



# СБОРНИК ТЕЗИСОВ

XVII Всероссийская школа-конференция  
«Актуальные вопросы теплофизики и  
физической гидрогазодинамики»

19-24 марта 2023, Шерегеш

УДК 532:533:534:535:536:537

Сборник содержит доклады XVII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». В сборнике представлены доклады по направлениям: турбулентные течения, тепло- и массообмен в однофазных средах, теплообмен и гидродинамика в многофазных средах, теплообмен при фазовых превращениях, интенсификация теплообмена, теплофизика микро- и наносистем, теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен, процессы в разреженных газах и плазме, теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение.

**XVII Всероссийская школа-конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики»**, организуемая Институтом теплофизики СО РАН при поддержке Математического центра Новосибирского государственного университета, Сибирского отделения Российской академии наук и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2021-575, пройдет с 19 по 24 марта 2023 года в горнолыжном курорте Шерегеш.

Школа-конференция ведет свою историю с 1984 года и в настоящее время является традиционным форумом молодых учёных-теплофизиков России и ближнего зарубежья.

### **Организационный комитет**

**Председатель**  
Маркович Д. М.  
академик РАН

**Зам. председателя**  
Сиковский Д. Ф.  
к.ф.-м.н.

**Ученые секретари**  
Мулладжанов Р. И., д.ф.-м.н.  
Старинская Е. М., к.ф.-м.н.

### **Члены оргкомитета**

Алексеев С.В., академик РАН  
Павленко А.Н., чл.-корр. РАН  
Кабов О.А., чл.-корр. РАН  
Дулин В.М., д.ф.-м.н.  
Стрижак П.А., д.ф.-м.н.  
Виноградов А.В., д.ф.-м.н.  
Минаков А.В., д.ф.-м.н.  
Абдуллаев Р.Н., к.ф.-м.н.  
Беляев И.А., к.т.н.  
Замчий А.О., к.ф.-м.н.  
Зарипов Д.И., д.ф.-м.н.  
Ковалев А.В., к.ф.-м.н.  
Копьев Е.П., к.т.н.  
Макаров М.С., к.ф.-м.н.  
Редьков А.В., к.ф.-м.н.  
Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.  
Сердюков В.С., к.ф.-м.н.

Скрипкин С.Г., к.ф.-м.н.  
Смовж Д.В., к.ф.-м.н.  
Старинский С.В., к.ф.-м.н.  
Суртаев А.С., к.ф.-м.н.  
Чеверда В.В., к.ф.-м.н.  
Шмакова Н.Д., к.ф.-м.н.  
Владыко И.В.  
Зубова С.В.  
Иващенко В.А.  
Иващенко Е.И.  
Кириченко Е.О.  
Кочкин Д.Ю.  
Миськив Н.Б.  
Пещенюк Ю.А.  
Толстогузов Р.В.  
Филиппов М.В.

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции. За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

ISBN 978-5-89017-081-1

Институт теплофизики СО РАН, 2023

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

# **DYNAMICS OF DROPLETS IN THE TRANSITION AND FILM BOILING REGIME ON TEXTURED SUBSTRATES**

Susmita Dash

*Indian Institute of Science, India*

Droplet dynamics on a heated surface plays an important role in applications ranging from spray cooling to solidification and pharmaceuticals. A liquid droplet placed on a heated substrate which is at a significantly higher temperature compared to the saturation temperature of the liquid hovers over a thin film of vapor. This film boiling regime of the droplet is termed as the Leidenfrost (LF) state and is detrimental to heat transfer due to the low thermal conductivity of the vapor. The transition boiling regime is characterized by intermittent contacts between the heated substrate and the liquid droplet and marks the transition between vigorous nucleate boiling and film boiling. Here, we show that in the transitional boiling regime, an unconstrained droplet exhibits trampolining where the droplet bounces to higher heights with each consecutive contact with the substrate. I will discuss the role of substrate morphology and permeability on the excess vapor gap established beneath the droplet during the film boiling regime. I will also discuss the different modes of bouncing and trampolining of a Leidenfrost droplet on a heated substrate and the influence of substrate temperature.

## **BIPHILIC SURFACES FOR THERMAL-FLUIDS SYSTEMS AND ENERGY EFFICIENCY**

Ali Kosar

*Sabancı University, Turkey*

Boiling and droplet condensation are major phase change phenomena. Performance enhancements in these phase change phenomena can be achieved with surface modification. One of the most promising approaches includes the use of biphilic surfaces, which have mixed wettability on the surface. Phase change on biphilic surfaces and optimization efforts for various biphilic surfaces in both boiling and dropwise condensation will be covered in this lecture.

## **TURBULENCE CONTROL — BETTER, FASTER AND EASIER WITH MACHINE LEARNING**

Bernd Noack

*Harbin Institute of Technology, China*

Closed-loop turbulence control has current and future engineering applications of truly epic proportions, including cars, trains, airplanes, jet noise, air conditioning, medical applications, wind turbines, combustors, and energy systems, i.e., well-known topics presented in this conference. Recently, Artificial Intelligence (AI) / Machine Learning (ML) has opened game-changing new avenues (Brunton; Noack 2015): the automated model-free discovery and exploitation of unknown nonlinear actuation mechanisms directly in the plant - included automated reduced-order modeling of the plant. In this talk, we review recent successes on these avenues towards broadband frequency turbulence control with distributed actuation/sensing.

# **PHYSICS-INFORMED MODELLING OF COHERENT STRUCTURES IN MULTIPHYSICS FLOWS**

Kilian Oberleithner

*Berlin Technical University, Germany*

The vast majority of natural and technical flows are turbulent. While turbulence is beneficial for engineering applications where effective mixing and heat transfer are important, it also has dramatic negative effects. For example, turbulence causes the annoying whistling of wind turbines, the dramatic rumbling of jet engines, and it can trigger resonances and pressure fluctuations in gas and water turbines, which drastically reduces the efficiency and operability of electric power plants.

Thanks to immense advances in large-scale numerical simulation and high-performance computers, we are now able to simulate turbulent flows with high accuracy. However, such simulations alone neither reveal the mechanism that drives turbulence, nor do they tell us how to control turbulence in a beneficial way.

In this talk linearized mean field analysis of turbulent flows is introduced. This physics-based method uncovers the driving mechanisms that lead to the formation of turbulent structures and it offers an analytic framework for turbulent flow control. The core idea is to build a linearized operator from a set of governing equations and analyse this operator using stability and resolvent analysis. The method will be demonstrated for different technical applications within the field of aeroacoustics, thermoacoustics and instability control. The talk will conclude with an overview of future challenges and opportunities.

# **SPRAY COOLING FOR HIGH HEAT-FLUX ELECTRONICS COOLING**

Run Hu

*Huazhong University of Science and Technology, China*

Spray cooling is a promising thermal management solution for high-heat-flux electronics. To facilitate the application of spray cooling in electronics cooling, we have improved the experimental system by designing a high heat flux heat source and an electronic device. A relatively high critical heat flux and better temperature uniformity have been achieved. A quantitative evaluation of parameters has been proposed to provide guidance for the performance enhancement of spray cooling system and to facilitate the high-heat-flux heat dissipation in electronic devices.

## **НОВЫЙ ФИЗТЕХ: ПУТЬ ОТ ЛАБОРАТОРИИ В РАМКАХ МЕГАГРАНТА ДО ФАКУЛЬТЕТА**

Павел Белов

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

В рамках лекции будет рассказано о принципах работы на Новом Физтехе университета ИТМО: науке в России на мировом уровне, элитном физическом образовании и важности организационных вопросов в эффективном функционировании научно-образовательных подразделений.

## **SIMPLE MODELS OF COMPLEX PROCESSES: HEATING AND EVAPORATION OF DROPLETS ON A SUPERHYDROPHOBIC SURFACE**

Сергей Сажин

*University of Brighton, UK*

A new model for heating and evaporation of a droplet on a superhydrophobic surface will be described. The model uses the analytical solution to the spherically symmetric heat transfer equation with the source term which is implemented in the numerical code and used at each time step of the calculations. It was assumed that heat supplied by conduction and radiation from the substrate to the droplet is instantaneously and homogeneously distributed throughout the whole droplet volume. A new approach to the verification of the predictions of the earlier developed model of puffing/micro-explosion in multi-component composite droplets will be described. The results of the generalization latter model to consider the shifting of the water sub-droplet away from the centre of the fuel droplet will be presented.

## **МОЛОДЕЖНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ: СОЗДАНИЕ, СТАНОВЛЕНИЕ, РАЗВИТИЕ**

Павел Стрижак

*Томский политехнический университет, Томск*

В докладе обсуждаются ключевые задачи и сложности, возникающие при работе молодежных научных лабораторий. Представлены возможные треки развития членов коллективов таких лабораторий. Выделена связь работы лабораторий с образовательными программами в вузах. Определены перспективные шаги для развития лабораторий с учетом совокупности внешних и внутренних факторов.

## **ОТ ОТКРЫТИЯ ЛАБОРАТОРИИ ДО СОЗДАНИЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА: РОЛЬ СВЯЗИ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ**

Валерия Родионова

Балтийский федеральный университет, Калининград

Лаборатория новых магнитных материалов была создана в Балтийском федеральном университете им. И. Канта в 2013 году, в 2022 году это структурное подразделение - научно-образовательный центр, занимающийся не только наукой, но и образованием, просветительской и организационной деятельностью. Зачем? Рассмотрим механизмы запуска, развития, ловушки на пути становления и инструменты поддержки научного сообщества.

## **ОТЧЕГО ТАКОЙ СИЛЬНЫЙ ВЕТЕР?**

Григорий Фалькович

*Weizmann Institute of Science, Israel*

Краткий обзор спектров атмосферной турбулентности и результатов лабораторных экспериментов по турбулентности в тонких слоях. Немного теории и обсуждение возможных связей между явлениями.

# ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ



# НОВЫЕ СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ЗА СЧЕТ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕПНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФРАГМЕНТАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Антонов Д.В.\*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,  
Россия

\* [antonovdv132@gmail.com](mailto:antonovdv132@gmail.com)

Представлены результаты экспериментальных исследований условий реализации так называемых цепных механизмов, характеризующих группу последовательных фрагментаций композиционных топлив в высокотемпературной газовой среде с целью формирования топливовоздушной смеси в авиационных двигателях [1]. Опыты проведены с группой исходных капель, закрепленных в высокотемпературной газовой среде на разном удалении и при разных схемах взаимного расположения, а также при движении группы капель в газовой среде в режиме свободного падения. Выполнена математическая обработка результатов опытов с целью получения аппроксимационных выражений для установленных экспериментальных зависимостей времен задержки между последовательными фрагментациями, количеством формируемых капель, их размерами и другими характеристиками.

На рис. 1 представлены кадры с изображением типичного цепного (также можно назвать каскадным) механизма фрагментации капель: образование дочерней (вторичной) капли, ее разрушение, образование дочерней капли меньшего размера и ее разрушение и т.д. Результаты обработки проведенных экспериментов показали, что наибольшее количество последовательных распадов вторичных капель регистрировалось при режиме паффинг для родительских капель. Это обусловлено тем, что родительская капля при режиме паффинг имеет локальные области со значительным перегревом до метастабильного состояния воды, достаточным для зарождения пузырьков и их интенсивного роста.

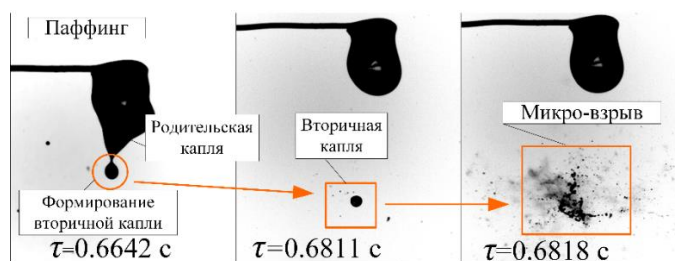


Рис. 1. Кадры с изображением цепного механизма фрагментации капель вода/рапсовое масло (объемная концентрация воды 10%) при  $T_a \approx 843$  К.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта российского научного фонда (РНФ 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).

## Литература

1. Boggavarapu P., Ramesh S.P., Avulapati M.M. Secondary breakup of water and surrogate fuels: Breakup modes and resultant droplet sizes // – Int. J. Multiph. Flow. (2021) 145, №103816.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР НА ОБДУВАЕМОЙ ГАЗОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

Апостол Ю. С.<sup>1,2\*</sup>, Вожаков И. С.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\**y.apostol@g.nsu.ru*

Двухфазные газожидкостные потоки широко используются во многих отраслях. Стратифицированные режимы течения могут включать в себя как течения с гладкой поверхностью пленки жидкости, так и с волнистой, а при дальнейшем увеличении скорости газа наблюдается явление уноса капель. Пленочные течения часто встречаются в теплообменном оборудовании, так как являются эффективными в вопросах охлаждения; наличие же диспергированной фазы - капель - значительно увеличивает межфазную поверхность, что повышает скорость химических реакций. Таким образом, предметами исследования в данной работе являются волны на межфазной поверхности и капли, сорванные газовым потоком. Целью работы является получение характеристик волн и капель при высоких расходах жидкости и газа, а также механизмов их образования.

Моделирование волновых структур производилось путем численного решения уравнений Навье-Стокса с использованием платформы с открытым исходным кодом OpenFOAM. Расчеты проведены в двумерной постановке подходом квази-прямого численного моделирования.

В результате моделирования получены пространственно-временные диаграммы, описывающие амплитуды поверхности для различных значений скорости газового потока. Показано, что при турбулизации газового потока происходит рост амплитуды. Кроме того, обнаружено, что генерация волн быстрой ряби происходит в результате воздействия турбулентных пульсаций газового потока на пленку жидкости.

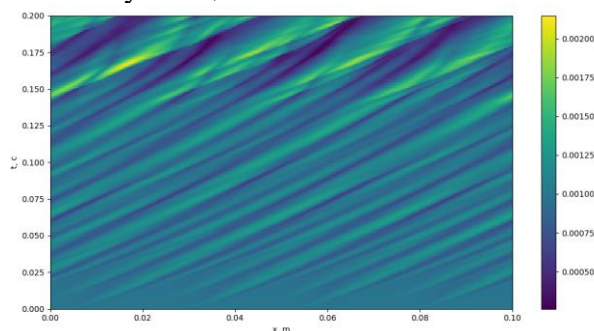


Рис. 1. Пространственно-временная диаграмма развития волновых структур при скорости газового потока 20 м/с, шкала справа указывает на амплитуду волны в заданной продольной координате в данный момент времени

## Литература

1. Cherdantsev A. V., Hann D. B., Azzopardi B. J. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment //International Journal of Multiphase Flow. – 2014. – Т. 67. – С. 52-64.
2. Fan W., Cherdantsev A. V., Anglart H. Experimental and numerical study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow //Energy. – 2020. – Т. 207. – С. 118309.

# РЕГИСТРАЦИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Ахметшин М.Р. \*, Няшина Г.С. \*

НИИ Томский политехнический университет, Томск, Россия

\* [mra3@tpu.ru](mailto:mra3@tpu.ru); [gsn1@tpu.ru](mailto:gsn1@tpu.ru)

Проблема использования и утилизации отходов нефтедобычи и нефтепереработки является одной из самых актуальных в настоящее время [1]. Классические методы переработки, такие как сжигание или захоронение в почве, малоэффективны и оказывают негативное влияние на окружающую среду [2]. Одним из способов снижения негативного воздействия на окружающую среду является использование отходов добычи и переработки нефтей и углей в качестве компонентов водосодержащего топлива. В качестве компонентов использовались нефтешламы, фильтр-кек каменного коксующегося угля и опилки. В настоящей работе измерялись концентрации оксидов серы и азота, образующиеся в процессе горения, а также устанавливались механизмы, протекающие в процессе сжигания, позволяющие снизить концентрации антропогенных газовых выбросов [3]. По результатам исследований установлены различия характеристик выбросов для топливных композиций, в состав которых входили вышеуказанные компоненты [4]. Показано, что сжигание топливных композиций, содержащих компоненты в различных массовых пропорциях, может снизить концентрации антропогенных выбросов  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  на 16–39% и 4–48%, соответственно.

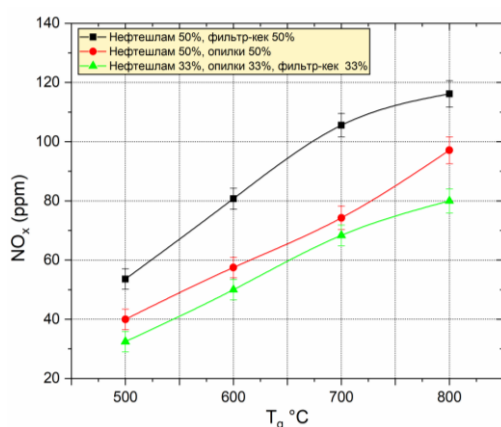


Рис. 1. Зависимости концентраций оксидов азота от температуры в камере сгорания [4]

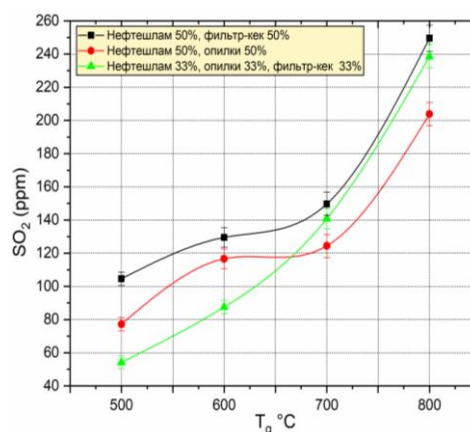


Рис. 2. Зависимости концентраций оксидов серы от температуры в камере сгорания [4]

## Литература

1. Al-Mulali U. Oil consumption, CO<sub>2</sub> emission and economic growth in MENA countries // Energy. 2011. V. 36. №10. P. 6165–6171.
2. Liu H., Zhao S., Xie Z., Zhu K., Xu X., Ding X., Glowacz A. Investigation of the pyrophoric tendency of the powder of corrosion products in an oil tank // Powder Technology. 2018. V. 339. P. 296–305
3. Няшина Г. С., Шлегель Н. Е., Стрижак П. А. Анализ антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив и отходов углерепереработки // Кокс и химия. 2017. № 4. С. 40–46.
4. Няшина Г. С., Курганкина М. А., Ахметшин М. Р., Медведев В. В. Анализ состава золы при сжигании перспективных водосодержащих суспензионных топлив // Кокс и химия. 2020. № 3. С. 48–59.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОПОЛИМЕРНЫХ МИКРОГЕЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КАПЛЕ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛИМЕРА НА ОСОБЕННОСТИ ЕЕ РАСТЕКАНИЯ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Ашихмин А.Е.\* , Пискунов М.В., Антонио Ди Мартино, Федоров В.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,  
Россия

\**aeatru@gmail.com*

Процесс взаимодействия гидрогеля с поверхностью является неотъемлемой частью технологии производства биологических тканей. Исследование особенностей и динамики поведения капель таких жидкостей при биопечати тканей является актуальным вопросом, решение которого позволит усовершенствовать технологию [1]. Поэтому целью данной работы является исследование гидродинамики процесса взаимодействия модельного гидрогеля на основе раствора агара с различными поверхностями.

В работе измерены реологические и поверхностно-активные свойства образцов полимерных эмульсий, а также характеристики контактного смачивания поверхностей взаимодействия. Выполнено экспериментальное исследование взаимодействия капли полимерной эмульсии с гладкой и мембранной поверхностью. Установлено влияние частиц микрогеля на максимальный диаметр растекания капли полимерной эмульсии (рисунок 1). Продемонстрированы морфологические особенности процесса растекания капель полимерных эмульсий с частицами микрогеля. Оценено влияние количества частиц микрогеля в растекающейся капле эмульсии на деформацию ее отдельных элементов.

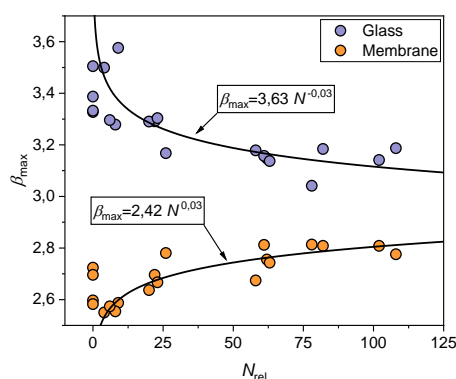


Рис. 1. Влияние количества частиц микрогеля  $N$  в каплях полимерных эмульсий на коэффициент их максимального растекания  $\beta_{max}$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

## Литература

1. Tao J. et al. Nanoparticle-Stabilized Emulsion Bioink for Digital Light Processing Based 3D Bioprinting of Porous Tissue Constructs // Adv. Healthc. Mater. 2022. Vol. 11, № 12. P. 2102810.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ОРЕБРЕНИЯ

Барсуков\* А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*\*[andreybarsukov96@gmail.com](mailto:andreybarsukov96@gmail.com)*

В литературе существует множество исследований, как экспериментальных, так и расчетных, касающихся фундаментальных средств повышения внутренней теплопередачи в конфигурациях с преимущественно турбулентным потоком. К ним относятся турбулизация проходов различными повторяющимися элементами поверхности, соударяющиеся струи и массивы струй, закрученные потоки, шероховатости и многое другое. Использование ребер является одним из наиболее распространенных средств повышения коэффициентов теплопередачи. Основные исследования, в результате которых были получены широко используемые данные и корреляции, были выполнены в работах [1-3]. Общие результаты всех таких исследований заключаются в том, что усредненные по поверхности коэффициенты теплопередачи в стационарных турбулизированных каналах могут быть увеличены в 2–2,5 раза, а коэффициенты трения или требуемая мощность откачки увеличиваются в 3–5 раз.

В данной работе проведено численное моделирование турбулентного течения в оребренном канале. Число Рейнольдса рассчитывалось по среднерасходной скорости и высоте канала. Варьируемыми параметрами были число Рейнольдса и угол между набегающим потоком и ребром канала. На рисунке 1 представлена расчетная область.

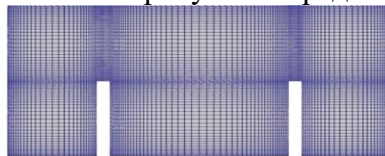


Рис. 1. Схема расчетной области.

В работе представлено подробное численное исследование усиления теплообмена при наличии ребер в канале. Полученные результаты расчетов отрывного обтекания ребер при варьировании угла набегающего потока. Подробно исследованы локальные и интегральные характеристики турбулентного течения. Было получено распределение локального числа Нуссельта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575).*

## Литература

1. Saha K., Acharya S., Nakamata C. Heat transfer enhancement and thermal performance of lattice structures for internal cooling of airfoil trailing edges // J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2013 V 5 011001.
2. Oh I. T. et al. Local heat-mass transfer and friction loss measurement in a rotating matrix cooling channel// J. Heat Transfer 2012 V134 011901
3. Dua W, Luo L, Wang S, Liu J and Sunden B Heat transfer and flow structure in a detached latticework duct // Applied Thermal Engineering 2019 155 pp 24-39

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА В ПРЯМОМ И СИНУСОИДАЛЬНОМ МИКРОКАНАЛАХ ПРИ СНАРЯДНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

Барткус Г.В. \*, Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия  
\* [germanbartkus@gmail.com](mailto:germanbartkus@gmail.com)

Углекислый газ широко распространен в природных и промышленных процессах и управление растворением его в жидкостях является приоритетной задачей для понимания процессов в многофазных потоках и с целью утилизации для уменьшения эмиссии. Важным преимуществом использования микроканалов является существенная интенсификация процессов массообмена за счет высокой удельной поверхности контакта фаз. В данной работе было проведено экспериментальное исследование, направленное на изучение процесса массообмена в прямоугольном и синусоидальном микроканалах с целью измерения объемных коэффициентов массоотдачи для смеси этанол-СО<sub>2</sub>, используя высокоскоростную и контрастную визуализации течения при высоком разрешении.

Получены значения объемных коэффициентов массоотдачи для прямого канала и предложена физически обоснованная модель межфазного массообмена на основе работы Butler и др. [1] при абсорбции для снарядного режима течения в канале прямоугольного сечения, учитывающая циркуляционное течение в перемычки жидкости. Измерен объемный коэффициент массоотдачи в канале синусоидального профиля и показана значительная интенсификация массоотдачи по сравнению с прямым каналом, за счет дополнительного перемешивания жидкости, рис. 1.

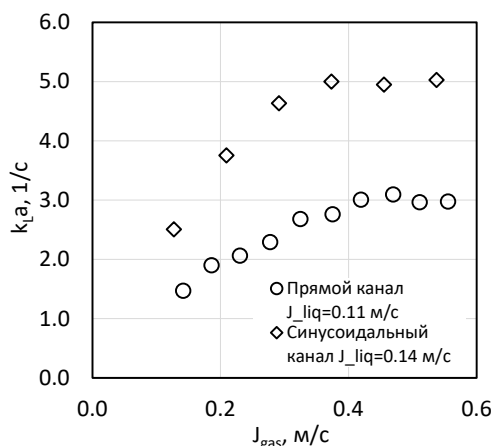


Рис. 1. Сравнение зависимостей объемного коэффициента массоотдачи от приведенной скорости газа для течения смеси 90% этанол-СО<sub>2</sub> в прямом микроканале (380×190 мкм) при  $J_{лиq}=0.11$  м/с и микроканале с синусоидальными стенками (400×130 мкм) при  $J_{лиq}=0.14$  м/с.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского Научного Фонда (РНФ №21-19-00626, <https://rscf.ru/project/21-19-00626/>).

## Литература

1. Butler C., Cid E., Billet A.-M. Modelling of mass transfer in Taylor flow: Investigation with the PLIF-I technique // Chem. Eng. Res. Des. – 2016. – Vol. 115. – P. 292–302.

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМИТАРОВ РАСПЛАВА СОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К РЕАКТОРНЫМ УСТАНОВКАМ IV ПОКОЛЕНИЯ

Белавина Е.А.<sup>1,2\*</sup>, Бердюгин Д.А.<sup>2</sup>, Ерпулёв А.А.<sup>2</sup>, Пятницкая Н.Ю.<sup>1,2</sup>

1) *Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

2) *Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия*

*[\\*belavinaea@gmail.com](mailto:belavinaea@gmail.com)*

Расплавы солей рассматриваются в качестве перспективных теплоносителей в контурах атомных электростанций (АЭС), термоядерных реакторов (ТЯР) и гибридных проектов. Их применение позволяет полностью пересмотреть инфраструктуру ядерной энергоустановки применив ряд решений, повышающих безопасность, эффективность и ресурсообеспеченность промышленной эксплуатации ядерных технологий [1]. В случае использования расплава соли в ТЯР течение электропроводной жидкости (расплава соли) будет осложнено дополнительным фактором – влиянием магнитного поля. В связи с этим, комплексное исследование, состоящее из изучения свойств перспективных расплавов фторидных солей, а также создание экспериментальной и численной баз для верификации инженерных кодов, представляют особый интерес. Работа в этой области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ» - ОИВТ РАН [2].

Одной из задач данного исследования является вопрос рассмотрения ряда численных и экспериментальных исследований особенностей теплообмена в условиях смешанной и естественной конвекций под действием массовых сил различной природы, применительно к идее «жидкой» активной зоне ЖСР, которую формирует гомогенная расплавленная смесь из фторидов солей и фторида урана, плутония или тория. Эта же топливная композиция служит теплоносителем первого контура. В качестве модельной жидкости рассматривались водные растворы КОН с массовой концентрацией в 3,4, 20 и 30 процентов. Для изучения поведения естественной конвекции был создан экспериментальный стенд, состоящий из тестовой ячейки и медных платин, пропускание тока через которые моделируют объемное тепловыделение. Максимальная тепловая нагрузка, реализуемая в эксперименте, составила 800 кВт/м<sup>3</sup>. Характер полученных распределения полей электрического потенциала продемонстрировал его равномерность распределения по всему сечению исследуемой области, а разность в значениях температуры в верхнем и нижнем слоях ячейки составила порядка 3°С, что свидетельствует о равномерности объемного тепловыделения и отсутствии неблагоприятных эффектов.

На базе экспериментального исследования выполнено численное моделирование задачи. Полученные картины распределения полей температуры и потенциала, которые показали, что существенного перекоса в распределении электропотенциала не происходит в условиях поперечного по отношению к градиенту потенциала температурного напора, а значит, тепловыделение по всему объему можно считать равномерным, а предложенный подход подходящим для моделирования процессов естественной конвекции в условиях объемного тепловыделения, применительно к активной зоне жидкосолевого реактора.

## Литература

1. Блинкин В. Л., Новиков В. М. Жидкосолевые ядерные реакторы // - Атомиздат, 1978, 1112 с.
2. Белавина Е.А. Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева // 2021, 4, с.82-97.

# СМАЧИВАНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ БИФИЛЬНОЙ МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Васильев М.М.<sup>1,2\*</sup>, Родионов А.А.<sup>1,2</sup>, Шухов Ю.Г.<sup>1</sup>, Терехов В.В.<sup>1,2</sup>, Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*vasilevmik.arck@gmail.com](mailto:vasilevmik.arck@gmail.com)

Контролируемое изменение свойств смачиваемости различных поверхностей играет важную роль в таких задачах как интенсификация теплообмена, улучшение антикоррозионных и самоочищающихся свойств и др [1]. В последние годы особым интересом пользуются поверхности с бифильными свойствами смачивания ввиду своей перспективности в решении прикладных и фундаментальных задач. Известно, что для изменения свойств смачивания поверхности требуется контроль как химического состава, так и морфологии поверхности. Одним из наиболее перспективных методов модификации поверхности является импульсная лазерная абляция (ИЛА) [2]. Использование ИЛА позволяет широко варьировать ключевые свойства модифицируемой поверхности, такие как микро/наноструктура, шероховатость. Оптимизировать подбор морфологии поверхности для контролируемого изменения свойств смачиваемости можно с помощью численного моделирования. Кроме того, создание бифильных поверхностей с помощью лазера слабо освещено в литературе [3]. В этой работе предполагалось экспериментальное и численное исследование смачивания бифильных медных поверхностей, модифицированных наносекундным лазером. Численное моделирование проведено с помощью метода решеточных уравнений Больцмана (LBM). LBM хорошо зарекомендовал себя, как инструмент для моделирования задач с фазовыми превращениями.

В ходе работы проведена модификация медного образца для исследования динамики смачивания поверхности, а также с целью интенсификации теплообмена. Изготовление бифильной поверхности состояло из двух этапов: сперва производилось текстурирование материала с помощью Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1064$  нм) в воздухе, затем локальное удаление супергидрофильного слоя в условиях вакуума. Результаты показали, что поверхности, сочетающие гидрофильные и супергидрофильные области, позволяют контролировать места активации кипения. Кроме того, произведен численный анализ взаимодействия капель воды с бифильной поверхностью. Численная модель была верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных в рамках данной работы. В итоге получена верифицированная численная модель, позволяющая обобщить имеющиеся экспериментальные результаты на широкий диапазон режимов, а также проанализировать свойства смачивания.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 18-79-10119П.*

## Литература

1. Ganesh V. A. et al. A review on self-cleaning coatings // Journal of Materials Chemistry. – 2011. – Т. 21. – №. 41. – С. 16304-16322.
2. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Applied Surface Science. – 2020. – Т. 512. – С. 145753.
3. Koukoravas T. P. et al. Spatially-selective cooling by liquid jet impinging orthogonally on a wettability-patterned surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 95. – С. 142-152.



# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ КАВЕРН НА МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ

Владимиров В.Ю.\* , Чиннов Е.А., Хмель С.Я.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[victor.lipps@gmail.com](mailto:victor.lipps@gmail.com)*

Перспективным подходом для интенсификации теплообмена при кипении является создание бифильных поверхностей, которые могли бы сочетать преимущества как гидрофильности (высокий критический тепловой поток) так и гидрофобности (более эффективные центры парообразования). Обыкновенно такие образцы представляют собой локальные гидрофобные/супергидрофобные пятна на поверхности, смачиваемость которой выше, чем у пятен (зачастую поверхность гидрофильная или супергидрофильная). Помимо прочих параметров такие поверхности характеризуются степенью гидрофобности (или area ratio) – отношением совокупной площади всех гидрофобных областей ко всей площади поверхности. Детальных исследований влияния степени гидрофобности на интенсивность теплообмена при кипении мало. Существуют такие работы для кремниевых [1] и алюминиевых [2] подложек и они демонстрируют существенное влияние материала подложки на оптимальное значение степени гидрофобности.

В данной работе исследовались поверхности с массивами каверн, полученных методом лазерной абляции, после которой производилось осаждение гидрофобного покрытия [3]. Достигнута существенная интенсификация теплообмена по сравнению с гладкими медными поверхностями. Показано, что для исследуемых поверхностей степень гидрофобности не оказывает существенного влияния на интенсивность теплообмена. Предполагается, что причиной является форма сечения этих областей (каверны, а не плоские пятна, как в [1 и 2]) и их достаточно малый размер. В результате гидрофобные каверны покрываются паром. В таких условиях ключевым фактором, способствующем интенсификации теплообмена должно стать увеличение количества каверн, при этом их размер не играет существенного значения и может быть невелик.

Известно так же, что одной из проблем при создании гидрофильных (и, соответственно, бифильных поверхностей) является их устойчивость к химическому и механическому разрушению, утеря свойств. Исследованные в данной работе поверхности в ходе многолетних испытаний продемонстрировали высокую стабильность и сохранили интенсивность теплообмена достигнутой вначале.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда [грант № 22-19-20090, <https://rscf.ru/project/22-19-20090/>] и Правительства Новосибирской области [соглашение № p-13].*

## Литература

1. Motezakker A. R. et al. Optimum ratio of hydrophobic to hydrophilic areas of biphilic surfaces in thermal fluid systems involving boiling //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 135. – С. 164-174.
2. Može M., Zupančič M., Golobič I. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 161. – С. 120265.
3. Voinovich L. B. et al. Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings //Advanced Materials Interfaces. – 2018. – Т. 5. – №. 21. – С. 1801099.

# ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Владыко И.В.<sup>1,2\*</sup>, Суртаев А.С.<sup>1,2</sup>, Сердюков В.С.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*i.vladyko@g.nsu.ru](mailto:i.vladyko@g.nsu.ru)

Данная работа демонстрирует преимущества и перспективы исследования теплообмена при спрейном орошении с помощью прозрачной конструкции импактной поверхности. В основе метода лежит плёночный ИТО-нагреватель для одновременного изучения гидродинамических и тепловых характеристик охлаждения. Термография позволяет анализировать температурное поле поверхности, что в следствие значительной неравномерности температуры необходимо для точного измерения теплообмена [1]. На основе термограмм были детально изучены характеристики спрейного охлаждения при различных начальных температурах и расходах жидкости в широком диапазоне тепловых потоков до 5,5 МВт/м<sup>2</sup> для различных форсунок. Продемонстрировано, что высокоскоростная визуализация с обратной стороны прозрачного нагревателя позволяет идентифицировать отдельные капли до их удара о пленку жидкости, что позволяет измерить их размеры и оценить количество капель. Также высокоскоростная видеосъёмка позволяет изучать особенности эволюции пленки жидкости. Так, например, показано подавление кипения при высоких тепловых потоках при формировании сухих пятен в области меньшего потока капель. Комбинированный анализ видео данных вместе с распределением температуры позволил выявить основные механизмы теплопередачи при спрейном охлаждении в широком диапазоне режимных параметров, а также подтвердить корреляции, представленные в литературе [2].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-19-00581).*

## Литература

1. Xia Y., Gao X., Li R. Management of surface cooling non-uniformity in spray cooling // *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol. 180. P. 115819.
2. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // *Int. J. Heat Mass Transf.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 115. P. 1174–1205.

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПУСКНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Воробьев М.А.\*, Рандин В.В., Кашинский О.Н.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

\* [vorobyev@itp.nsc.ru](mailto:vorobyev@itp.nsc.ru)

Повсеместное присутствие двухфазных систем в промышленных установках, а также фундаментальная сложность описания их движения определяет высокий интерес научного сообщества к двухфазным течениям. На сегодняшний день остаются слабоизученными опускные пузырьковые течения при малых скоростях жидкой фазы, например при докритических числах Рейнольдса, или вблизи режима зависания газовой фазы. Важнейшей характеристикой двухфазного потока, определяющей его гидродинамические параметры, является истинное объемное газосодержание  $\phi$ . Значение истинного газосодержания используется в теоретических и полуэмпирических моделях двухфазных течений для предсказания их гидродинамических характеристик. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию локальных характеристик опускного пузырькового газожидкостного потока при малых расходах жидкой фазы. Экспериментальная установка представляет собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу контур. Роль рабочего участка выполняла вертикальная труба с внутренним диаметром 14 мм. Измерения напряжения трения на стенке канала проводилось электродиффузионным методом. Перепад давления вдоль канала измерялся U-образным манометром. В результате исследования показано, что напряжение трения в опускном пузырьковом течении больше чем в однофазном. Относительные пульсации напряжения трения в опускном пузырьковом течении вблизи режима зависания газовой фазы больше чем в однофазном на 20%, что не типично для опускных течений. Измеренные значения перепада давления и напряжения трения на стенке позволили получить значения истинного газосодержания исходя из баланса сил. Показано, что современные корреляции, основанные на модели «потока-дрейфа» [1,2], с большой погрешностью предсказывают истинное газосодержание вблизи режима зависания газовой фазы.

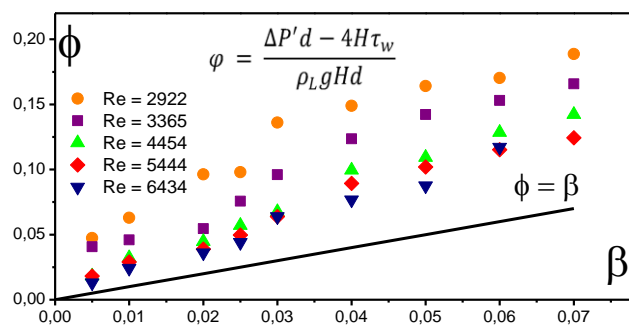


Рис. 1. Истинное газосодержание.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. Goda H. et al. Drift-flux model for downward two-phase flow // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2003. Vol. 46, № 25. P. 4835–4844.
2. Dong C., Hibiki T. Drift-flux parameter modeling of vertical downward gas–liquid two-phase flows for interfacial drag force formulation // Nucl. Eng. Des. Elsevier B.V., 2021. Vol. 378, № April. P. 111185.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕСТРОЙКИ ПОТОКА НА ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Гордиенко М.Р. \*, Кабардин И.К., Правдина М.Х., Какаулин С.В., Яворский Н.И.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[\\*fregat120@yandex.ru](mailto:fregat120@yandex.ru)

Эффект Ранка-Хилша известен уже более 90 лет, но пока не имеет общепринятого научного обоснования. Актуально объяснение нагрева периферийного потока внутри вихревой трубы. В работе [1] было выдвинуто предположение, что нагрев потока происходит за счет перестройки потока в виде каскада гидравлических прыжков, на определенных участках трубы в широком диапазоне режимных параметров, которые сопровождаются нагревом потока.

