



IX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
С ЭЛЕМЕНТАМИ ШКОЛЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

# ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

г. Сочи, отель “Акваград”  
8 - 15 сентября 2024 г.

Научная молодежная школа  
**ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ  
ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ**

г. Сочи, отель “Акваград”  
8 - 15 сентября 2024 г.

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Министерство науки и высшего образования РФ  
Сибирское отделение Российской академии наук  
Национальный комитет по тепломассообмену РАН

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
Новосибирский государственный университет  
Новосибирский государственный технический университет



НКТМ  
РАН



N\*



РНФ



Научная молодёжная школа проводится при финансовой поддержке  
Российского научного фонда грант № 19-79-30075  
и ООО "СигмаПро"

Министерство науки и высшего образования РФ  
Сибирское отделение Российской академии наук  
Национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
Новосибирский государственный университет  
Новосибирский государственный технический университет

IX Всероссийская научная конференция  
с элементами школы молодых учёных

# **ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА**

Сочи  
Отель «Акваград»  
8–15 сентября 2024 г.

**Научная молодёжная школа**

## **ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ**

Сочи  
Отель «Акваград»  
8–15 сентября 2024 г.

### **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Новосибирск 2024

Сборник содержит тезисы докладов IX Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2024) и, проводимой в рамках этой конференции, научной молодёжной школы «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (ТФГСВ2024). Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Сочи. Организаторами конференции выступают Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет. Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах; гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах; фазовые переходы; научные основы нефтегазовых технологий; гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы; численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике; методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента; теплофизические свойства веществ и новые материалы; тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах; электрофизические явления в газовых и жидких средах; теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

**Председатель**

Маркович Д.М., академик РАН

**Заместители**

Головин С.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Марчук И.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

**Учёный секретарь**

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

**Технический комитет**

Кашкарова М.В., к.ф.-м.н.

Зорькина А.И.

Лукьянов А.А.

Сластная Д.А.

ООО "Научный сервис"

**Научный комитет**

Алексеев С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Алхасов А.Б., профессор, д.т.н. (ИПГВЭ - филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале, Махачкала)  
 Батаев А.А., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)  
 Васильев А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Губайдуллин А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТПМ СО РАН, Тюмень)  
 Елистратов С.Л., доцент, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)  
 Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Исаев С.А., профессор, д.ф.-м.н. (СПбГМТУ, Санкт-Петербург)  
 Кабов О.А., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Кедринский В.К., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Коротаяев Г.К., чл.-корр. РАН (МГИ РАН, Севастополь)  
 Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)  
 Кузнецов В.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Куперштох А.Л., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Мильман О.О., профессор, д.т.н. (НПП Турбокон, Калуга)  
 Наумов И.В., профессор РАН, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Павленко А.Н., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Пруэлл Э.Р., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Пухначёв В.В., чл.-корр. РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)  
 Рабаданов М.Х., д.ф.-м.н. (ИПГВЭ - филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале, Махачкала)  
 Рыжков А.Ф., профессор, д.т.н. (УрФУ, Екатеринбург)  
 Сажин С.С., PhD, Prof. (University of Brighton, UK)  
 Смовж Д.В., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Соловьев С.Л., д.т.н. (АО «ВНИИАЭС», Москва)  
 Станкус С.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Терехов В.И., профессор, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Терехов В.В., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Федорук М.П., академик РАН (НГУ, Новосибирск)  
 Фрик П.Г., профессор, д.ф.-м.н. (ИМСС, Пермь)  
 Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Цвелодуб О.Ю., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Чернов А.А., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)  
 Яворский Н.И., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.

За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

ISBN 978-5-89017-088-0

© Институт теплофизики СО РАН, 2024

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ  
ГИДРОДИНАМИКА:  
СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ





## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ: РАБОЧИЕ ЦИКЛЫ, КОНСТРУКЦИИ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

По режиму температур нагреваемого внешнего теплоносителя для практического применения тепловые насосы (ТН) классифицируются на низкотемпературные (40...45°C, кондиционирование, система «теплый пол»); среднетемпературные (до 60...65°C, горячее водоснабжение, среднетемпературное отопление) и высокотемпературные ВТН (более 80°C). Практически 90% всех ТН в мире работают в режиме нагрева теплоносителей на нужды среднетемпературного отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования. Эффективное использование ТН в промышленности и коммунальном теплообеспечении сопряжено с увеличением как их теплопроизводительности, так и температур нагрева до экономически оправданных максимально высоких значений, в т.ч. с получением водяного пара низких параметров.

