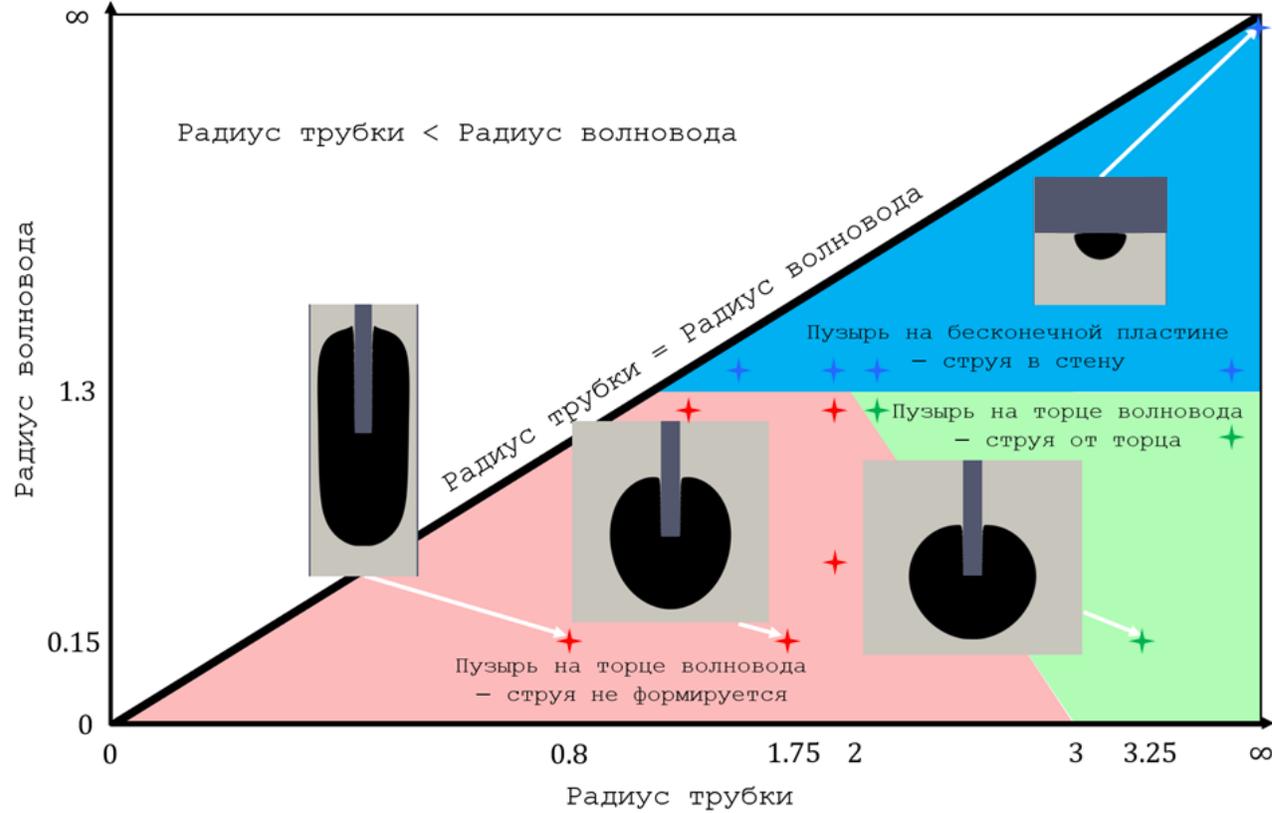
$$\bar{R}_t = 0.9$$
$$\bar{R}_f = 0.15$$



$$\bar{R}_t = R_{tube} / R_{b,max}$$

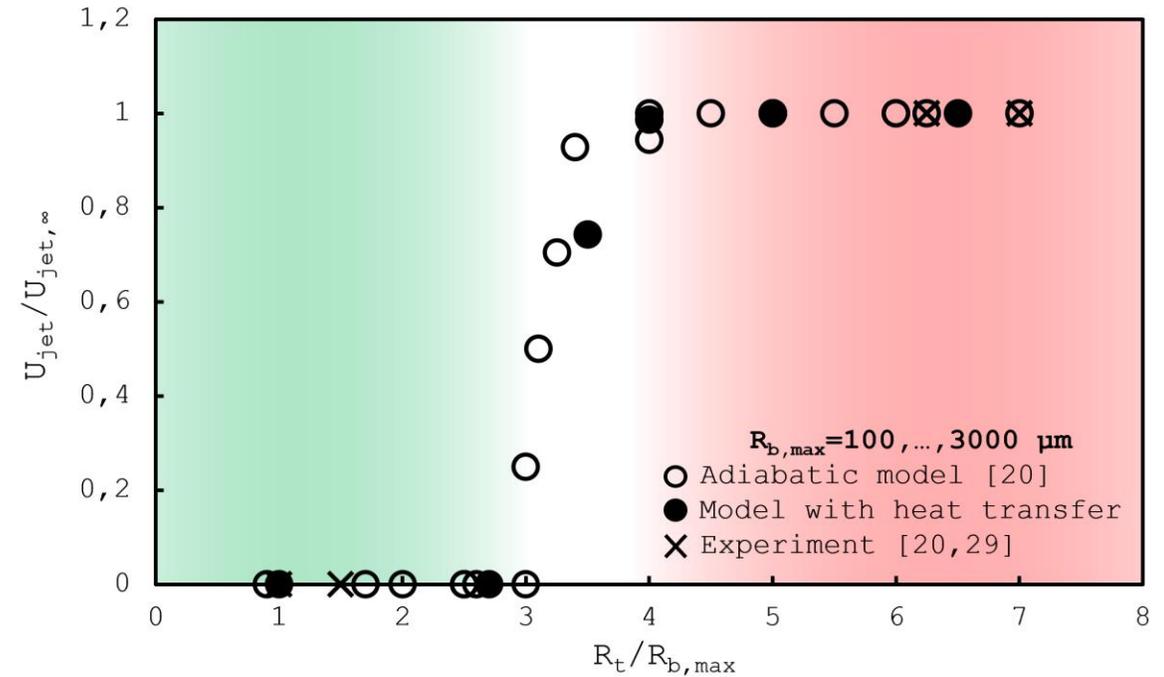
[1] Levin A., et al, Technical Physics Letters. 2023. 49, 60-63.

Диаграмма режимов



Безразмерные
параметры

Радус трубки = $R_{\text{tube}} / R_{b, \text{max}}$
Радус волновода = $R_{\text{fiber}} / R_{b, \text{max}}$



Основные результаты

- В трубках большого радиуса ($R_{\text{tube}}/R_{b,\text{max}} > 4$) скорость струи практически не зависит от наличия трубки и ее влиянием можно пренебречь.
- В переходном случае, то есть для трубок среднего размера ($2.5 < R_{\text{tube}}/R_{b,\text{max}} \leq 4$), повторное расширение пузырька приводит к тому, что струя формируется с меньшей скоростью, чем если бы она генерировалась в широкой трубке.
- Для узких трубок ($R_{\text{tube}}/R_{b,\text{max}} \leq 2.5$) численное моделирование и эксперимент указывают на невозможность образования струи.

Благодарности

- **В.А. Косяков** - численное моделирование, обработка результатов, обсуждения
- **В.М. Чудновский** - экспериментальные результаты, физическая постановка, обсуждения
- **С.С. Минаев, М.А. Гузев** - обсуждения результатов

Работа выполнена при поддержке РФФ № 22-19-00189