Один из этапов проверки данной гипотезы является экспериментальное исследование роста периферийной температуры на стенках трубы при отдалении от завихрителя и приближении к «горячему» выходу установки. Работа была разбита на несколько этапов. Первым этапом работы была тарировка датчиков. Проводились сравнения показания сопротивления датчика и показания термометра, который был погружен в ту же емкость с водой, что и термисторы.

Вторым этапом проводились измерения профилей температуры в различных сечениях вихревой трубы длиной 450 мм. Датчики температуры располагались через каждые 20 мм. Датчики расположены заподлицо. Погрешность показания датчиков составляла 0,3 градуса. Время установления режима 15 минут. Измерен набор профилей температур на стенке трубы. Определены зоны с резким градиентом температуры, которые были сопоставлены с областями достижения критической скорости внутри вихревой трубы. Области совпали, что свидетельствует о влиянии перестройки течения на энергоделение в вихревой трубе.

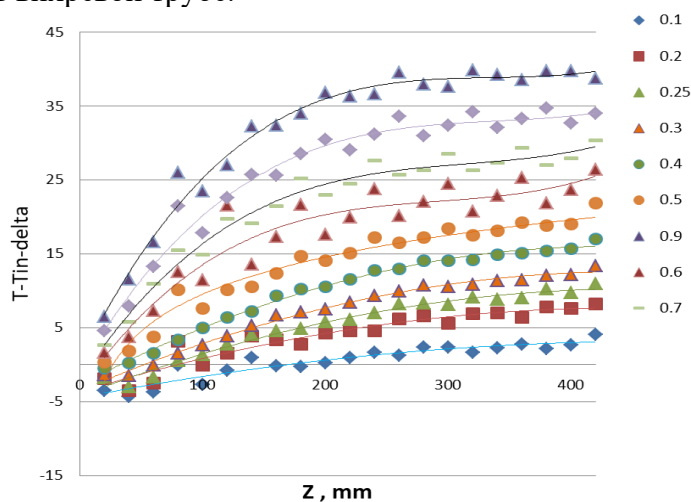


Рис. 1. Профили скорости на стенке трубы круглого сечения.

*Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ 22-29-01262*

## Литература

1. И.К. Кабардин, Н.И. Яворский, В.Г. Меледин, М.Х. Правдина, М. Р. Гордиенко. Сравнительный анализ режимов в трубах Ранка с круглым и квадратным сечением рабочего канала // ПМТФ. – 2020. – Т. 61, № 1, с. 43–52.

# ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ-ЦЕПОЧЕК ПРИ ДВИЖЕНИИ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е.<sup>1,2\*</sup>, Кашинский О.Н.<sup>1</sup>, Чинак А.В.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\*[gorelikova.a@gmail.com](mailto:gorelikova.a@gmail.com)

Пузырьки газа, всплывающие в неподвижной или движущейся жидкости, могут оказывать значительное влияние на теплообмен из-за перемешивания пристенных слоев жидкости. Динамика пузырька может быть нелинейной и сложной, на движение пузырьков влияют геометрия канала, внутренний диаметр капилляра и характеристики жидкости.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению формирования устойчивых структур при всплытии пузырьков жидкости от одиночного капилляра в наклонной трубе в неподвижной жидкости и в потоке. Измерения проводились при углах наклона трубы 30-60° с использованием метода теневой фотографии.

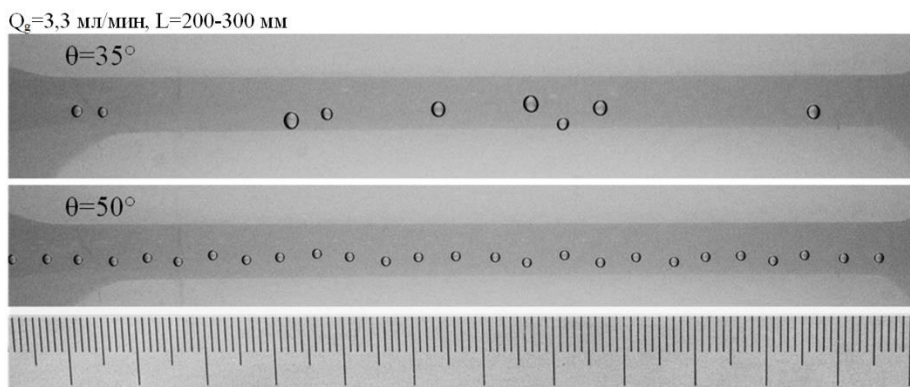


Рис. 1. Движение пузырьков в режимах без образования кластеров ( $\theta = 35^\circ$ ) и с образованием кластеров ( $\theta = 50^\circ$ ) при равном расходе газа ( $Q_g = 3,3$  мл/мин)

При малом угле наклона трубы (30°÷35°) движение пузырьков имеет сложный характер. Пузырьки совершают колебания перпендикулярно направлению движения. В работе [1] аналогичное зигзагообразное движение было показано для пузырьков диаметром более 1 мм. С увеличением угла наклона перпендикулярная составляющая скорости пузырьков значительно уменьшается из-за трения о верхнюю стенку трубы. Это позволяет сформировать устойчивую кластерную структуру – цепочку пузырьков.

Образование цепочек пузырьков и отсутствие коалесценции в этих кластерах оказывает влияние на движение пузырей как в неподвижной жидкости, так и в газожидкостном течении, что может быть использовано в задачах интенсификации теплообмена.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20029 при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области, <https://rscf.ru/project/22-21-20029>.*

## Литература

1. Magnaudet, J., Eames, I. The Motion of High-Reynolds-Number Bubbles in Inhomogeneous Flows // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 2000 – V. 32, no. 1, pp. 659–708.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА POD ДЛЯ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В РАДИАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКЕ

Гореликов Е.Ю.<sup>1,2\*</sup>, Литвинов И.В.<sup>1,2</sup> Шторк С.И.<sup>1</sup>

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\* [gorelikoey@gmail.com](mailto:gorelikoey@gmail.com)

Закрученные струйные течения широко используются в различных областях техники, в том числе в камерах сгорания ракетных и газотурбинных двигателей, газовых горелках и т.д. При высоких величинах закрутки потока стабилизация пламени обеспечивается центральной рециркуляционной зоной, где горячие продукты сгорания возвращаются к устью факела и поджигают свежую топливовоздушную смесь. Такой подход позволяет стабилизировать горения обедненных топливных смесей, что позволяет снизить образование вредных оксидов азота. Турбулентные течения с высокой степенью закрутки, как правило не являются стационарными из-за распада вихря и генерации прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), который служит источником высокоуровневых турбулентных пульсаций [1].

Для выявления вклада прецессии вихревого ядра в общий уровень флуктуаций потока использовался метод разложения на ортогональные моды (Proper Orthogonal Decomposition, POD), который применялся для анализа распределений скорости, полученных методом PIV.

Вклад отдельных мод в кинетическую энергию турбулентности (КЭТ) для числа крутки потока  $S=1,0$  приведены на Рис. 1а. Первые две моды со вкладом 14,5% и 13% близки по своим значениям и значительно превышают вклад остальные. В литературе известно, что именно первые две POD соответствуют эффекту ПВЯ. На Рис. 1б показано пространственное распределение КЭТ, обезразмеренное на квадрат среднерасходную скорости, для числа крутки потока  $S=1,0$ .

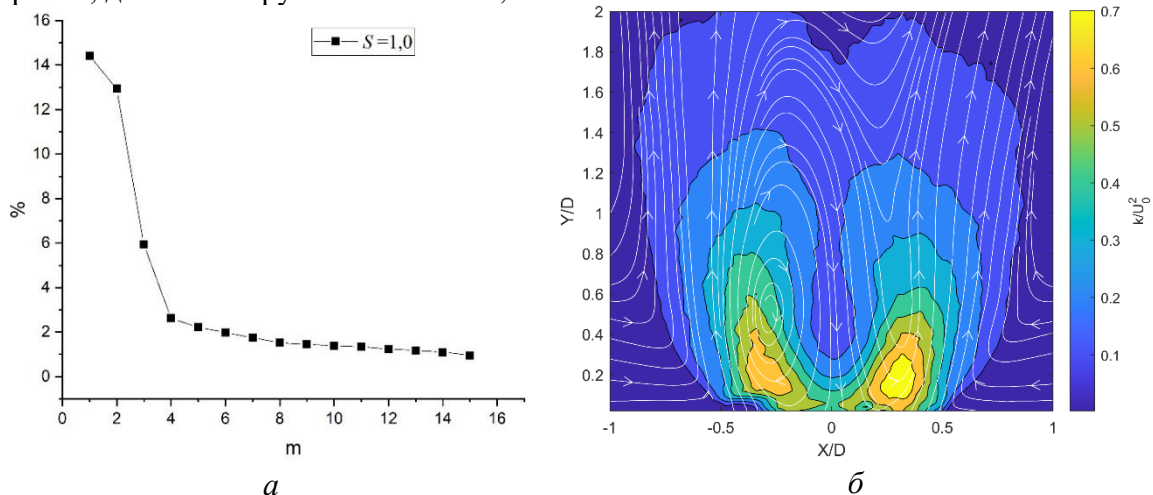


Рис. 1. Результаты POD анализа: а – вклад отдельных POD мод в КЭТ для  $S=1,0$ , б – пространственное распределение КЭТ для  $S=1,0$ .

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00769).

## Литература

1. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. "Swirl Flows", Abacus Press, Tunbridge Wells, UK. (1984).

# ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ УРАВНЕНИЯ КДФ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Гудько А.С.<sup>1,2\*</sup>, Гелаш А.А.<sup>3,4</sup>, Муллыджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Россия*

3) *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*

4) *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

[\\*algudko@gmail.com](mailto:algudko@gmail.com)

В данной работе рассматриваются новые численные подходы реализации метода обратной задачи рассеяния (МОЗР), также известного как нелинейное преобразование Фурье (NFT – nonlinear Fourier transform) для уравнения КдФ. Рассматриваются нелинейные волновые поля, содержащие в себе как дискретный, так и непрерывный спектр. Теоретический анализ обратной задачи рассеяния [1] для уравнения КдФ показал, что численная реализация МОЗР сталкивается с вычислительными сложностями, такими как оперирование с очень большими и очень малыми числами. Поэтому, для устойчивой работы численных алгоритмов мы предлагаем применять высокоточную арифметику. А чтобы справиться с экспоненциальным накоплением ошибок при увеличении числа солитонов, мы предлагаем алгоритмы высокого порядка, основанные на разложении Магнуса [2]. Для примера, сравнение схем второго и шестого порядков оказалась примерно в 2 раз медленнее при аналогичной дискретизации, тогда как точность возрастает более чем в 16 раз, что приводит к увеличению эффективности метода примерно в 9 раз. Высокоточные вычисления представляют собой универсальный метод, позволяющий анализировать большие нелинейные волновые поля с большим числом солитонов даже в присутствии шума, недостижимого для методов низкого порядка (Рис. 1).

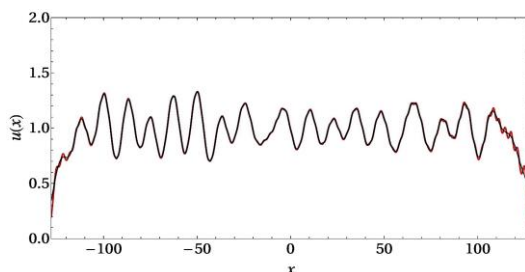


Рис. 1. Пример решения обратной задачи рассеяния для случайного потенциала, содержащего 170 солитонов.

Данный метод был апробирован на различных случайных полях. Эти результаты позволяют исследовать экспериментальные данные различной сложности для исследования распространения поверхностных волн.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. Mullyadzhyanov R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // *Optics Letters*. – 2019. – Т. 44. – №. 21. – С. 5298-5301.
2. Gudko A., Gelash A., Mullyadzhyanov R. High-order numerical method for scattering data of the Korteweg—De Vries equation // *Journal of Physics: Conference Series 1677* (1), 012011, 2020.

# ПРИМЕНЕНИЕ СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ

Гусев Г.Е.<sup>1\*</sup>, Плохих И.А.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

1) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

\* [gusgrigoriev@gmail.com](mailto:gusgrigoriev@gmail.com)

Данное исследование было направлено на применение методов глубокого обучения на базе свёрточных нейронных сетей для предсказания приближённых решений системы уравнений Навье-Стокса для задачи обтекания тела в канале.

В статье [1] была описана архитектура DeepCFD, способная предсказывать поля скорости и давления при обтекании тела в канале, основанная на применении свёрточной нейронной сети, обучаемой на выборке точных численных решений системы уравнений Навье-Стокса. Основным недостатком данного подхода являлось применение регулярной сетки для описания данных о течении, поскольку это приводило к существенному увеличению ошибки вблизи границ объекта сложной формы. Данная проблема решалась использованием методов, способных работать с нерегулярной сеткой, например, графовыми свёрточными нейронными сетями [2].

Предсказания упомянутых моделей основаны на геометрии тела обтекания и подразумевают, что граничные условия остаются постоянными, из-за чего попытки обучать модель на данных с переменными граничными условиями приводят к неудовлетворительному результату. В ходе работы мы усовершенствовали архитектуру, добавив возможность учитывать переменные граничные условия, а также предсказывать поле температуры в канале. Полученные модели можно применять для снижения времени вычислений в прикладных задачах, например, в задачах оптимизации.

## Литература

1. Ribeiro M. D. et al. DeepCFD: Efficient steady-state laminar flow approximation with deep convolutional neural networks //arXiv preprint arXiv:2004.08826. – 2020;
3. Chen J., NACHEM E., Viquerat J. Graph neural networks for laminar flow prediction around random two-dimensional shapes // Physics of Fluids 33, 123607 – 2021



## **УВЕЛИЧЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СБОРА ПРОДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ X**

Дикаев Е.С.<sup>1</sup>, Девлешова Н.А.<sup>1,2</sup>

1) ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Россия

2) ООО «Газпромнефть НТЦ», г. Тюмень, Россия

Реинжиниринг – это комплексный подход к оценке объектов наземной инфраструктуры, целью которого является оптимизация технологического процесса, повышение экономических показателей проекта и снижение капитальных и операционных затрат. На месторождении X действующая наземная инфраструктура имеет недостаточную пропускную способность для взятия полного потенциала добычи. Вследствие чего предложен ряд оптимизационных работ, позволяющих повысить экономические показатели проекта путем реинжиниринга системы сбора продукции.

Наземная инфраструктура месторождения X представляет собой сеть нефтегазосбора (НГС), водоводов высокого давления для системы поддержания пластового давления и установку подготовки нефти и газа (УПН). Действующая система сбора продукции описана в интегрированной модели (ИМ), построенной в ПО GAP Petroleum Experts. На основе ИМ проведен анализ и выявлено превышение граничного давления в 40 атм для системы НГС на более удаленных от УПН кустах скважин и превышение линейного давления на концевых участках трубопроводов, выявлен потенциал по увеличению добычи за счет снижения давления в системе трубопроводного транспорта нефти со скважин.

В данной работе рассмотрены альтернативные варианты увеличения пропускной способности системы сбора нефти и газа (МФНС, ДНС, лупинги, УПОГ и др.), выполнено их сравнение и проведен факторный анализ. Также проводилась комплексная оценка сооружений подготовки и внешнего транспорта продукции с учетом роста добычи жидкости в каждом сценарии.

По результатам проведенных расчетов выявлены мероприятия по приращению добычи. Проведена технико-экономическая оценка на основании гидравлических расчетов в интегрированной модели и экономических показателей в финансово-экономической модели, выбран наиболее оптимальный вариант обустройства.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИСТЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ В СНАРЯДНОМ ТЕЧЕНИИ В ПУЗЫРЬКОВОЙ КОЛОННЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Евдокименко И.А.<sup>1,2\*</sup>, Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Блель В.<sup>2</sup>, Джентрик К.<sup>2</sup>, Си-Ахмед Э-К.<sup>2</sup>,  
Легран Д.<sup>2</sup>, Дешандоль Э.<sup>2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, Saint-Nazaire, France*

\*[evdokimenko96@ngs.ru](mailto:evdokimenko96@ngs.ru)

Фотобиореакторы — это установки, предназначенные для промышленного производства микроводорослей. Прохождение пузырьков воздуха, обогащенных CO<sub>2</sub>, в этих системах позволяет создать очень тонкую жидкую пленку между пузырьком и стенкой фотобиореактора, что позволяет интенсифицировать процесс культивирования с точки зрения массопереноса, гидродинамики и, впоследствии, биологической кинетики, с целью повышения производительности клеток и энергоэффективности. Целью данной работы является изучение пристенного градиента скорости и толщины плёнки жидкости во время прохождения тейлоровского пузырька с помощью электрохимического и кондуктометрического методов, синхронизированных с методом теневой съемки.

Экспериментальная установка представляет собой оргстеклянный канал квадратной геометрии со стороной 4 мм и высотой 250 мм. Жидкость подавалась с постоянным расходом из резервуара под давлением в диапазоне чисел Рейнольдса от 0 до 28. Ввод газа находился у основания канала. Расход контролировался с помощью массового расходомера в диапазоне чисел Рейнольдса от 170 до 270. Эксперименты проводились для двух размеров пузырей с эквивалентным диаметром 4,2 и 6,7 мм. Размер пузырей варьировался с помощью изменения диаметра капилляра, через который вводилась дисперсная фаза. Для измерения распределения трения на стенке и толщины пленки жидкости использовались электрохимический и кондуктометрический методы. Пара круглых платиновых датчиков диаметром 0,4 мм располагалась на расстоянии 25 микрон друг от друга и на высоте 190 мм от основания канала. Визуализация течения была осуществлена с помощью съемки цифровой камерой. Методы измерения пристенных явлений и съемка камерой были синхронизированы между собой через триггерный сигнал.

Были получены результаты по распределению трения на стенке и изменению толщины пленки жидкости в квадратном канале. оказано, что для тейлоровских пузырей с диаметром 6,7 мм наблюдается существование двух пиков напряжения трения, которые соответствуют «носику» и «спинке» пузыря. Минимальная толщина пленки достигает 10 микрон. Пузыри с эквивалентным размером 4,2 мм, также имеют 2 пика трения, которые приходятся на точки соприкосновения пузыря с каналом.

## Литература

1. Thobie, C., Gadoin, E., Blel, W., Pruvost, J., Gentric, C., 2017. Global characterization of hydrodynamics and gas-liquid mass transfer in a thin-gap bubble column intended for microalgae cultivation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 122, 76–89.
2. Tihon, J., Pěnkavová, V., Vejražka, J., 2014. Wall shear stress induced by a large bubble rising in an inclined rectangular channel. *International Journal of Multiphase Flow* 67, 76–87.

# ВЛИЯНИЕ МЕЖУСТУПНОГО РАССТОЯНИЯ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ДВУХФАЗНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Евдокименко И.А.<sup>1,2\*</sup>, Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Блель В.<sup>2</sup>, Джентрик К.<sup>2</sup>, Си-Ахмед Э-К.<sup>2</sup>,  
Легран Д.<sup>2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, Saint-Nazaire, France*

[\\*evdokimenko96@ngs.ru](mailto:evdokimenko96@ngs.ru)

Современные высокоэнергетические установки представляют собой систему, состоящую из множества сложных элементов, обеспечивающих правильное функционирование технологического аппарата. Ввиду многообразия элементов и различных процессов, протекающих в таких установках, создание достоверной математической модели для описания системы является сложной задачей, требующей большого количества эмпирических данных, полученных на более простых модельных конфигурациях. Канал с каскадом внезапных расширений и сужений является одной из таких конфигураций.

Целью данной работы является оценка влияния ввода газовой фазы в виде пузырьков на гидродинамическую структуру отрывного течения в прямоугольном канале с серией внезапных расширений.

Исследование проводилось в прямоугольном канале из оргстекла с геометрическими размерами 200x1000x20 мм. Для создания системы внезапных расширений и сужений в канал была установлена плоская оргстеклянная вставка с размерами 200x600x8 мм и поперечная пластина прямоугольного сечения длиной 20 мм с высотой 8 мм. Высота канала  $H_1$  до расширения составляет 12 мм, после расширения  $H_2$  равна 20 мм ( $H=8$  мм,  $ER=1,6$ ). Для проведения оптических измерений локальной гидродинамической структуры течения между двумя уступами, использовался PLIF метод. Работа проводилась при ранжировании расстояния между ступенями от  $2,5H$  до  $7,5H$  при  $Re_{ж}=5000$  и при постоянном расходе газа 900 мл/мин. Расходное газосодержание в канале – 3%. Средний размер пузырей составлял 3 мм. Дополнительные эксперименты проведены в однофазном потоке при том же расходе жидкости.

При проведении оптических измерений лазерный нож был расположен параллельно уступу. Данная конфигурация позволяет определить закономерности распределения профилей скорости как для различных расстояний от ступеньки, так и по ширине канала.

В работе были получены результаты по распределению скорости жидкости между двумя уступами для однофазного и для двухфазного пузырькового потока для продольного сечения на высоте равной середине высоты ступени. Полученные результаты позволяют определить степень влияния дисперсной фазы на локальные гидродинамические характеристики потока.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. V. I. Terekhov, N. I. Yarygina, and R. F. Zhdanov, "Heat Transfer in Turbulent Separated Flows in the Presence of High Free-Stream Turbulence," *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2003. 46, 4535–4551

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСУНКИ РИФОРМЕРА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Жерибор М. О.<sup>1\*</sup>, Хребтов М. Ю.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*lyfoore@gmail.com](mailto:lyfoore@gmail.com)

В данной работе была предложена и исследована модель форсунки для риформера дизельного топлива [1], использующейся для получения водорода. Предложенная модель имеет два подводящих канала, позволяющих создать две области внутри форсунки с разными знаками закрутки. Данная конфигурация приводит к тому, что на разделительной кромке, между областями образовывается область сильного сдвигового напряжения, что ведет к генерации турбулентности и, следовательно, интенсификации перемешивания и распада дизельного топлива.

Численное моделирование производилось в открытом программном коде OpenFOAM [1] методом RANS с использованием модели турбулентности  $k-\omega$ -SST в сжимаемой постановке. В результате расчетов были получены распределения продольных и окружных скоростей, амплитуды сдвига и массовой доли пара дизельного топлива. На графике распределения сдвиговых напряжений (Рис. 1) наблюдаются области интенсивного сдвига во внешней и внутренней части форсунки, а также на разделительной кромке. На графике распределения окружной компоненты видно, что на выходе из форсунки средняя окружная скорость гасится за счет разных знаков начальной закрутки, что приводит к более равномерному потоку на выходе из сопла. По распределению массовой доли пара (Рис. 1) можно заметить, что вблизи выхода из форсунки достигается равновесная концентрация паровой фазы топлива, что говорит об эффективности предложенной модели форсунки.

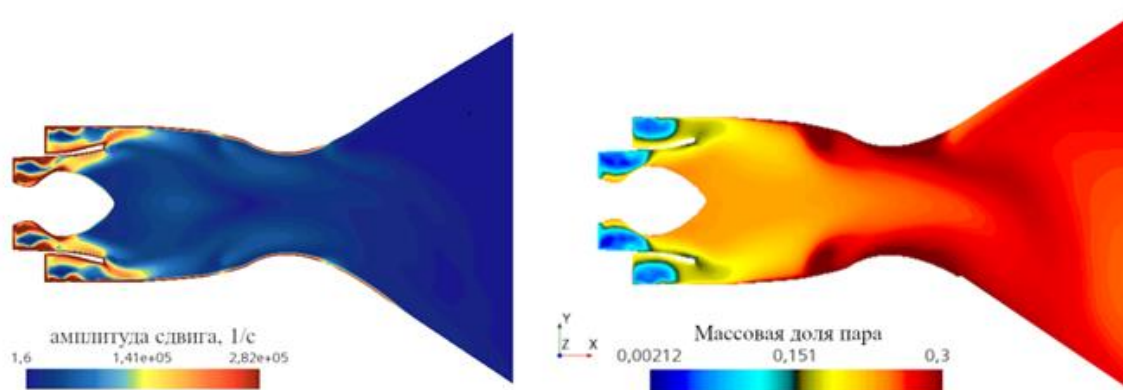


Рис. 1. Амплитуда сдвигового напряжения (слева), массовая доля пара топлива(справа).

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН*

## Литература

1. Rogozhnikov V. N. et al. Design, scale-up, and operation of a Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2</sub>- $\delta$ - $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeCrAl alloy wire mesh honeycomb catalytic module in diesel autothermal reforming //Chemical Engineering Journal. – 2019. – Т. 374. – С. 511-519.
2. <https://www.openfoam.com>

# КРИЗИС ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ КОНЕЧНОЙ ВЫСОТЫ

Жуков В.И.<sup>1\*</sup>, Павленко А.Н.<sup>2</sup>

1) Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

2) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

\* [vizh@inbox.ru](mailto:vizh@inbox.ru)

Представлены результаты измерения и расчета по модернизированной модели Зубера [1] критической плотности теплового потока (КТП) при пузырьковом кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на плоской поверхности. Известно, что Зубер сформулировал основные теоретические положения своей модели для расчета КТП на бесконечной горизонтальной поверхности, исходя из анализа наблюдений на трубке, обогреваемой паром. В более поздней работе [2], где уточнялась теория Зубера, также основные визуальные наблюдения проводились на горизонтальных цилиндрах. В данной работе использовались слои н-додекана высотой 1.7; 2.5; 4; 10 мм. В слое высотой 1.7 мм наблюдался кризис осушения поверхности, в слоях большей высоты наблюдался обычный гидродинамический кризис пузырькового кипения. В режимах развитого пузырькового кипения высота слоя увеличивалась. Двухфазный слой представлял собой пену, в которой по углам квадратной прямоугольной решетки поднимались «паровые столбы» (рис. 1). В расчетах пену рассматривали как изотропную однородную систему с паросодержанием  $\varepsilon$ . Предложенная модель хорошо описывает экспериментальные данные авторов по КТП при пузырьковом кипении жидкости.



Рис. 1. Фотография «паровых столбов», наблюдавшиеся в тонком слое н-додекана при пузырьковом кипении: высота слоя  $h = 2.5$  мм ( $h/l_\sigma = 1.45$ ), давление в объеме  $P_s = 20$  кПа ( $P_s / P_{cr} = 1.1 \cdot 10^{-2}$ ),  $q = 108$  кВт / м<sup>2</sup>,  $(T_w - T_s) = 42.1$  К.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования России под руководством ведущих ученых (№ 075-15-2021-575).*

## Литература

1. Zuber N., On the Stability of Boiling Heat Transfer // Trans. ASME (1958) 80, № 3, p.711–720.
2. Lienhard J.H., Dhir V.K., Hydrodynamic Prediction of Peak Pool-Boiling Heat Fluxes from Finite Bodies // Trans. ASME J. Heat Transfer (1973) 95 p.152–158.

# КИПЕНИЕ В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ

Зайцев Д.В.<sup>1\*</sup>, Белослудцев В.В.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

\*[zaitsev@itp.nsc.ru](mailto:zaitsev@itp.nsc.ru)

В работе выполнены систематические исследования динамики паровых пузырей и теплообмена при кипении в мини- и микроканалах высотой от 0.2 до 3 мм при различном недогреве рабочей жидкости. Эксперименты проводились на нагревателях размером 3x3 и 10x10 мм в двух основных конфигурациях – с однородным нагревом по ширине канала (ширина потока совпадает с шириной нагревателя) и с неоднородным нагревом (ширина потока рабочей жидкости больше ширины нагревателя). Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки (до 1 кВт/см<sup>2</sup> с нагревателя 10x10 мм). При помощи высокоскоростной камеры (с частотой съемки до 775 000 кадров в секунду) выполнена визуализация процесса кипения. В качестве рабочих жидкостей использовалась вода, растворы ионных жидкостей, а также диэлектрическая жидкость HFE-7100.

Установлено, что, как в широком канале (неоднородный нагрев по ширине канала), так и в узком канале (однородный нагрев), с увеличением высоты канала в диапазоне 0.2 – 3 мм интенсивность тепло-обмена и критический тепловой поток существенно возрастают, Рис. 1а. Выявлено снижение критического теплового потока для канала с однородным нагревом (узкий канал), Рис. 1а, что, по-видимому, вызвано более стесненными условиями течения в узком канале. Для заданного расхода жидкости и высоты канала, критический тепловой поток на нагревателе 3x3 мм существенно превышает тепловой поток на нагревателе 10x10 мм (Рис. 1б).

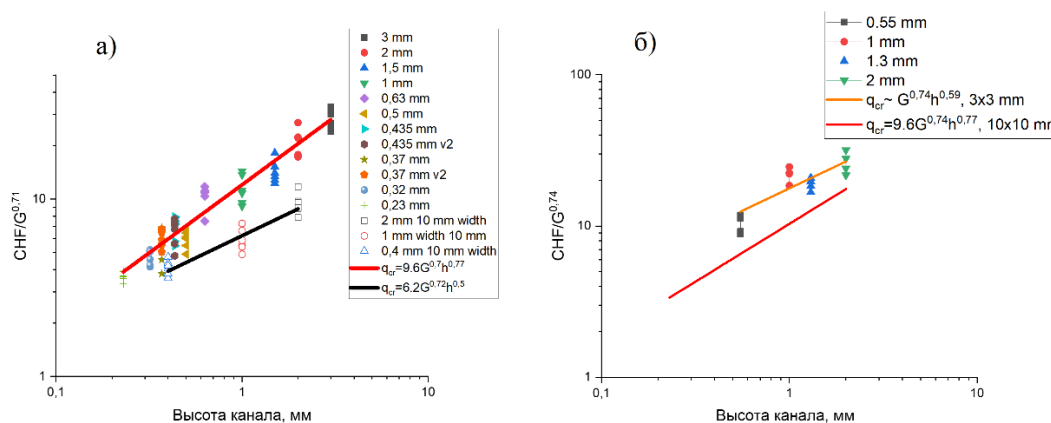


Рис. 1. (а) Влияние высоты канала на приведенный критический тепловой поток для однородного (черная линия) и неоднородного (красная линия) нагрева. Вода, размер нагревателя 10x10 мм, CHF – критический тепловой поток, G – массовая скорость (кг/м<sup>2</sup>с), h – высота канала.

(б) Сравнение критического теплового потока на нагревателе 3x3 мм и 10x10 мм (нижняя красная линия). Вода, неоднородный нагрев по ширине канала, CHF – критический тепловой поток. G – массовая скорость (кг/м<sup>2</sup>с), h – высота канала.

*Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 22-49-08018).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ АТТРАКТОРОВ В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Замараева Е.В.<sup>1,2</sup>, Шмакова Н.Д.<sup>1,2</sup>

1) *Институт гидродинамики им М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\* [e.ermanyuk@nsu.ru](mailto:e.ermanyuk@nsu.ru)

Данная работа посвящена исследованию внутренних волн, генерируемых в океане при взаимодействии приливных течений с подводными горными хребтами. В замкнутой системе, когда имеют место два параллельных горных хребта, как например в Лусонском проливе, внутренние волны могут отражаться от поверхностей, и в силу дисперсионного соотношения, фокусировать энергию на т.н. аттракторе [1].

Целью данной работы является экспериментальное исследование нелинейных эффектов, возникающих при образовании аттрактора. Эксперименты были выполнены на установке в Институте Гидродинамики, представляющей из себя резервуар из оргстекла с наклонными стенками по бокам и совершающей колебания пластиной - генератором волн -, разделяющей резервуар на две равные части. Для визуализации волн использовался синтетический шлирен-метод.

Анализ данных производился с помощью приложения PIVLab в среде Matlab. Исследовано возникновение триадного резонанса при различных амплитудах колебания генератора посредством построения частотно-временных характеристик, а также его влияние на разрушение аттрактора. Вычислен энергетический спектр для волн в системе при разных амплитудах колебания. Показано, что при больших амплитудах возникает волновая турбулентность, а на умеренных амплитудах наблюдается особый переходный режим с преобладанием стоячих волн. Также было произведено сравнение частотного спектра для шлирен и PIV метода. Установлено, что при данных длинах волн наиболее чувствительным методом является шлирен-метод.

*Работа выполнена при финансировании РФФ 23-41-00090*

## Литература

1. Echeverri, P., Yokossi, T., Balmforth, N. J., Peacock, T. Tidally generated internal-wave attractors between double ridges // J. Fluid. Mech. 2011. V. 669. PP. 354-374.

# ДИНАМИКА РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Зорькина А. И.<sup>1,2\*</sup>, Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*a.zorkina@g.nsu.ru](mailto:a.zorkina@g.nsu.ru)

Кипение – эффективный способ теплоотвода, широко использующийся во многих областях промышленности. В существующих корреляциях для тепловой стадии роста пузыря диаметр пропорционален квадратному корню от времени. Лабунцов и Ягов вывели зависимость, учитывающую испарение микрослоя, образовавшегося между основанием пузыря и поверхностью нагрева, работающую в широком диапазоне изменения числа Якоба. В настоящей работе для увеличения пространственных и временных масштабов задачи эксперимент был проведён в условиях пониженной гравитации на МКС, позволяя подробнее изучить быстротечные процессы кипения. В работе исследуется зависимость диаметра парового пузыря от времени при различных параметрах эксперимента.

Экспериментальная ячейка заполнена рабочей жидкостью FC-72. Паровой пузырь инициализируется лазерным импульсом на поверхности нагревателя, в качестве которого служит слой хрома толщиной 800 нм, нанесённый на прозрачный в ИК – диапазоне кристалл фторида бария. Установка снабжена высокоскоростными инфракрасной и чёрно-белой камерами. Электрод и насос, создающий сдвиговый поток, используют для изучения эффективных методов удаления пузырей с поверхности. В ходе эксперимента варьируются следующие параметры: давление жидкости, температура недогрева, тепловой поток от нагревателя, время ожидания - время между активацией нагревателя и включением лазера.

Выявлена зависимость скорости роста пузыря от параметров эксперимента: диаметр увеличивается с уменьшением давления, увеличением времени ожидания и уменьшением недогрева. Степень  $t$  увеличивается с уменьшением времени ожидания и изменяется в диапазоне от 0,49 до 0,8. Экспериментальные данные хорошо согласуются с корреляцией Ягова и Лабунцова.

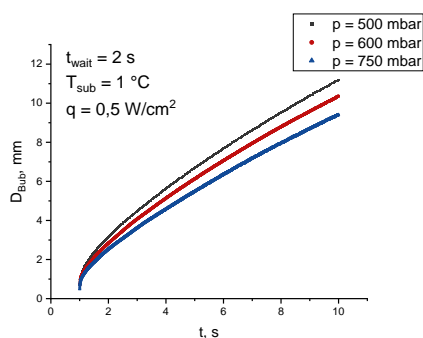


Рис. 1. Влияние давления жидкости на скорость роста пузыря.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>*

## Литература

1. Лабунцов Д. А., Ягов В. В. Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374 с.



## МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ «КОТ»

Иванов Р.С.<sup>1,2\*</sup>, Мурахтин С.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*[r.ivanov4@g.nsu.ru](mailto:r.ivanov4@g.nsu.ru)*

В институте ядерной физики в настоящее время введена в эксплуатацию установка КОТ [1] (компактный осесимметричный тороид) — открытая магнитная ловушка, на базе которой проводятся поддерживающие эксперименты для установки ГДМЛ [2]. Целью создания установки КОТ является отработка принципов диамагнитного удержания плазмы при помощи обращения ведущего магнитного поля азимутальным током — FRC (Field Reversed Configuration) [3]. Для его получения в двухкомпонентную мишенную плазму температурой 50эВ инжектируются мощные атомарные пучки, при взаимодействии которых с мишенной плазмой накапливается необходимая популяция быстрых ионов. Целью экспериментов на установке является развитие методов создания и стабилизации компактного плазменного образования. Важным элементом диагностики плазмы являются магнитные зондовые и диамагнитные измерения [5]. Измерение диамагнетизма плазмы позволяет контролировать ее энергосодержание для оптимального захвата ионов на ларморовскую орбиту и накопления азимутального тока. Магнитные зондовые измерения предназначены для определения положения и мод колебаний FRC и мишенной плазмы в эксперименте на установке КОТ.

Целью данной работы является построение теоретической модели необходимой для процедуры восстановления энергосодержания мишенной плазмы из показаний диамагнитных петель, а также разработка математического аппарата для обработки и расшифровки сигналов с набора азимутальных магнитных зондов (катушек Мирнова). В результатах работы представлены данные об энергосодержании плазмы, полученные с использованием диамагнитных петель, а также измерения и расшифровка модового состава азимутальных колебаний плазмы, при помощи кросс-спектрального метода обработки сигналов с катушек Мирнова.

*Работа выполнена в рамках госзадания «Осесимметричные открытые ловушки с улучшенным продольным удержанием (FWGM-2022-0017)»*

### Литература

1. A.A. Ivanov et al., SUSTAINMENT OF HIGH-BETA MIRROR PLASMA BY NEUTRAL BEAMS // Plasma Physics and Technology 5(3):125-127, 2018.
2. A.Beklemishev, et al., The BINP Road Map for Development of Fusion Reactor Based on linear Machine // Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) AIP Conf. Proc. 1771, 080001-1–080001-9; doi: 10.1063/1.4964240.
3. Tuszewski. M. Field reversed configurations // Nuclear Fusion, November 1988. 28. 11. 2033. 10.1088/0029-5515/28/11/008.
4. P.P Deichuli et al., Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating // Rev Sci. Instrum. 86, 113509 (2015).
5. П.А. Багрянский, В.Н. Бочаров, П.П. Дейчули и др. Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инжекции мощных атомарных пучков. // Препринт ИЯФ 93-70 (1993).

# ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО РЕЖИМА ОБТЕКАНИЯ ГИДРОПРОФИЛЯ С ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

Ивашенко Е.И.<sup>1,2\*</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*[edauengauer@mail.ru](mailto:edauengauer@mail.ru)*

Возникновение разного рода неустойчивостей, в том числе вызванных кавитацией, в проточных трактах гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Поэтому на сегодняшний день актуальной задачей, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для развития нового, более эффективного гидравлического оборудования, является развитие методов управления кавитирующими течениями. На сегодняшний день широко известны активные [1] и пассивные [2] способы управления. Так в недавней работе [3] был описан экспериментальный метод подавления кавитации на гидропрофиле при малых углах атаки. Было показано, что при малых углах атаки этот метод оказывается крайне эффективным при различных скоростях инъекции  $U_{inj}$ .