Ориентация на рабочие тела природного происхождения, отвечающие международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности, становится общемировой тенденцией. В связи с этим, переход на использование CO<sub>2</sub> (R-744), NH<sub>3</sub> (R717), изобутан (R-600a) в парокомпрессионных ТН, а также на новые водно-солевые растворы в абсорбционных и H<sub>2</sub> в адсорбционных ТН сопряжен с необходимостью решения целого ряда научно-технических задач. Так, например, рабочие процессы углекислотного цикла (рис.1) характеризуются высокими давлениями и отсутствием процессов конденсации в сверхкритической области, а в конструкции может рассматриваться в качестве основного аппарата энергоэффективный турбокомпрессорный агрегат [1].

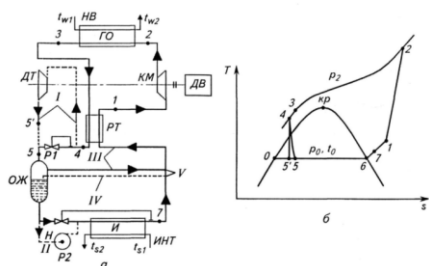


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и рабочий цикл (б) высокотемпературного теплового насоса на R-744.

Благодаря уникальным термодинамическим и теплофизическим особенностям углекислого газа (R-744) становится возможным использование окружающего воздуха в качестве источника низкопотенциального тепла для нагрева воды до 90°C [2], а также создание высокопроизводительных (до 100 МВт) высокотемпературных тепловых насосов для энергетики и коммунального хозяйства [1].

Рабочим веществом в ТН абсорбционного типа (АТН) является вода, а традиционным абсорбентом водный раствор соли бромид лития (LiBr), термостабильный только до 130°C. АТН обеспечивают нагрев внешнего теплоносителя до 90°C с использованием в качестве высокопотенциального источника энергии водяного пара

с давлением до 0,75 МПа, теплоты продуктов горения, а в качестве утилизируемого тепла - теплоты антропогенных или природных теплоисточников с температурой более 20°C.

В современных АТН понижающего типа используются схемы многоступенчатой абсорбции и десорбции, позволяющие повысить эффективность систем тригенерации. Не менее важным представляется переход к использованию новых термостабильных водно-солевых растворов (рис.2) на основе солей LiCl и CsCl [3].

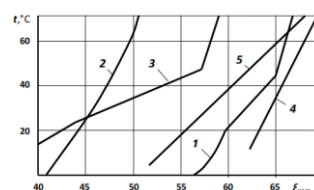


Рис. 2. Зависимость растворимости солей (или смеси солей)  $\xi$  в воде от температуры  $t$ : 1 - LiBr; 2 - LiCl; 3 - CaCl<sub>2</sub>; 4 - LiCl - CsCl (5,26:1); 5 - LiCl-CaCl<sub>2</sub>-Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (4,2:2,7:1).

Как имеющие большие перспективы рассматриваются АТН повышающего типа, способные до половины потенциала теплоисточников с температурами 60...70°C преобразовывать в тепло уровня 90°C и более без существенных затрат электроэнергии, но с необходимым сбросом другой, большей части первоначального потенциала, в окружающую среду.

В связи с бурным развитием водородных и нанотехнологий интерес представляют адсорбционные металлгидридные ТН, способные работать в условиях невесомости. Использование H<sub>2</sub> в качестве рабочего тела позволяет осуществить процессы его сорбции и десорбции в широком диапазоне температур от -50 до +200°C. Перспективы водородных ТН периодического действия связывают с созданием эффективных систем тригенерации на основе высокотемпературных топливных элементов, как в земных условиях, так и в космосе.

Развитие теплонасосной техники с использованием новых научно-технических и технологических подходов – это одно из направлений модернизации энергетики и энергоёмких отраслей экономики на основе соблюдения принципов рационального природопользования.

### Список литературы

1. Калнинь И.М., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И. Тепловые насосы на диоксиде углерода для систем теплогенерирования //Известия РАЕН, 2009. С. 81-86.
2. Высокотемпературный тепловой насос на CO<sub>2</sub> (воздух-вода) ТСАН200НН [Электронный ресурс] URL: <https://tica.pro/catalog/co2-heat-pump/>.
3. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов /А.В. Бараненко, С.В. Караван, О.А. Пинчук, Д.В. Караван; М.: Изд-во «Перо», 2014. 303с.

## ЭНЕРГОБЛОКИ ORC НА БАЗЕ НИЗКОКИПЯЩИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ: СХЕМЫ, КОНСТРУКЦИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мильман О.О.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон,  
ул. Комсомольская роща, Калуга, 248010, Россия

<sup>2</sup> Калужский государственный университет им К.Э. Циолковского,  
ул. Ст. Разина, 26, Калуга, 248023, Россия

Потенциал энергосбережений России оценивается величиной 420 - 450 млн. т.у.т./год. На промышленность и ТЭК приходится 60 - 65 % этого потенциала. Россия занимает 12 место в мире по эффективности использования топлива, с одной стороны это плохо, с другой стороны мы располагаем громадными источниками для выработки электроэнергии без затрат топлива. Так, например, по нашим оценкам на базе тепловых выбросов ПАО «Газпром» можно произвести до 5 млн. кВт электроэнергии, что составляет более. 2 % от мощности всех ЭС России.

В 2016 г. в Газпроме принята программа строительства теплоутилизационных комплексов (ТУК) на базе компрессорных станций магистральных газопроводов, и встает естественный вопрос: какая схема теплоутилизационного энергокомплекса и термодинамический цикл станут базовыми для реализации потенциала энергосбережения.

Классический цикл Ренкина для выработки электроэнергии не исчерпал своих возможностей. Пример - энергоблок на КС «Чаплыгин» это характерное решение для высокопотенциального источника тепла с водяным теплоносителем. Для низкопотенциальных источников с температурой греющей среды до  $t_{гр}=250\div 300^{\circ}\text{C}$  преимущество имеет цикл на органическом теплоносителе (хладоны, кремнийорганика, фторуглероды). Для северных районов водяной цикл вообще не желателен и границы использования ORC по температуре расширяются.

В зависимости от температурного уровня источников тепла технически и экономически обоснованы типы энергоустановок (см. таблицу). Низкопотенциальное тепло - сфера применения ORC установок с низкокипящим теплоносителем.

*Таблица 1. Типы утилизационных установок*

Температура источника тепла	Тип оборудования			
	Э	Э+Т	Т	Т+К
T>550	+			
T 300 - 550		+		
120-300		+	+	
T<120			+	+
Э - производство электроэнергии Т - теплоснабжение К - кондиционирование				

В мире работает более 3000 таких установок поставки фирм ORMAT (США, Израиль), Turboden (Италия), General Electric (США) и др.

Важный вопрос проектирования и эксплуатации таких установок - выбор рабочего тела (РТ) на фоне основных требований к нему: энергетическая эффективность, взрыво-пожаробезопасность, стоимость, экологические показатели: DDR (воздействие на озоновый слой) и GWP (парниковый эффект). Последние показатели за рубежом и в России оказывает все большее влияние на выбор и доступность РТ.

Термодинамические преимущества в сочетании с конструктивными особенностями установок малой и средней мощности (компактность, простота, отсутствие влажно-паровой эрозии) делают ORC технологию более привлекательными в области низкопотенциальных источников энергии.

ORC установки получают определенную универсальность и широкие возможности внедрения, если источник тепла - термомасло от утилизатора. В этом случае парогенератор может быть ориентирован не только на масло, но и на горячую воду без существенной реконструкции. Тип парогенератора с кипением РТ в трубах или в объеме зависит от источника тепла и стоимости РТ.

Турбина, работающая на фреонах, получается более компактной, может выполняться в центробежном варианте или (для более высоких температур) в виде 3÷4 осевых ступеней на роторе небольшого диапазона.

Габариты установки в целом в значительной степени зависят от конденсатора и конденсатно-питательного насоса, взаиморасположение которых определяет вертикальные габариты установки. Варианты компоновки для различных форм варьируют от единого контейнера (мощность 300÷500 кВт) до открытой компоновки на участке электростанции мощностью 5÷20 МВт.

В настоящее время выполнен большой объем НИОКР по теме ORC и назрел вопрос о создании отечественного референтного образца.

### Список литературы

1. Исследование процессов кипения хладона R113 в горизонтальном трубном пучке/ О.О. Мильман, В. Б. Перов, Г. Г. Яньков; Теплоэнергетика, 2023. № 2, С. 1-3.
2. Энергетическая установка /Патент РФ № 2760853, 30.11.2021. Мильман О.О., Кузина Л.А.
3. Двухпоточный турбогенератор для органического цикла Ренкина /Патент РФ № 191940 от 28.08.2021. Мильман О.О., Шифрин Б.А.