В данной работе рассматривается кавитационное течение около модифицированного гидропрофиля при угле атаки  $9^\circ$  и различных числах Рейнольдса ( $Rec = 1.19-1.3 \times 10^6$ ), рассчитанному по хорде крыла  $C = 0.1$  м. Модификация крыла представляет собой наличие небольшого выступа (высотой 0.8 мм) на расстоянии  $x/C = 0.6$  от передней кромки крыла, через который осуществлялась тангенциальная подача жидкости. Все расчеты проводятся в рамках метода крупных вихрей с использованием вычислительного кода OpenFoam, для замыкания уравнений Навье-Стокса используется динамическая модель с дополнительным транспортным уравнением на кинетическую энергию подсеточных масштабов. Вычислительная сетка содержит около  $20.1 \times 10^6$  вычислительных узлов. Для моделирования кавитации используется модель Шнерра-Сауэра. В рамках данной работы будет изучено влияние стационарных внешних возмущений на зарождение и развитие кавитации и турбулентную структуру потока при различных скоростях инъекции. На основе полученных численных результатов будут сделаны выводы об эффективности данного метода управления кавитационными течениями и определен диапазон режимов течения, для которого данный метод целесообразно применять.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны вычислительному кластеру «Каскад» за предоставленные вычислительные ресурсы.*

## Литература

1. Тимошевский М.В. и др. Управление кавитацией на двумерном гидрокрыле посредством непрерывной тангенциальной инъекции //Изв. Том. политех. универ. Инжинир. георесур. – 2016. – Т. 327. – №. 12. – С. 75-90.
2. Kadivar E. et al. Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems //Phys. of Fluids. – 2020. – Т. 32. – №. 5. – С. 052108.
3. Timoshevskiy M. V. et al. Manipulating cavitation by a wall jet: Experiments on a 2D hydrofoil //Intern. J. of Mult. Flow. – 2018. – Т. 99. – С. 312-328.

# ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРИЗАЦИИ РАЗВИТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ

Иващенко В.А.<sup>1,2\*</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*ivashchenko@itp.nsc.ru](mailto:ivashchenko@itp.nsc.ru)

Трубопроводный вид транспортировки природных ресурсов в настоящее время является основным. Газ под давлением движется по трубам, теряя импульс и энергию при преодолении силы трения. Поэтому для обеспечения бесперебойной поставки газа необходимо сооружать специальные компрессорные станции на протяжении всего трубопровода. При этом снижение силы трения в трубопроводе хотя бы на несколько процентов обеспечит существенную экономическую выгоду. Обычно для решения этой задачи используются методы, основанные на частичной ламинаризации турбулентного потока путем разрушения или предотвращения образования вихревых структур. Недавно авторам работ [1, 2] с использованием различных методов управления потоком удалось добиться полной ламинаризации развитого турбулентного течения в канале круглого поперечного сечения и тем самым снизить гидравлическое сопротивление до уровня ламинарного течения.

В данной работе это явление исследуется с помощью прямого численного моделирования в открытом вычислительном пакете Nek5000, который ранее уже был апробирован при решении ряда задач [3,4]. Рассматривается развитое турбулентное течение в цилиндрическом канале с безразмерным радиусом  $R = 1$  и длиной  $18R$  при числе Рейнольдса  $Re = U_b R / \nu = 2500$ . На выходе из канала задавались свободные граничные условия, а на входе – условия развитого турбулентного течения, предварительно найденные во вспомогательном расчете аналогичного течения в канале длиной  $3R$  с периодическими граничными условиями. В качестве метода управления рассматривается пассивный метод в виде системы сот (honeycombs) [2], расположенной на расстоянии от  $4R$  до  $6R$  от входной границы канала.

Рассматривались три конфигурации системы сот и анализировалась их эффективность. Получены распределения профилей скорости, касательного напряжения на стенке, давления и членов уравнения баланса кинетической энергии турбулентности.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны Институту теплофизики СО РАН и Новосибирскому государственному университету за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера “Каскад”.*

## Литература

1. Kühnen J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // Nature Physics. – 2018. – Т. 14. – №. 4. – С. 386-390.
2. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of pipe flow by means of 3d-printed shaped honeycombs // Journal of Fluids Engineering. – 2019. – Т. 141. – №. 11.
3. Zaripov D. et al. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – Т. 923.
4. Zaripov D. et al. Reverse flow phenomenon in duct corners at a low Reynolds number // Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 8. – С. 085130.

# ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В НАНОПЛЁНКАХ В ДВУМЕРНОМ И ТРЕХМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ С УЧЁТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ГРАНИЦ (МОДЕЛЬ МГТУ)

Инь Ф. \*, Чжэн Ц.

*МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

*[\\*yinfeincepu@gmail.com](mailto:yinfeincepu@gmail.com)*

Анализ на основе транспортной теории Больцмана показывает, что возникновение размерного эффекта у теплопроводности тонких пленок связано с уменьшением времени релаксации или длин свободного пробега фононов (колебаний решетки) в плёнке. В данной работе впервые использована статистическая модель шероховатости поверхности для аппроксимации длин свободного пробега фононов внутри тонких пленок в двух и трех измерениях.

Чтобы однозначно установить влияние шероховатости на длины свободного пробега фононов, в данной работе отдельно рассматриваются баллистические режимы переноса тепла, как в поперечном, так и в продольном направлениях. Это значит, что изучаемый диапазон толщин  $h$  плёнок соответствует значениям параметра Кнудсена  $\text{Kn}_h = l_\infty / h \ll 1$ , а длины плёнок  $L$  – не менее  $\text{Kn}_L = l_\infty / L > 1$ . В рамках сформулированных приближений учитываются взаимодействия фононов только с шероховатыми поверхностями плёнок. Существующие в настоящее время экспериментальные данные [1], полученные для нанонитей, показывают, что теплопроводность сильно зависит от высоты  $\sigma$  и длины  $l_r$  шероховатостей. Таким образом, в используемой нами модели неровности шероховатости характеризуются безразмерной величиной  $\sigma / l_r$ . Так как точное воспроизведение шероховатой поверхности невозможно, используется существующая статистическая модель шероховатости, развитая для анализа рассеяния упругих и электромагнитных волн [2,3]. Длины свободного пробега фононов в трехмерной нанопленке также получены с помощью двумерных проекций траекторий движения фононов в различных плоскостях.

Согласно расчетам, длины свободного пробега фононов в нанопленках немного больше толщины пленки. По мере увеличения толщины и длины пленки, длины свободного пробега фононов увеличиваются. Сравнивая двумерные нанопленки одинаковой толщины с трехмерными, можно установить, что длины свободного пробега фононов в трехмерных нанопленках немного больше, чем в двумерных.

## Литература

1. Lim J. et al. Quantifying Surface Roughness Effects on Phonon Transport in Silicon Nanowires // *Nano Lett.* (2012) **12**, no. 5, p. 2475–2482.
2. Ogilvy J.A. Wave scattering from rough surfaces // *Rep. Prog. Phys.* (1987) **50**, no. 12., p. 1553–1608.
3. Bass F.G., Fuks I.M. Wave scattering from statistically rough surfaces. New York: Pergamon Press. (1979) 527 p.

# ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШЕРОХОВАТОСТИ НА РЕЖИМЫ СОУДАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ С ТВЕРДЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.

*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

*[\\*agi2@tpu.ru](mailto:*agi2@tpu.ru)*

Взаимодействие капель жидкостей с твердыми частицами достаточно часто реализуется во многих практических приложениях [1–3]: смешивающие системы, газопарокапельные технологии, пожаротушение, топливные системы, теплообменные и очистные агрегаты и др. К настоящему времени не разработана теория взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц, так как пока достаточно много факторов остаются неизученными экспериментально, например, влияние на характеристики соударений свойств твердых поверхностей, форм капель и частиц, углов атаки и др. При этом изучаемые параметры варьируются в ограниченных диапазонах с учетом возможностей экспериментальных установок, которые не всегда покрывают диапазоны, соответствующие технологическим условиям. Как следствие, известные математические модели не могут полностью описать все потенциально значимые условия, эффекты и факторы, влияющие на режимы и последствия соударений капель жидкостей и твердых частиц. Цель работы – установление основных характеристик процессов взаимодействия капель дистиллированной воды с металлическими частицами при варьировании шероховатости поверхности.

Параметры среднеарифметического отклонения профиля поверхности варьировались в типичном для практических приложений диапазоне 0.05–39 мкм. Установлены режимы соударения капель и частиц, характеристики вторичных жидкостных фрагментов, а именно: агломерация и разделение растяжением. Построены карты режимов взаимодействия капель и частиц. Определено влияние характеристик шероховатости на смещение границ режимов взаимодействия на режимных картах. В частности, установлено, что увеличение среднего арифметического отклонения профиля поверхности с 0.05 мкм до 39 мкм приводит к смещению границы между режимами агломерация и разделение растяжением практически на 50% в сторону меньших критических чисел Вебера. Получены математические выражения для описания границ режимов взаимодействия капель и частиц.

*Исследования выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект 18-71-10002-П, <https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>).*

## Литература

1. Pizziol B., Costa M., Panão M.O., Silva A. Multiple impinging jet air-assisted atomization // Exp. Therm. Fluid Sci. (2018) 96, p. 303–310.
2. Yang C., Jeong J., Kim Y., Bang B., Lee U. Numerical simulation of a circulating fluidized bed combustor and evaluation of empirical models for estimating solids volume fraction // Powder Technol. (2021) 393, p. 786–795.
3. Xia J., Zhang Q., He Z., Wang J., Liu R., Qian Y., Ju D., Lu X. Experimental study on diesel's twin injection and spray impingement characteristics under marine engine's conditions, Fuel. (2021) 302, 121133.

# ОЦЕНКА УМЕНЬШЕНИЯ АДГЕЗИИ ЛЬДА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОСТРУКТУРАМИ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Какаулин С.В. \*, Кабардин И.К., Гордиенко М.Р., Мухин Д. Г., Зуев В.О.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[kakaulin\\_sergeri@mail.ru](mailto:kakaulin_sergeri@mail.ru)*

Адгезия льда является одним из основных критериев оценки противообледенительных свойств разрабатываемых материалов. Существует множество методов определения адгезии льда, кроме того, трудно определить точную прочность сцепления материала со льдом. В результате проведения обзора установлено, что более низкие значения силы указывают на лучшие противообледенительные свойства материала. Обзор методов показал, что испытания по определению адгезии льда можно разделить на две основные категории: прямое механическое испытание (с помощью метода горизонтального и вертикального сдвига, а также метода растяжения) и испытание центробежной силой. В первом случае сила прикладывается непосредственно ко льду, во втором – центробежная сила отрывает лед от материала.

Цель работы провести измерения адгезии льда к выбранным поверхностям и к пластику, из которого изготавливались лопатки с использованием центробежной силы.

Для создания центробежной силы была выбрана угловая шлифовальная машина (УШМ), редуктор и двигатель которой приводят в движение диск с тестируемыми деталями. Диск диаметром 400 мм с отверстиями для крепления подложек. Подложки, предназначенные для закрепления пленок с различными микроструктурами. Лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР), для регулировки скорости вращения диска УШМ.

Нанесение льда происходило в климатической трубе сезонного типа при температурах от 0 до минус 30 °С. Обледенение тестового материала производилось в течении 20 мин. Толщина льда варьировалась от 3 до 10 мм. Вес льда варьировался от 8 до 40 граммов.

Экспериментально показано, что адгезия от исследуемых покрытий и от материала крыла имеет близкие значения, однако адгезия для покрытий в виде столбиков с нанотравой дают значения адгезии меньше на 25–30 %, чем для материала, из которого изготовлены элементы лопастей ветрогенераторов, что делает их перспективными для антиобледенительных систем.

## Литература

1. V. L. Okulov et. al. Influence of nano- and micro-roughness on vortex generations of mixing flows in a cavity// Physics of Fluids. - 2022. - Vol. 34. - 032005
2. Telecka, A., et.al. 2016. Superhydrophobic Properties of Nanotextured Polypropylene Foils Fabricated by Roll-to-Roll Extrusion Coating // ACS Macro Lett, Vol. 5. - P. 1034-1038

# DEAD-RISE ANGLE AND SPEED EFFECT ON THE AIR ENTRAPMENT DURING CONUS IMPACT ONTO A LIQUID

Carrat J.-B.<sup>1\*</sup>, Gavrilov N.V.<sup>1</sup>, Cherdantsev A.V.<sup>2</sup>, Shmakova N.D.<sup>1</sup> and Ermanyuk E.V.<sup>1</sup>

1) Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia

2) Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russia

\*[jb.carrat@gmail.com](mailto:jb.carrat@gmail.com)

When a solid body impacts a liquid, an air cushioning (air trapped between the liquid and a solid surface) may occur. This leads to inconsistencies in coating or uneven cooling. In this experimental work a stainless steel conus (diameter of 179.4 mm) with different dead-rise angle  $\beta$  (2°, 3°, 4° and 5°) impacts a deep liquid (2.5% butanol or water) pool at a speed varying from 13.0 to 190.3 mm/s. A total internal reflection (TIR) set-up is used to observe the flow at the interface between the air and the liquid. This method gives a big contrast between the part of the interface in contact with the conus (black in fig. 1.a) and the air cushion trapped by the liquid ring (in grey in the center of frame 2 to 4 in fig. 1.a). By using an image treatment, the diameter of the liquid ring and the air cushion is estimated for every frame, see figure 1.b. An exponential fitting for the air cushion diameter proposed in [1] and a linear fitting for the liquid outer ring diameter are used. The intersection between these two fittings corresponds to the initial diameter  $D_0$ , similar to the one defined in [2]. All initial diameters are plotted as a function of the parameter  $A = \mu_{air}/(\rho_l V \tan(\beta)^2)$  in fig. 1.c and are collapsing on the same curve for both liquids and all angles. Thus the initial diameter of the air cushion does not depend of surface tension and the conus dead-rise angle but only of the vertical impact speed  $V$ .

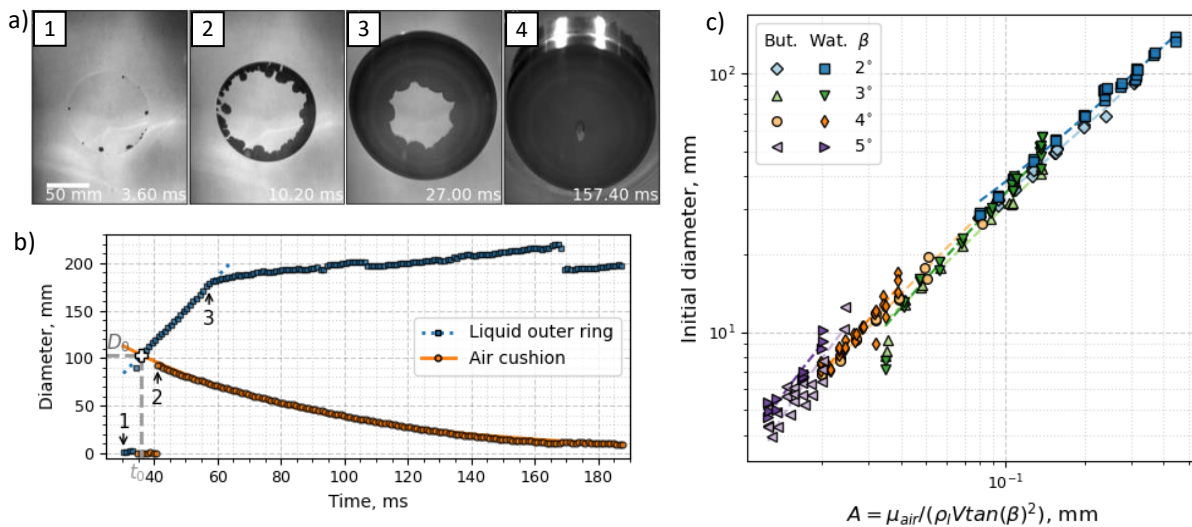


Fig. 1 a) Image of the free surface interface during the impact. b) Fitting of the air cushion and liquid outer ring diameter and estimation of the initial diameter  $D_0$ . c) Initial diameter for all experiments as a function of the parameter  $A = \mu_{air}/(\rho_l V \tan(\beta)^2)$ .

## Bibliography

1. Thoroddsen, S. T., T. G. Etoh, K. Takehara, N. Ootsuka, and Y. Hatsuki The Air Bubble Entrapped under a Drop Impacting on a Solid Surface // *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. V. 545. P. 203.
2. Hicks, P. D., Ermanyuk E. V., Gavrilov N. V., and Purvis R. Air Trapping at Impact of a Rigid Sphere onto a Liquid // *Journal of Fluid Mechanics* 2012 V. 695. PP. 310

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕЛЕТА МИКРОКАПЕЛЬ НАД ЛИНИЕЙ КОНТАКТА В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, НАГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ

Кириченко Е.О. \*, Кириченко Д.П., Зайцев Д.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[\\*kirichenko\\_ekaterina@outlook.com](mailto:kirichenko_ekaterina@outlook.com)

В таких приложениях как спрейное охлаждение границы раздела жидкость-газ контактируют с твердыми нагретыми поверхностями. Контактная линия - область контакта трех фаз: твердой, жидкой и газообразной. Она является ключевым объектом во всех процессах, сопровождаемых испарением, динамикой капли и ее взаимодействием с твердой поверхностью. К настоящему времени принято, что максимальные скорости испарения достигаются в микрорегионе вблизи контактной линии. В работе [1] исследовались микрокапли воды вблизи линии контакта, являющейся границей раздела между сухим пятном и слоем жидкости на нагреваемой горизонтальной подложке. С помощью данных о траекториях капель вычисляется локальная скорость течения вблизи линии контакта. В данной работе проводятся экспериментальные исследования по перелету левитирующих микрокапель жидкости через контактную линию со смоченной поверхности в область сухого пятна, с изменением таких параметров как температура поверхности и краевого угол смачивания.

Рабочий участок представляет собой текстолитовое основание, с нагревателем диаметром 3 мм в центре. На поверхности нагревателя создается тонкий слой жидкости и вручную формируется сухое пятно. Процесс перелета микрокапель фиксируется с помощью высокоскоростной камеры Fastcam SA 1.1 Photron с разрешением 1024x1024 пикселей и скоростью съемки до 5400 к/с. Были проведены эксперименты в диапазоне температур 52°C – 77°C, а также с изменением краевого угла смачивания.

Было получено, что при увеличении температуры подложки увеличивается диаметр микрокапель и высота перелета. Также высота перелета увеличивается при увеличении краевого угла смачивания.

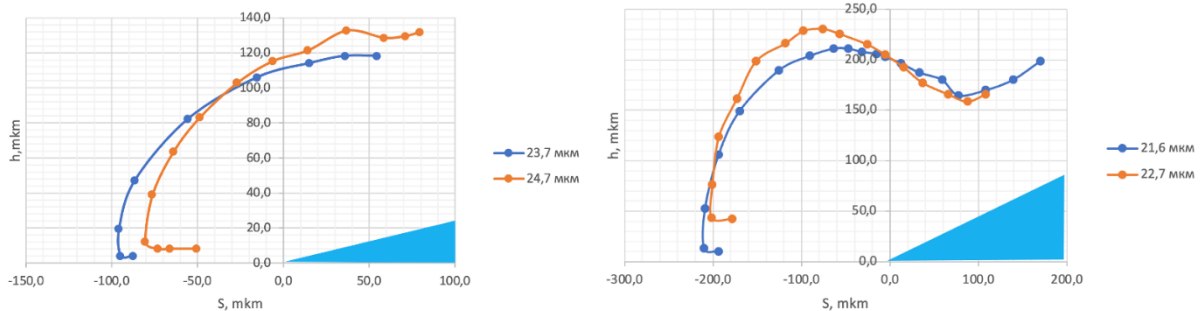


Рис. 1. Перелет микрокапель через контактную линию.  $T=60^{\circ}\text{C}$ .  
 $CA = 15^{\circ}$  (слева)  $CA = 30^{\circ}$  (справа).

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 19-19-00695).*

## Литература

1. О. А. Kabov, D. V. Zaitsev, D. P. Kirichenko and V. S. Ajaev. Investigation of moist air flow near contact line using micro-droplets as tracers // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 4 (2-3): 207–216, 2016.



# АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ ТРАССЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ЗАТОПЛЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Кирчанова Е.Е.<sup>1,2\*</sup>, Токарев М.Ю.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>.

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*e.kirchanova@g.nsu.ru*

Измерение объемного (3D) распределения поля скорости является актуальной задачей при исследовании фундаментальных свойств анизотропных турбулентных течений, таких как струи с закруткой потока [1]. В настоящее время активно развиваются методы 3D визуализации на основе изображений трассерных частиц, зарегистрированных с различных ракурсов. Для обработки изображений используют различные математические подходы. Наиболее часто применяемые методы:

- Трехмерная анемометрия по трекам частиц (3D-PTV) [2], позволяющая отследить местоположение и скорость каждой отдельной частицы для их малой концентрации. Метод основан на вероятностном определении одной и той же частицы в пространстве на паре кадров и восстановлении её трехмерных координат путем триангуляции;
- Томографический метод анемометрии по изображениям частиц PIV (Tomographic PIV) [3], восстанавливающий объемные 3D изображения интенсивности частиц, по которым определяется групповая скорость частиц в перемещаемом по пространству окне опроса;
- Лагранжевый метод анализа траекторий частиц [4] – совокупность первых двух методов в условиях регистрации изображений с высоким временным разрешением. Метод позволяет отслеживать отдельные частицы даже если их траектории пересекаются на проекциях, то есть при высоких концентрациях.

Целью данной работы является развитие Лагранжевого метода за счет повышения точности калибровки камер до субпиксельного размера. Для апробации работы алгоритма был обработан эксперимент со спиральными режимами течения в струях разной степени закрутки [5,6], были найдены траектории трассерных частиц. Также было произведено сравнение с результатами обработки алгоритмом Томо-PIV.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00803, <https://rscf.ru/project/22-19-00803/>.*

## Литература

1. Xu H. et al. High order Lagrangian velocity statistics in turbulence //Physical review letters. – 2006. – Т. 96. – №. 2. – С. 024503.
2. Virant M., Dracos T. 3D PTV and its application on Lagrangian motion //Measurement science and technology. – 1997. – Т. 8. – №. 12. – С. 1539.
3. Atkinson C.. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry //Experiments in Fluids. – 2009. – Т. 47. – №. 4. – С. 553-568.
4. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities //Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – №. 5. – С. 1-27.
5. Markovich D. M. et al. Helical modes in low-and high-swirl jets measured by tomographic PIV //Journal of Turbulence. – 2016. – Т. 17. – №. 7. – С. 678-698.
6. Alekseenko S. V. et al. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2018. – Т. 70. – С. 363-379.

# ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПОТОКАХ ГАЗ – ВЯЗКОУПРУГАЯ ЖИДКОСТЬ

Ковалев А.В.<sup>1,2\*</sup>, Ягодницына А.А.<sup>1,2</sup>, Бильский А.В.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*[therfmig@gmail.com](mailto:therfmig@gmail.com)*

Потоки вязкоупругих жидкостей в микроканальных устройствах являются неотъемлемой частью процесса 3D-печати. Вязкоупругие чернила, содержащие газовые включения, могут быть использованы в био-печати, печати протезов для медицины и других приложениях. Для управления свойствами напечатанных объектов и создания пен с контролируемой пористостью необходимы детальные знания о механизмах формирования газовых пузырей, а также зависимости их размеров и скорости движения от управляющих параметров системы, что обуславливает предмет данной работы.

В работе исследован поток газ – вязкоупругая жидкость в микроканалах с Т- и Х-входами. Чипы были выполнены из полиметилметакрилата методом микрофрезерования. Микроканалы имели прямоугольное сечение с отношением сторон 1:2 и гидравлическими диаметрами 267 мкм и 279 мкм для Т- и Х-канала соответственно. В качестве дисперсной фазы использовался воздух, в качестве несущей – силиконовые масла различной вязкости и вязкоупругие водные растворы полиакриламида (РАА) в концентрациях 0,096%, 0,22% и 0,347% по массе.

Установлено, что в случае вязкоупругих несущих фаз длина снарядов значительно превышает предсказанные зависимостью Xu et al. [1] значения, которая работает для ньютоновских вязких жидкостей. При этом частота отрыва снарядов значительно понижается в случае вязкоупругих несущих фаз. Обнаружено существенное влияние концентрации РАА на механизм формирования газовых пузырей как в Х- так и в Т-каналах. Показано, что с увеличением числа Вайсенберга толщина плёнки жидкости увеличивается, так как нормальные напряжения в несущей фазе приводят к уменьшению поперечного сечения газового снаряда (см. Рис. 1).

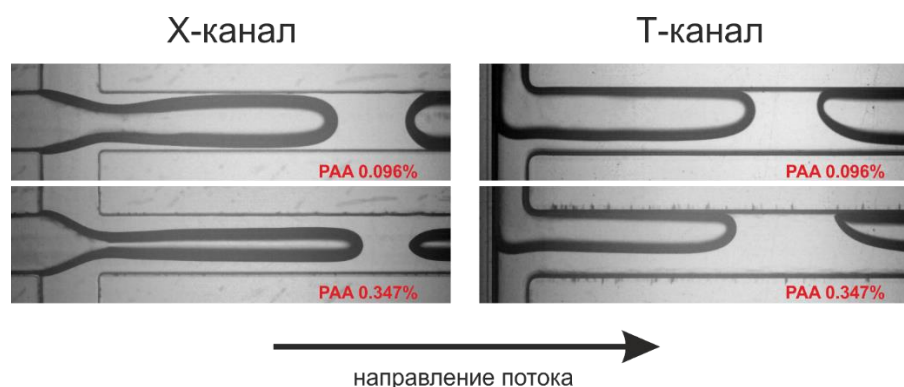


Рис. 1. Пример формирования газовых пузырей в Т- и Х-каналах при разных концентрациях РАА.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-19-00732).*

## Литература

1. Xu et al. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: From squeezing to dripping // *Microfluidics and Nanofluidics* (2008), 5(6), pp. 711–717.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ ОХЛАДИТЕЛЯ

Козюлин Н. Н.<sup>1\*</sup>, Хребтов М. Ю.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\* [nikkozyulin@gmail.ru](mailto:nikkozyulin@gmail.ru)

В данной работе методом численного моделирования с использованием открытого вычислительного пакета OpenFoam [1] было изучено завесное охлаждение плоской пластины. Конфигурация сопла подачи охладителя была устроена таким образом, что при выходе охладителя в основной канал, за счет наличия уступа, возникают трехмерные вихревые когерентные структуры, аналогично дорожке Кармана в следе за плохообтекаемым телом [2].

Эффективность тепловой завесы зависит от степени диффузии охладителя в направлении от стенки (1). При эксплуатации систем завесного охлаждения в широком диапазоне параметров при высоких числах расхода охладителя трехмерные турбулентные структуры существенно влияют на эффективность тепловой защиты. В работе был изучен режим  $M = U_c / U_\infty = 2$ . Для этого режима число Рейнольдса, построенное по диаметру подводящей трубки и скорости охладителя равнялось примерно  $Re = 5000$ , что соответствует турбулентному режиму В первой части исследования на конфигурации, исследуемой в предыдущих работах [3] были исследованы варианты с разным количеством подводящих каналов охладителя 2 струи, 3 струи, 4 струи. Гидродинамическое сопротивление возрастало с увеличением количества струй. Было получено, что в случае с тремя струями наблюдалась наименьшая степень диффузии охладителя от стенки, и как следствие, наилучшая тепловая эффективность.

$$\eta = \frac{T_h - T_{wall}}{T_h - T_c} \quad (1)$$

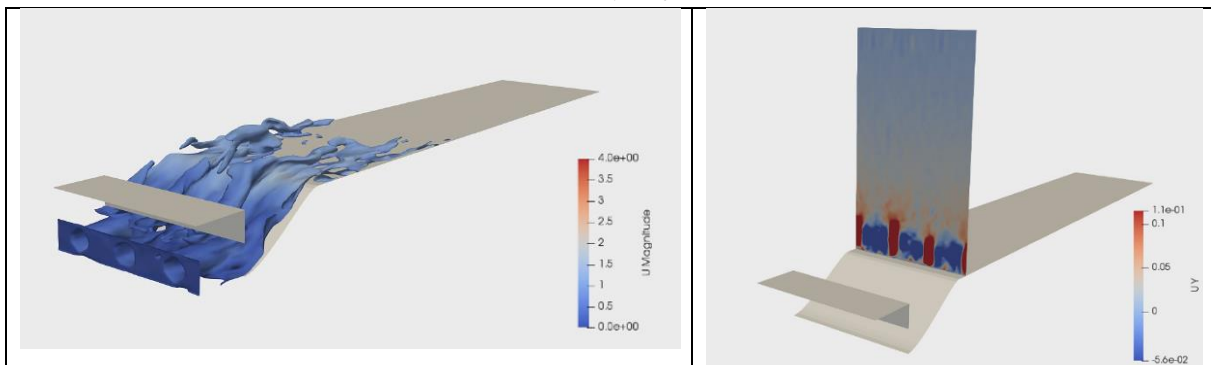


Рис. 1. Изоповерхность температуры (слева), вертикальная компонента скорости (справа).

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН*

## Литература

1. <https://www.openfoam.com>
2. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/karman-vortex-street>
3. Козюлин Н. Н., Хребтов М. Ю., «Эффект гармонической модуляции потока в тепловой завесе над плоской пластиной», DOI: 10.53954/9785604859551\_163.

# ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА С МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ

Колесов К.А.<sup>1\*</sup>, Маширов А.В.<sup>1</sup>, Кузнецов А.С.<sup>1</sup>, Мусабилов И.И.<sup>2</sup>, Коледов В.В.<sup>1</sup>, Шавров В.Г.<sup>1</sup>

1) *Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

2) *Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

<sup>\*</sup>[kolesovkka@mail.ru](mailto:kolesovkka@mail.ru)

Основной целью данной работы является определение термического сопротивления разъемной контактной пары. В качестве источника тепла выступает сплав на основе редкоземельного металла, обладающий магнитокалорическим эффектом, в качестве теплоприемника – медный блок. Термическое сопротивление контактной пары измерялось в условиях нестационарного теплового потока в диапазоне температур 60-100 К с пиком 75 К во внешнем магнитном поле до 10 Тл, что соответствует наибольшему адиабатическому изменению температуры при намагничивании сплава GdNi<sub>2</sub>. Исследование проводилось внутри криостата со сверхпроводящим источником магнитного поля. Охлаждение осуществлялось с помощью криорефрижератора работающего по замкнутому циклу. С помощью криорефрижератора происходит охлаждение, как образцов контактной пары, так и источника магнитного поля. Давление окружающей среды, при котором определялось контактное термическое сопротивление, лежит в диапазоне 10<sup>-2</sup> - 10<sup>-3</sup> Па. Температура контролировалась с помощью температурных датчиков «Сенсох» и медь-константановых дифференциальных термопар, расположенных на исследуемых образцах контактной пары. Нагрев образцов до требуемой температуры обеспечивался за счёт нагревателя из нихромовой проволоки, также расположенного на каждом из образцов контактной пары.

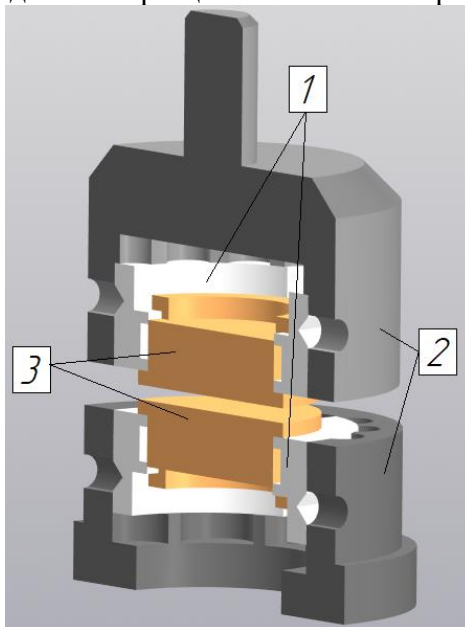


Рис. 1. Изображение контактной пары в держателях образцов, где 1 – проставочное кольцо, 2 - держатель образцов, 3 - образцы контактной пары.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-10197, <https://rscf.ru/project/20-79-10197/>.*

# ДИНАМИКА РИВУЛЕТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ПОДЛОЖКЕ

Кочкин Д.Ю.<sup>1,2\*</sup>

- 1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

[\\*kochkin1995@mail.ru](mailto:kochkin1995@mail.ru)

Пленочное течение жидкости широко используются в различных технологических системах, так как обеспечивает высокую интенсивность тепломассопереноса и значительную поверхность контакта фаз при малых удельных расходах жидкости. Одним из видов пленочного течения является ривулетное (ручейковое) течение, представляющее собой относительно узкую струйку жидкости, стекающую по твердой поверхности и ограниченную контактными линиями (границами раздела газ-жидкость-твердое тело) с двух сторон.

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики ручейкового течения жидкости, стекающей под действием гравитации по вертикально ориентированной относительно горизонта сапфировой пластине, на одну сторону которой нанесено покрытие из оксида индия-олова (англ. Indium tin oxide или сокращённо ИТО), являющееся омическим нагревателем. Сапфировая пластина в отличие от ИТО покрытия прозрачна в инфракрасном диапазоне, что позволяет проводить измерения поля температур ИК сканером непосредственно на нагревателе.

При включении нагрева ширина ручейка существенно уменьшается (рис. 1). Данный эффект обусловлен действием термокапиллярных касательных напряжений, действующих на границе раздела жидкость-газ. Совместно с уменьшением ширины ручейка при увеличении температуры нагревателя также наблюдается изменение режима течения, выраженное появлением колебательных движений ривулета поперек основного направления его течения.

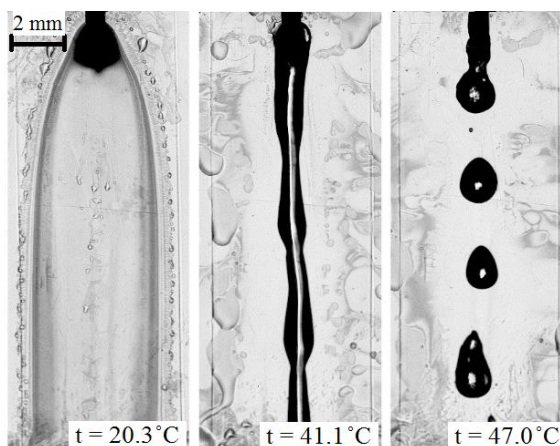


Рис. 1. Пример дробления ривулета жидкости на капли при увеличении температуры ИТО нагревателя.

Также при увеличении температуры нагревателя ривулет приобретает периодические локальные сужения и в конечном итоге распадается на капли. Механизм дробления ривулета на капли аналогичен механизму распада цилиндрической струи жидкости вследствие неустойчивости Рэлея — Плато, однако является более сложным из-за наличия в системе твердой стенки.

# ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАННЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ ПО ГАЗОВОМУ СОСТАВУ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА МАТЕРИАЛОВ

Кропотова С.С.\* , Стрижак П.А., Кузнецов Г.В.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

*[\\*ssk22@tpu.ru](mailto:ssk22@tpu.ru)*

Количество пожаров в зданиях жилого сектора с каждым годом увеличивается [1,2]. Для общей оценки пожарной опасности помещений необходим детальный анализ характеристик газов, выделяемых при пиролизе и горении различных материалов, а также экспериментальные исследования интегральных характеристик физико-химических процессов в очаге горения на разных стадиях развития и подавления горения.

Цель исследования – обоснование по результатам экспериментов выбора эффективных комбинаций технических средств, необходимых и достаточных для ранней идентификации возгораний, своевременного инициирования тушения, прекращения горения и тления возгораний в помещениях.

Исследования выполнены на примере модельных очагов горения категории “А”, состоящих из типичных для помещений разного назначения материалов (древесина, картон, бумага, линолеум). Изучены температуры, состав продуктов сгорания, интенсивности свечения пламени очага. Обоснована необходимость измерения концентраций газов с использованием различных методов и подходов (газовая и газожидкостная хроматография, масс-эффузио-спектрометрия, ИК-спектрометрия, газоаналитическое оборудование (лабораторные и промышленные газоанализаторы)), так как каждый из них позволяет проанализировать определенную группу соединений.

Определены эффективные комбинации технических средств (тепловых и дымовых датчиков, датчиков излучения пламени, контактных и бесконтактных средств измерения температуры, системы газоанализа, видеорегистрирующей техники), необходимых и достаточных для ранней идентификации возгораний в помещениях. Установлены минимальные необходимые и достаточные объемы огнетушащей жидкости (воды) для подавления горения. Обоснованы преимущества использования систем с обратной связью при тушении пожаров, которые состоят в оптимизации расхода воды на тушение и времени подавления горения за счет мониторинга характеристик пожара в режиме реального времени. Сформулированы рекомендации по созданию автоматизированных систем тушения пожаров в помещениях, позволяющих оптимизировать условия подавления горения и минимизировать угрозу жизни и здоровью людей.

*Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-19-00009, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/>)*

## Литература

1. Araujo Lima G.P., Viana Barbosa J.D., Beal V.E., Moret S. Gonçalves M.A., Souza Machado B.A., Gerber J.Z., Lazarus B.S. Exploratory analysis of fire statistical data and prospective study applied to security and protection systems // Int. J. Disaster Risk Reduct. – 2021. – No. 61, 102308.
2. Kodur V., Kumar P., Rafi M.M. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety// PSU Res. Rev. ahead-of-p. – 2019.

# ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА

Кундашкин А.Д.<sup>1,2\*</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Палкин Е.В.<sup>1</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*[alexkundashkin@gmail.com](mailto:alexkundashkin@gmail.com)*

В ближайшем обозримом будущем человечество будет зависимо от ископаемых горючих веществ, сжигание которых остается основным способом получения энергии человечеством. Соответственно, вопросы оптимизации гидродинамических потоков в камерах сгорания являются одними из самых актуальных вопросов энергетики на сегодняшний день. Для стабилизации этих течений используются различные методы воздействия – модификации геометрии камеры [1], закрутка потока [2] и дополнительная инжекция топлива [3]. Во всех работах продемонстрирована стабилизация потоков, улучшающая энергоэффективность камер и положительно влияющая на их ресурс, в связи с подавлением когерентных структур.

В данной работе рассматривается третий способ стабилизации гидродинамического потока на примере изучения изотермической гидродинамики в цилиндрической камере с двумя входными потоками, направленными по оси цилиндра. В предыдущей работе [4, 5] была проведена валидация расчетов с экспериментальными данными, а также линейный анализ устойчивости и восприимчивости, в результате которого определены места наилучшей инжекции топлива.