*Работа поддержана РНФ  
(грант № 22-19-00495 от 13.05.2022 г).*



**ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОЛОГИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА****Ненарокомов А.В., Будник С.А., Титов Д.М.**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское ш. 4, Москва, 125993, Россия

Решение обратных задач теплообмена на практике обычно сопровождается их преобразованием к конечномерным аналогам. Такое преобразование осуществляется за счет аппроксимации операторов уравнений, описывающих исследуемую систему и краевые условия, введения параметризации различных функций и ряда других операций. Переход к конечномерной формулировке обратной задачи, вообще говоря, сужает область ее возможных решений. Однако, в силу обычного отсутствия априорной информации об искомым решениях исходной задачи, эта область остается достаточно широкой.

В обратных задачах теплообмена область возможных решений определяется рядом факторов, характеризующих как условия проведения эксперимента, так и использование соответствующих дополнительных измерений состояния рассматриваемой системы. Рациональный выбор этих факторов может существенно изменить (сузить) область возможных решений обратных задач, и улучшить свойства сходимости и точности используемых вычислительных алгоритмов. Исследование данного круга вопросов требует привлечения методов теории оптимального эксперимента.

Оптимальным планированием тепловых экспериментов называется выбор такой совокупности условий проведения эксперимента (плана эксперимента), который обеспечивает наилучшую обусловленность алгоритма решения соответствующей обратной задачи. Решение обратной задачи заключается в восстановлении неизвестных характеристик математической модели по результатам измерений некоторых функций от переменных состояния (например, ЭДС термопары как функция температуры). Обратную задачу можно рассматривать как некоторый эксперимент, конечной целью которого является получение количественной информации о неизвестных характеристиках. При этом для повышения точности решения и достоверности результатов могут быть использованы методы математической теории оптимального эксперимента. В некорректных обратных задачах качество эксперимента, по-видимому, наиболее целесообразно оценивать с помощью критерия, отражающего вычислительные особенности задачи.

Математическая формулировка обратных задач объединяет в себе две составные части 1) модель исследуемого процесса теплопереноса (или модель состояния системы), 2) модель формирования дополнительной информации о функции состояния системы с помощью измерительного устройства (или модель измерений). В общем случае математическая модель процесса теплопереноса представляет неявную зависимость характеристик состояния (температура, плотность и т.д.) от пространственной переменной, времени, известных теплофизических характеристик математической модели, вектора неизвестных параметров, геометрических размеров, продолжительности

процесса, начального распределения функции состояния, а также внешнего теплового воздействия, в том числе и величин, характеризующих условия проведения теплофизического эксперимента. К последним следует отнести совокупность следующих факторов: геометрические параметры пространственной области, время проведения эксперимента, внешнее воздействие, и начальное распределение температуры, и которые можно представить в форме вектора условий проведения эксперимента.

Модель измерений отражает зависимость результатов измерений от переменных состояния системы. В предположении, что в эксперименте осуществляются прямые измерения характеристик состояния в некоторой пространственной области и в некоторые моменты времени. В практике теплофизических исследований пространственная область обычно является некоторым ограниченным числом точек. Выбранное множество точек измерений в теории оптимального планирования обычно называется схемой измерений.

Исходные данные при решении обратных задач теплообмена являются результатами реальных измерений и поэтому всегда содержат в себе погрешности. Общая погрешность измерений складывается из систематической и случайной составляющих. Полный анализ источников отдельных составляющих погрешностей представляет собой самостоятельную сложную проблему. Однако современные методы и средства температурных измерений позволяют обеспечить достаточно низкий уровень систематической погрешности за счет использования соответствующей технологии изготовления измерительных устройств. Поэтому в данной работе предполагается, что погрешности температурных измерений содержат только случайную составляющую.

Данная работа посвящена анализу задачи оптимизации условий проведения экспериментов, в частности выбора оптимальной схемы размещения точек измерений при параметрической идентификации математических моделей теплообмена. Путем математического моделирования исследуется влияние размещения измерительных средств на точность решения обратных задач. Рассматривается постановка задачи оптимального планирования эксперимента. Анализируется алгоритм численного решения задачи оптимизации схемы размещения измерительных средств. Приводятся примеры решения задач планирования измерений при проведении теплофизических экспериментов.

*Работа выполнена при поддержке РФФ  
(грант № 23-19-00764).*

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В КАПЛЯХ ВОДЫ НА ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Антонов Д.В., Керимбекова С.А., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

В последние десятилетия активно исследуются фазовые превращения, тепломассообменные и физико-химические процессы в каплях неоднородных жидкостей. Это обусловлено недостаточной экспериментальной базой и необходимостью развития газопарокапельных технологий. В частности, недостаток чистой воды требует совершенствования технологии очистки промышленных и сточных вод, формирующихся в больших объемах при производственных работах во многих отраслях промышленности [1]. Понимание физики процессов, протекающих в неоднородных каплях при их движении в высокотемпературной (более 600 К) газовой среде - основа создания новых и усовершенствования существующих методов термической очистки жидкостей. Пока не разработана единая теория для описания процессов тепломассопереноса для таких условий.

Существует ряд исследований, посвященных исследованию влияния теплофизических свойств неоднородных жидких сред [3], начального размера капель [4], скорости их движения [5] и деформации [6], а также наличия ПАВ [7], на интегральные характеристики прогрева и испарения капель жидкостей. Исследовано влияние твердых включений в виде типичных грунтовых примесей (ил и глина) при движении в высокотемпературной (около 1100 К) газовой среде [7]. Известные на сегодняшний день модели испарения (кинетические и диффузионные) [8-10] удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным только в области температур внешней среды до 750 К. Получение достоверных математических и физических моделей возможно при наличии базы данных экспериментов, полученных с применением методов диагностики газожидкостных потоков (рис. 1) [8].

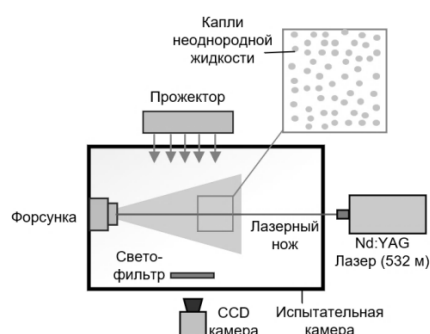


Рис. 1. Пример схемы экспериментальной установки с применением методов диагностики газожидкостных потоков

В докладе представлены результаты экспериментов и моделирования, выполненных с неоднородными каплями на базе воды и примесей. При помощи специализированной форсунки, вмонтированной в испытательную камеру с продуктами сгорания, формировался поток капель очищаемой жидкости (радиусом примерно 100 мкм). Размеры капель регистрировались методом теневой фотографии «Shadow

Photography» (SP) [9]. Метод SP предполагает фоновую подсветку измерительной области лазером (применялся зеленый Nd:YAG лазер «Quantel EverGreen 70») посредством оптического световода, подключенного к рассеивающему диффузному экрану, и видеофиксацию изображений капель с использованием CCD видеокамеры (использовалась модель «ImperX IGV-B2020M»). Экспериментальные данные обрабатывались в программном обеспечении «Actual Flow». Погрешность определения размеров капель не превышала 1.5%. Также экспериментально определялось время прохождения каплями канала с продуктами сгорания путем слежения за отдельными каплями с использованием высокоскоростной камеры «Phantom MIRO M310» (разрешение изображения 1280×800 пикселей; скорость съемки – до 6.5·10<sup>5</sup> к/сек). С целью установления влияния типа примесей на теплообменные процессы в испытательную камеру распылялись составы с различным содержанием примесей: твердые нерастворимые (активные неметаллы и металлы), твердые растворимые, органические, бактерии, их смеси.

## Список литературы

1. Bochkareva E. M., Ley M. K., Terekhov V. V., Terekhov V. I. J. Methodological Characteristics of an Experimental Investigation of the Process of Evaporation of Suspended Liquid Droplets // J. Eng. Phys. Thermophys. 2019. V. 92, N 5. P. 1171-1179.
2. Kulkarni A.P., Megaritis T., Ganippa L.C. Impact dynamics and morphology of urea–water–solution droplets impinging on a hot plate under urea–SCR relevant conditions: Influence of surface tension // Fuel. 2021. Vol. 298. 120671.
3. Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование влияния скоростей движения и размеров капель жидкостей на характеристики их деформации в воздухе // Журнал технической физики. 2015. В. 85. N 10. С. 29–33.
4. Huang, C.K. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition / C.K. Huang, V.P. Carey // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 269–282.
5. Huang C.K., Carey V.P. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. P. 269–282.
6. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение капель воды при движении через высокотемпературные газы // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 1. С. 104–111.
7. Sazhin S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101. 7.
8. Porowska A. Dosta M., Fries L., Gianfrancesco A., Heinrich S., Palzer S. Predicting the surface composition of a spray-dried particle by modelling component reorganization in a drying droplet // Chemical Engineering Research and Design. 2016. V. 110. P. 131–140. 8.
9. Strizhak P.A. Volkov R.S., Castanet G., Lemoine F., Rybdylova O., Sazhin S.S. Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 127. P. 92–106. 9.