Однако, при выбранных режимах работы камеры, поток в ней турбулентный, поэтому нелинейные эффекты оказывают сильное влияние на его динамику. В связи с чем представляет интерес параметрическое исследование местоположения инжекции. В данной работе был выполнен расчет течений с различными позициями инжекции. Показано, что при изменении места инжекции на небольшую величину ниже или выше места инжекции, полученного с помощью линейного анализа устойчивости, подавление когерентной структуры по амплитуде сопоставимо с изначальной позицией. Большие отклонения от первоначального места инжекции ухудшают качество подавления, что позволяет говорить о правильности результатов ЛАУиВ.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. Bardera R., Matías-García J. C. Optimization of passive flow control above the ski jump ramp of an aircraft carrier by CFD and experimental investigation //Ocean Engineering. – 2022. – Т. 263. – С. 112419.
2. Zhang B. et al. Contributions of hydrodynamic features of a swirling flow to thermoacoustic instabilities in a lean premixed swirl stabilized combustor //Physics of Fluids. – 2019. – Т. 31. – №. 7. – С. 075106.
3. Gao D. et al. Active flow control of the dynamic wake behind a square cylinder using combined jets at the front and rear stagnation points //Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 4. – С. 047101.
4. Palkin E. V. et al. Influence of a Central Jet on Isothermal and Reacting Swirling Flow in a Model Combustion Chamber //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 5. – С. 1615.
5. Kundashkin A. D. et al. Active flow control in a model combustion chamber using additional gas injection method //Thermophysics and Aeromechanics. – 2022. – Т. 29. – №. 5. – С. 829-834.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В КВАЗИТРЕУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Макаров М.С.<sup>1,2</sup>, Наумкин В.С.<sup>1,2</sup>, Лебеда К.С.<sup>1,2\*</sup>

- 1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
 2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*  
 \*kslebeda@outlook.com

В работе с применением численных методов исследуется теплообмен при течении гелий-ксеноновой смеси с числом Прандтля 0,23 в обогреваемом квазитреугольном канале. Поперечное сечение канала соответствует форме канала, образованного треугольной упаковкой цилиндрических тепловыделяющих элементов. Для численного моделирования построена геометрия и расчетная сетка с использованием параметрического генератора GGN. Численное моделирование проведено с использованием CFD пакета ANSYS Fluent 2020 R2. Для получения стационарного решения с необходимой точностью проводилась гибридная инициализация и URANS моделирование при заданном расходе газовой смеси на выходе из трубы. Верификация результатов моделирования проведена с использованием данных эксперимента о распределении температуры стенки по длине квазитреугольного канала [1].

Моделирование проведено в широком диапазоне чисел Рейнольдса при среднерасходной скорости на выходе из квазитреугольного участка канала вплоть до звуковой. Получены данные по теплоотдаче на нагреваемом участке квазитреугольного канала. Проведено обобщение данных в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса с использованием методики предложенной в работе [2].

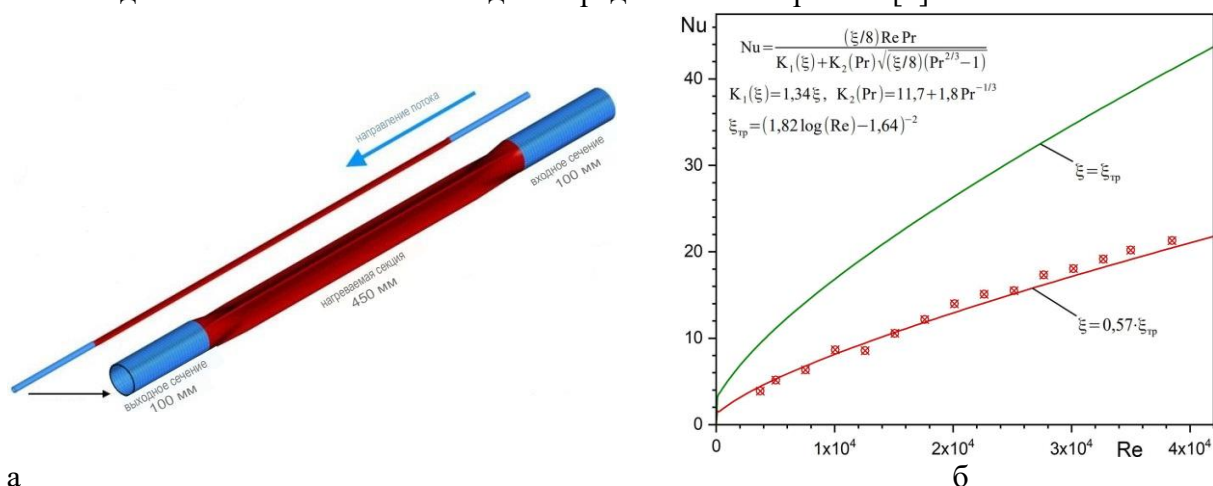


Рис. 1. (а) Геометрия исследуемого квазитреугольного канала, (б) распределение числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса.

*Работа выполнена за счет Госконтракта ИТ СО РАН № 121031800217.*

## Литература

1. Vitovsky O.V. Experimental study of heat transfer during the flow of a gas coolant in a heated quasi-triangular channel // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. Vol 190. P. 122771.
2. Makarov M.S. et al. Investigation of hydraulic resistance and heat transfer in the flow of He-Xe mixture with a small Prandtl number in a quasi-triangular pipe // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. Vol. 199. P. 123427.



# ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИИ НА ОБТЕКАНИЕ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА, ПОКРЫТОГО ГИДРОФОБНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Лебедев А.С., Добросельский К.Г., Дулин В.М.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

Круглый цилиндр является фундаментальным примером плохообтекаемого тела. Исследование процессов обтекания труднообтекаемых тел имеет большое значение во многих инженерных приложениях. Характеристики потока, в том числе вызванные потоком силы, действующие на тело, неустойчивость потока, характер течения и поведение вихреобразования в следе за цилиндром могут вызывать серьезные структурные вибрации, акустический шум, резонанс, усиленное перемешивание и значительное увеличение среднего сопротивления и колебаний подъемной силы.

При больших скоростях набегающего потока, в следе за телом обтекания происходит фазовый переход - кавитация. Кавитация представляет собой процесс испарения жидкости, образования пузырьков или паровых слоев и дальнейшее разрушения паровых структур. В морском транспорте, гидравлических и маслогидравлических машинах кавитация возникает вблизи поверхности гребного винта, лопастей насоса, рабочих лопаток в гидротурбине и приводит к различным нежелательным эффектам, таким как вибрация, акустический шум, эрозия рабочих поверхностей [1]. В силу этого, перспективным направлением исследований является разработка методов управления отрывными течениями. Современные методики интеллектуального управления для увеличения эффективности могут быть дополнены простыми, но экономичными и эффективными методами пассивного управления отрывом [2].

В рамках данной работы был проведен ряд экспериментов, направленных на исследование гидрофобного покрытия в качестве метода пассивного управления отрывными течениями [3], на примере обтекания круглого цилиндра. Исследование было проведено для сверхкритических чисел Рейнольдса  $Re=2.2 \cdot 10^5$ , в диапазоне давления набегающего потока  $P=1.2 - 1.5$  атм. Для проведения подробного анализа реализуемых режимов течений были применены современные оптические методы диагностики потоков. Проведен сравнительный анализ влияния гидрофобного покрытия на интенсивность образования газопаровой фазы.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. Sreedhar B. K., Albert S. K., Pandit A. B. Cavitation damage: Theory and measurements— A review //Wear. – 2017. – Т. 372. – С. 177-196.
2. Gad-el-Hak M., Bushnell D. M. Separation control. – 1991.
3. Kim J., Lee J. S. Surface-wettability-induced sliding bubble dynamics and its effects on convective heat transfer //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 113. – С. 639-652.

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ ЛАМИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

Литвиненко Ю.А.<sup>1\*</sup>, Сарычев Д.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской Академии Наук, Новосибирск*

2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*  
*\*litur@itam.nsc.ru*

Известны работы по изучению взаимодействия газовых микроструй [1 – 3]. В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса диффузионного горения при соударении двух осесимметричных ламинарных микроструй пропана. Истечение газа через круглые сопла осуществляется с равными скоростями. В процессе эксперимента варьируется поперечное положение сопел относительно друг друга. Вариант полного перекрытия соответствует позиции, когда оси симметрии обеих струй находятся в одной плоскости. При разведении струй сохраняется угол между ними. В результате показан сценарий формирования факела при различной позиции сопел. Установлено, что при полном перекрытии истекающих струй происходит деформация факела с формированием ортогонального факела. Данный процесс носит общие черты с аналогичным истечением воздушных струй. Также представлены особенности развития факела при промежуточных положениях сопел. По мере сближения струй от полностью несоосного положения и отсутствия взаимодействий между струями до соосного положения и полного перекрытия струй наблюдается изменение структуры результирующей струи. Частичное перекрытие сталкивающихся струй формирует струю, отклоняющуюся от начальной плоскости развития, происходит поворот результирующей струи. Фотографии 5, 10 рис. 1 демонстрируют соосное истечение струй с полным перекрытием. В результате реализуется разворот результирующей струи и развитие струи в ортогональной плоскости по отношению к начальной плоскости развития струй.

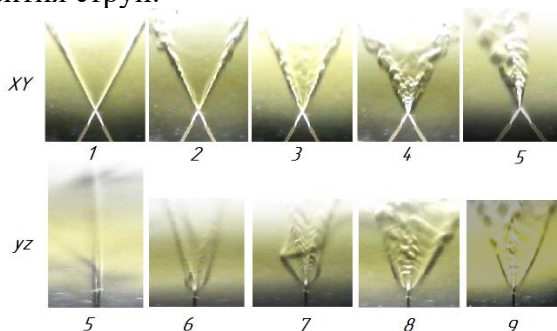


Рис.1.

## Литература

1. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. и доп. // Новосибир. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2013. 240 с.
2. E. Laurendeau, P. Jordan, J. P. Bonnet, a J. Delville, P. Parnaudeau, and E. Lamballais Subsonic jet noise reduction by fluidic control: The interaction region and the global effect// Physics of Fluids 20, 101519 2008
3. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй// Механика жидкости и газа. 2013. No2. С. 104 - 111.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАПУСКА ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Литвинцева А.А.<sup>1,2\*</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>, Чеверда В.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*[nastja@mail.ru](mailto:nastja@mail.ru)*

Тепловые трубы являются пассивными теплоотводящими элементами, которые работают в широком диапазоне температур и тепловых потоков, простые в производстве и практически не содержат элементов, которые могут выйти из строя во время работы. Кроме того, ПТТ используют пленочный режим испарения в Тейлоровских пузырях, а именно при таком режиме наблюдается максимальный теплоотвод. Поэтому пульсационные тепловые трубы являются одним из самых эффективных способов отвода тепла. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию режимов работы ПТТ. Экспериментальный стенд представляет собой ПТТ с 10 коленами (габаритные размеры 260 мм x 385 мм) из медной трубки Ø2 x 1 мм со вставкой из кварцевого стекла длиной 100 мм для визуализации процессов внутри трубы. Рабочая жидкость – дегазированная вода.

В данной работе экспериментально исследовалось влияние рабочих параметров ПТТ на процессы теплообмена. Была проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена в тепловой трубе (рис. 1). Определены параметры запуска тепловой трубы ( $\Delta T$ ,  $P$ ). Проведена визуализация паро-жидкостного течения рабочей жидкости и измерены пульсации температуры вдоль трубы. Определено влияние ориентации ПТТ на процессы теплообмена и эффективность работы трубы.

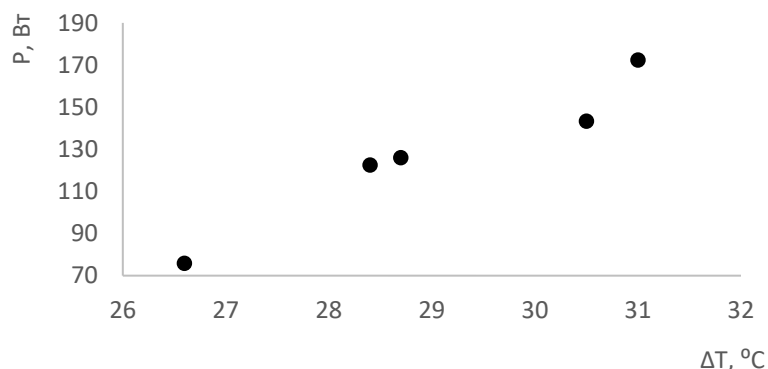


Рис. 1. Зависимость подводимой мощности от перепада температур между нагревателем и испарителем.

*РНФ 20-79-10096 «Теоретическое и экспериментальное исследование пульсационных тепловых труб», <https://www.rscf.ru/project/20-79-10096/>*

## Литература

1. Faghri A. Review and Advances in Heat Pipe Science and Tech-nology // Journal of Heat Transfer, 2012, 134 (12).
2. Zhang Y.W., Faghri A. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes // Heat Transfer Eng., 2008, 29 (1), pp. 20–44.
3. Xiao L, Cao Y. Recent advances in pulsating heat pipes and its derivatives // Journal of Enhance Heat Transfer, 2012, 19(3), pp. 213–231.

# ВЛИЯНИЕ АДДИТИВНЫХ МИКРОСТРУКТУР НА КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА В ШИРОКОМ МИКРОКАНАЛЕ

Литвинцева А.А.\* , Чеверда В.В.

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

\*[nastja@mail.ru](mailto:nastja@mail.ru)

В работе исследовалось влияние аддитивных микроструктур на процессы теплообмена в миниканале. Были проведены эксперименты с гладким нагревателем и нагревателем с микроструктурами. Показано, что эффективность теплоотвода выше при использовании нагревателя с микроструктурами (рис. 1). Сухие пятна смываются с поверхности аддитивного нагревателя вбок. На гладком нагревателе наблюдается образование маленьких пузырей, а затем при дальнейшем росте теплового потока слияние с образованием одного большого и как следствие наблюдается кризис теплообмена. Кроме того, эксперименты показали, что эффективность теплоотвода выше в случае однофазного потока для аддитивного нагревателя (рис. 1).

Экспериментальный стенд представляет собой миниканал прямоугольного сечения (0.9 мм x 30 мм x 59 мм), расположенный горизонтально. В нижней части установлен нагреватель (10 x 10 м<sup>2</sup>). Рабочая жидкость – дистиллированная вода. Верхняя часть канала – оптическое стекло для наблюдения за процессами в канале. Стенд оснащен системой измерения температуры: системой термопар К-типа для измерения температуры поверхности рабочего участка и ИК камерой «Titanium HD 570M» для определения температурного поля поверхности.

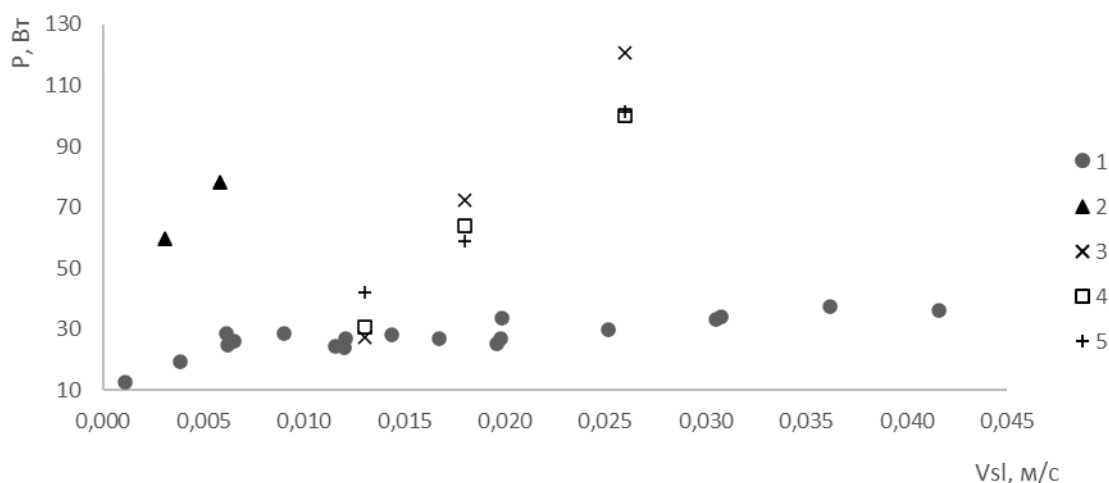


Рис. 1. Зависимость мощности, подводимой к нагревателю от приведенной скорости жидкости  $v_{sl}$ : 1, 2 –нагреватель гладкий/ с микроструктурами, без потока газа; 3 – 5 [1] – нагреватель с микроструктурами, двухфазный поток ( приведенная скорость газа  $v_{sg} = 2, 5$  и  $8$  м/с соответственно).

РНФ 22-29-01655 «Использование микроструктурированных поверхностей для интенсификации теплообмена при движении жидкости в миниканале», <https://www.rscf.ru/project/22-29-01655/>

## Литература

1. Eloyan K.S., Ronshin F.V., Cheverda V.V. The influence of additive microstructures on the heat transfer crisis in a two-phase system with a local heating source // AIP Conference Proceedings 2135, 020022 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5120659>

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРОЦЕСС ЛАМИНАРИЗАЦИИ РАЗВИТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ

Лукьянов А.А.<sup>1,2\*</sup>, Ничик М.Ю.<sup>1,2</sup>, Пантелеев С.А.<sup>1,2</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*[\\*a.lukyanov@g.nsu.ru](mailto:a.lukyanov@g.nsu.ru)*

Снижение влияния силы трения при транспортировке текучих сред, таких как вода, газ или нефть, является старейшей, но до сих пор актуальной, задачей, на решение которой направлено усилие многих исследователей по всему миру. Недавно в работе [1] было предложено использование специального устройства, напоминающего систему пчелиных сот, с помощью которого удалось полностью ламинаризовать исходно полностью развитое турбулентное течение и тем самым снизить гидравлическое сопротивление до уровня ламинарного течения. Согласно работе [2], механизм реламинаризации заключается в создании ударного, т.е. плоского, профиля средней скорости на выходе из этого устройства. Однако вопрос о том, является ли это условие достаточным до сих пор остается открытым.

В данной работе было рассмотрено развитое турбулентное течение воды в оптически прозрачном прямолинейном канале круглого поперечного сечения диаметром 0,016 м и длиной 5 м при в диапазоне чисел Рейнольдса  $2000 < Re < 5000$ , где  $Re = U_b D / \nu$ ,  $U_b$  – среднерасходная скорость,  $D$  – диаметр канала,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости. Результаты предварительных измерений профилей скорости и турбулентных пульсаций вдоль канала показали, что течение в рабочем участке было полностью развитым в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса.

При исследовании механизма реламинаризации рассматривалось несколько конфигураций специального устройства-реламинаризатора, представляющего систему сот и характеризующегося различной степенью местного гидравлического сопротивления. Эти устройства устанавливались на расстоянии  $80D$  от входного сечения канала, где течение было полностью развитым. Измерения были выполнены на расстояниях  $6D$  и  $120D$  за этими устройствами с использованием высокоскоростного многопроходного метода Particle Image Velocimetry [3] с высоким пространственно-временным разрешением. Анализ профилей скорости и турбулентных пульсаций показал возможность применения рассматриваемого пассивного метода управления, приводящего к полной реламинаризации исходно турбулентного течения. Были получены параболические профили скорости на расстояниях  $120D$  вниз по потоку от рассматриваемых устройств вплоть до  $Re = 3800$ .

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01274, <https://rscf.ru/project/22-29-01274/>.*

## Литература

1. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of pipe flow by means of 3d-printed shaped honeycombs // – Journal of Fluids Engineering (2019) **141**, №11.
2. Kühnen J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // – Nature Physics (2018) **14**, №4, с. 386-390.
3. Ахметбеков Е.К. и др. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // – Вычислительные методы и программирование (2006) **7**, №2, с. 79-85.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СНАРЯДНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ В КВАДРАТНОМ МИНИКАНАЛЕ

Лукьянов Ан.А.<sup>1,2\*</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>, Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*a.lukyanov1@g.nsu.ru](mailto:a.lukyanov1@g.nsu.ru)

Развитие электронных устройств и тенденция к их миниатюризации приводят к необходимости эффективного рассеивания более высоких тепловых потоков. Это стимулирует разработку новых подходов к охлаждению. Одним из подходов к повышению эффективности охлаждения является создание мини- и микроканалов. В таких устройствах можно добиться улучшенной массо- и теплопередачи благодаря большому отношению поверхности к объему. Кроме того, преобладание сил поверхностного натяжения в таких каналах приводит к различным режимам течения по сравнению с большими каналами. В широком диапазоне скоростей потока газа образуются пузырьки, которые заполняют почти все поперечное сечение канала. Вокруг пузырьков образуется тонкая жидкая пленка. Этот режим называется потоком Тейлора. Во многих работах изучается поведение потока Тейлора, состоящего не из пузырьков пара, а из пузырьков газа [1-3]. Пузырьки Тейлора возмущают поле скоростей внутри жидких пробок, вызывая рециркуляцию, которая увеличивает локальную передачу массы, импульса и энергии по сравнению с однофазным потоком.

Проведено численное и экспериментальное исследование пузырьков Тейлора в квадратном миниканале со стороной 1 мм. Трехмерное численное моделирование было выполнено с использованием метода VOF в пакете OpenFOAM. Экспериментальное исследование было проведено с использованием высокоскоростного теневого метода и автоматической обработки. Исследуются характерные режимы течения, при этом основное внимание уделяется режиму Тейлора. В ходе работы было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, и было показано их хорошее соответствие. Изучено распределение скоростей в жидкости и газе, а также распределение толщины пленки жидкости в пузырьке. Толщина пленки жидкости в углу и центре канала сравнивается с соответствующими хорошо известными корреляциями. Предложена зависимость, описывающая толщину пленки жидкости в квадратном канале. Показано, что в квадратном канале перед пузырьком имеются четыре устойчивых вихря в направлении углов канала. Внутри пузыря существует специфический поток от хвоста к носу пузыря. В пузырьке происходит закручивание газа в поперечном направлении.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>*

## Литература

1. J. Yue, L. Luo, Y. Gonthier, G. Chen, and Q. Yuan, "An experimental study of air–water taylor flow and mass transfer inside square microchannels," *Chemical Engineering Science* 64, 3697–50 3708 (2009).
2. R. Gupta, etc., Taylor flow in microchannels: a review of experimental and computational work // *The Journal of Computational Multiphase Flows* 2 (1) (2010) 1–31.
3. T. Mitchell and C. Leonardi, "Development of closure relations for the motion of taylor bubbles in vertical and inclined annular pipes using high-fidelity numerical modeling," *Physics of Fluids* 32, 063306 (2020)

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ФРЕНСИСА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНОГО ЩЕЛЕВОГО ВДУВА

Лутченко И. И.<sup>1,2</sup>, Палкин Е. В.<sup>1</sup>, Хребтов М. Ю.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р. И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*i.lutchenko@g.nsu.ru*

Валидация математической модели и соответствующих ей расчетов является актуальной задачей для описания течений в гидротурбинах, поскольку в их конструкции зачастую могут возникать нестационарные когерентные вихревые структуры, такие как прецессирующий вихревой жгут [1]. Это явление приводит к ограничению диапазона устойчивых режимов работы [2]. Необходимо строго подходить к описанию таких неустойчивостей для дальнейшего развития методов управления и расширению диапазона устойчивых режимов работы гидротурбины.

В докладе рассмотрено применение численных методов в исследовании управления турбулентным потоком в отсасывающей трубе модельной гидротурбины Френсиса-99 с входным диаметром  $D = 100$  мм с помощью радиально кольцевой инъекции. Численные расчеты нестационарного потока выполнены с использованием открытого программного пакета OpenFOAM [3]. В целях снижения вычислительных затрат и аккуратного рассмотрения вихревых структур использовался метод крупных вихрей (LES). Замыкание нестационарных отфильтрованных в пространстве уравнений Навье—Стокса проводилось с использованием динамической модели вихревой вязкости [4], предложенной Смагоринским и модифицированной Германо и Лилли, не использующая эмпирических констант.

В докладе будет представлен выбор оптимального места инъекции, распределения компонент поля скорости вниз по потоку за рабочим колесом модельной гидротурбины. Обнаружено положительное влияние на уменьшение характерных размеров рециркуляционной зоны вследствие инъекции.

*Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, грант № СП-829.2021.1. Разработка вычислительного кода выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

## Литература

1. Gallaire F., Ruith M., Meiburg E., Chomaz J.-M., Huerre P. Spiral vortex breakdown as a global mode // *J. Fluid Mech.* 2006. Т. 549, С. 71–80.
2. Dörfler P., Sick M., Coutu A. Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery: Engineer's Guidebook for Planning, Design and Troubleshooting. London: Springer, 2013.
3. Сайт OpenFOAM (программный пакет CFD с открытым исходным кодом и широким набором функций для решения множества задач, от сложных потоков жидкости, включающих химические реакции, турбулентность и теплопередачу, до акустики, механики твердого тела и электромагнетизма). [Электрон. ресурс]. URL: <http://www.openfoam.com>. (дата обращения: 15.06.2022).
4. Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model // *Phys. Fluids A: Fluid Dynamics.* 1991. Т. 3, №. 7, С.

# МГД И ТЕПЛОБМЕН ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОМБИНИРОВАННОМ КАНАЛЕ В СИСТЕМЕ ДВОЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Лучинкин Н.А.<sup>1,2\*</sup>, Разуванов Н.Г.<sup>1,2</sup>, Полянская О. Н.<sup>1,2</sup>

1) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

2) Объединённый институт высоких температур (ОИВТ) РАН, Москва., Россия

\*[LuchinkinNA@yandex.ru](mailto:LuchinkinNA@yandex.ru)

Тяжелые жидкометаллические (ЖМ) теплоносители (свинец и его сплавы) рассматриваются для охлаждения активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, экспериментальных модулей blankets ИТЭР, blankets гибридного реактора (термоядерного источника нейтронов).

Геометрия blanket предполагает сложные коробчатые конструкции системы теплообменных каналов, которые в отличие от труб плохо выдерживают нагрузки давления, температуры и деформации. Поэтому перспективны системы двойных каналов, когда конструкцию blanket пронизывают трубы с текущим теплоносителем, а межтрубное пространство заполнено средой неподвижного ЖМ с невысоким давлением.

Существующий ЖМ комплекс, состоящий из трех ртутных МГД-стендов, расположенных в НИУ МЭИ и ОИВТ РАН позволяет изучать МГД и теплообмен в не исследованных ранее конфигурациях неизотермического течения. в продольном или поперечных магнитных полях. Применение зондовых методик измерений позволяет получать более надежные данные и переносить их методами подобия на реальные теплоносители, а также верифицировать расчетные коды.

В работе рассматривается комбинированный канал с двойными стенками «канал – труба» (рис. 1): в трубе -вынужденное течение, в межтрубном пространстве – свободно-конвективное или магнито-конвективное. Измерения проводились при однородном обогреве стенок канала, в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=(5-90) \cdot 10^4$ , Грасгофа  $Gr$  до  $10^8$ , в поперечном МП с числами Гартмана  $Ha=0-500$ .

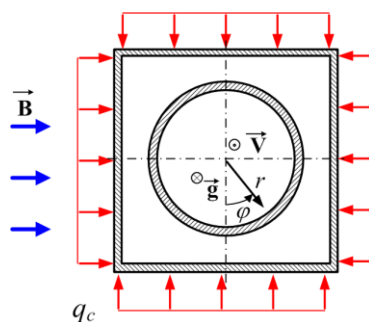


Рис. 1 Схема исследуемого канала в сечении.

Исследования проводились зондовыми методами: шарнирным в сечении канала и продольным зондом типа «гребенка» по длине. Выполнены серии экспериментов по измерению полей осредненной температуры и скорости, распределений температуры стенки по периметру канала и по длине, статистических характеристик пульсаций температуры. Результаты измерений представлены как для круглой трубы, так и для межтрубного пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-29-00878).



# ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАНОНИТЕЙ

Лю Ш., Баринов А.А.\*

МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*[barinov@bmstu.ru](mailto:barinov@bmstu.ru)

Нанонити являются перспективным структурным элементом в наноэлектронике, оптоэлектронике и нанофотонике. При этом возникает проблема обеспечения стабильности теплофизических свойств. Так в работе показано, что при рассмотрении теплопроводности нанонитей необходимо учитывать влияние следующих определяющих факторов: диаметра  $d$  (размерного эффекта), шероховатости (граничного эффекта), температуры  $T$  и дисперсионных свойств фононов.

За основу расчета взята кинетическая модель теплопроводности Фукса-Зондхаймера для нитей [1]. При этом, во-первых, рассмотрена дисперсия фононов – модель тонкого стержня. Во-вторых, учет влияние рассеяния на границах построен на подходе Казимира-Займана-Соффера [1]. То есть для описания свойств поверхности вводится комплексный параметр  $p$ , характеризующий долю фононов отраженных зеркально/диффузно от поверхности со средней квадратичной шероховатостью  $\sigma$ :  $p(k, \theta, \sigma) = \exp(-4k^2\sigma^2 \cos^2\theta)$ , где  $k$  – волновое число фононов;  $\theta$  – угол между импульсом фонона и нормалью к идеализированной гладкой поверхности.

Разработан комплекс программ, позволяющий проводить оценку и прогнозирование теплопроводности нанонитей в зависимости от морфологии поверхности, оказывающей определяющее влияние на теплоперенос. Проведена валидация путем сравнения с экспериментальными данными [2] по теплопроводности кремниевых нанонитей с диаметрами 37 нм, 56 нм и 115 нм в диапазоне температур от 100 до 350К (рис. 1). При этом использованные в расчете значения  $\sigma$  хорошо согласуются с технологическими характеристиками реальных поверхностей нитей.

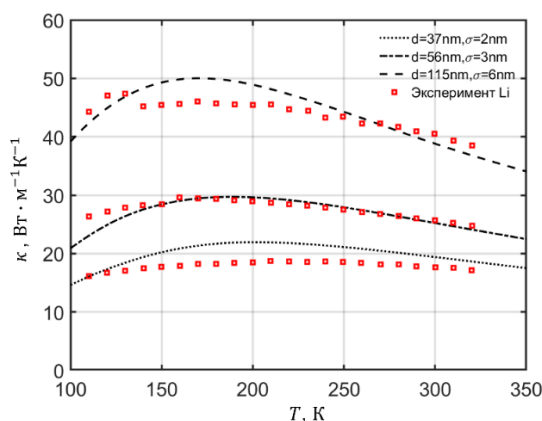


Рис. 1. Эффективная теплопроводность кремниевых нанонитей.

## Литература

1. Chantrenne P. et al. An analytical model for the thermal conductivity of silicon nanostructures // J. Appl. Phys. (2005) 97, no. 10, p. 104318.
2. Soffer S.B. Statistical Model for the Size Effect in Electrical Conduction // J. Appl. Phys. (1967) 38, no. 4., p. 1710–1715.
3. Li D. et al. Thermal conductivity of individual silicon nanowires // Appl. Phys. Lett. (2003) 83, no. 14, p. 2934–2936.

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КРЕМНИЕВОМ ОСНОВАНИИ

Малахов И. П.\*<sup>1</sup>, Сердюков В. С.<sup>1,2</sup>, Сафонов А.И.<sup>1,2</sup>, Родионов А. А. <sup>1,2</sup>

Старинский С.В.<sup>1,2</sup>, Суртаев А. С. <sup>1,2</sup>

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

[\\*ivan.pavlovich.malakhov@gmail.com](mailto:ivan.pavlovich.malakhov@gmail.com)

Для интенсификации теплообмена и повышения критических тепловых потоков (КТП) при кипении как правило применяются различные методы модификации теплообменной поверхности. Одним из наиболее перспективных и обсуждаемых подходов является использование т.н. бифильных поверхностей, представляющих собой гидрофобные участки на гидрофильном основании, которые позволяют одновременно добиться снижения температурного напора закипания, а также повышения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока. Тем не менее актуальным вопросом остается поиск наиболее технологичных методов создания бифильных поверхностей, а также их оптимальных конфигураций. Целью настоящей работы было исследование теплообмена и развития кризиса кипения воды на бифильной поверхности, созданной на кремниевой подложке с помощью методов химического осаждения (HWCVD) и лазерной абляции.

С использованием данных высокоскоростной визуализации было показано, что на бифильной поверхности режим развитого кипения начинается при существенно более низких тепловых потоках по сравнению с базовой поверхностью ( $q = 21 \text{ кВт/м}^2$  и  $q > 90 \text{ кВт/м}^2$  соответственно). При этом существенно повышается как частота отрыва пузырей, так и плотность активных центров в широком диапазоне тепловых потоков. На основании данных ИК термографии было показано, что температурный напор закипания снижается до  $\Delta T_{\text{нк}} = 3 \text{ К}$ , при этом наблюдается повышение коэффициента теплоотдачи на 60% в широком диапазоне тепловых потоков. Полученные данные также показали, что при кипении на бифильной поверхности величина КТП составляет  $1365 \text{ кВт/м}^2$ , что на 58% больше, чем для базовой поверхности ( $858 \text{ кВт/м}^2$ ).

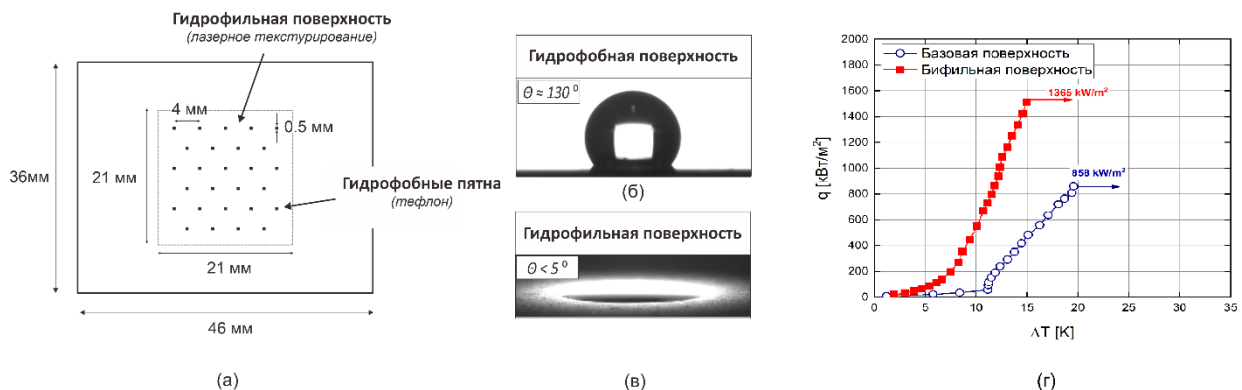


Рис. 1. (а) Конфигурация бифильной поверхности, созданной на поверхности кремниевого нагревателя; (б) смачивание лазер-модифицированной поверхности кремния; (в) смачивание поверхности, покрытой фторполимером. (г) Кривые кипения воды для базовой и бифильной поверхностей.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 18-79-10119н).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КИПЕНИИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Марасанов Н.В.\* , Мелешкин А.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[\\*nikmarasanov@gmail.com](mailto:nikmarasanov@gmail.com)

Газовые гидраты представляют собой соединения воды и газа, в которых молекулы газа удерживаются силами Ван-дер-Ваальса в сформированной молекулами воды кристаллической решетке. Одной из особенностей газовых гидратов является то, что в процесс их образования вовлекаются только молекулы чистой воды, что позволяет использовать газовые гидраты для опреснения и очистки воды. При этом важно отметить уникальность термобарических условий образования газового гидрата из каждого отдельного газа, что позволяет подбирать такой газ, который удешевит и упростит технологию в каждом отдельном случае.

В работе представлены результаты моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics процесса гидратообразования методом кипения-конденсации гидратообразующего газа в объеме воды в геометрии реальной установки по производству гидратов, рабочая зона которой представляет собой параллелепипед с основанием  $150 \times 150$  мм и высотой 740 мм (Рис. 1). Отвод тепла от установки осуществляется через боковые стенки, на которых происходит конденсация гидратообразующего газа, одновременно с этим происходит подвод тепла к дну установки, интенсивность которого характеризует скорость образования пузырьков газа и зародышей газового гидрата из слоя сжиженного газа. Важно отметить, что на установку и ее содержимое не оказывается механическое воздействие, а вся циркуляция воды и газа в рабочем объеме обеспечивается подводом и отводом теплоты в разных участках.

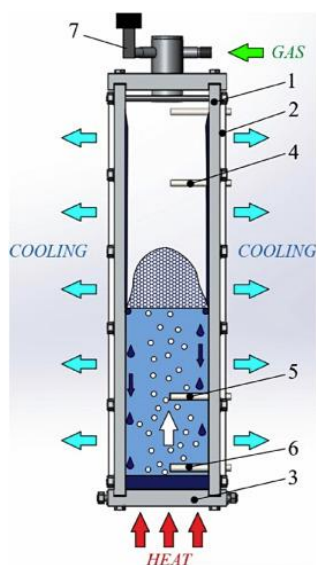


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Были смоделированы гидродинамические процессы при различных условиях интенсивности нагрева и охлаждения стенок экспериментальной установки и при различных температурах воды. Полученные при моделировании в COMSOL Multiphysics результаты были сопоставлены с результатами экспериментов.

*Работа поддержана РНФ (грант № 22-79-10330)*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО КЛЮЧА ДЛЯ КРИОГЕННОГО МАГНИТНОГО РЕФРИЖЕРАТОРА НА ОСНОВЕ КРИОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ 10 ТЛ

Маширов А.В.<sup>1\*</sup>, Колесов К.А.<sup>1</sup>, Кузнецов А.С.<sup>1</sup>, Мусабилов И.И.<sup>2</sup>, Коледов В.В.<sup>1</sup>, Шавров В.Г.<sup>1</sup>

1) *Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

2) *Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

\*[a.v.mashirov@mail.ru](mailto:a.v.mashirov@mail.ru)

Задача определения рабочих параметров тепловых ключей в области криогенных температур обусловлена интересом исследователей применением магнитокалорического эффекта в криогенных магнитных рефрижераторах [1, 2]. Целью работы являлось провести прямое экспериментальное наблюдение процесса контактной теплопроводности разнородной разъемной контактной пары механического теплового ключа при криогенных температурах, причем, одним из элементов контактной пары являлся магнитокалорический материал GdNi<sub>2</sub>. В данном сплаве наблюдается максимальный магнитокалорический эффект области фазового перехода ферромагнетик-парамагнетик при 75 К. Контактная пара помещалась в шахту диаметром 29 мм криомагнитной системы, где возможно было контролировать температурный диапазон 7-325 К и создавать магнитное поле до 10 Тл. При помощи линейного электродвигателя контактная пара могла либо прижиматься с заданным усилием в центре магнитного поля, либо создавался зазор 250 мкм, когда магнитокалорический материал помещался за пределы магнитного поля на данное расстояние. Тогда магнитокалорический элемент контактной пары в виде диска диаметром 15 мм и толщиной 5 мм линейным электродвигателем через шток 150 мм в начальный момент времени находился за пределами магнитного поля. Затем имея температуру 70 К за время 2 секунды элемент GdNi<sub>2</sub> перемещался в центр магнитного поля претерпевал магнитокалорический эффект (при адиабатическом намагничивании в поле 5 Тл его температура увеличивалась до ≈73 К) и в центре магнитного поля прижимался в медному диску равных габаритов и с такой же начальной температурой 70 К. В результате контактной теплопроводности температуры элементов контактной пары GdNi<sub>2</sub>-медь выравнивались. Данный экспериментальный протокол повторялся для различных температур и магнитных полей. Результаты экспериментального наблюдения контактной теплопроводности в нестационарных условиях позволяют оценить время, конечные и начальные температуры процесса передачи тепла и как следствие параметры прототипов криогенных магнитных рефрижераторов на основе механических тепловых ключей и сравнить их с газовыми.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197, <https://rscf.ru/project/20-79-10197/>).*

## Литература

1. Park, I., Jeong, S. Development of the active magnetic regenerative refrigerator operating between 77 K and 20 K with the conduction cooled high temperature superconducting magnet // *Cryogenics* (2017) 88, с.106-115.
2. Kamiya K. et al. Active magnetic regenerative refrigeration using superconducting solenoid for hydrogen liquefaction // *Applied Physics Express* (2022)

# ГАЗОГИДРАТНЫЙ МЕТОД ОПРЕСНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ, ОСНОВАННЫЙ НА КИПЕНИИ СЖИЖЕННОГО ГИДРАТООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ОБЪЕМЕ ВОДЫ.