Работа поддержана Министерством науки и образования РФ (соглашение №075-15-2024-620).

## БИОМИМЕТИКА В ЭНЕРГЕТИКЕ: КАК ПРИРОДА ВДОХНОВЛЯЕТ УЧЁНЫХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ

Суртаев А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия  
<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Природа, эволюционировавшая на протяжении миллиардов лет, предоставляет учёным неисчерпаемый источник вдохновения для разработки новых технологий и решений для различных областей жизнеобеспечения и жизнедеятельности человека, включая архитектуру и строительство [1], транспорт [2], робототехнику и искусственный интеллект [3], медицину и биотехнологии [4], управление водными ресурсами [5]. Более того, биомиметика, изучающая применение принципов и механизмов, найденных в природе, играет важную роль в развитии современных экологически безопасных энергетических технологий.

Одним из ярких примеров биомиметических решений является разработка солнечных панелей, вдохновленных структурой листьев. Листья растений обладают способностью эффективно улавливать и преобразовывать солнечную энергию через фотосинтез. Ученые адаптируют эти принципы для создания солнечных панелей с высокой эффективностью за счет использования материалов с более высокой способностью к поглощению света, что приводит к повышению КПД солнечных панелей [6].

Еще один пример - это ветрогенераторы, основанные на принципах полета птиц и морских обитателей. Современные лопасти ветряков часто разрабатываются с учетом аэродинамических характеристик крыльев птиц или плавников китов, что позволяет значительно увеличить производительность и стабильность работы ветряных турбин [7].

Также биомиметика предлагает огромные перспективы для создания новых материалов и технологий для традиционной энергетики, включая гидро, тепловую и ядерную энергетику. Например, использование микроструктур, имитирующих природные поверхности, позволяет создавать покрытия, которые ингибируют осаждение примесей и коррозию на подводных частях оборудования, таких как гидротурбины. Биовдохновленные технологии также предоставляют новые пути для повышения эффективности процессов с фазовыми превращениями (кипение, конденсация, испарения), которые являются основополагающими в традиционной энергетике. Более того, такие процессы как кипение, испарение и конденсация являются ключевыми в современных теплообменных системах и системах термостабилизации, включая тепловые трубки, паровые камеры, микроканальные теплообменники, системы со спрейным охлаждением и т.д. Данное направление в настоящий момент особенно актуально в связи с активным развитием микро/нанoeлектронники с высокой интенсивностью тепловыделения, например, высокопроизводительных компьютерных микрочипов.

Однако, несмотря на огромный потенциал и широкий спектр идей, реализованных природой за продол-

жительное время эволюции биологических систем, существуют значительные научные и технические вызовы. Одним из главных препятствий является сложность воссоздания и интеграции биологических механизмов в масштабируемые промышленные процессы.

Данный пленарный доклад будет посвящён обзору идей, решений и технологий, вдохновлённых природой, которые используются учёными и инженерами для решения актуальных вопросов современной энергетики, включая традиционную и альтернативную энергетику. Отдельное внимание в докладе будет уделено обзору природоподобных технологий для повышения эффективности процессов с фазовыми переходами (конденсация, кипение, испарение), которые являются основополагающими в традиционной энергетике, а также для разработки новых инновационных систем охлаждения и термостабилизации.

Биомиметика в энергетике открывает новые горизонты для устойчивого и эффективного использования природных ресурсов. Изучая и применяя природные решения, ученые могут не только улучшить существующие технологии, но и разработать инновационные методы получения и использования энергии, способствующие снижению экологической нагрузки на планету.

### Список литературы

1. Ripley R. L., Bhushan B. Bioarchitecture: bioinspired art and architecture—a perspective //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. V. 374. №. 2073. P. 20160192.
2. Jiakun H. A. N. et al. Review on bio-inspired flight systems and bionic aerodynamics //Chinese Journal of Aeronautics. 2021. V. 34. №. 7. P. 170-186.
3. Floreano D., Mattiussi C. Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods, and technologies. – MIT press, 2008.
4. Johnson A. P. et al. Bioinspired and biomimetic micro-and nanostructures in biomedicine //Journal of Controlled Release. 2022. V. 343. P. 724-754.
5. Brown P. S., Bhushan B. Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. V. 374. №. 2073. P. 20160135.
6. Zhou H. et al. Bio-inspired photonic materials: Prototypes and structural effect designs for applications in solar energy manipulation //Adv. Functional Materials. 2018. V. 28. №. 24. P. 1705309.
7. Gopinathan V. T., Bruce Ralphin Rose J. Aerodynamics with state-of-the-art bioinspired technology: Tubercles of humpback whale //Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2021. V. 235. №. 16. P. 2359-2377.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00581).*

## МОРСКИЕ БРЫЗГИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА: МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ, ВКЛАД ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА И РОЛЬ В ДИНАМИКЕ МОРСКОГО УРАГАНА

**Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Зотова А.Н., Вдовин М.И.**

Институт прикладной физики РАН им. А.В.Гапонова-Грехова, Нижний Новгород,  
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950, Россия

Морские погодные системы со штормовыми и ураганскими ветрами и осадками представляют существенную проблему для прибрежных территорий и морской деятельности. Высокие значения скорости ветра и связанные с ними ветровые нагрузки представляют собой основной фактор штормов и ураганов. С этим связаны высокие требования к качеству моделирования штормовой погоды.

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в прогнозировании траекторий штормов [1]. В то же время, интенсивность циклонов, и, прежде всего, максимальные значения скорости ветра предсказываются с большими погрешностями. Для наиболее интенсивных, быстро развивающихся штормов максимальная скорость ветра часто занижается более чем вдвое. Одной из основных причин для этого считается некорректное моделирование потока энергии из океана в атмосферу и аэродинамического сопротивления межфазной границы при высоких и экстремально высоких скоростях ветра.

В экспериментах наблюдается аномальная зависимость коэффициентов обмена (аэродинамического сопротивления и обмена теплом) от скорости ветра аномально низкий коэффициент аэродинамического сопротивления морской поверхности [2-5] и высокий коэффициент теплообмена [5]. В качестве причин этого аномального поведения рассматривается изменение реологии пограничных слоев атмосферы и океана, которые при штормовых условиях становятся многофазными средами: приводный слой атмосферы насыщен брызгами и дождевыми каплями, на поверхности воды присутствуют пенные области, а приповерхностный водный слой насыщен пузырьками воздуха. Это очень существенно, иногда определяющим образом, влияет на динамику морских штормов, поскольку в значительной степени определяет потоки энергии и импульса из океана в атмосферу. Натурные данные о параметрах таких сред, так же, как и коэффициенты обмена, характеризуются большими погрешностями. Такие неопределенности связаны как с трудностями проведения натуральных измерений в условиях шторма, так и с недостаточной изученностью механизмов генерации брызг, ограничивающей возможности теоретических оценок. В таких условиях возрастает роль теории и эксперимента в контролируемых лабораторных условиях.

На основе лабораторных экспериментов с применением высокоскоростной видеосъемки нами были выделены три механизма образования брызг: фрагментация жидких нитей, разрывы подводных пузырьков и дробление по типу "парашют" [6]. Предложена простая аналитическая модель инициации такого типа дробления [7]. В рамках модели получено уравнение, описывающее начальное возмущение в виде "нарастающей простой волны, форма которой благоприятствует процессу фрагментации по типу "парашют".

Модель верифицирована в лабораторном эксперименте, предложено статистическое описание событий фрагментации. Показано, что распределение средних

размеров "парашютов" описывается логнормальным законом. С учетом функции распределения по размерам брызг, генерируемых при одном событии фрагментации, построена функция генерации брызг, которая находится в хорошем согласии с данными независимых лабораторных экспериментов. На основе данных лабораторных экспериментов о статистике событий фрагментации и натурных данных об обрушениях поверхностных волн построена параметризация статистики брызг и числа событий дробления по типу "парашют" по скорости ветра и разгону волнения, применимая в натуральных условиях.

По данным экспериментов определено статистическое распределение по скоростям инъекции капель, образующихся при дроблении по типу "парашют". Полученные зависимости используются при инициации параметров капель в лагранжевой стохастической модели воздушного потока над взволнованной водной поверхностью, содержащего капли.

На основе расчетов в рамках в лагранжевой стохастической модели предложены параметризации для турбулентных потоков тепла, влаги и импульса. Эти параметризации были использованы при расчетах с использованием осесимметричной негидростатической модели шторма, предложенной в [8]. Показано, что учет потоков, обусловленных «микромасштабными» процессами в пограничных слоях океана и атмосферы, заметно увеличивает интенсивность шторма.