Мелешкин А.В.\*, Марасанов Н.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[mav@itp.nsc.ru](mailto:mav@itp.nsc.ru)*

За последние несколько десятилетий морская вода стала важным источником пресной воды, поскольку она является одним из самых богатых ресурсов на Земле. Опреснение - это процесс удаления солей из морской воды считается основной технологией для решения этой проблемы. Хотя обратный осмос является наиболее широко используемой технологией опреснения воды в мире, он требует больших затрат энергии (30% от общей стоимости опреснения воды). Следовательно, в мире существует необходимость в разработке инновационных энергоэффективных технологий для опреснения и очистки воды. Опреснение на основе газовых гидратов является многообещающей технологией для этих целей, так как в процессе гидратообразования участвует только чистая вода, что приводит к образованию твердого гидрата и концентрированного соляного рассола. После отделения от рассола синтезированного образца газового гидрата и его разложению образуется чистая вода.

Целью настоящей работы является создание гидратного метода опреснения и очистки воды от тяжёлых металлов. В основе которого ляжет разработанный авторами метод, основывающийся на самоорганизующемся циклическом процессе кипения и конденсации гидратообразующего газа в объеме воды. Высокая скорость образования газогидрата в данном методе связана с набором критериев, которые приводят к интенсификации процесса образования газового гидрата: Сжиженное состояние гидратообразующего газа позволяет ввести в реакционную среду сразу значительный объем газа; в результате кипения сжиженного газа создается развитая обновляемая граница зоны контакта газа и воды, которая стимулирует образование газового гидрата (газовый гидрат растет на границе раздела газ-вода; температура газа внутри пузырька всегда максимально охлаждена относительно линии насыщения, при этом при кипении сжиженного газа также происходит существенное охлаждение воды, что позволяет эффективно отводить выделенное в процессе гидратообразования тепло; переохлаждение реакционной среды относительно термобарических условий образования гидрата позволяет уменьшить время индукции. Одновременное наложение этих факторов значительно сокращает время образования гидрата по сравнению с другими методами синтеза. При этом метод имеет высокую энергоэффективность, поскольку никаких дополнительных воздействий на газожидкостную систему не требуется, только одновременный нагрев и охлаждение рабочей секции, при этом нагрев может осуществляться радиатором холодильной машины, что может существенно повысить эффективность метода.

Особенностью метода, применительно к опреснению и очистке воды, является возможность быстро образовывать гидрат без использования химических или кинетических промоутеров (часто используемых при синтезе гидрата). Полученные результаты могут быть использованы для создания экономичных и экологически безопасных систем водоснабжения атомных и тепловых электростанций, городских систем очистки питьевых и сточных вод.

*Работа поддержана РФФ (грант № 22-79-10330).*

# ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ПРОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕНКАХ

Михайлов А.В.<sup>1\*</sup>, Кислицын С.А.<sup>1</sup>, Гришков В.А.,<sup>1</sup> Юровских Е.А.<sup>2</sup>, Бердников В.С.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*senya\\_mik@ngs.ru](mailto:*senya_mik@ngs.ru)

Исследовано развитие нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в слое этилового спирта со свободной поверхностью после внезапного разогрева электрическим током одной из вертикальных стенок прямоугольной полости в диапазоне высот слоя жидкости от 50 до 170 мм и при плотностях тепловых потоков на разогреваемой стенке полости от 274 до 1710 Вт/м<sup>2</sup>. Выполнена цифровая видеосъемка развития пространственной формы течения во всем объеме полости и в пограничных слоях на разогреваемой и изначально холодной стенках. Исследован процесс формирования течения вдоль свободной поверхности слоя жидкости. Определены времена продвижения теплового фронта от разогреваемой стенки до противоположной вертикальной стенки. После натекания потока горячей жидкости на противоположную тонкую металлическую стенку наблюдается появление и развитие нагретого фрагмента. Проведена тепловизионная съемка нестационарных полей температуры на тонкой стенке. Проведена компьютерная обработка тепловизионных фильмов, построены распределения температуры по высоте стенки. По ним оценены градиенты температуры в зависимости от времени во всех экспериментально исследованных режимах. Параллельно выполнены численные исследования методом конечных элементов в условиях близких к экспериментальным. Полученные численно нестационарные поля температуры в объеме слоя жидкости и на тонкой стенке существенно дополняют данные экспериментов. Полученные результаты интересны с точки зрения оптимизации соотношений весовых и прочностных параметров в авиационной технике, где необходимы исследования нестационарных полей температуры, градиентов температуры и температурных напряжений в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) и другой термонапряженной техники [1- 3]. Для оценок ресурса элементов ЛА и тонкостенных конструкции, требуются достоверные знания о теплообмене в конструкции, о распределениях градиентов температуры и термических напряжений. Термические напряжения, обусловленные большими локальными градиентами температуры, могут возникать в зонах контакта «стенка–жидкость–газ».

## Литература

1. Белов В. К., Белов В. В. Прочность и устойчивость ракетных и авиационных конструкций при термосиловом нагружении. Монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 491 с.
2. В. С. Бердников, В. А. Гапонов, В. А. Гришков, П. М. Лиханский, В. А. Марков Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // Теплофизика и аэромеханика, 2010, т.17, № 2, с.197- 208.
3. A V Mikhaylov, V A Grishkov and V S Berdnikov. Dependence of the temperature fields of a thin vertical wall on the intensity of the oncoming flow of a heated liquid. // Journal of Physics: Conference Series 1867 (2021) 012040 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1867/1/012040

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА СТЕНКАХ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Михайлов А.В. \*, Кислицын С.А., Гришков В.А., Бердников В.С.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

[\\*senya\\_mik@ngs.ru](mailto:*senya_mik@ngs.ru)

Экспериментально и численно проведены исследования процесса кристаллизации воды при охлаждении вертикальной и горизонтальной стенок прямоугольной полости ниже температуры кристаллизации. Изучена эволюция формы течения и ее влияние на формы фронтов кристаллизации, в зависимости от высоты слоя воды и значений перепадов температуры между стенками. Рабочий участок экспериментального стенда состоит из полости размером  $105 \times 105 \times 30$  мм<sup>3</sup>, две торцевые стенки которой являются теплообменниками. Эксперименты проведены со слоями толщиной от 12 до 105 мм. Перепады температуры между боковыми стенками полости менялись от 5 до 15°C. Форма течения в эксперименте снималась цифровой видеокамерой. Течение воды визуализировалось полиамидными частицами-трассерами в тонком подсвечиваемом слое. Численные расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов. Решались нестационарные уравнения свободной конвекции для жидкости и уравнение теплопроводности для льда в двумерной сопряженной постановке в терминах температура, функция тока и вихрь скорости. Использовались треугольные сетки, адаптирующиеся под изменяющееся положение фронта кристаллизации. Сетка сгущается ко всем границам, включая границу раздела кристалла и расплава. Теплота кристаллизации учитывалась через внутренний источник энергии. Границы зоны учета теплоты кристаллизации определялись в итерационном процессе решения уравнений внутри временного шага. Расчеты выполнены в полости со всеми жесткими стенками и со свободной верхней границей с учетом термокапиллярного эффекта. Показано, что кристаллизация начинается после переохлаждения слоя воды вблизи границы. В начале процесса кристаллизации наблюдается резкий рост температуры из-за выделения теплоты кристаллизации. Показано, что изменение высоты слоя жидкости и изменение температуры на более горячей границе могут приводить к качественному изменению формы фронта кристаллизации. С помощью метода PIV получены поля скорости и профили компонент скорости в жидкости при физическом моделировании. Численные расчеты дополняют экспериментальные результаты данными об эволюции полей температуры в жидкости и в кристалле. Полученные результаты могут быть полезны при выращивании кристаллов из расплавов обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры, например, кадмий-ртуть-теллур, кристаллы которого широко применяются в оптической технике, работающей в ИК диапазоне.

## Литература

1. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией / Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А., М.: Физматлит, 2007. 224 с
2. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications / P. Capper, J. Garland, John Wiley & Sons Ltd, 2011. 556 p.
3. Кислицын С.А., Михайлов А.В., Золотухина О.С. Влияние высоты слоя воды на формы фронта кристаллизации льда при охлаждении вертикальной стенки полости / Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар, посвященный 65-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН»: Труды конференции (29-31 августа 2022 г., Новосибирск) –Новосибирск: СО РАН, 2022, с.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНВЕКТИВНОМ ИСПАРЕНИИ НЕ АЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ R32/R134A В МИКРОКАНАЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Мордовской А.С., Шамирзаев А.С. \*

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

\* [alisham@itp.nsc.ru](mailto:alisham@itp.nsc.ru)

Работа направлена на экспериментальное исследование теплообмена и определение критического паросодержания в системе щелевых микроканалов при течении двухфазного потока не азеотропной смеси при высоких массовых скоростях в условиях доминирующего влияния испарения. В таких условиях теплообмен определяется термическим сопротивлением пленки, которая формируется под воздействием межфазного трения. Эксперименты проведены на участке, содержащем 2 прямоугольных микроканала сечением  $2 \times 0.2$  мм длиной 16 мм, схема участка и экспериментальная установка аналогична [1].

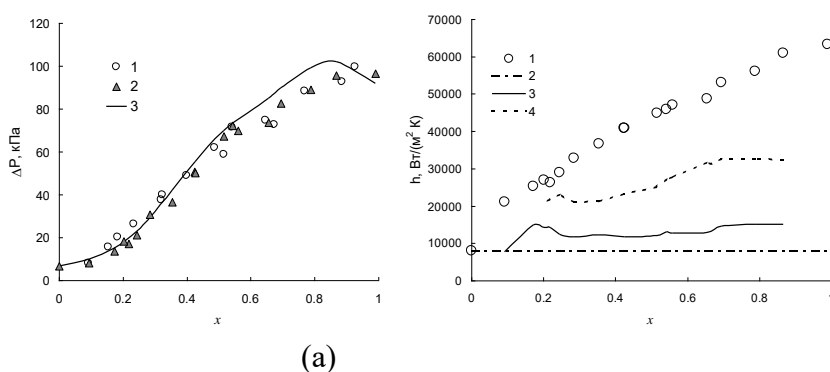


Рис.1. Перепад давления (а) Коэффициента теплоотдачи (б) от паросодержания.

Проведено экспериментальное измерение перепада давления и теплообмена при течении парожидкостного потока бинарной смеси хладагентов R32/R134a (65%/35%). Условия эксперимента  $G \sim 1900$  кг/м<sup>2</sup>с,  $q = 130$  кВт/м<sup>2</sup>. В ходе опытов варьировалось входное паросодержание. На рис 1а данные по перепаду давления: точки 1- адиабатное течение, точки 2  $q = 130$  кВт/м<sup>2</sup>, линия 3 расчёт по [2]. Экспериментальные данные хорошо соответствуют расчёту. На рис 1б данные по теплоотдаче. Точки 1 – эксперимент, линии 2 –расчёт для однофазной жидкости по Гнелински; 3 – расчёт испарения равномерной гладкой плёнки при кольцевом режиме течения (трение по [2]), 4 –расчёт испарения равномерной волновой плёнки при кольцевом режиме течения (трение по [2]). Коэффициенты теплоотдачи увеличиваются с ростом паросодержания, наблюдается отсутствие кризисных явлений при высоких паросодержаниях. Показана возможность полного бескризисного испарения не азеотропного потока. Экспериментальные коэффициенты теплоотдачи при испарении лежат существенно выше, чем при расчёте для равномерной плёнки, что указывает на неравномерность распределения жидкости по периметру канала при высоких массовых скоростях.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-00168, <https://rscf.ru/project/22-29-00168/>.*

## Литература

1. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. Technical Physics Letters. 2018. 44(10), 938-941
2. Shamirzaev A. International Journal of Multiphase Flow. 2022.C.104314.



# ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Морозова М.А.<sup>1\*</sup>, Максимовский Е.А.<sup>2</sup>, Зайковский А.В.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
2) *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[\\*morozova.itp@gmail.com](mailto:morozova.itp@gmail.com)

Использование наножидкостей в качестве рабочей среды в солнечных коллекторах может значительно повысить их эффективность. При этом первостепенной задачей является создание стабильных наножидкостей. В настоящей работе исследуются принципы создания стабильных наножидкостей на основе углеродных наноматериалов, полученных электродуговым методом. Для этой цели был использован электродуговой реактор плазмохимического синтеза наноматериалов, подробно описанный в [1]. В процессе электродугового синтеза камера реактора была заполнена гелием, давление которого является одним из ключевых параметров, управляющих процессом синтеза наноматериалов и формируемой структурой. В данной работе давления гелия составляли 3, 12, 25, 50, 100, 200 Торр. Синтезированные материалы были исследованы различными методами структурного анализа. Далее были получены наножидкости на основе воды с добавлением различных концентраций синтезированных углеродных частиц и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Стабильность наножидкостей определялась путём анализа спектров поглощения образцов. Образцы с добавлением ПАВ сохраняли стабильность в течение 3 месяцев.

В результате проведенных исследований было установлено, что в процессе плазмохимического синтеза формируется углеродная структура, представляющая собой агломераты углеродных глобул. Увеличение давления гелия в камере электродугового реактора приводит к формированию большего размера углеродных глобул. На основе синтезированных материалов получены стабильные наножидкости.

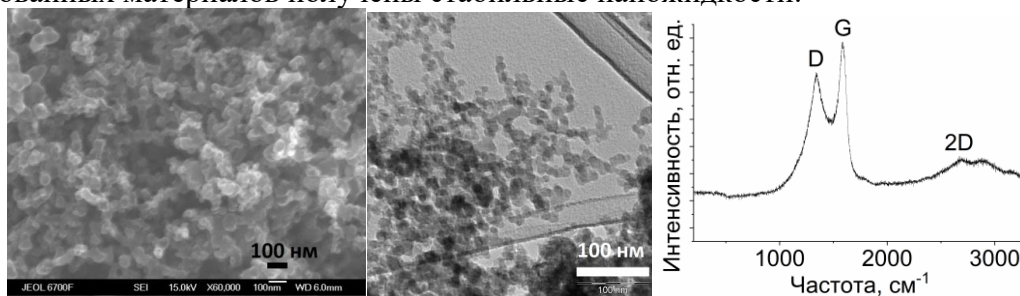


Рис. 1. Углеродные наночастицы: а) снимок, полученный методом сканирующей электронной микроскопии, б) методом просвечивающей электронной микроскопии, в) спектр комбинационного рассеяния света.

*Работа выполнена с использованием оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН. Авторы работы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение исследований методом ПЭМ. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 22-79-00139, <https://rscf.ru/project/22-79-00139/>.*

## Литература

1. Zaikovskii AV, Kardash TY, Kolesov BA, Nikolaeva OA. Graphene, SiC and Si Nanostructures Synthesis During Quartz Pyrolysis in Arc-Discharge Plasma // Phys. Status Solidi A, 2019, 216(14), 1900079

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ МИНИКАНАЛЕ

Мунгалов А.С.<sup>1,2\*</sup>, Кочкин Д.Ю.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*mungalov@alumni.nsu.ru](mailto:mungalov@alumni.nsu.ru)

Применение испарительных систем, основанных на пленочном течении жидкости в миниканале под действием потока газа, является эффективным методом охлаждения теплонагруженных элементов [1]. В данных системах увеличение значений отводимых тепловых потоков может быть достигнуто при помощи повышения расходов жидкости и газа. Однако при определенных расходах происходит переход от расслоенного режима течения к кольцевому, при этом часть жидкости, движущаяся по верхней стенке канала, не вступает в контакт с охлаждаемым элементом и соответственно не участвует в отводе тепла с его поверхности. Целью данной работы является численное исследование перехода от расслоенного режима течения в плоском миниканале к кольцевому.

Задача решалась методом конечных объемов при помощи ПО Ansys Fluent в двумерной постановке. В задаче варьировалась геометрия входного участка, а также скорости жидкости и газа. Межфазная граница моделировалась с помощью метода объема жидкости. Кроме того, осуществлялся поиск геометрии входного участка, при котором расслоенный режим течения сохраняется для более широкого диапазона скоростей газа и жидкости.

На рис. 1 представлен результат расчета расслоенного режима течения в миниканале длиной 70 мм, высотой 1 мм и углом подвода жидкости  $15^\circ$ . Для данного случая вблизи смесителя наблюдается образование возмущений, амплитуды которых увеличиваются со временем, что приводит к отрыву капель, которые впоследствии взаимодействуют с верхней стенкой канала. Стоит отметить, что образование неустойчивости подобного типа, характеризующейся отрывом капель, происходит по всей длине канала, а не только в области смесителя.

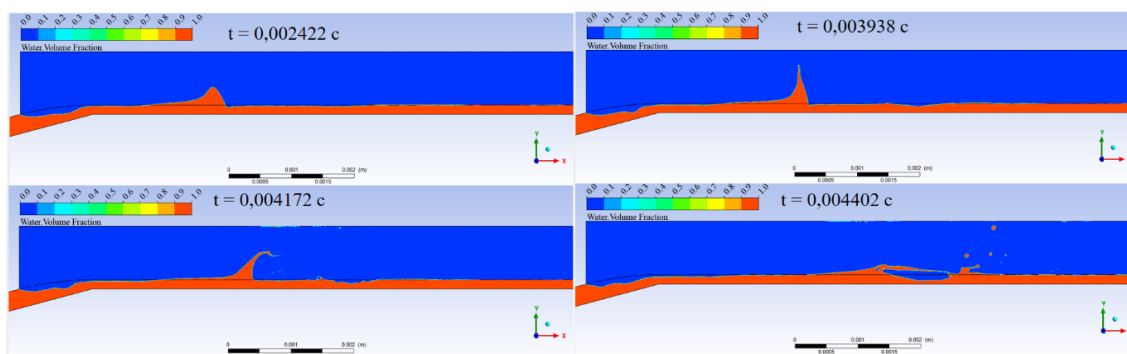


Рис. 1. Результаты расчета для входного участка с наклоном  $15^\circ$ . Скорость газа составляла 25 м/с, скорость жидкости составляла 0,05 м/с.

*Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00695 П, <https://rscf.ru/project/19-19-00695/>).*

## Литература

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V., Bar-Cohen A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2011. – V. 35

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Мухина М.А.<sup>1\*</sup>, Садкин И.С.<sup>1,2</sup>, Копьев Е.П.<sup>1</sup>, Шадрин Е.Ю.<sup>1</sup>

- 1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
- 2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*  
[\\*mary-andr@yandex.ru](mailto:mary-andr@yandex.ru)

Резкое увеличение темпов загрязнения окружающей среды приводит к необходимости поиска новых технологий и совершенствования старых методов снижения выбросов при сжигании топлив. Одним из методов контроля выбросов NO<sub>x</sub> является снижение пиковой температуры при горении путем добавления газов-разбавителей. В качестве разбавителя большой интерес представляет собой водяной пар в связи с его дешевизной и легкодоступностью.

Ранее авторами было исследовано влияние впрыска водяного пара при сжигании жидких углеводородных топлив и показаны преимущества метода, такие как снижение выбросов СО и NO<sub>x</sub>, высокая полнота сгорания топлива, возможность сжигания некондиционных жидких горючих при их распылении струей пара [1, 2]. Настоящая работа посвящена изучению влияния перегретого пара и нагретого воздуха на сжигание газообразного углеводородного топлива. Такое топливо представляет интерес, так как не требует распыла, в связи с чем отсутствуют затраты энергии на разрушение капли и ее испарение. В качестве топлива была взята пропан-бутановая смесь.

Для исследования тепловых и экологических характеристик сжигания газообразного топлива в присутствии перегретого водяного пара был модернизирован огневой стенд, предназначенный для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов, а именно была смонтирована система подачи газообразного топлива. Эксперименты проводились на лабораторном образце горелочного устройства с естественным притоком воздуха из атмосферы [1]. Пропан-бутановая смесь подавалась через трубку с внутренним диаметром 4 мм вблизи основания струи распылителя – перегретого водяного пара или, вместо него, нагретого воздуха. Газовый состав продуктов сгорания регистрировался на выходе из проточного калориметра, где проба имеет температуру, близкую к комнатной. Определение средней по времени температуры в факеле проводилось с использованием Pt-Rh/Pt-Rh термопары.

В ходе экспериментов варьировались расход топлива и пара или, вместо него, воздуха. Получены характерные фотографии пламени, построены карты содержания кислорода, монооксида углерода и оксидов азота в продуктах сгорания, а также профили температуры пламени вдоль вертикальной оси сопла горелки в зависимости от режимных параметров. Впрыск перегретого водяного пара вместо воздуха позволяет снизить максимальную температура в среднем на ~ 100 °С. Найдены режимные параметры, при которых концентрации СО в продуктах сгорания минимальны. Для таких режимов наблюдается снижение образования NO<sub>x</sub> при впрыске пара, что предположительно связано со снижением пиковой температуры.

## Литература

1. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NO<sub>x</sub> reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // *Process Saf. Environ. Prot.* – 2021. – V. 152. – P. 240-248.
2. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NO<sub>x</sub> emission // *Fuel.* – 2021

# НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Сарычев В.Д. \*, Невский С.А., Грановский А.Ю., Сарычев Д.В., Коновалов С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*

*\*[sarychev\\_vd@mail.ru](mailto:sarychev_vd@mail.ru)*

Целью работы является теоретическое обоснование образования наноразмерных структур при сдвиговых течениях в материалах в широком диапазоне скоростей. В работе [1] описано формирование наноразмерных ячеек металлах при воздействии гетерогенных плазменных потоков, созданных электрическим взрывом проводников. При воздействии этих потоков на металлы происходит расплавление поверхностного слоя и реализуется сдвиговое течение плазмы и расплавленного металла. В этой работе использовалась идея о том, что наноструктуры в металле образуются в результате неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Слой плазмы моделируется идеальной жидкостью, а расплавленный слой вязкой жидкостью. Линейный анализ уравнений гидродинамики Навье-Стокса относительно малых возмущений позволил получить дисперсионное уравнение, численное решение которого позволило получить зависимость скорости роста от длины волны. Максимум в этой зависимости достигается при определенном значении длины волны  $\lambda_m$ . Получено, что при конкретных значениях параметров (плотности слоев, толщины слоев, вязкости, коэффициентов натяжения и скорости относительного движения) длина волны  $\lambda_m$  находится в нанометровом диапазоне. Это означает, что волны размером порядка именно этой длины волны, получают развитие и после застывания расплавленного слоя их можно наблюдать. При этом скорость скольжения составляет порядка 1 км/с и роль вязкости незначительна. Этот результат был новым, однако являлся ожидаемым: при увеличении скорости скольжения длина  $\lambda_m$  уменьшается. В этих же экспериментах был обнаружен второй нанослой, расположенный на границе расплавленного и нерасплавленного металла. Модель его формирования так же основана на возникновении неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, где принципиальную роль играет вязкость [2]. При определенных параметрах была обнаружена зависимость скорости роста от длины волны, имеющая два максимума, один из которых может лежать в нанометровом диапазоне (вязкостно обусловленный максимум). Исследования [3] позволили найти условия формирования двух максимумов и дать приближенные выражения для двух значений  $\lambda_m$ . Это позволяет проводить параметризацию с целью выявления условий формирования наноструктур в сдвиговых слоях в широком диапазоне скоростей, что является принципиально новым и требует экспериментальной проверки. В заключении рассматриваются схемы экспериментов, в которых могут быть получены подтверждения предложенной модели.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ проекта 22-79-10229, <https://rscf.ru/project/22-79-10229>)*

## Литература

1. Sarychev V. D., Vashchuk E.S., Budovskikh E.A., et al, Nanosized structure formation in metals under the action of pulsed electric-explosion-induced plasma jets // Tech. Phys. Lett. –2010.– V. 36. – p. 656–659.
2. Granovskii A.Y., Sarychev V.D., Gromov V.E. Model of formation of inner nanolayers in shear flows of material // Tech. Phys. – 2013. – V. 58. – p. 1544–1547.
3. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kormyshev V.E. et al. Model of Nanostructural Layer Formation during Long-Term Operation of Rails. // Steel Transl. – 2020. – V. 50. P. 665–671.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТОЧНОГО УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА

Новоселов К.В. \*, Юношева Е.В.\*\*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*[\\*k.novoselov@g.nsu.ru](mailto:k.novoselov@g.nsu.ru)*

*[\\*\\*e.yunosheva@g.nsu.ru](mailto:e.yunosheva@g.nsu.ru)*

Исследование течения, которое возникает при подаче в породу жидкости или газа, важно для повышения процессов нефтеотдачи. Один из способов изучения таких течений – проведение лабораторных экспериментов над образцом керна, однако этот способ имеет ряд недостатков:

1. Дорого и долго (обычно исследование керна в лаборатории занимает в районе трех месяцев).

2. Низкая достоверность результатов исследований.

3. Не всегда получается достать целый керн, часто во время транспортировки он разрушается.

4. Над керном можно будет провести только один эксперимент.

Поэтому нужно сделать цифровой аналог, это экономично и над ним можно провести большое количество экспериментов. Так как многофазные течения с обменом компонентами исследованы достаточно слабо, разрабатываемая численная модель позволит лучше понять их свойства и закономерности.

Работа посвящена исследованию двухфазного течения в пористой среде. Течение моделировалось с помощью метода решеточного уравнения Больцмана. Использовались двумерная модель D2Q9 и трехмерная модель D3Q19 [1]. Для описания разделения фаз многокомпонентного флюида применялся метод псевдопотенциала с общим уравнением состояния Пенга-Робинсона [2]. Рассматриваемая система представляла собой смесь углеводородов. При моделировании учитывалось взаимодействие флюида с материалом пористого скелета.

В тестовых расчетах проверено выполнение закона Лапласа, вычислено поверхностное натяжение при разных начальных параметрах, получены значения коэффициентов, необходимых для задания различных краевых углов. Были посчитаны равновесные концентрации компонент в жидкой и газовой фазе при различных давлении и температуре. Проведены предварительные расчеты двухфазного течения в модели пористой среды.

## Литература

1. Qian Y.N., d’Humières D., Lallemand P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation // *Europhysics Letters*. – 1992. – V.17, N 6. P. 479-484.
2. Cheng Peng, Luis F. Ayala, Orlando M. Ayala. A thermodynamically consistent pseudo-potential lattice Boltzmann model for multi-component, multiphase, partially miscible mixtures // *Journal of Computational Physics*. – 2021. – V.

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ ТОНКОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ШЛИРЕН МЕТОДОМ

Пещенюк Ю.А.<sup>1,2\*</sup>, Гатапова Е.Я.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*peschenyuk.yulya@gmail.com](mailto:*peschenyuk.yulya@gmail.com)

Испарение одиночных капель играет важную роль во многих приложениях таких как, охлаждение микроэлектроники, биологические и медицинские исследования и др. В связи с этим создание метода для количественного измерения толщины пленки и деформаций её поверхности является особенно актуальным. Для получения двухмерных и трехмерных характеристик быстро испаряющихся тонких пленок жидкости применяются несколько оптических методов. Таких как конфокальная микроскопия, интерферометрия и шлирен метод [1,2].

В данной работе использовался модифицированный шлирен метод со ступенчатым градиентным фильтром. В качестве подложки использовался черный кремний (b-Si). Для обработки полученных данных была разработана программа в среде Matlab. Значения измеряемых углов лежат в диапазоне  $\pm 5^\circ$ . Произведен расчет толщины тонкой пленки, площади поверхности и объема жидкости методом элементарных параллелепипедов. Измерены профили толщины для капель воды при различных значениях температуры подложки, которые дают качественное и количественное представление о двухмерных и трехмерных деформациях поверхности. Минимальная измеренная толщина пленки жидкости 2 мкм. Проведен расчет скорости контактной линии и удельной скорости испарения с единицы поверхности. Показано, что полученные данные по скорости испарения хорошо согласуются с данными, полученными интерференционным методом и асимптотическим подходом [2], Рис.1.

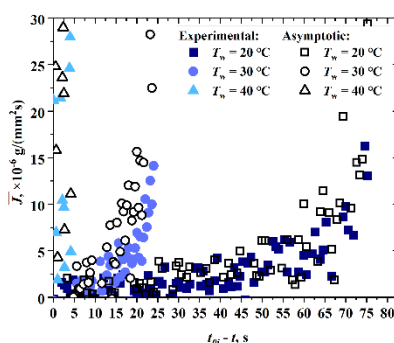


Рис. 1. Удельная скорость испарения воды с единицы поверхности.

*Характеризация свойств смачивания поверхности черного кремния на KRUSS DSA-100E выполнено за счет государственного контракта с ИТ СО РАН (121031800213-0).*

## Литература

1. Gatapova E. Y. et al. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation //Soft Matter. – 2018. – Т. 14. – №. 10. – С. 1811-1821.
2. Peschenyuk Y. A. et al. The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter //Experiments in Fluids. – 2023. – Т. 64. – №. 1. – С. 1-14.

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

Плеханов М. С.<sup>1,2</sup>, Сальников М. В.<sup>1</sup>, Мулляджанов Р. И.<sup>1</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*m.plekhanov@g.nsu.ru*

Численное моделирование физических процессов играет важную роль во многих областях производства, поскольку позволяет экономить физические и временные ресурсы. Задача моделирования гидродинамики и газовой динамики является востребованной в области конструирования систем сложной геометрии с тепло- и массопереносом.

Стандартным методом моделирования задач гидродинамики является численное решение уравнения Навье-Стокса при помощи разностных схем. Однако данный подход обладает существенным недостатком в плане временных затрат, поскольку время вычислений линейно возрастает с увеличением числа пространственных ячеек. В противовес ему в настоящее время развивается альтернативный подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана (Lattice Boltzmann Method, LBM).

LBM моделирует эволюцию функции распределения частиц вещества по направлениям скорости в каждой ячейке пространства. При этом эволюция определяется только взаимодействием с соседними ячейками пространства, в связи с чем алгоритм данного метода может быть распараллелен. Реализация алгоритма на графических процессорах позволяет степенным образом уменьшить время вычислений, что является основным преимуществом данного метода.

В данный момент существуют успешные реализации LBM, однако они не способны решать задачи взаимодействия нескольких компонент или фаз вещества. Для решения задач такого характера в лаборатории 7.2 ИТ СО РАН ведется разработка программного обеспечения на основе открытого кода FluidX3D. В данной работе было проведено первичное исследование данного кода на предмет имплементированных алгоритмов и расчет типовых задач для проверки производимых расчетов на корректность.

Анализ кода показал наличие имплементации базовых алгоритмов LBM и качественного графического интерфейса. Моделирование типовых задач (течение Пуазейля, Куэтта, течение в каверне) находится в согласовании с результатами научно верифицированных программных пакетов. Данный факт является доказательством корректности имплементации LBM и предпосылкой для дальнейшего развития открытого кода FluidX3D.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны Институту теплофизики СО РАН и Новосибирскому государственному университету за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера "Каскад".*

## Литература

1. Krueger T., Kusumaatmaja H., Kuzmin A., Shardt O., Silva G., Viggen, E. M. The Lattice Boltzmann Method: Principles and Practice. (Graduate Text in Physics) // Springer – 2016. 690 p.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ УГЛОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ПЛАСТИНЫ В ЛИНЕЙНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Рудая Я. Е.<sup>1\*</sup>, Шмакова Н.Д.<sup>1</sup>, Чеботников А.В.<sup>1</sup>, Бойко О.А.<sup>1</sup>, Ерманюк Е.В.<sup>1</sup>,  
Сибгатуллин И.Н.<sup>2</sup>

1) *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г.Новосибирск, Россия*

2) *Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Институт  
океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия*

*\*[y.rudaya@g.nsu.ru](mailto:y.rudaya@g.nsu.ru)*

Исследование внутренних волн имеет множество приложений в геофизике и климатологии [1]. Внутренние волны в океане возникают в стратифицированной жидкости при взаимодействии приливных течений с рельефом океанического дна. При определенном сочетании геометрии области и угла распространения волновых лучей фокусировка волновой энергии может привести к ее концентрации вблизи замкнутых геометрических конфигураций, называемых волновыми аттракторами [2].

Целью работы является экспериментальное исследование квази-двумерных аттракторов внутренних волн, имеющих по одному отражению от вертикальных и горизонтальных стенок. Экспериментальная установка представляет собой резервуар из оргстекла длиной 110 см, шириной 23 см и глубиной 50 см, с наклоненными под углом 32° боковыми стенками и помещенной в центре пластиной, совершающей колебания с определенными амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ . На пластине закреплены датчики линейных перемещений и момента силы. Колебания пластины в однородно-стратифицированной жидкости генерируют два симметричных волновых аттрактора. Для визуализации течения используется синтетический шпирен-метод. Поля градиентов плотности вычислены с помощью кросс-корреляции изображений. Для фильтрации волн на определенных частотах использовано преобразование Гильберта.

Рассмотрено влияние амплитуды колебаний на структуру волнового аттрактора. При малых амплитудах аттрактор устойчив. При увеличении амплитуды колебания волнопродуктора возникает триадный резонанс и волновая турбулентность. Из данных, полученных с датчика момента силы, и из двумерных численных расчетов была вычислена мощность в системе [3]. В линейном режиме расчет в точности совпадает с экспериментальными данными. При увеличении амплитуды колебаний расчет и экспериментальные данные расходятся из-за роста диссипации энергии на горизонтальных стенках, отсутствующей в двумерных расчетах. При достаточно большой амплитуде колебаний, обнаружены вторичные короткие волны на основной частоте возмущения с групповой скоростью, противоположно направленной групповой скорости основной волны в той же области.

## Литература

1. Ferrari, R. What goes down must come up // *Nature*. – 2014. – 513. – 179–180.
2. Maas, L. R. M., Benielli, D., Sommeria, J., Lam, F.-P. A. Observation of an internal wave attractor in a confined, stably stratified fluid // *Nature*. – 1997. – 388. – 557–561.
3. Davis G., Dauxois T., Jamin T., Joubaud S. Energy budget in internal wave attractor experiments // *Journal of Fluid Mechanics*, 880: 743-763, 2019.



# ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КАПСУЛ ПРИ РАСПАДЕ КОАКСИАЛЬНОЙ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ

Рябов М.Н. \*, Гобызов О.А., Бильский А.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*\*[mihahmach@mail.ru](mailto:mihahmach@mail.ru)*

Работа направлена на развитие основ высокопроизводительной 3Д-печати. Целью экспериментального исследования является анализ процессов стабильного распада коаксиальной струи. Течение двухфазной струи в работе формировалось коаксиальным микросоплом: внешний кольцевой канал (кольцевая фаза) образован зазором между внешней стенкой трубки внутреннего канала (осевая фаза, проходной диаметр 200 мкм) и стенкой внешнего канала, ширина зазора 100 мкм (рис. 1). Таким образом, работа имеет непосредственную актуальность для развития аддитивных технологий в области печати объектов из композитных материалов [1], а также обладает фундаментальным характером с точки зрения изучения процессов взаимодействия несмешивающихся жидкостей в спутном потоке [2]. Основной экспериментальной методикой была высокоскоростная теневая визуализация с большим оптическим увеличением. В качестве осевой фазы выступала дистиллированная вода, в качестве кольцевой применялась смесь полиметилсилоксанов различной молекулярной массы итоговой вязкостью 100 сСт для моделирования маловязких полимерных смол.

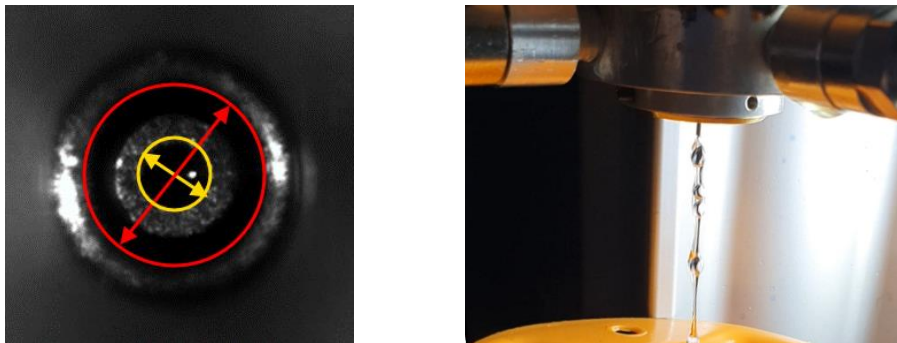


Рис. 1. Фотография выходного участка коаксиального микросопла и сопла в работе.

Давления вытеснения рабочих жидкостей лежали в диапазоне от 0 до 5 атмосфер. В таком диапазоне были реализованы характерные режимы истечения, встречающиеся в литературе: капельный режим (dripping), режим с образованием композитных капель (капсул), режим турбулентного распада композитной струи. Наибольшее внимание уделено процессу образования капсул: частотам отрыва, размерам и процентному содержанию фаз в зависимости от режимных параметров. Отдельно рассматривается эффект формирования многокамерных капсул.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-19-00732, <https://rscf.ru/project/21-19-00732/>.*

## Литература

1. Mea H. J., Delgadillo L., Wan J. On-demand modulation of 3D-printed elastomers using programmable droplet inclusions //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2020. – Т. 117. – №. 26. – С. 14790-14797.
2. Kendall J. M. Experiments on annular liquid jet instability and on the formation of liquid shells //The Physics of fluids. – 1986. – Т. 29. – №. 7. – С. 2086-2094.

# ГИДРОДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ МАГНИТНОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ряполов П.А. \*, Соколов Е.А., Калужная Д.А.

*Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия*

*\*r-piter@yandex.ru*

В данной работе предлагается новая методика создания активных пузырьков и капель с немагнитным ядром и покрытием, образованным магнитной жидкостью [1,2]. Гидродинамика данных систем рассмотрена в различных каналах при воздействии неоднородного магнитного поля. Магнитные жидкости являются коллоидным раствором наночастиц магнетика, покрытых поверхностно-активным веществом, диспергированных в жидкость-носитель.

Процесс образования активных пузырьков и капель состоит во введении немагнитной фазы в магнитную, которая удерживается неоднородным магнитным полем комбинированного источника, объединяющего кольцевой магнит и электромагнит. Мы исследовали различные режимы, приводящие к различным активным пузырькам и каплям, также было исследовано влияние магнитного поля на размер, скорость и ускорение образующихся активных капель. Показано, что активные пузырьки меняют свою траекторию под действием постоянного магнитного поля, а также распадаются под действием импульсного. Это обеспечивает новый механизм управления каплями и пузырьками с помощью магнитного поля. В отличие от метода flow focusing, являющимся одним из основных методов в капельной микрофлюидике, отрыв немагнитных капель и пузырьков происходит не от капилляра, а от левитирующего немагнитного объема. В этом случае левитирующая газовая полость выступает в роли ресивера, позволяя стабилизировать размер отрывающихся пузырьков и увеличить диапазон регулировки в отличие от данных работы [3], в которой отрыв пузырьков в магнитной жидкости происходил в однородном магнитном поле.

Это создает предпосылки для разработки жидких многослойных капсул, управляемых магнитным полем, которые могут концентрироваться в определенном месте и разрушаться под импульсным воздействием. Полученные результаты могут быть применены для создания систем микрофлюидики на основе капель, в которых неоднородное магнитное поле может использоваться для фокусировки капельных и пузырьковых течений в магнитной жидкости.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-22-003113  
<https://rscf.ru/project/22-22-00311/>*

## Литература

1. Sokolov, E.; Kaluzhnaya, D.; Shel'deshova, E.; Ryapolov, P. Formation and Behaviour of Active Droplets and Bubbles in a Magnetic Fluid in an Inhomogeneous Magnetic Field // Fluids – 2023 V8, №2.
2. Ryapolov P. A., Sokolov E. A., Postnikov E. B. Behavior of a gas bubble separating from a cavity formed in magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 549. – С. 169067.
3. Yamasaki H. et al. Dynamic behavior of gas bubble detached from single orifice in magnetic fluid //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 501. – С. 166446.

# ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПЛАМЕНИ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Савицкий А.Г.<sup>1,2\*</sup>, Шараборин Д.К.<sup>1,2</sup>, Толстогузов Р.В.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*a.savitskii@g.nsu.ru*

Одним из подходов для организации горения с низкой эмиссией вредных веществ в камерах сгорания газотурбинных установок является сжигание бедной (со значительным избытком воздуха) хорошо перемешанной смеси топлива и окислителя [1]. Однако известно, что в таких условиях пламя становится менее устойчивыми к внешним воздействиям. Это может приводить к термоакустическим пульсациям, которые, в свою очередь, становятся причиной разрушения узлов камеры сгорания [2]. Детальное экспериментальное исследование взаимодействия потока с пламенем в трехмерных течениях, часто нестационарных, опирается на анализ локального тепломассопереноса и специфику химических реакций. Подобный анализ требует одновременных измерений скорости, температуры и концентрации молекул.

Таким образом, важным параметром, подлежащим измерению при исследовании процессов, протекающих в камерах сгорания газотурбинных установок, является температура пламени. Выбор метода измерения является актуальной задачей. Основные требования к технике измерения температуры – высокое пространственное и временное разрешение, высокая точность. Кроме того, метод желательно должен быть бесконтактным и оказывать минимальное влияние на исследуемое пламя. Распространенными методами измерения температуры в турбулентном пламени являются рассеяние Рамана, когерентное анти-стоксовое комбинационное рассеяние, а также лазерно-индуцированная флуоресценция [3]. Однако стоит отметить, что в настоящее время в литературе представлено довольно мало экспериментальных работ, содержащих информацию о двумерном распределении температуры в турбулентных закрученных пламенах. Такие данные могут быть получены с использованием третьего из перечисленных выше методов.

Цель данной работы – исследование пространственной структуры поля температуры для модельного двухзонного фронтального устройства камеры сгорания газотурбинного типа, реализующего бедное горение предварительно перемешанной смеси, стабилизированное дежурным факелом метана при  $Re = 2.5 \times 10^4$ ,  $\varphi = 0.7$ . Измерения проводятся с использованием метода термически-активированной флуоресценции. Проведение подобных экспериментов необходимо для формирования базы данных, которая может быть использована для валидации результатов численного моделирования горения в камерах сгорания ГТУ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00803, <https://rscf.ru/project/22-19-00803/>).*

## Литература

1. Dunn-Rankin D. Lean Combustion: Technology and Control // The Aeronautical Journal. London: Cambridge University Press (2008) 112, №1131.
2. Meier W. et al. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame // Combust. Flame. Elsevier (2007) 150, №1–2. с. 2–26.
3. Eckbreth A.C. Laser Diagnostics for Temperature and Species in Unsteady Combustion // Unsteady Combust. Springer, Dordrecht (1996). с. 393–410.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОМАСЛЯНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОТХОДОВ

Садкин И.С. \*, Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Ануфриев И.С.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[sadkinvanya@mail.ru](mailto:sadkinvanya@mail.ru)*

В работе на примере смеси отработанных моторных масел проводится изучение характеристик горения жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара [1] в условиях закрытого топочного пространства применительно к созданию безопасного способа утилизации некондиционных жидких горючих отходов с получением тепловой энергии.

Представлена модернизированная конструкция оригинального паромасляного горелочного устройства малой мощности [2], основанная на принципе распыла топлива высокоскоростной струей пара, с возможностью регулировки подачи первичного и вторичного воздуха. В ходе исследований определены показатели вредных выбросов при изменении коэффициента избытка воздуха внутри топки. Научная новизна работы заключается в получении новых экспериментальных данных о процессах горения некондиционных жидких углеводородов в условиях закрытой камеры сгорания и с управлением коэффициентом избытка воздуха, которые дополняют сведения о механизмах горения в присутствии пара.

В работе исследуется работа горелочного устройства в диапазоне мощности 15-35 кВт в условиях типового водогрейного котла при различных режимных соотношениях пар/воздух/топливо. При варьировании подачи вторичного воздуха (наддува) была получена калибровочная зависимость массового содержания токсичных веществ в продуктах сгорания от общего избытка воздуха в камере сгорания установки. Показано, что добавление перегретого водяного пара обеспечивает высокую полноту сгорания топлива с одновременным снижением выбросов СО и NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания.

В ходе экспериментов обосновывается перспективность предложенного принципа сжигания жидких углеводородов при их распылении перегретым водяным паром в виду наличия ряда практических преимуществ перед существующими и широко применяющимися на практике решениями. Помимо низких показателей по содержанию вредных веществ в уходящих газах, конструкция горелочного устройства обеспечивает бесконтактный распыл, отсутствие топливной системы высокого давления, проблем засорения и коксования каналов подачи топлива. Причем еще одним преимуществом разработанной горелки является относительно малые габариты и мощность (от 10 кВт). Тогда как основные аналоги для сжигания отходов используют более мощные горелки мощностью от 200 кВт, из-за того, что отходы гораздо хуже горят, чем стандартное топливо, требуя гораздо больше времени сгорания и, соответственно, большие размеры камеры сгорания. Указанные недостатки решаются за счет использования пара.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-79-10134-П).*

## Литература

1. Anufriev, I.S., Kopyev, E.P., Alekseenko, S.V., Sharypov, O.V., Vigrayanov, M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy. – 2022. – V. 250. – Art. No. № 123849. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123849
2. Патент РФ №2740722 (ИТ СО РАН) Паромасляное горелочное устройство / Вигриянов М.С.; Ануфриев И.С.; Копьев Е.П.; Садкин И.С.; Шарыпов О.В.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСОСА НА СОБСТВЕННЫЕ И УСИЛЕННЫЕ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ВОЗМУЩЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Садовский И.А., Катасонов М.М.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
\*sadovski.ivan@yandex.ru*

В современной аэрогидромеханике до сих пор остро стоит задача управления обтеканием объектов в различных средах. В рамках традиционного подхода пассажирские самолеты на сегодняшний день практически достигли предела оптимизации аэродинамической компоновки. Известно, что отрывное течение многократно усиливает аэродинамическое сопротивление. При этом, отрыв может быть смещен или устранен турбулизацией пограничного слоя. Турбулентное обтекание так же не является оптимальным, поскольку сопротивление трения турбулентного пограничного слоя вносит, согласно оценкам, примерно половину от общего сопротивления. В идеале необходимо добиться ламинаризации обтекания там, где это в принципе возможно. Таким образом, решение задачи активной оптимизации обтекания в перспективе позволяет получить сильное снижение сопротивления трения, а, следовательно, уменьшение  $C_x$ , шума и расхода топлива. Наибольшие успехи достигнуты в методах, сочетающих в себе активное и пассивное управление пограничным слоем, т.н. КУЛО (Комбинированным управлением ламинарным обтеканием). Распределенный отсос – один из самых перспективных активных методов воздействия на пограничный слой уже используется в рамках КУЛО хвостового оперения на самолете Боинг 787-9.

В данной работе исследуется воздействие распределенного отсоса на собственные возмущения пограничного слоя, развивающиеся в естественных условиях и усиленных с помощью акустики. Эксперименты проводились на базе аэродинамических установок МТ-324 и Т-324 ИТПМ СО РАН. Отдельно выполнялось усиление естественных возмущений с помощью акустического воздействия на их гармонической частоте. Генерация и усиление возмущений с помощью акустики является апробированным методом, применявшемся, например, в работе [1]. Особенностью организации распределенного отсоса в пограничном слое скользящего крыла была гидродинамически гладкая проницаемая поверхность, через которую производился отсос. В этой поверхности неровности настолько малы, что не влияют на поток и развитие возмущений в нем. Результатом исследований стало уменьшение толщины пограничного слоя и устранение отрыва. Без использования отсоса естественные возмущения в данных условиях активно нарастают, вплоть до образования турбулентных пятен в конце области измерений. Акустическое воздействие усиливает скорость нарастания амплитуды возмущения. Распределенный отсос так же воздействует на усиленные акустикой собственные возмущения, устраняя их рост на протяжении всей области измерений.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00670, <https://rscf.ru/project/23-29-00670/>)*

## Литература

1. Довгаль А. В., Козлов В. В., Симонов О. А. Возбуждение звуком колебаний пограничного слоя на скользящем крыле // Ученые записки ЦАГИ. 1989. №6

# ЛАЗЕРНАЯ ЗОЛОТОИНДУЦИРОВАННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК СУБОКСИДА КРЕМНИЯ

Самохвалов Ф.А.<sup>1,2\*</sup>, Родионов А.А.<sup>1</sup>, Баранов Е.А.<sup>1</sup>, Замчий А.О., Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*faddeysamokhvalov@gmail.com*

Сегодня полупроводниковая электроника используется во многих областях. Так, тонкоплёночные поликристаллические полупроводниковые материалы перспективны для микро-, нано-, оптоэлектроники и фотовольтаики. Одной из ключевых потребностей для промышленного производства является удешевление подобных материалов, в частности, использование в качестве подложек стекла и пластика. Основным методом получения тонких плёнок поликристаллического кремния является термический отжиг плёнок аморфного кремния. Однако, термический отжиг требователен к внешним условиям: высокая температура процесса (более 600°C), необходимость поддерживать высокий вакуум, продолжительность (более 10-ти часов). Существуют альтернативные методы кристаллизации, например: лазер-индуцированная кристаллизация (ЛИК) и металл-индуцированная кристаллизация (МИК). Была поставлена задача объединить МИК и ЛИК для получения быстрого и нетребовательного к внешним условиям способа кристаллизации.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования кристаллизации аморфного кремния с использованием наносекундного импульсного лазерного отжига в сочетании с методом металл индуцированной кристаллизации. Образец представляет собой слоистую структуру из плёнки золота, толщиной 30 нм, и плёнки аморфного кремния, толщиной 130 нм. Для лазерного отжига использовались две длины волны: 532 и 1064 нм. ИК излучение модифицирует материал и имеет большой рабочий диапазон энергий. Порог модификации для ИК излучения составил 0,12 Дж/см<sup>2</sup>. Под воздействием видимого излучения наблюдался разрыв и отслоение плёнки композита. Аналогичные эксперименты были проведены в вакууме. RAMAN спектроскопия материала показала, что кремний кристаллизуется под действием ИК излучения.

Впервые донорным металлом для такого процесса выбрано золото, так как образует с кремнием точку эвтектики с самой низкой температурой и не окисляется. Показана возможность кристаллизовать аморфный кремний предложенным методом, как в воздухе, так и в вакууме. В будущем будут проводиться поиски других возможных режимов работы и исследование зависимости процесса от длительности лазерного импульса.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ № 20-58-04021.*

## Литература

1. Alexey A. Serdobintse et al. Scalable Approach for Amorphous Thin Silicon Films Near-IR Laser-Induced Crystallization Using Nickel Absorption Layer // Phys. Status Solidi.- June 2019.- Vol. 216.- № 11.- Article 1800964.
2. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Appl. Surf. Sci.-2020.- Vol. 512- Article. 145753.

# НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПАВ

Семенов А.А.<sup>1,2\*</sup>, Пещенюк Ю.А.<sup>1,2</sup>, Морозов В.С.<sup>1</sup>, Мисюра С.Я.<sup>1</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\* *semenov.itp@gmail.com*

В последние десятилетия электронные устройства имеют тенденцию к миниатюризации, что требует разработки новых систем охлаждения. Капельное охлаждение на обогреваемой стенке эффективно используется в силовых устройствах с высокими плотностями теплового потока. Использование ПАВ приводит к увеличению диаметра пятна смачивания и скорости испарения капель. Несмотря на широкий интерес и многочисленные работы в этой области, до сих пор остаются неисследованными вопросы влияния ПАВ и температуры подложки на конвекцию в капле, а также на неоднородность нагрева капли и уменьшения парциального давления пара с увеличением концентрации ПАВ.

В данной работе экспериментально исследуется влияние на скорость испарения капель температуры стенки в диапазоне 20–90 °С и концентрации ПАВ в водном растворе лаурилсульфата натрия (SLS) от 0 до 10000 ppm. Впервые показано, что при повышении температуры стенки происходит инверсия скорости испарения по отношению к диаметру капли. Влияние ключевых факторов на испарение капли воды с SLS меняется с температурой. Таким образом, при слабо нагретой стенке рост диаметра капли становится преобладающим. При больших тепловых потоках преобладает роль неизотермичности. Для определения индивидуального влияния ПАВ на парциальное давление водяного пара были проведены опыты по испарению слоя жидкости. Полученные результаты и упрощенные оценки могут быть использованы для развития существующих расчетных моделей, а также для оптимизации технологий охлаждения сильно нагретых поверхностей.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10096, <https://rscf.ru/project/20-79-10096/>).*

## Литература

1. Misyura, S., Semenov, A., Peschenyuk, Y., Vozhakov, I., & Morozov, V. (2023). Nonisothermal Evaporation of Sessile Drops of Aqueous Solutions with Surfactant. *Energies*, 16(2), 843.
2. Semenov, A. A., Peschenyuk, Y. A., & Vozhakov, I. S. (2021). Application of Aqueous Solutions of Surfactants in Pulsating Heat Pipe. *Journal of Engineering Thermophysics*, 30(1), 58-63.

# ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА И ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСЛОЯ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В ВАКУУМЕ

Сердюков В.С. \*, Малахов И.П., Суртаев А.С.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[ysserd@gmail.com](mailto:ysserd@gmail.com)

Кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов теплоотвода и широко используется в различных областях промышленности, в частности, в теплоэнергетике, для охлаждения атомных реакторов, в химической и пищевой промышленности и т.д. Кроме того, важной задачей является повышение функциональности и надежности работы различных устройств микроэлектроники, для чего необходимо поддерживать температуру их элементов постоянной на заданном уровне. Кипение является перспективным способом для охлаждения таких устройств, в частности, двухфазное погружное охлаждение уже активно применяется в работе сверхпроизводительных серверов. Отдельного внимания заслуживают процессы тепло- и массообмена, имеющие место при кипении жидкости в области субатмосферных давлений. Понижение давления позволяет существенно снизить температуру кипения рабочей жидкости и, как следствие, уменьшить энергозатраты в конкретном промышленном цикле. Поэтому кипение при субатмосферных давлениях реализуется в ряде энергетического оборудования. Кроме того, кипение при пониженном давлении может быть использовано для создания новых перспективных технологий на основе возобновляемых источников энергии, например, для проектирования и создания высокоэффективных систем хранения солнечной энергии и т.д.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния давления в диапазоне 8 - 101 кПа на локальный теплообмен, динамику микрослоя и тройной контактной линии при кипении воды и этилового спирта. Экспериментальные данные были получены с помощью высокоскоростной инфракрасной термографии, что позволило проанализировать нестационарное поле температуры поверхности под отдельными пузырями и эволюцию микрослоя с высоким пространственным и временным разрешением. В исследовании использовалась прозрачная нагревательная поверхность на основе сапфировой подложки и тонкопленочного ИТО нагревателя, что также позволило провести высокоскоростную видео визуализацию с нижней стороны нагревателя. Для обработки полученного массива данных по мультимасштабным характеристикам кипения, включая скорости роста и отрывные диаметры паровых пузырей, плотность центров парообразования, частоты отрыва пузырей и толщину микрослоя было использовано машинное зрение на основе нейронных сетей. Полученные в работе результаты позволяют разработать новые, более точные теоретические подходы к описанию локального и интегрального теплообмена при кипении жидкости в широком диапазоне режимных параметров.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 22-79-00174, <https://rscf.ru/project/22-79-00174/>).*



# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА, ОТВОДИМОГО КАПЛЕЙ ЖИДКОСТИ, ПРИ ПАДЕНИИ НА ТВЁРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ В СПУТНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Сибиряков Н.Е.<sup>1</sup>, Кочкин Д.Ю.<sup>1</sup>, Кабов О.А.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*kolyasibir@yandex.ru*

Одним из методов отведения больших тепловых потоков является газоспрейное охлаждение, которое за счёт спутного потока газа и жидкости позволяет получить мелкодисперсный слой капель с большой скоростью. Для детального понимания этого процесса и построения интегральных моделей необходимо исследовать взаимодействие отдельных капель с нагретой подложкой.

Большинство работ по взаимодействию одиночных капель с поверхностью изучают капли, падающие на подложку с некоторой высоты или разгоняемые электрическим полем [1]. Однако такие эксперименты не дают в полной мере понимания процесса взаимодействия капель при газоспрейном охлаждении, поскольку отсутствует спутный поток газа, который разгоняет капли и увеличивает скорость испарения.

Мы исследуем взаимодействие таких капель с подложкой при помощи установки, схема которой представлена на рис. 1. Высокоскоростная камера снимает процесс растекания, а метод тонкой фольги, который позволяет измерить температуру фольги непосредственно под каплей. Затем, с помощью решения обратной задачи, определить тепловой поток на границе твердого тела и капли.

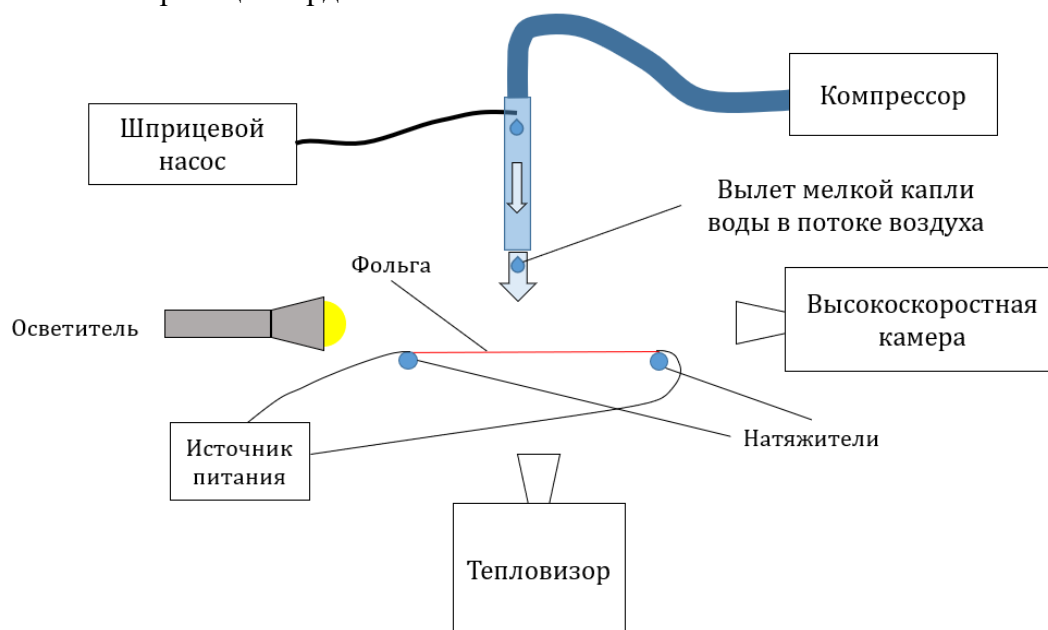


Рис. 1. Пример подписи рисунка.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-79-10373, <https://rscf.ru/project/21-79-10373/>.*

## Литература

1. Liang, Gangtao, and Issam Mudawar. Review of drop impact on heated walls // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2017 – pp. 103-126.

# РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ КАПИЦЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПАРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИЗ КРЕМНИЯ И АЛЮМИНИЯ

Силионова Е.И.<sup>1\*</sup>, Хвесюк В.И.<sup>1,2</sup>

1,2) Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

\* [silionova.ei@gmail.com](mailto:silionova.ei@gmail.com)

Проводимость интерфейса, или так называемая проводимость Капицы, которая описывает эффективность переноса теплового потока на границе между двумя твердыми телами, является концепцией, которая требует дальнейшего развития, чтобы обеспечить надежные предсказания тепловых режимов различных наноустройств. Именно поэтому разработка корректной модели расчёта представляет в настоящее время особый интерес.

В данной работе был рассмотрен тривиальный случай одного интерфейса – то есть двух сопряженных полупространств. В основе расчетов использовалась модель акустического несоответствия, при этом дополнительно были учтены следующие факторы: тепловые потоки с обеих сторон интерфейса, полное внутреннее отражение падающей волны, дисперсия акустических волн, а также ограниченность частот волн максимальными значениями. Данный подход более полно учитывает свойства упругих волн. В качестве исходных данных для расчетов взята существующая реальная фоновая дисперсия [1], [2].

На рисунке 1 представлено сравнение полученных в результате расчетов результатов с экспериментальными данными [3]. Видно, что наилучшее согласование происходит в интервале температур 0-60 К. Это объясняется тем, что для расчетов использовалось предположение о том, что разница температур на границе контакта мала. Однако, было обнаружено, что чем выше средняя температура интерфейса, тем выше величина данной разницы, что необходимо учитывать при расчетах, и что дает в итоге более корректные результаты.

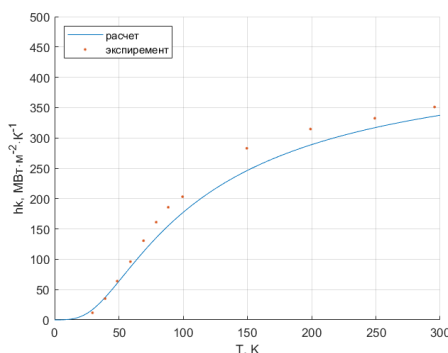


Рис. 1. Проводимость Al-Si интерфейса.

## Литература

1. Weber W. Adiabatic bond charge model for the phonons in diamond, Si, Ge, and  $\alpha$ -Sn // Phys. Rev. – 1977. – V 15. – P. 4789-4803.
2. Gilat G., Nicklow R. M. Normal Vibrations in Aluminum and Derived Thermodynamic Properties // Phys. Rev. – 1966. – V 143. – P. 487-494.
3. Minnich A. J., Johnson J. A., Schmidt A. J., Esfarjani K., Dresselhaus M. S., Nelson K. A., Chen G. Thermal conductivity spectroscopy technique to measure phonon mean free paths // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V 107. – 095901.

# ДИНАМИКА ПАДАЮЩИХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ВЕБЕРА И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДЛОЖКИ

Ситников В.О.<sup>1,2</sup>, Гатапова Е.Я.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Работа посвящена изучению динамики капли жидкости, падающей на нагретую поверхность. В качестве рабочей жидкости использовались вода и диэлектрическая жидкость HFE 7100. В основных экспериментах температура подложка была выше температуры кипения жидкости: для очищенной дегазированной деионизированной воды Milli-Q 100 – 170°C, для HFE-7100 температура варьировалась от 50 до 130°C. Подложкой служила сапфировая пластина с прозрачным нагревателем из оксида индия-олова, что позволяло визуализировать сверху образующиеся пузыри в капле жидкости. Капли жидкости формировались с помощью шприцевого насоса и наконечника диаметром 0.35 мм. Числа Вебера для воды варьировались  $We = 38 - 97$ , а для HFE-7100  $We = 164 - 493$ . Визуализация проводилась с помощью высокоскоростной камеры Phantom VEO 410L и стереомикроскопа Альтами (Рис. 1). Подробное описание установки можно найти в предыдущих работах [1, 2].

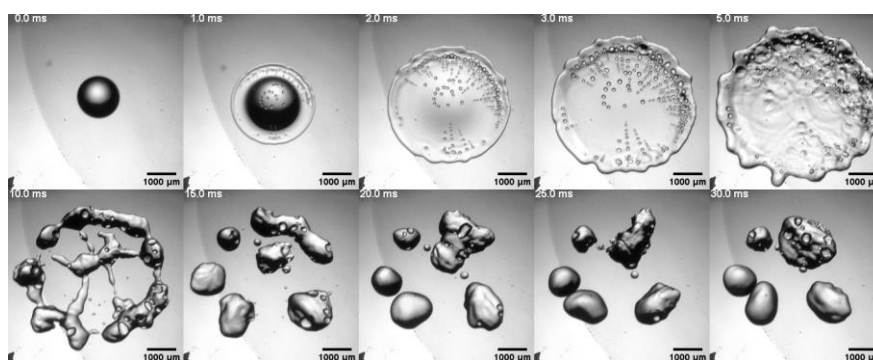


Рис. 1. Режим атомизации (atomization)  $T_w=80^\circ\text{C}$ ,  $We=118$ , HFE 7100.

Производилась покадровая обработка записанных данных. Были получены карты режимов соударения в зависимости от числа Вебера и исходной температуры подложки для воды и для HFE-7100, гистограммы пузырей пара, возникающие в тонкой пленке жидкости для различных чисел Вебера, зависимости контактных диаметров растекания капель от чисел Вебера, были исследованы времена разрыва тонкой пленки жидкости в зависимости от температуры подложки. Выделены новые режимы для легкокипящей жидкости HFE 7100.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-19-00581, <https://rscf.ru/project/22-19-00581>)*

## Литература

1. Gatapova E.Ya., Gatapova K.B., Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact, *Soft Matter*, 16, 10397–10404 (2020).
2. Gatapova E.Y., Sitnikov V.O., Sharaborin D.K., Visualization of drop and bubble dynamics on a heated sapphire plate by high-speed camera enhanced by stereomicroscope. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 29 (2), 87-103 (2022).

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПАКТНОГО ПЛАМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Сластная Д.А.<sup>1,2\*</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*da.slastnaya@gmail.com*

Импактные (натекающие на преграду) струи с горением реализуются в различных промышленных устройствах в процессах нагрева, плавления, обработки поверхности и синтеза материалов. Важными аспектами импактных пламен являются неравномерный теплообмен и особенности химического реагирования в пристенной области. В данной работе выполнено прямое численное моделирование (DNS) импактного пламени предварительно перемешанной смеси в форме конуса, направленного перпендикулярно на плоскую преграду с использованием детальных кинетических.

Предварительно перемешанная метановоздушная смесь с коэффициентом избытка топлива  $\phi = 0,918$  вытекает из сопла Витошинского (ударный профиль) диаметром  $d = 15$  мм при числе Рейнольдса  $Re = 1000$ , температура газа  $T_{gas} = 293$  К. Преградой является плоская поверхность постоянной температуры  $T_{wall} = 371$  К, расстояние до которой от кромки сопла  $h / d = 1$ . Вычислительная область представляет собой сектор цилиндра высотой 65 мм, радиусом 100 мм и углом раствора  $5^\circ$  (предполагается осевая симметрия течения). Расчетная сетка состояла из  $2 \times 10^5$  четырехугольных ячеек. Поджог осуществлялся после установления равновесия резким увеличением температуры горизонтальной поверхности сопла  $T_{spark} = 2500$  К.

Вычисление проводилось на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM, для моделирования гидродинамики в котором применяется метод конечных объемов. Химическая кинетика определялась с помощью расчетного пакета laminarSMOKE [1], позволяющего учитывать детальные механизмы реакций, путем введения оператора разделения Стренга. Данные об элементарных реакциях задавались отдельным файлом в формате CHEMKIN: используемый кинетический механизм - GRI-Mech 3.0, включающий 53 компонента и 324 реакции. Для построения начального поля скорости был использован решатель simpleFoam, дальнейшие вычисления проводились laminarBuoyantPimpleSMOKE.

Получены поля скорости, температуры и массовых долей компонентов реакции. Проведено сравнение поля температуры с результатами ранее проведенного эксперимента методом Two Color PLIF [2]. Исследованы профили осевой и радиальной компонент скорости, а также профили мольных долей основных компонентов смеси поперек фронта пламени. Изучен теплообмен импактного пламени с преградой. Вышеперечисленные результаты будут представлены в докладе.

*Работа выполнена с использованием вычислительной мощности суперкомпьютера "Каскад" ИТ СО РАН / НГУ. Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00803, <https://rscf.ru/project/22-19-00803>.*

## Литература

1. Cuoci, Alberto, et al. "Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method." *Energy & fuels* 27.12 (2013): 7730-7753.
2. Tolstoguzov R. V., Chikishev L. M. Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2233. – №. 1. – С. 012014.

# ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАПЛИ ПРИ ИСПАРЕНИИ С БИФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Смирнов Н.И.<sup>1,2\*</sup>, Сафонов А.И.<sup>1</sup>, Родионов А.А.<sup>1,2</sup>, Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>, Старинская Е.М.<sup>1,2</sup>,  
Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*n.smirnov3@g.nsu.ru](mailto:n.smirnov3@g.nsu.ru)

Испарение капель с различных структурированных поверхностей является актуальной задачей, которая широко исследуется и имеет множество технических приложений [1]. Также не остаются без внимания исследования в области влияния электрического поля на геометрию капли и скорость ее испарения [2]. Особый интерес представляют бифильные поверхности – сложно структурированные поверхности, имеющие резкий пространственный переход между участками с контрастными свойствами смачиваемости [3]. Подобные поверхности имеют большой потенциал в различных производственных приложениях, так как могут быть использованы для контролируемого движения жидкостей, управляемого осаждения и интенсификации теплообмена. В настоящей работе проводилось исследование динамики испарения сидячих капель различных жидкостей с бифильной поверхности в постоянном электрическом поле (рис. 1). Полученные данные позволят расширить представления о кинетике испарения капель при воздействии электрического поля.

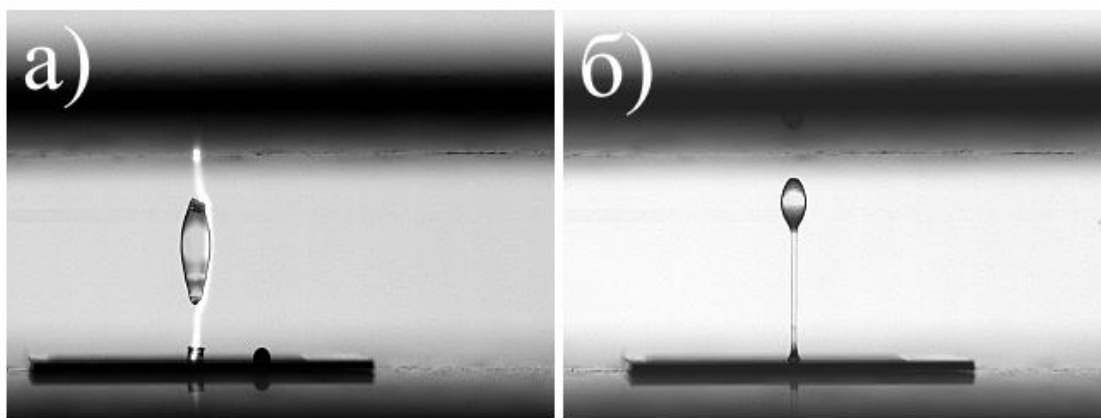


Рис. 1. Изменение геометрии капли в постоянном электрическом поле: а) глицерин; б) вода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10119-П, <https://rscf.ru/project/21-79-03019/>)*

## Литература

1. H. Almohammadi, A. Amirfazli, Sessile drop evaporation under an electric field, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 555 (2018) 580–585.
2. B.B. Wang, X.D. Wang, Y.Y. Duan, M. Chen, Molecular dynamics simulation on evaporation of water and aqueous droplets in the presence of electric field, *Int. J. Heat Mass Transf.* 73 (2014) 533–541.
3. W. Qi, P.B. Weisensee, Dynamic wetting and heat transfer during droplet impact on bi-phobic wettability-patterned surfaces, *Phys. Fluids.* 32 (2020).

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Сомванши П.М.<sup>1\*</sup>, Чеверда В.В.<sup>1,2\*</sup>, Кабов О.А.<sup>1,3</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

3) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

\* [praveen.somwanshi@gmail.com](mailto:praveen.somwanshi@gmail.com), [slava.cheverda@gmail.com](mailto:slava.cheverda@gmail.com)

Взаимодействие капли с твёрдой поверхностью широко изучается экспериментально, численно и теоретически из-за важности данных процессов в природе и технике [1]. Трёхфазная контактная линия демонстрирует значительную величину теплового потока [2, 3].

Теплопередающие характеристики воды и глицерина сравниваются в данной работе. Изменение напряжения сдвига на стенке в зависимости от времени показано на рисунке 1(а). Напряжение сдвига на стенке увеличивается до максимума, а затем уменьшается. Напряжение сдвига на стенке прямо пропорционально динамической вязкости, скорости распространения и обратно пропорционально смещению объема жидкости в направлении, нормальном для скорости распространения. Пиковое значение напряжения сдвига на стенке в воде примерно на 8,5% больше, чем у глицерина.

Изменение среднего теплового потока на стенке в зависимости от времени показано на рисунке 1(б). Усреднение теплового потока осуществляется по всему пятну контакта капли. Максимальный тепловой поток на стенке для воды примерно на 91,2% больше, чем у глицерина.

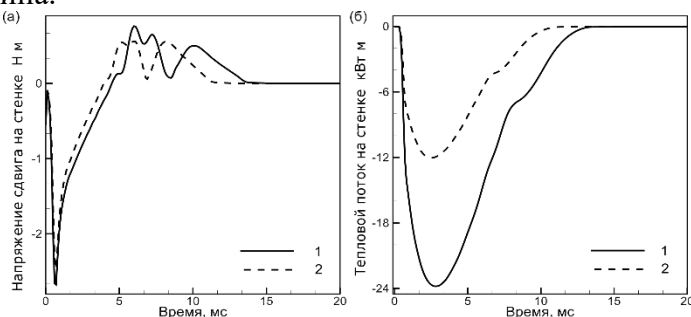


Рис. 1. (а) Напряжение сдвига на стенке и (б) средний тепловой поток на стенке в зависимости от времени, наблюдаемого при падении капли холодной жидкости с числом Бонда и Вебера  $\sim 0,23$  и  $\sim 1,6$  на супергидрофобную поверхность с краевым углом смачивания  $150^\circ$ . 1 - вода, 2 - глицерин.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-79-10373, <https://www.rscf.ru/project/21-79-10373>. Измерение краевого угла смачивания проводилось в рамках государственного задания Института теплофизики им. Кутателадзе СО РАН.*

## Литература

1. Yarin A. L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing // Annual Review of Fluid Mechanics. 2006. V. 38 P. 159–192.
2. Чеверда В. В., Карчевский А. Л., Марчук И. В., Кабов О. А. Плотность теплового потока в области контактной линии капли, лежащей на горизонтальной поверхности тонкой нагреваемой фольги // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24 № 5(107) С. 825–828.
3. Somwanshi P. M., Muralidhar K., Khandekar S., Vyacheslav C. Mixing and wall heat transfer during vertical coalescence of drops placed over a superhydrophobic surface // Interfacial Phenomenon and Heat Transfer. 2020. V. 8 N 3. P. 207–224.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА ЗА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКОЙ

Сорокин М.И.<sup>1,2</sup>, Толстогузов Р.В.<sup>1</sup>, Данилов П.А.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>.

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[m.sorokin@g.nsu.ru](mailto:m.sorokin@g.nsu.ru)

Знание характеристик частиц в дисперсных многофазных потоках важно для анализа процессов переноса в спреях, пузырьковых или кавитационных потоках. Высокую эффективность в определении характеристик дисперсной фазы показывают оптические методы измерений, главное преимущество которых – бесконтактность. Они позволяют проводить измерения не только на специально оборудованных экспериментальных стендах, но и на промышленных предприятиях, так как процесс измерения не оказывает физического влияния на объект исследования.

Существуют различные методы оптической диагностики газокапельных потоков. Наиболее часто используемые лазерные методы: фазовый доплеровский анализатор частиц (TSI, Dantec), лазерный дифракционный анализатор размера частиц (Malvern, Sypatec). Недавно был предложен альтернативный подход с использованием некогерентного излучения, основанный на двухракурсной времяпролетной регистрации рассеяния луча каплями. Данный метод позволяет измерять одновременно скорость и размер частиц дисперсной фазы, последовательно пересекающих два луча лазерных диодов. За время пролета по паре детекторов на луч регистрируют вспышки от преломленного и отраженного в детектор излучения. По задержке между пиками можно определить скорость каждой отдельной частицы, её размер и значение коэффициента преломления (в приближении сферичности).

В настоящей работе будут представлены принцип действия и описание двухракурсного времяпролетного метода и результаты его применения для исследования факела распыла для модельной центробежной форсунки. Измерения проводились в поперечном сечении факела распыла жидкости с целью определения распределения капель по скорости и размеру в данном сечении.

*Работа поддержана РФФ №22-79-10246, <https://rscf.ru/project/22-79-10246/>.*

## Литература

1. Tropea C. et al. (ed.). Springer handbook of experimental fluid mechanics. – Berlin : Springer, 2007. – Т. 1. – С. 237.
2. Li L. et al. Light scattering from a drop with an embedded particle and its exploitation in the time-shift technique //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2019. – Т. 227. – С. 20-31.
3. Schaefer W. et al. Spray measurements with the time-shift technique //Measurement Science and Technology. – 2021. – Т. 32. – №. 10. – С. 105202.
4. Schäfer W., Rosenkranz S., Tropea C. Validation of the time-shift technique for spray characterization //ILASS Americas 27th annual conference on liquid atomization and spray systems. – 2015.

# ТРАНСЦЕНДЕНТНОСТЬ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПО СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Старинский С.В.<sup>1,2\*</sup>, Родионов А.А.<sup>1,2</sup>, Шухов Ю.Г.<sup>1</sup>, Сафонов А.И.<sup>1</sup>, Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>,  
Старинская Е.М.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

\*[starikhbz@mail.ru](mailto:starikhbz@mail.ru)

Управления характеристиками смачиваемости поверхности весьма перспективно с точки зрения пассивного управления взаимодействия жидкости с твердой стенкой. В недавней работе Ду было методом численного моделирования детально рассмотрено как энергия поверхности и ее топологические характеристики (шероховатость) влияют на растекание капли жидкости. Нами предложен экспериментальный подход, который позволяет верифицировать полученные численные результаты. Важная особенность данной работы заключается в том, что с помощью ранее разработанного методики [1] нам удалось варьировать поверхностную энергию материала, сохраняя при этом ее морфологические характеристики. Было достигнуто хорошее согласие между экспериментальными результатами и расчетом Ду [2]. С помощью высокоскоростной видеосъемки на поверхностях с эффектом листа лотоса была экспериментально зарегистрирован эффект трансцендентности краевого угла смачивания предсказанного в работе Ду, когда оттекающий краевой угол смачивания превышает натекающий (Рис. 1). Для сравнения также были проведены эксперименты на гидрофобной поверхности смачиваемой в состоянии Вензеля, характеризуемых эффектом лепестка розы. В данном случае наблюдается классическое поведение капли, когда из-за пиннинга к поверхности оттекающий краевой угол существенно меньше чем натекающий.



Рис. 1. Движение капли водно-глицериновой смеси 1:10 по поверхностям с различным смачиванием.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10119-П, <https://rscf.ru/project/21-79-03019/>)*

## Литература

1. Starinskiy S. V., Bulgakov A. V., Gatapova E.Y., Shukhov Y.G., Sulyaeva V.S., Timoshenko N.I., Safonov A.I. Transition from superhydrophilic to superhydrophobic of silicon wafer by a combination of laser treatment and fluoropolymer deposition // J. Phys. D: Appl. Phys., 2018. – Vol. 51. – P. 255307.
2. Du Q., Zhou P., Pan Y., Qu X., Liu L., Yu H., Hou J. Influence of hydrophobicity and roughness on the wetting and flow resistance of water droplets on solid surface: A many-body dissipative particle dynamics study // Chem. Eng. Sci. –, 2022. – Vol. 249. - P. 117327.



# ОПТИМАЛЬНЫЕ АДсорбЕНТЫ ДЛЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ВОЗДУХА (ВЕНТИРЕГ)

Стрелова С.В.<sup>1,2\*</sup>, Черкасова А.В.<sup>2</sup>, Мезенцев С.И.<sup>3</sup>

- 1) Институт катализа им Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия
- 2) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
- 3) Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

\*[strelova@catalysis.ru](mailto:strelova@catalysis.ru)

В условиях холодного климата, когда разница температур между наружным воздухом и воздухом в помещении составляет 30-60 °С, использование стандартных систем вентиляции сопряжено с рядом проблем: это большие теплотери (до 50 %); обледенение систем на выходе; снижение относительной влажности в помещении (до 10%). Для решения этих проблем был предложен адсорбционный способ регенерации теплоты и влаги в системах вентиляции ВентиРег [1] (рис. 1). Ключевым компонентом ВентиРег является адсорбент, свойства которого определяют эффективность системы. Целью данной работы стал поиск и разработка оптимального адсорбента, специализированного для ВентиРег.

Оптимальный адсорбент должен обладать: 1) высокой степенью осушки воздуха (сильное сродство к парам воды); 2) высокой сорбционной емкостью; 3) возможность регенерации низкотемпературной теплотой (слабое сродство к парам воды). Требования 1 и 3 противоречат друг другу, поэтому необходим компромисс между степенью осушки и температурой регенерации, учитывая конкретные условия цикла. Традиционные микро- и мезопористые адсорбенты показали низкую эффективность, так как первые обладают слишком высоким сродством к парам воды и не могут быть регенерированы в условиях цикла, а мезопористые адсорбенты поглощают мало влаги. Перспективными материалами являются композитные сорбенты «Соль в пористой матрице». Они обладают высокой емкостью и возможностью направленно регулировать их адсорбционные свойства.

В качестве рабочих условий были выбраны температура наружного воздуха -30 °С с абсолютной влажностью 0.3 г/м<sup>3</sup>, температура внутри помещения 20 °С с относительной влажностью 50%. Проведен анализ адсорбционного равновесия паров воды на семействе композитных сорбентов соль/силикагель и показано, что для цикла ВентиРег в вышеописанных условиях оптимальными адсорбентами являются композиты на основе LiCl, LiBr, LiNO<sub>3</sub> и CaCl<sub>2</sub>, способные обменивать 0.4-0.55 г H<sub>2</sub>O/г композита.

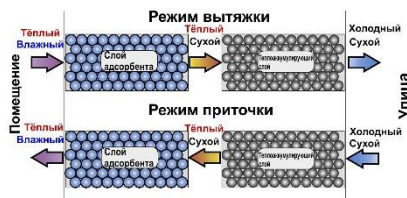


Рис. 1. Схема процесса ВентиРег.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-29-01412).*

## Литература

1. Аристов Ю.И., Мезенцев И.В., Мухин В.А. Новый подход к регенерации теплоты и влаги в системе вентиляции помещений. 1. Лабораторный прототип регенератора // – ИФЖ (2006) 79, № 3, с. 143-150.

# МОЛОДЕЖНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ: СОЗДАНИЕ, СТАНОВЛЕНИЕ, РАЗВИТИЕ

Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,  
Россия  
[pavelspa@tpu.ru](mailto:pavelspa@tpu.ru)

Аннотация: «В докладе обсуждены ключевые задачи и сложности, возникающие при работе молодежных научных лабораторий. Представлены возможные треки развития членов коллективов таких лабораторий. Выделена связь работы лабораторий с образовательными программами в вузах. Определены перспективные шаги для развития лабораторий с учетом совокупности внешних и внутренних факторов».

Молодежные лаборатории в настоящее время во всем мире рассматриваются эффективным инструментом в области развития науки, техники и технологий. Такие лаборатории создаются при поддержке государственных структур, частного бизнеса, а также научно-исследовательских институтов и вузов. Как правило, коллективам такого рода лабораторий ставятся задачи реализации «науки полного цикла» – от идеи до конечного продукта в виде устройства, программного продукта, способа, технологии и др. В связи с активным привлечением индустриальных партнеров задачи ставятся с учетом интереса из реального сектора экономики. В рамках настоящего приглашенного доклада рассмотрены наиболее перспективные модели. Большая часть из них прошла апробацию в российских вузах, институтах РАН и производствах. На основе накопленного опыта выполнены оценки преимуществ и недостатков моделей. Определенные выводы и рекомендации по данному блоку сформулированы в докладе. Рассмотрены тренды развития молодежных лабораторий до опытных научных команд через проекты с бизнес-акселераторами и индустриальными партнерами. Продемонстрированы основные шаги развития Лаборатории тепломассопереноса Томского политехнического университета с учетом ключевых направлений исследований (рис. 1).

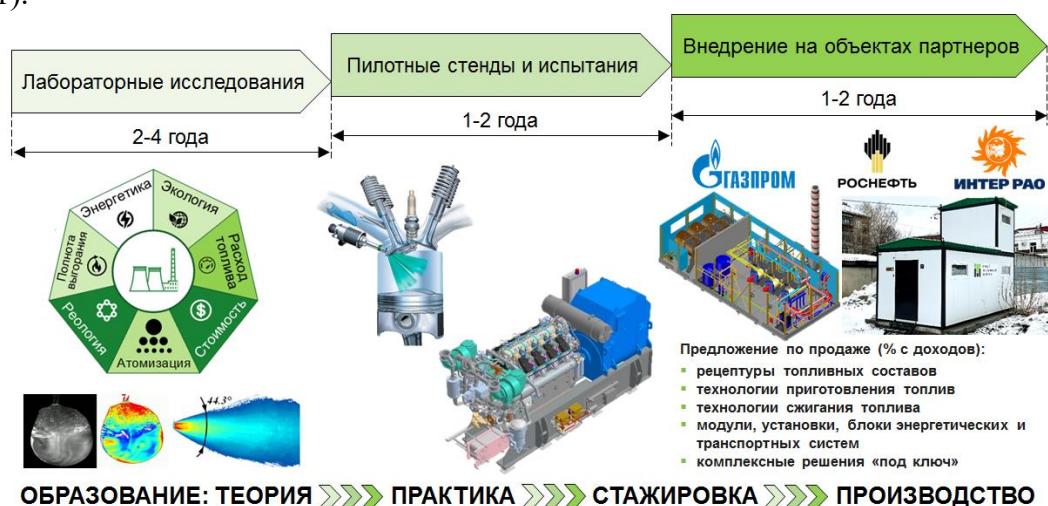


Рис. 1. Этапы реализации научных проектов в области композиционных топлив на примере Лаборатории тепломассопереноса Томского политехнического

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Тарраф Д.

*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

Технический углерод (сажа) – продукт, получаемый термическим разложением (пиролизом) углеводородов (как правило нефти) в потоке газа-теплоносителя. Технический углерод широко применяется в качестве усиливающего компонента в производстве резин и пластических масс. В производстве шин используется 70% всего выпускаемого углерода. При печном производстве углерода жидкое углеводородное сырьё впрыскивается форсунками в поток продуктов сгорания природного газа. Происходит распыл и испарение сырья с дальнейшим пиролизом. Важно, чтобы сырьё полностью испарилось до начала пиролиза, иначе будет образовываться кокс, загрязняющий продукт. Для совершенствования технологии производства углерода, в частности, обеспечения полного испарения сырья до начала пиролиза, невозможно обойтись без математического моделирования самого процесса. Оно является важнейшим способом получения наиболее полной и детальной информации об особенностях работы реактора.

В работе разрабатывается трехмерная математическая модель и метод расчета распыла и испарения сырья в потоке газа-теплоносителя. За основу взята Эйлерова модель трехфазного (газ, сырьё, продукты испарения сырья) течения, реализуемая на основе VOF метода [1]. Численная реализация модели многофазных течений выполнена на основе пакетов программ OpenFoam [2] и ANSYS FLUENT [3]. Достоверность получаемых результатов численного моделирования обоснована на известной задаче распыла струи жидкости под воздействием потока газа [4]. Представлены результаты расчета распыла и испарения сырья в реальном реакторе для производства технического углерода. Разработан и численно реализован метод формирования капель распыла сырья по распределению в области течения объёмной доли сырья. Он позволяет определять важную характеристику распыла — средний саутеровский диаметр.

## Литература

1. Hirt, C. W. Nichols, B. D. (1981) Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics 39 (1981), 201-226.
2. Greenshields C. J. User Guide –The OpenFOAM Foundation.
3. Ansys® FLUENT 20R, Inc. –16.3 Volume of Fluid (VOF) Model Theory.
4. Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзиков Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 93-101.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛИ ВИХРЕВОГО БИОРЕАКТОРА

Тинтулова М.В.<sup>1,2\*</sup>, Шарифуллин Б.Р.<sup>1</sup>, Наумов И.В.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*m.tintulova@g.nsu.ru](mailto:m.tintulova@g.nsu.ru)

Одним из важнейших этапов становления современной биотехнологии интенсивного культивирования клеток и микроорганизмов является разработка биореакторов. Несмотря на достигнутые успехи в разработке газовихревых биореакторов [1, 2], исследования в данном направлении продолжают. В настоящей работе в поисках простой и эффективной конструкции биореактора для выращивания фототрофных микроорганизмов был рассмотрен цилиндрический контейнер с нижним вращающимся торцом (диском) и верхней свободной границей. Цель работы – экспериментальное исследование структуры вихревого течения жидкости в цилиндрическом контейнере (I) при малом аспектном отношении и сравнение со структурой течения в газовихревом биореакторе со свободно плавающей шайбой (II).

Экспериментальные исследования проводились в цилиндрическом контейнере (радиус  $R = 144$  мм) с нижним вращающимся диском и в газовихревом биореакторе (радиус  $R = 95$  мм) с плавающей шайбой на поверхности жидкости. Экспериментально исследованы режимы формирования циркуляционного движения жидкости при малом отношении высоты ( $h$ ) к радиусу реактора ( $R$ ) в диапазоне 0.05–0.2. В качестве рабочей жидкости использовался 65% водный раствор глицерина (плотность  $\rho = 1150$  кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $\nu = 15$  мм<sup>2</sup>/с). Исследования проводились при помощи метода Particle Image Velocimetry в горизонтальном сечении (1 мм) вблизи поверхности жидкости в цилиндре, а также вблизи шайбы и дна в биореакторе. Жидкость засеивалась полиамидными частицами плотностью 1030 кг/м<sup>3</sup> размером 10 мкм.

В ходе работы определены зависимости формирования циркуляционного движения при увеличении закрутки потока. Получено, что при малой высоте жидкости в открытом цилиндре (I) формируется область на оси, в которой отсутствует радиальная составляющая скорости. Следовательно, меридиональная циркуляция формируется не во всем объеме цилиндра при разных высотах заполнения, а эффективность массопереноса уменьшается. В то же время при закрутке рабочей жидкости плавающей шайбой в газовихревом биореакторе (II) формируется меридиональное движение течения рабочей жидкости во всем объеме реактора. Таким образом, несмотря на простоту конструкции, цилиндр с нижним диском не обеспечивает необходимую циркуляцию всего объема культуральной среды, что особенно важно при выращивании тяжелых фототрофных микроводорослей.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-19-00083, <https://rscf.ru/project/22-19-35009/>.*

## Литература

1. Мертвецов Н., Рамазанов Ю., Репков А., Дударев А.Н., Кислых В. Газовихревые биореакторы "Биок": Использование в современной биотехнологии // Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука" (2002), 118 с.
2. Naumov, I. V., Gevorgiz, R. G., Skripkin, S. G., & Sharifullin, B. R. Experimental investigation of vortex structure formation in a gas-vortex bioreactor // Thermophysics and Aeromechanics (2022), 29(5), с.719-724.

# ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛИФ

Толстогузов Р.В.<sup>1,2\*</sup>, Савицкий А.Г.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*\*enot.roman@gmail.com*

Целью данной работы является комплексное экспериментальное исследование влияния импактной поверхности, закрутки потока, добавления жидкой фазы в поток на распределение температуры в пламени с использованием современных оптических методов измерения поля температуры на основе лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ, англ. laser-induced fluorescence, LIF) радикала ОН. Полученные данные позволят составить широкую экспериментальную базу информации, необходимую для более детального понимания процессов и нюансов, возникающих при горении смеси топлива на простом объекте. Полученные данные также будут полезны для верификации данных, полученных методами численного моделирования, а также для модернизации существующих оптических методов измерений и моделирования.

Экспериментальный стенд состоял из: осесимметричного сужающегося сопла (внутренний диаметр сопла  $d = 15$  мм), лопатного завихрителя, установленного в сопло (степень закрутки  $S = 1$ ), импактной поверхности (цилиндрическая ёмкость с диаметром поверхности 300 мм). Внутри ёмкости поддерживалась постоянная циркуляция воды с постоянной температурой в  $96^{\circ}\text{C}$  градусов с помощью термостата. В случае исследования ламинарного пламени Бунзена предварительно-перемешанной пропановоздушной смеси число Рейнольдса составляло  $Re = 1000$  и коэффициент избытка топлива был равен  $\Phi = 0.92$ , а в случае закрутки пламени  $Re = 5000$  и  $\Phi = 0.7$ . В случае натекания пламени на импактную поверхность расстояние между соплом и импактной поверхностью было равно  $H/d = 1, 2$  и  $3$ . В случае исследования газочапельного ламинарного горения смеси воздуха, паров и капель спирта параметры были равны  $Re = 1000$ ,  $\Phi = 0.95$  и  $1.2$ . Измерительная система состояла из двух перестраиваемых лазеров на красителях, двух импульсных лазеров накачки Nd:YAG и двух чувствительных в УФ диапазоне интенсифицированных ПЗС-камер. Подробнее о системе измерения описано в работе [1].

В результате работы были получены поля температуры пламени в различных конфигурациях и при различных параметрах с помощью оптических методов, основанных на лазерно-индуцированной флуоресценции радикала ОН. С использованием методов Thermally-assisted LIF и Two-line LIF было проведено измерение полей температуры для импактного конического пламени и турбулентного закрученного импактного пламени. Также в работе представлены результаты оценки температуры в ламинарном коническом пламени смеси воздух-этанол с каплями жидкого топлива при помощи метода Two-line LIF.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ № 22-19-00803, <https://rscf.ru/project/22-19-00803/>.*

## Литература

1. Dulin V.M. et al, Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the  $A^2\Sigma^+-X^2\Pi$  (1-0) band // Proc Combust Inst. – 2021. – V. 38 (1). – P. 1877–1883

# ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРАЛОВ

Ушаков К.Ю.<sup>1\*</sup>, Богомолов А.Р.<sup>1</sup>, Петров И.Я.<sup>2</sup>

1) КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

2) Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

\* [ushakovkju@kuzstu.ru](mailto:ushakovkju@kuzstu.ru)

Процессы прямого ожижения углей получили широкое распространение в мире для производства жидких углеводородов из углей. В Кузбассе имеются значительные запасы низкометаморфизованных углей, перспективным направлением переработки которых является их термическое превращение с получением газо-жидкостного сырья и сорбента. К недостаткам процесса ожижения углей относят высокую стоимость растворителей и газообразного водорода, которые используются в процессе. Возможность снижения стоимости процесса авторами видится в совместной переработке угля и широкодоступного, но обогащенного водородом сырья – отходов резины и жидких продуктов её пиролиза, утилизация которых одновременно решает и ряд экологических проблем. Для предварительной оценки возможности использования углеродсодержащих материалов в процессах гидрогенизационной переработки активно применяются методы термического анализа, которые позволяют определить температурные интервалы и последовательность стадий термического разложения материалов, а также оценить прочность в них химических связей. В настоящей работе авторами проведено исследование термических превращений ряда низкометаморфизованных кузбасских углей, резиновой крошки и их смеси при температурно-программированном разложении в различных средах. Пример записанных дериватограмм представлен на рис. 1.

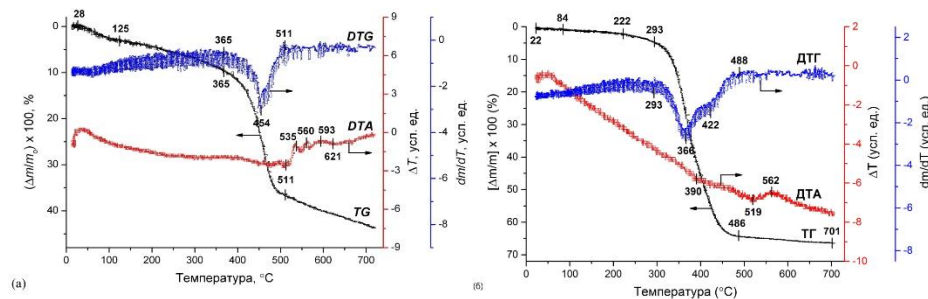


Рис. 1. Дериватограммы в инертной среде (гелий): (а) – выветренный плитчатый барзасский сапромиксит («рогожка»), (б) – резиновая крошка кл.2-4 мм.

На дериватограммах, записанных в инертной среде, выделяются три основные области термического разложения: 1) удаление адсорбированной воды, 2) стадия первичного или быстрого пиролиза и 3) стадия вторичного или медленного пиролиза. При этом температурные диапазоны стадий и характеристики (температура максимума реакции, энергия активации и т.д.) термических разложений исследуемых материалов и их смесей различны. В работе рассмотрены основные различия и причины этих расхождений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ

Федоренко Р.М. \*, Антонов Д.В., Стрижак П.А.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

*\*[vfedrm@gmail.com](mailto:vfedrm@gmail.com)*

Микро-взрывное измельчение двухжидкостных капель при нагреве реализуется в режиме паффинга и микро-взрыва [1]. Эти режимы позволяют получать размеры вторичных жидкостных фрагментов в десятки и даже сотни раз меньше, чем размеры родительской капли [2]. Для практического применения эффектов микро-взрывного дробления необходимо исследовать компонентный состав образующихся вторичных фрагментов, в особенности это важно для технологий горения жидких и суспензионных топлив. С увеличением интереса к применению перспективных видов топлив возрастает и необходимость в достоверном анализе компонентного состава исходных и вторичных капель. До настоящего момента задача идентификации типа и концентрации компонентов во вторичных фрагментах не была решена, в этом состоит мотивация настоящего исследования.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований компонентного состава вторичных фрагментов, образующихся при микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. В качестве компонентов исследованных двухжидкостных капель использованы вода и рапсовое масло. Исследования проведены при варьировании концентрации компонентов в каплях, температуры внешней среды и схемы нагрева, начальных размеров двухжидкостных капель. Эксперименты проводились для разных условий нагрева исходных капель: в пламени, муфельной печи, на разогретой подложке. Для идентификации компонентного состава вторичных фрагментов был использован метод Laser Induced Fluorescence. Разделение вторичных фрагментов по компонентному составу проводилось на основании разницы светимости компонентов капель под действием лазерного излучения.

Установлены типичные распределения вторичных фрагментов по размерам для воды и рапсового масла при фрагментации двухжидкостных капель в условиях влияния совокупности факторов. Определены средние размеры вторичных фрагментов для воды и рапсового масла. Показано, что этими характеристиками можно управлять за счет варьирования значений группы исходных параметров. Обосновано применение метода Laser Induced Fluorescence для идентификации компонентного состава вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. Описаны границы применимости данного подхода.

*Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).*

## Литература

1. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. – 2019. – V. 142.
2. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. – 2020. – V. 164.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ТЕПЛООБМЕН В КОЛЬЦЕВОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И., Ян Лун Н., Сарсембенев Е.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[mfilippov181096@gmail.com](mailto:mfilippov181096@gmail.com)

Сегодня, в связи с очевидным развитием промышленности, увеличиваются локальные мощности тепловыделения в электронике, повышаются рабочие температуры газотурбинных установок и двигателей. Одним из перспективных методов нагрева/охлаждения поверхности являются импактные струи, которые имеют существенные преимущества применения: (1) высокая интенсивность тепло/массопереноса, (2) хорошая адаптируемость к различной форме поверхности, и (3) простота производства и невысокая стоимость [1]. Однако проблемой импактного охлаждения является причиной сильной неоднородности теплоотдачи. Поиск путей создания систем охлаждения с более равномерным теплообменом представляет одну из ключевых задач современной аэромеханики и теплофизики. Одним из наиболее перспективных вариантов с точки зрения интенсификации теплообмена - использование кольцевых струй.

Данная работа была выполнена с помощью метода инфракрасной термографии. В экспериментах использовался предварительно осушенный и очищенный от примесей атмосферный воздух. Поток нагнетался из компрессора через расходомеры Bronkhorst с точностью 0.01 г/с в кольцевое сопло, откуда в виде струи выходил перпендикулярно поверхности. Импактная поверхность была изготовлена из титановой фольги с размерами в плане 382x520 мм и толщиной 0.1мм. Поверхность равномерно нагревалась регулируемым источником. Внешний диаметр кольцевого сопла  $D$  составлял 22 мм, а ширина кольца  $b$  варьировалась от 0.6 до 4.4 мм. Расстояние от струи до подложки регулировалось с помощью ручного однокомпонентного координатного устройства с шагом перемещения 0.2 мм ( $h$  — расстояние от струй до поверхности) и  $h/D$  варьировалось от 0 до 2. Измерение температуры поверхности производилось с помощью тепловизора Testo с разрешением матрицы 1280x960 пикселей.

Были получены новые данные по теплообмену в кольцевой струе при вариации расходных и геометрических характеристик. Особое внимание было уделено анализу отличий теплопередачи для сомкнутого и разомкнутого режимов. Показано, что переключение режимов оказывает существенное влияние на коэффициент теплопередачи. Более того, распределение коэффициента теплопередачи после переключения режимов близко к однородному при  $x/D < 1$ . При увеличении ширины щели и сохранении расхода, падает коэффициент теплоотдачи.

*Работа поддержана РФФИ (грант № 20-58-26003).*

## Литература

1. Z. Travnicek, V. Tesar. Hysteresis in Annular Impinging Jets // Exp. Thermal and Fluid Science. – 2013. – V. 44. – P. 565-570.



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПЕСЧАНЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Фокин М. И. \*, Марков С. И.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
[\\*fokinmi@ipgg.sbras.ru](mailto:fokinmi@ipgg.sbras.ru)*

В данной работе методом численного моделирования определён эффективный коэффициент теплопроводности песчаных гранулированных образцов с различным количеством газового гидрата метана в поровом пространстве. В качестве расчётной области использовалась геометрия внутренней структуры образца, полученная по данным синхротронной рентгеновской микротомографии. Результаты расчётов сопоставлены с теоретическими эффективными моделями, учитывающими тип заполнения газогидратом порового пространства образцов.

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности в работе использовались томографические изображения лабораторно сформированных насыпных образцов кварцевого песка с различным объёмным содержанием газогидрата в поровом пространстве (9% - 33%). Томографические изображения были получены в рамках эксперимента по синхротронному микротомографическому сканированию гидратосодержащих образцов [1]. Томографические данные были сегментированы на области, соответствующие трём фазам: гранулы кварцевого песка, газовый гидрат метана, газообразный метан. Была выполнена пространственная дискретизация полученной трёхфазной системы при использовании адаптированных тетраэдральных сеток. На базе закона Фурье и результатов прямого математического моделирования процесса теплопередачи в условиях стабильного состояния газовых гидратов был произведен расчёт эффективного коэффициента теплопроводности. Для дискретизации математической модели использовалась вычислительная схема неконформного метода конечных элементов. Результаты расчётов эффективного коэффициента теплопроводности были сопоставлены с теоретической эффективной моделью (параллельная модель), учитывающей тип заполнения порового пространства газогидратом [2]. Сравнение результатов вычислительного эксперимента с теоретической моделью показало хорошее совпадение для случая «цементирующего» типа заполнения пор гидратом.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0030.*

## Литература

1. Nikitin V. V. et al. Dynamic in-situ imaging of methane hydrate formation and self-preservation in porous media // Marine and Petroleum Geology. – 2020. – V. 115
2. Sun S. et al. A new effective thermal conductivity model of methane hydrate-bearing sediments considering hydrate distribution patterns // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – V. 183

# ЭНТАЛЬПИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЖИДКИХ МАГНИЯ, КАЛЬЦИЯ И ИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА

Хайрулин А.Р. \*, Станкус С.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*rainjke95@yandex.ru*

Обзор имеющейся литературы показал, что данные по многим теплофизическим свойствам магния, кальция и их сплавов либо полностью отсутствуют, либо единичны и имеют большой разброс, особенно для жидкого состояния. Это затрудняет как развитие теории металлов, так и практическое использование сплавов на основе Mg и Ca, которые имеют обширную область применения – от аэрокосмической промышленности [1] до медицинских технологий [2].

В докладе представлены результаты экспериментального исследования инкремента энтальпии и теплоемкости чистых магния, кальция и сплава Mg<sub>2</sub>Ca. Измерения были проведены на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой в интервале температур от 400 до 1300 К. Получены температурные зависимости инкремента энтальпии и теплоемкости исследуемых веществ и определены температуры фазовых переходов.

Установлено, что теплоемкость исследованных веществ в жидком состоянии не зависит от температуры (рис. 1), уточнено значение ее абсолютной величины. Теплоемкость жидкого сплава Mg<sub>2</sub>Ca была получена впервые, по результатам расчетов её величина на 5% превышает расчеты по правилу аддитивности.

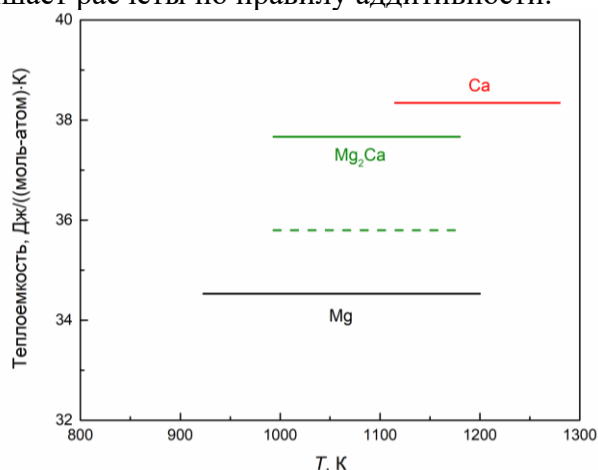


Рис. 1. Температурные зависимости удельной теплоемкости жидких магния, кальция и сплава Mg<sub>2</sub>Ca. Штриховая линия – результаты расчета теплоемкости расплава Mg<sub>2</sub>Ca по закону для идеальных растворов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10025, <https://rscf.ru/project/20-79-10025/>)*

## Литература

1. Haferkamp H., Niemeyer M., Boehm R., Holzkamp U., Jaschik C., Kaese V. Development, processing and applications range of magnesium lithium alloys // Materials Science Forum. – 2000. – Vol. 350. – P. 31–42.
2. Xia D., Liu Y., Wang S., Zeng R.C., Liu Y., Zheng Y., Zhou Y. In vitro and in vivo investigation on biodegradable Mg-Li-Ca alloys for bone implant application // Science China Materials. – 2019. – Vol. 62, No. 2. – P. 256–272.

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ МИКРОГЕЛЯ С ГИДРОФОБНЫМИ ГЛАДКОЙ И МИКРОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Пискунов М.В., Хомутов Н.А.\* , Пискунова А.Е., Хан Е.А., Антонио Ди Мартино

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

\*[nah7@tpu.ru](mailto:nah7@tpu.ru)

В последнее время одним из наиболее активных направлений, развивающихся в области полимеров, являются микрогели. Состав, размеры и морфологию микрочастиц возможно варьировать в широких пределах в зависимости от области применения. В то же время довольно мало известно о механизмах, характеристиках и режимах гидродинамики и тепломассообмена для микрочастиц геля, взаимодействующих с твердой нагретой и не нагретой поверхностью. В настоящей работе разработана система генерирования сдвоенного потока микрочастиц геля на основе полимерного раствора альгината натрия и сшивающего раствора хлорида кальция с добавлением этилового спирта. Измерены реологические и поверхностно-активные свойства образцов микрогеля, а также характеристики контактного смачивания поверхности взаимодействия микрочастицами геля. Выполнено экспериментальное исследование взаимодействия микрочастиц геля с гладкими и мембранными сухими поверхностями, а также с поверхностями, смоченными тем же микрогелем (Рис. 1). Выведены эмпирические соотношения с учетом характерных чисел Вебера, Рейнольдса, капиллярности и критериев подобия в реологии для определения динамических и кинематических параметров осаждения растекающейся/деформируемой микрочастицы геля с выделением стадий процесса. Полученные результаты по характеристикам растекания при осаждении и деформации сравниваются с известными теоретическими и эмпирическими моделями растекания капель и частиц однородных и неоднородных жидкостей. Установлены отличия и сходства в режимах, механизмах и определяющих силах взаимодействия. Исследование мотивировано возможностью применения многокомпонентных неоднородных жидкостей со сложной внутренней структурой в ряде промышленных и биомедицинских технологий для увеличения их функциональных возможностей в процессе осаждения на этапе взаимодействия с целевой поверхностью. В частности, полученные результаты важны для развития технологий трехмерной печати и биопечати отверждаемыми полимерами, микропроизводства биоматериалов, производства гидрогелей и микрогелей, в том числе предназначенных для безопасной доставки биологических клеток и лекарств.

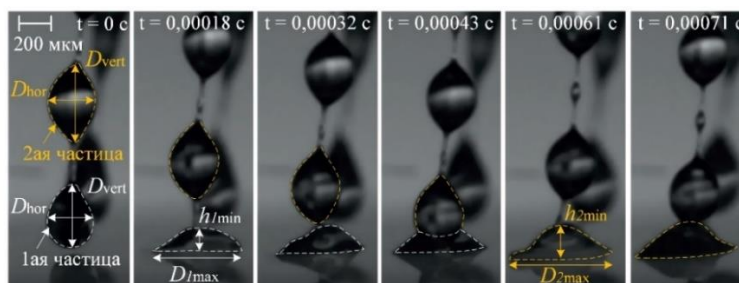


Рис. 1. Визуализация процесса взаимодействия гелеобразных микрочастиц с мембранным (микроволокнистым) покрытием

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20109, <https://rscf.ru/project/22-29-20109/> и средств Администрации Томской области.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕВЕРСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТИПА ПРИ НАЛИЧИИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Черкасова А.В.<sup>1</sup>, Мезенцев С.И.<sup>2\*</sup>, Стрелова С.В.<sup>3</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия,*

2) *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,*

3) *Институт катализа им Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*mezn@ngs.ru*

Системы приточно-вытяжной вентиляции для всех типов помещений необходимы как с санитарно-гигиенической точки зрения, так с экономической. Автоматическая утилизация теплоты приводит к существенному снижению затрат на отопление. В таких процессах теплота удаляемого воздуха используется для нагрева приточного воздуха.

Целью данной работы было определение коэффициента теплоутилизации при реверсивных режимах течения воздуха с фазовым переходом для определения эффективности теплообменника.

Исследования были проведены на экспериментальной установке. Схема установки изображена на рис. 1. Установка представляла собой трубу 2 в которой располагался теплообменный модуль 3. В качестве модуля 3 были использованы трубочки с водой, которые располагались горизонтально, т.е. вдоль течения воздуха. Поступление приточного и вытяжного воздуха обеспечивал реверсивный вентилятор 4. Система автоматики в составе ТРМ148 (5) и АС4 (2) обеспечивала запись результатов эксперимента на компьютер 7 с термопар 1 в автоматическом режиме.

Полученные результаты показывают увеличение времени переключения полуциклов приточки и вытяжки.

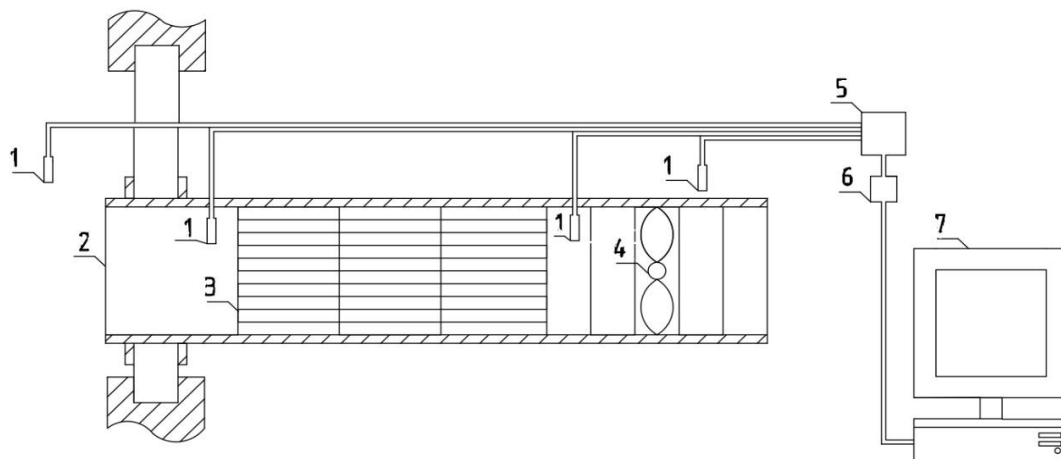


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-29-01412)*

# ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ФОНОНОВ В НАНОПЛЕНКАХ С РЕАЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОЙ ГРАНИЦЕЙ

Чжэн Цзяюэ\*, Инь Фэй

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

\*zhengjiayu959@gmail.com

В последние годы теоретические исследования теплопроводности тонких пленок в основном были сосредоточены на микро-масштабных эффектах, встречающихся в экспериментах. Основой описания теплопереноса является уравнение переноса Больцмана (Boltzmann Transport Equation, BTE), дополненное соответствующими микро-масштабными ограничениями. Эти исследования показывают, что размерный эффект теплопроводности пленки в основном связан с рассеянием фононов на границе образца, что первоначально было предложено Казимиром [1]. Для изучения влияния морфологии границы образца на длину свободного пробега пленки использована модель МГТУ [2]: приведена статистическая модель шероховатости поверхности [3,4], рассмотрены различные варианты границ пленки, для которых выполнен расчет средней длины свободного пробега фононов.

В работе рассмотрено влияние угла падения и угла наклона поверхности на длину свободного пробега. Результаты расчетов средней длины свободного пробега в зависимости от соотношения средней квадратичной шероховатости  $\sigma$  к длине корреляции  $l$  представлены на рис.1. Видно, что с увеличением неоднородности,  $\sigma/l$ , поверхности плёнки существенно падает длина пробега  $l_{ph}$ . Установлено, что длина свободного пробега продольных фононов пленки больше толщины пленки, что отличается от вывода Казимира [1] о том, что для шероховатых поверхностей длина свободного пробега фононов почти равна диаметру образца.

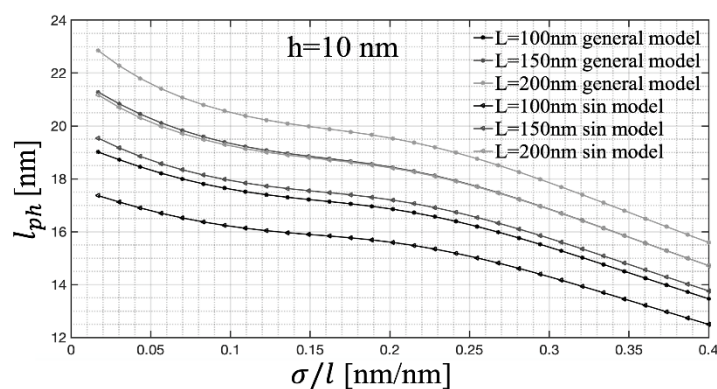


Рис. 1. Средние длины свободного пробега фононов для разных моделей поверхности.

## Литература

1. Casimir H. B. G. Note on the conduction of heat in crystals // Physica (1938) 5, iss. 6, p. 495–500.
2. Barinov A.A., Liu B., Khvesyuk V.I. A new technique for modelling phonon scattering processes at rough interfaces and free boundaries of solids // J. Phys.: Conf. Ser. (2022) 2150, no. 012021, 6 p.
3. Ogilvy J.A. Wave scattering from rough surfaces // Rep. Prog. Phys. (1987) 50, no. 12, p. 1553–1608.
4. Bass F.G., Fuks I.M. Wave scattering from statistically rough surfaces. Oxford; New York: Pergamon Press. (1979) 527 p.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИСТЕННОГО ОБРАТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ СТЕНОК

Чупров И.В.<sup>1,2</sup>, Иващенко В.А.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1,3</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

3) *Институт энергетики и перспективных технологий КазНЦ РАН, Казань, Россия*

*\*[i.chuprov@g.nsu.ru](mailto:i.chuprov@g.nsu.ru)*

На протяжении долгого времени возникновение пристенных обратных течений считалось невозможным, о чем свидетельствует работа Экельмана [1]. Позже их существование было показано как экспериментально, так и в численных расчетах. Недавно в работах [2, 3] был предложен механизм образования пристенных обратных течений на основе данных, полученных в ходе эксперимента с использованием оптических методов измерения (PIV, от англ. particle image velocimetry) и прямого численного моделирования (DNS, от англ. direct numerical simulation). В данной работе планируется исследовать влияние нагрева стенок канала на процесс образование пристенных обратных течений и их статистические характеристики.

В работе рассматривается течение трех различных теплоносителей (воздуха, жидкого натрия и свинцово-висмутевого сплава) в канале квадратного поперечного сечения шириной  $2H$ . Задача решается прямым численным моделированием. Для решения уравнения Навье-Стокса вплоть до колмогоровского масштаба вблизи стенок используется сгущение сетки. Для скорости наложены периодические граничные условия в продольном направлении и условие прилипания на боковых стенках канала, для температуры формулируется задача Дирихле на верхней и нижней стенках ( $y/H = \pm 1$ ), боковые стенки теплоизолированы. Рассматривается перенос температуры как пассивной примеси, так и в постановке малого числа Маха. Число Рейнольдса равно  $Re = 3150$ , построенное по среднерасходной скорости и полувысоте канала. Зависимости плотности и вязкости от температуры выбраны в соответствии с экспериментальными данными.

Расчет турбулентного течения проводится методом прямого численного моделирования (DNS) с помощью открытого вычислительного пакета Nek5000, ранее уже используемого для решения подобных задач [2,3]. Благодаря спектральной точности кода удастся добиться хорошей точности решения на относительно небольшом количестве вычислительных узлов, которое для данной задачи не превысило 10 млн. точек. Были получены профили распределения скорости и ее пульсаций, температуры, проанализирована вероятность появления пристеночных обратных течений как на поверхности плоских стенок, так и в углах канала.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны ИТ СО РАН и Новосибирскому государственному университету за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера “Каскад”.*

## Литература

1. Eckelmann, H. 1974 The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow. *J. Fluid Mech.* 65 (3), 439–459.
2. Zarirov D. et al. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2021. – Т. 923.
3. Zarirov D. et al. Reverse flow phenomenon in duct corners at a low Reynolds number // *Physics of Fluids*. – 2021. – Т. 33. – №. 8. – С. 085130.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТОМ ЦИЛИНДРЕ С НИЖНИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТОРЦОМ

Шарифуллин Б.Р. \*, Тинтулова М.В., Наумов И.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[sharifullinbulat@mail.ru](mailto:sharifullinbulat@mail.ru)*

Исследование формирования циркуляционных вихревых ячеек для улучшения тепло-массообменных процессов в биологических и энергетических технологиях является важнейшим приложением в разработке вихревых аппаратов и оптимизации рабочих режимов [1]. В данной работе выполнено экспериментальное исследование распределения скорости при организации вихревого движения жидкости в цилиндрическом контейнере с нижним вращающимся торцом (диском) в двух конфигурациях: (I) при свободной верхней границе раздела [2], (II) при наличии второй более легкой несмешиваемой жидкости [3]. Цель работы – исследовать режимы и параметры, при которых происходит циркуляция жидкости во всем объеме для эффективного перемешивания и сравнить с замкнутым вихревым реактором.

Исследования проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере (радиус  $R = 144$  мм) с нижним диском, вращающимся с угловой скоростью  $\omega$ . В качестве рабочей жидкости использовался 65% водный раствор глицерина (плотность  $\rho_g = 1150$  кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $\nu_g = 15$  мм<sup>2</sup>/с). В качестве второй жидкости использовалось подсолнечное масло ( $\rho_o = 916$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_o = 41.9$  мм<sup>2</sup>/с). Высота слоя рабочей жидкости  $h_g$  менялась от  $0.2R$  до  $1R$  с шагом  $0.2R$ , а высота верхней жидкости была фиксирована  $h_o = 1R$ . Число Рейнольдса  $Re = \omega R^2/\nu_g$  варьировалась от 200 до 1000. Исследования проводились при помощи метода PIV в вертикальном сечении, проходящем через ось цилиндра и в горизонтальном сечении под границей раздела на расстоянии 1 мм. Поток жидкости засеивался полиамидными частицами плотностью 1030 кг/м<sup>3</sup> и средним размером 10 мкм.

В ходе работы определены зависимости циркуляционного движения при увеличении закрутки потока и изменении высоты рабочей жидкости. Показано, что при свободной поверхности (воздух) возможно твердотельное вращение жидкости в приосевой зоне реактора, в которой отсутствует радиальная составляющая скорости. Получено, что для меридиональной циркуляции жидкости во всем объеме необходимо чтобы высота слоя жидкости была не менее  $1R$ . Установлено, что при наличии сверху второй жидкости, даже при  $h_g = 0.2R$ , в рабочей жидкости формируется такое же меридиональное течение как в конфигурации с твердой крышкой. Твердая крышка твердотельного вращения не допускает и возникает меридиональная циркуляция, тогда как жидкая крышка - промежуточный случай, а результат зависит от ее вязкости.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-19-00083.*

## Литература

1. Shtern V. Cellular Flows. Topological Metamorphoses in Fluid Mechanics // New York: Cambridge University Press. – 2018.
2. Chaplina T.O. Experimental study of substance transfer in vortex and wave flows in multicomponent media // In Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). – Springer, Cham. – 2019. – pp. 159-173.
3. Skripkin S.G., Sharifullin B.R., Naumov I.V., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid whirlpool // Scientific Reports (2021) 11, 23085.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ В ЦЕРЕБРАЛЬНОЙ СОСУДИСТОЙ ПАТОЛОГИИ И ЕЁ ОКРЕСТНОСТИ ВО ВРЕМЯ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

Шарифуллина Т.С. \*, Черевко А.А., Остапенко В.В.

*Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*[tatiana\\_06.08@mail.ru](mailto:tatiana_06.08@mail.ru)*

Церебральная артериовенозная мальформация (АВМ) является врожденной патологией развития сосудов головного мозга, при которой артериальное и венозное кровеносные русла соединены клубком беспорядочно переплетенных выродившихся сосудов. Одним из методов хирургического лечения является эмболизация — это малоинвазивное вмешательство, представляющее собой внутрисосудистое заполнение клубка патологических сосудов специальным жидким твердеющим веществом (эмболическим агентом) с целью блокирования кровотока через них. Не смотря на широкое применение данного хирургического метода, остаются риски неблагоприятного исхода операции, вызванные периоперационными кровоизлияниями. Математическое моделирование процесса эмболизации рассматривается совместно с постановкой задачи оптимального управления этим процессом.

Для описания течения внутри патологии используется математическая модель двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей через пористую среду (АВМ), где вытесняемой фазой является кровь, а вытесняющей эмболический агент. Поскольку АВМ является частью сосудистой системы головного мозга, то по мере поступления эмболического агента увеличивается гидравлическое сопротивление патологии и кровотоков в окружающих патологию сосудах перестраивается. Для учета этого перераспределения потока крови, к модели фильтрации добавляется модель окружающей сосудистой сети, построенная на основе гидравлического приближения. Полученная система интегро-дифференциальных уравнений в частных производных решается численно с помощью монотонной модификации схемы CABARET [1].

Одной из целей работы является отыскание оптимального с точки зрения безопасности и эффективности сценария эмболизации. Для возникающих начально-краевых задач ставится задача оптимального управления, где целевой функционал и ограничения выбираются в соответствии с медицинскими показаниями. Задача оптимизации решается численно в специальном классе управлений. Исследуется перестройка кровотока при различных сценариях эмболизации.

Для установления тесной связи математической постановки задачи с клиническими приложениями при определении параметров и функций, входящих в модели, используются реальные клинические данные пациентов [1,2]. Результаты исследований могут использоваться для усовершенствования методики, выработки рекомендаций и повышения безопасности проведения нейрохирургических операций.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00264, <https://rscf.ru/project/22-11-00264/>).*

## Литература

1. Cherevko A.A., Gologush T.S., Petrenko I.A., Ostapenko V.V., Panarin, V.A. Modelling of the arteriovenous malformation embolization optimal scenario // Royal Soc. Open Sci. – 2020. – V. 7. №. 7. P. 191992.
2. Khe A.K. et al. Monitoring of hemodynamics of brain vessels // J. App. Mech. Tech. Phys. – 2017. – V. 58. P. 763–770.



# ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ПРИ КИПЕНИИ В СЛОЯХ ЖИДКОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ

Швецов Д.А.<sup>1\*</sup>, Павленко А.Н.<sup>1</sup>, Жуков В.И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

*\*shvetsov.kh301@ya.ru*

В данной работе представлены результаты исследования критических тепловых потоков (КТП) при испарении и кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости на 2-D модулированных капиллярно-пористых покрытиях в широком диапазоне изменения относительных давлений. С помощью аддитивной SLS технологии [1] были изготовлены два покрытия из нержавеющей стали (образец 1) и из бронзы (образец 2) с расстоянием между ребрами 3.5 мм и одно покрытие из бронзы с расстоянием между ребрами 1.7 мм (образец 3). Полученные экспериментальные данные сравнивались со значениями КТП на гладкой поверхности, а также с расчетными значениями по известным моделям (см. рис. 1). Увеличение КТП по сравнению с гладкой поверхностью достигалось в слоях жидкости высотой 4.0 и 10.0 мм. На образце 3 были получены наиболее высокие значения КТП по сравнению с другими образцами. Формула Ягова достаточно близко описывает КТП на образцах 1 и 2 в области давлений  $P_s/P_{cr} = 1.84 \cdot 10^{-5} - 6.62 \cdot 10^{-4}$ . При давлениях ниже  $P_s/P_{cr} = 7.35 \cdot 10^{-5}$  КТП на всех образцах ограничивались сверху неустойчивостью Ландау.

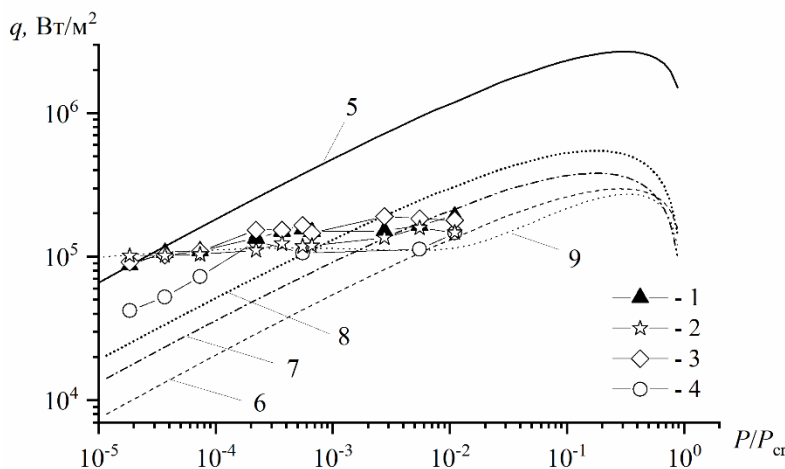


Рис. 1. КТП в слое н-додекана 4.0 мм в зависимости от относительного давления: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – гладкая поверхность; 5 – расчет по формуле Ландау; 6 – расчет по формуле Кутателадзе; 7, 8 – расчет по формуле Литера и Кавиани при параметрах для образцов 2 и 3, соответственно; 9 – расчет по формуле Ягова

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).*

## Литература

1. Бессмельцев В.П., Павленко А.Н., Жуков В.И. Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3D-печати для интенсификации теплообмена при кипении // *Автоматрия*. – 2019. – Т. 55. – №. 6. – С. 25–35.

# ФРАГМЕНТАЦИЯ КАПЕЛЬ ВОДОМАЗУТНОГО ТОПЛИВА

Шлегель Н.Е.\*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,  
Россия*

*\*nik.shlegel.ask@gmail.com*

В настоящее время для теплоснабжения жилых зданий и промышленных предприятий используются как традиционные виды топлива (уголь, газ) так и нефтепродукты (мазут, дизтопливо, сырая нефть) [1,2]. Мазут представляет смесь фракционного сырья и остатков процессов очистки и крекинга нефти и содержит высокий процент дизельного топлива (около 40%). В России 84.7 % производимого мазутного топлива используется на теплоэнергетических объектах, которые работают на нефтепродуктах [3]. Количество объектов в теплоэнергетике, использующих мазут как основной вид топлива, составляет 2357 – котельных и 7 – ТЭЦ [3]. При распылении мазутного топлива существует ряд технологических сложностей, которые приводят к нестабильности горения факела.

Целью работы являлось определение предельных (необходимых и достаточных) условий и характеристик вторичного измельчения капель водомазутной композиции при их соударении с твердой нагретой поверхностью, соответствующей стенкам камер сгорания.

Выполнены экспериментальных исследований характеристик вторичного измельчения капель водомазутного топлива при соударении с твердой подложкой и между собой. Установлены условия стабильной реализации двух режимов взаимодействия родительской капли и подложки. Для приближения условий опытов к газопарокапельным технологиям использовались варьируемые параметры: относительные концентрации воды и мазута, размеры капель (0.1–2.5 mm), скорости их движения (0–8 m/s), температура топлива (20–90 °C) и подложки (20–300 °C). Регистрируемые характеристики: режимы соударений, количество и размеры вторичных фрагментов, площадь поверхности жидкости. Построены карты режимов взаимодействия. Получены математические выражения для описания границ режимов взаимодействия. Вычислены площади поверхности капель водомазутной композиции после и до фрагментации. Сформулированы рекомендации по применению результатов исследований для развития технологий вторичного измельчения капель водомазутных топлив в приложениях.

*Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-79-00197, <https://rscf.ru/project/22-79-00197/>).*

## Литература

1. Shebeleva AA, Minakov A V, Chernetskii MY, Strizhak PA. Deformation of a Droplet of an Organic Water Coal Fuel in a Gas Flow // J Appl Mech Tech Phys. -2018.-No. 59, p. 653–61.
2. Alekseenko S V, Maltsev LI, Bogomolov AR, Chernetskiy MY, Kravchenko I V, Kravchenko AI, et al. Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot water boiler // Bull Tomsk Polytech Univ Geo Assets Eng. -2017.- No. 328, p. 16–28.
3. EMISS STATE STATISTICS. Fuel and energy resources consumed in the reporting year as boiler and furnace fuel in 2016, <https://fedstat.ru/indicator/43892>; 2022 [accessed 27 October 2022].

# ВЛИЯНИЕ ЖИДКОЙ ФРАКЦИИ ПЕНЫ НА ОБТЕКАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПРОНИЦАЕМОГО ПРЕПЯТСТВИЯ

Шмакова Н.Д.<sup>1\*</sup>, Стенникова О.Е.<sup>1,2</sup>, Карра Ж.-Б.<sup>1</sup>, Ерманюк Е.В.<sup>1</sup>

1) *Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[\\*shmakova@hydro.nsc.ru](mailto:shmakova@hydro.nsc.ru)

Жидкие пены используются во многих промышленных приложениях, где чрезвычайно важным представляется понимание закономерностей, позволяющих осуществлять контроль течения пен в гетерогенных средах [1]. Ранее было показано влияние геометрии проницаемого препятствия на квазидвумерное течение пены [2].

Целью данной работы является анализ экспериментальных данных течения пены с различным водосодержанием в ячейке Хеле-Шоу, состоящей из двух стеклянных пластин, разделенных миллиметровым зазором, при наличии проницаемого цилиндрического препятствия. В работе представлен новый алгоритм расчета жидкой фракции двумерной пены на основе статистического анализа. Показано, что повышение водосодержания приводит к уменьшению эффекта отрицательного следа при обтекании препятствия в плоской щели (рис. 1). Для более сухих пен увеличение высоты препятствия приводит к усилению эффекта отрицательного следа. Проницаемость локального препятствия значительно уменьшается с увеличением жидкой фракции в исследуемом диапазоне параметров и падает до значения, близкого к нулю при переходе к пузырьковому течению [3].

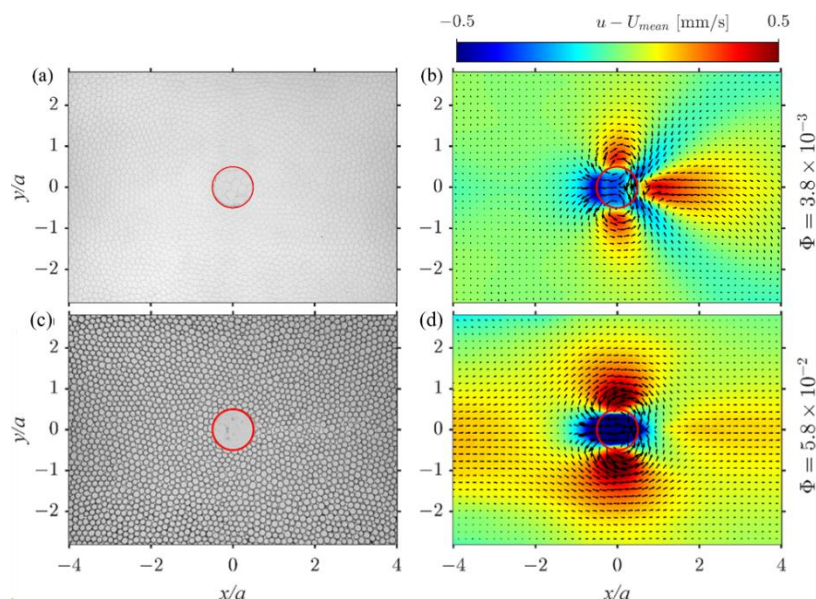


Рис. 1. Исходные изображения пены (слева) и продольная компонента скорости (справа) для низкого (a, b) и высокого (c, d) водосодержания.

## Литература

1. Cantat, I. *Foams, Structure and Dynamics*. Oxford University Press, 2013.
2. Shmakova N.D., Chevalier, T., Puisto, A., Alava, M., Raufaste, C., Santucci, S. Quasi-two-dimensional foam flow through and around a permeable obstacle // *Phys. Rev. Fluids*. 2020. V.5. 93301
3. Stennikova, O., Shmakova, N., Carrat, J.-B., Ermanyuk, E. Liquid Fraction Effect on Foam Flow through a Local Obstacle // *Polymers*. 2

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Щербаков Г.Е.<sup>1,2</sup>, Герасимов А.С.<sup>1,2</sup>, Чохар И.А.<sup>1</sup>, Терехов В.И.<sup>1,2</sup>

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*  
2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*  
\*gleb.shherbakov.99@mail.ru

Знание закономерностей теплообмена человека требуется в медицине для обоснования методик гипо-и гипертермии, разработки специальной одежды в авиации, МЧС, морском флоте. В имеющихся экспериментальных и расчетных исследованиях решен лишь ряд частных вопросов и эта проблема требует дальнейшего детального изучения.

В данной работе представлены результаты измерений тепловых потерь при вариации условий внешней среды. Проведен анализ всех компонентов теплового потока и их вклад в суммарный поток теплоты на отдельных участках кожи человека.

Выполнено исследование, представляющее собой комплекс из 6 экспериментов. В качестве испытуемых, участвовали два человека мужского пола возрастом 22 лет. В обнаженном виде человек находился в неподвижном лежачем положении в течение 30 минут в климатической камере со стабилизированной температурой и влажностью. В трех областях тела проводилось измерение локальных тепловых потоков. Датчики теплового потока, температуры и влажности располагались на груди, животе и плече.

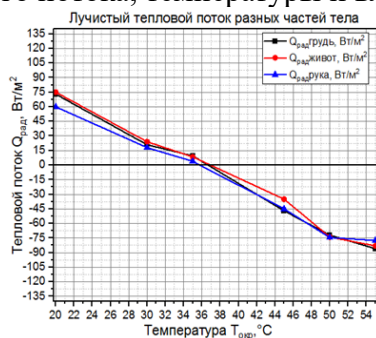


Рис.1. Радиационная компонента теплового потока,  $T_{\text{окр}}=20^{\circ}\text{C}$

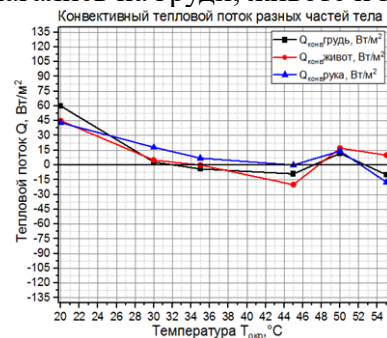


Рис.2. Конвективная компонента теплового потока,  $T_{\text{окр}}=20^{\circ}\text{C}$

В качестве примера на рис.1 показано изменение лучистого теплового потока при вариации температуры окружающей среды. Коэффициент излучения кожи был принят близким к абсолютно черному телу [1]. Данная составляющая была получена как теоретическим, так и экспериментальным методами. Также на основе разности значений полного и лучистого теплового потока, определена и конвективная компонента (рис.2). Как видно, излучение, выделяемое и поглощаемое телом, превалирует над конвективным теплообменом на поверхности кожи [2].

*Работа выполнена за счет Мегагранта №075-15-2021-575*

## Литература

1. J.D. Hardy. The radiation of heat from the human body (III) The human skin as a black-body radiator. J Clin Invest. 1934;13(4):615–620.
2. LijuanWang, Hui Yin, YuhuiDi, YanfengLiu, JiapingLi. Human local and total heat losses in different temperature // Physiology & Behavior, -2016; 157:270-6.

# Оглавление

Dynamics of Droplets in the Transition and Film Boiling Regime on Textured Substrates .....	3
Susmita Dash	
Biphilic Surfaces for Thermal-Fluids Systems and Energy Efficiency.....	3
Ali Kosar	
Turbulence Control — Better, Faster and Easier with Machine Learning.....	3
Bernd Noack	
Physics-Informed modelling of Coherent Structures in Multiphysics Flows .....	4
Kilian Oberleithner	
Spray Cooling for High Heat-Flux Electronics Cooling.....	4
Run Hu	
Новый Физтех: путь от лаборатории в рамках мегагранта до факультета .....	5
Павел Белов	
Simple Models of Complex Processes: Heating and Evaporation of Droplets on a Superhydrophobic Surface .....	5
Сергей Сажин	
Молодежные лаборатории: создание, становление, развитие .....	5
Павел Стрижак	
От открытия лаборатории до создания научно-образовательного центра: роль связи науки и образования.....	6
Валерия Родионова	
Отчего такой сильный ветер?.....	6
Григорий Фалькович	
Новые способы формирования топливовоздушной смеси в авиационных двигателях за счет реализации цепных механизмов фрагментации композиционных топлив .....	8
Антонов Д.В.	
Численное моделирование волновых структур на обдуваемой газом горизонтальной пленке жидкости.....	9
Апостол Ю. С., Вожаков И. С.	
Регистрация антропогенных газовых выбросов при сжигании отходов нефтепереработки .....	10
Ахметшин М.Р., Няшина Г.С.	

Экспериментальное исследование влияния биополимерных микрогелевых частиц в капле термочувствительного полимера на особенности ее растекания при соударении с гидрофобной поверхностью.....	11
Ашихмин А.Е., Пискунов М.В., Антонио Ди Мартино, Федоров В.С.	
Численное моделирование отрывного турбулентного потока в плоском канале при наличии периодического оребрения.....	12
Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.	
Исследование процесса массообмена в прямом и синусоидальном микроканалах при снарядном режиме течения .....	13
Барткус Г.В., Кузнецов В.В.	
Теплофизические особенности имитаторов расплава солей в условиях, приближенных к реакторным установкам IV поколения.....	14
Белавина Е.А., Бердюгин Д.А., Ерпулѐв А.А., Пятницкая Н.Ю.	
Смачивание текстурированной бифильной медной поверхности .....	15
Васильев М.М., Родионов А.А., Шухов Ю.Г., Терехов В.В., Старинский С.В.	
Влияние размеров супергидрофобных каверн на медной поверхности на интенсивность теплообмена при кипении .....	16
Владимиров В.Ю., Чиннов Е.А., Хмель С.Я.	
Перспективный метод комплексного исследования теплообмена при спрейнном охлаждении .....	17
Владыко И.В., Суртаев А.С., Сердюков В.С.	
Гидродинамические характеристики опускных пузырьковых течений при малых числах Рейнольдса .....	18
Воробьев М.А., Рандин В.В., Кашинский О.Н.	
Исследование влияния перестройки потока на энергоразделение в вихревой трубе: исследование полей температуры.....	19
Гордиенко М.Р., Кабардин И.К., Правдина М.Х., Какаулин С.В., Яворский Н.И.	
Формирование кластеров-цепочек при движении пузырей от одиночного капилляра в наклонной трубе .....	20
Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Чинак А.В.	
Применение метода POD для закрученного течения в радиальной вихревой горелке ...	21
Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Шторк С.И.	
Численный метод обратной задачи рассеяния уравнения КдФ для эффективного анализа случайных волновых полей.....	22
Гудько А.С., Гелаш А.А., Мулладжанов Р.И.	

Применение суррогатных моделей на базе свёрточных нейронных сетей для предсказания характеристик течения жидкости в канале .....	23
Гусев Г.Е., Плохих И.А., Мулляджанов Р.И.	
Увеличение экономической эффективности проекта путем оптимизации системы сбора продукции на примере месторождения Х.....	24
Дикаев Е.С., Девлешова Н.А.	
Исследование пристенных явлений в снаряжном течении в пузырьковой колонне квадратного сечения.....	25
Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Блель В., Джентрик К., Си-Ахмед Э-К., Легран Д., Дешандоль Э.	
Влияние межступного расстояния на гидродинамическую структуру двухфазного пузырькового потока в прямоугольном канале.....	26
Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Блель В., Джентрик К., Си-Ахмед Э-К., Легран Д.	
Исследование форсунки риформера дизельного топлива численным методом.....	27
Жерибор М. О., Хребтов М. Ю.	
Кризис пузырькового кипения в горизонтальных слоях жидкости конечной высоты ....	28
Жуков В.И., Павленко А.Н.	
Кипение в плоских микроканалах с интенсивным локализованным нагревом .....	29
Зайцев Д.В., Белослудцев В.В.	
Исследование стабильности аттракторов в нелинейном режиме для внутренних волн .	30
Замараева Е.В., Шмакова Н.Д.	
Динамика роста одиночного парового пузыря при кипении в условиях микрогравитации .....	31
Зорькина А. И., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.	
Магнитные измерения на установке «КОТ».....	32
Иванов Р.С., Мурахтин С.В.	
Вихреразрешающее моделирование кавитационного режима обтекания гидропрофиля с тангенциальной инъекцией.....	33
Иващенко Е.И., Зарипов Д.И., Мулляджанов Р.И.	
Прямое численного моделирование ламинаризации развитого турбулентного течения в трубах .....	34
Иващенко В.А., Мулляджанов Р.И., Зарипов Д.И.	
Процессы переноса тепла в наноплёнках в двумерном и трёхмерном приближении с учётом шероховатости границ (модель МГТУ).....	35
Инь Ф., Чжэн Ц.	

Влияние характеристик шероховатости на режимы соударения капель жидкостей с твердыми поверхностями .....	36
Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.	
Оценка уменьшения адгезии льда путем изменения поверхности микроструктурами разной геометрии.....	37
Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р., Мухин Д. Г., Зуев В.О.	
Dead-rise angle and speed effect on the air entrapment during conus impact onto a liquid....	38
Carrat J.-B., Gavrilov N.V., Cherdantsev A.V., Shmakova N.D. and Ermanyuk E.V.	
Исследование влияния различных параметров на процесс перелета микрокапель над линией контакта в пленке жидкости, нагреваемой снизу.....	39
Кириченко Е.О., Кириченко Д.П., Зайцев Д.В.	
Анализ траекторий трассерных частиц в затопленных турбулентных струях с закруткой потока .....	40
Кирчанова Е.Е., Токарев М.Ю., Дулин В.М.	
Формирование газовых пузырей и их характеристики в микроканальных потоках газ – вязкоупругая жидкость.....	41
Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В.	
Численное моделирование завесного охлаждения плоской пластины при струйной подаче охладителя .....	42
Козюлин Н. Н., Хребтов М. Ю.	
Термическое сопротивление контактной пары на основе элемента с магнитокалорическим эффектом .....	43
Колесов К.А., Маширов А.В., Кузнецов А.С., Мусабилов И.И., Коледов В.В., Шавров В.Г.	
Динамика ривулетного течения жидкости на нагреваемой подложке .....	44
Кочкин Д.Ю.	
Обоснование возможности ранней идентификации возгорания в помещении по газовому составу продуктов пиролиза материалов .....	45
Кропотова С.С., Стрижак П.А., Кузнецов Г.В.	
Параметрическое исследование активного управления потоком в камере сгорания дополнительной инъекцией газа .....	46
Кундашкин А.Д., Хребтов М.Ю., Палкин Е.В., Мулляджанов Р.И.	
Численное моделирование процесса теплоотдачи при течении гелий-ксеноновой смеси с малым числом Прандтля в квазитреугольном канале.....	47
Макаров М.С., Наумкин В.С., Лебеда К.С.	



Влияние кавитации на обтекание круглого цилиндра, покрытого гидрофобным материалом.....	48
Лебедев А.С., Добросельский К.Г., Дулин В.М.	
Особенности формирования факела при столкновении двух ламинарных газовых струй .....	49
Литвиненко Ю.А., Сарычев Д.В.	
Экспериментальное исследование условий запуска пульсационной тепловой трубы....	50
Литвинцева А.А., Вожаков И.С., Чеверда В.В.	
Влияние аддитивных микроструктур на кризис теплообмена в широком микроканале	51
Литвинцева А.А., Чеверда В.В.	
Экспериментальное исследование влияния специальных устройств на процесс ламинаризации развитого турбулентного течения в трубах.....	52
Лукьянов А.А., Ничик М.Ю., Пантелеев С.А., Зарипов Д.И.	
Исследование снарядного режима течения в квадратном миниканале.....	53
Лукьянов Ан.А., Вожаков И.С., Роньшин Ф.В.	
Численное исследование управления течением в отсасывающей трубе модельной гидротурбины Френсиса с помощью радиального щелевого вдува.....	54
Лутченко И. И., Палкин Е. В., Хребтов М. Ю., Мулляджанов Р. И.	
МГД и теплообмен жидкого металла в комбинированном канале в системе двойного охлаждения.....	55
Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г., Полянская О. Н.	
Влияние морфологии поверхности на эффективную теплопроводность нанонитей.....	56
Лю Ш., Баринов А.А.	
Интенсификация теплообмена при кипении с использованием бифильной поверхности на кремниевом основании .....	57
Малахов И. П., Сердюков В. С., Сафонов А.И., Родионов А. А., Старинский С.В., Суртаев А. С.	
Моделирование процесса гидратообразования при кипении сжиженного газа.....	58
Марасанов Н.В., Мелешкин А.В.	
Экспериментальное определение рабочих параметров механического теплового ключа для криогенного магнитного рефрижератора на основе криомагнитной системы 10 Тл	59
Маширов А.В., Колесов К.А., Кузнецов А.С., Мусабилов И.И., Коледов В.В., Шавров В.Г.	
Газогидратный метод опреснения и очистки воды, основанный на кипении сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды. ....	60
Мелешкин А.В., Марасанов Н.В.	

Исследования развития нестационарных свободноконвективных програничных слоев на вертикальных стенках .....	61
Михайлов А.В., Кислицын С.А., Гришков В.А., Юровских Е.А., Бердников В.С.	
Экспериментальные исследования процесса образования льда на стенках различной ориентации .....	62
Михайлов А.В., Кислицын С.А., Гришков В.А., Бердников В.С.	
Экспериментальное исследование теплообмена при конвективном испарении не азеотропной смеси R32/R134a в микроканальном теплообменнике .....	63
Мордовской А.С., Шамирзаев А.С.	
Получение стабильных наножидкостей на основе углеродных наночастиц, синтезированных электродуговым методом .....	64
Морозова М.А., Максимовский Е.А., Зайковский А.В.	
Численное моделирование двухфазного течения в плоском миниканале .....	65
Мунгалов А.С., Кочкин Д.Ю.	
Экспериментальное исследование влияния перегретого водяного пара на сжигание газообразного топлива .....	66
Мухина М.А., Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю.	
Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца в нанометровом диапазоне длин волн .....	67
Сарычев В.Д., Невский С.А., Грановский А.Ю., Сарычев Д.В., Коновалов С.В.	
Моделирование двухфазного течения в пористой среде с помощью решеточного уравнения Больцмана .....	68
Новоселов К.В., Юношева Е.В.	
Визуализация динамики испарения тонкой капли жидкости шпирен методом .....	69
Пещенюк Ю.А., Гатапова Е.Я.	
Разработка программного кода для численного моделирования задач гидродинамики методом решеточных уравнений Больцмана .....	70
Плеханов М. С., Сальников М. В., Мулляджанов Р. И.	
Экспериментальное исследование аттракторов внутренних волн, генерируемых угловыми колебаниями пластины в линейно стратифицированной жидкости .....	71
Рудая Я. Е., Шмакова Н.Д., Чеботников А.В., Бойко О.А., Ерманюк Е.В., Сибгатуллин И.Н.	
Характеристики образования капсул при распаде коаксиальной двухфазной струи .....	72
Рябов М.Н., Гобызов О.А., Бильский А.В.	
Гидродинамика многофазных магнитножидкостных систем в неоднородном магнитном поле .....	73

Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А.

Измерение поля температуры турбулентного закрученного пламени в вихревой камере сгорания методом лазерно-индуцированной флуоресценции..... 74  
Савицкий А.Г., Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.

Исследование паромасляного горелочного устройства для сжигания жидких углеводородных отходов..... 75  
Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А., Ануфриев И.С.

Исследование влияния распределенного отсоса на собственные и усиленные акустическим полем возмущения пограничного слоя..... 76  
Садовский И.А., Катасонов М.М.

Лазерная золотоиндуцированная кристаллизация тонких плёнок субоксида кремния .. 77  
Самохвалов Ф.А., Родионов А.А., Баранов Е.А., Замчий А.О., Старинский С.В.

Неизотермическое испарение капель водных растворов ПАВ ..... 78  
Семенов А.А., Пещенюк Ю.А., Морозов В.С., Мисюра С.Я., Вожаков И.С.

Локальные характеристики теплообмена и эволюция микрослоя при кипении жидкости в вакууме ..... 79  
Сердюков В.С., Малахов И.П., Суртаев А.С.

Измерение теплового потока, отводимого каплей жидкости, при падении на твёрдую поверхность в спутном потоке газа ..... 80  
Сибиряков Н.Е., Кочкин Д.Ю., Кабов О.А.

Расчет проводимости Капицы на границе раздела пары твердых тел из кремния и алюминия ..... 81  
Силионова Е.И., Хвесюк В.И.

Динамика падающих капель жидкости в зависимости от числа Вебера и тепловых характеристик подложки ..... 82  
Ситников В.О., Гагапова Е.Я.

Численное моделирование импактного пламени с использованием детальных кинетических механизмов ..... 83  
Сластная Д.А., Хребтов М.Ю., Дулин В.М.

Изменение геометрии капли при испарении с бифильной поверхности в постоянном электрическом поле..... 84  
Смирнов Н.И., Сафонов А.И., Родионов А.А., Миськив Н.Б., Старинская Е.М., Старинский С.В.

Взаимодействие капли жидкости с супергидрофобной поверхностью ..... 85  
Сомванши П.М., Чеверда В.В., Кабов О.А.

Применение времяпролетного метода для определения характеристик газочапельного потока за центробежной форсункой .....	86
Сорокин М.И., Толстогузов Р.В., Данилов П.А., Дулин В.М.	
Трансцендентность краевого угла смачивания при движении капли жидкости по супергидрофобной поверхности .....	87
Старинский С.В., Родионов А.А., Шухов Ю.Г., Сафонов А.И., Миськив Н.Б., Старинская Е.М.	
Оптимальные адсорбенты для открытых систем вентиляции воздуха (ВентиРег) .....	88
Стрелова С.В., Черкасова А.В., Мезенцев С.И.	
Молодежные лаборатории: создание, становление, развитие .....	89
Стрижак П.А.	
Численное моделирование процесса производства технического углерода.....	90
Тарраф Д.	
Экспериментальное исследование течения жидкости в модели вихревого биореактора	91
Тинтулова М.В., Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В.	
Измерение поля температуры в пламенах различной конфигурации с помощью метода ЛИФ .....	92
Толстогузов Р.В., Савицкий А.Г.	
Термогравиметрический анализ углеродсодержащих материалов.....	93
Ушаков К.Ю., Богомоллов А.Р., Петров И.Я.	
Исследование компонентного состава вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации капель многокомпонентных топлив .....	94
Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.	
Экспериментальное исследование влияния геометрических и расходных характеристик на теплообмен в кольцевой импактной струе.....	95
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И., Ян Лун Н., Сарсембенов Е.	
Определение эффективной теплопроводности гидратосодержащих песчаных образцов по данным синхротронной рентгеновской микротомографии .....	96
Фокин М. И., Марков С. И.	
Энтальпия и теплоемкость жидких магния, кальция и их интерметаллического сплава	97
Хайрулин А.Р., Станкус С.В.	
Взаимодействия частиц микрогеля с гидрофобными гладкой и микроволокнистой поверхностями .....	98
Пискунов М.В., Хомутов Н.А., Пискунова А.Е., Хан Е.А., Антонио Ди Мартино	

Экспериментальные исследования реверсивных процессов переноса в тепло- и массообменных аппаратах регенеративного типа при наличии фазовых переходов ..... 99  
Черкасова А.В., Мезенцев С.И., Стрелова С.В.

Длина свободного пробега фононов в нанопленках с реальной шероховатой границей ..... 100  
Чжэн Цзяюэ, Инь Фэй

Исследование пристенного обратного течения в канале квадратного поперечного сечения при нагреве стенок ..... 101  
Чупров И.В., Иващенко В.А., Мулляджанов Р.И., Зарипов Д.И.

Экспериментальное исследование циркуляционного движения жидкости в открытом цилиндре с нижним вращающимся торцом ..... 102  
Шарифуллин Б.Р., Тинтулова М.В., Наумов И.В.

Моделирование изменения гемодинамики в церебральной сосудистой патологии и её окрестности во время нейрохирургической операции ..... 103  
Шарифуллина Т.С., Черевко А.А., Остапенко В.В.

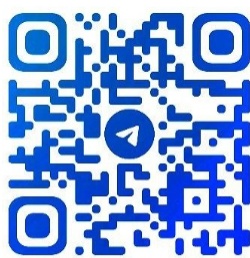
Влияние давления на критический тепловой поток при кипении в слоях жидкости на различных капиллярно-пористых покрытиях ..... 104  
Швецов Д.А., Павленко А.Н., Жуков В.И.

Фрагментация капель водомазутного топлива ..... 105  
Шлегель Н.Е.

Влияние жидкой фракции пены на обтекание локального проницаемого препятствия 106  
Шмакова Н.Д., Стенникова О.Е., Карра Ж.-Б., Ерманюк Е.В.

Экспериментальное исследование компонентов теплового потока на поверхности тела человека ..... 107  
Щербаков Г.Е., Герасимов А.С., Чохар И.А., Терехов В.И.

Чат-бот конференции



@AVTFG\_BOT



Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН



СО РАН

**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
**\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