### Список литературы

1. National Hurricane Center Forecast Verification <https://www.nhc.noaa.gov/verification/verify5.shtml>.
2. Powell, M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature, 2003, V.422, P.279-283.
3. Donelan M.A., et al. (2004) On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // Geophys. Res. Lett., 2004, V.31, L18306.
4. Troitskaya Yu.I, et al. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // J. Geophys. Res. 2012, V.117 P.C00J21.
5. Komori, S., et al.. Laboratory measurements of heat transfer and drag coefficients at extremely high wind speeds // J. Phys. Oceanogr., 2018, V. 48, P. 959-974.
6. Yu. Troitskaya, et al. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // Sci. Rep. 2017, V. 7, P. 1614.
7. Yu. Troitskaya, et al., "The Small-Scale Instability of the Air-Water Interface Responsible for the Bag-Breakup Fragmentation" // J. Phys. Oceanogr., 2022, V. 52, P.1520.
8. Rotunno, R., K.A. Emanuel, An air-sea interaction theory for tropical cyclones, Part II: Evolutionary study axisymmetric nonhydrostatic numerical model//J. Atmos. Sci., 1987, V. 44, P.542-561.

*Работы выполнены при поддержке гранта РФФ № 24-17-00299 на оборудовании УНУ ККГС ИПФ РАН.*

**СЕКЦИЯ 1**  
**Теплообмен и гидродинамика**  
**в однофазных средах**





## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОТИВОТОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ РАНКА-ХИЛША

Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Тряпина В.А.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,  
ул. Пушкина, 53, Рыбинск, Ярославская область, 152934, Россия

Гипотеза энергоразделения в трубе Ранка-Хилша заложенная в модели взаимодействия вихрей строится на цикловом характере переноса энергии в форме тепла. При этом затрачивается кинетическая энергия турбулентности, генерируемой в сдвиговом слое между периферийным квазипотенциальным и приосевым вынужденным вихрями.

Большое количество публикаций последнего десятилетия с использованием численного моделирования зарубежных и отечественных исследователей позволило существенно продвинуться в анализе процессов, протекающих в камере энергоразделения и подтвердило наличие закрученного прецессирующего потока с присутствием вторичных сложных вихревых структур, взаимодействующих между собой и перемещающихся противоположно существенно турбулизованных потоков [1-3]. Исследования показывают, что вихревой эффект напрямую зависит от структуры закрученного потока.

Эксперименты по визуализации структуры течения в вихревой трубе, преследовали две основные задачи: определение основных характеристик вихревых структур формирующихся в камере энергоразделения и выявление особенностей взаимодействия периферийного и приосевого потоков. Определение геометрических и динамических параметров вихревых структур особенно актуально для валидации используемых подходов к компьютерному моделированию эффекта Ранка-Хилша, особенно в части моделирования турбулентности. Для наглядной визуализации структуры течения в вихревой трубе использовались вода в качестве рабочего тела, мелкодисперсные пластиковые частицы и краситель, вводимые с помощью иглы. В ходе испытаний варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды  $\mu$ , выходящей через диафрагму и со стороны радиального диффузора.

При работе вихревой трубы в режиме  $\mu=1$  в приосевой области можно наблюдать формирование двух вихревых структур в виде спиралей, вращающихся в противофазе около оси трубы. На режиме при  $\pi = 1,8$  и  $\mu=0,5$  наблюдается существенная нестационарность приосевого вихря, проявляющаяся в виде периодического возмущения пробегающего в виде волны по поверхности центрального жгута.

На всех исследованных режимах прослеживается циркуляция вводимых трассеров от периферии к центру и совершаемое ими вращательное движение внутри периферийного спирального вихря. На режиме  $\mu = 0,5$  отмеченная циркуляция частиц прослеживается только вблизи радиально-щелевого диффузора. Это говорит о том, что на этом режиме периферийный закрученный поток распространяется вдоль всей камеры энергоразделения, а приосевое течение формируется только вблизи выхода «горячего» потока.

Анализ перемещения частиц-трассеров позволил определить относительный радиус разделения вихрей

в диапазоне 0,65-0,9. На начальном участке камеры энергоразделения спиральный вихрь занимает значительное пространство, имея в радиальном направлении размер порядка 0,5d, шаг винтовой линии растянут и составляет  $(2 \dots 3)d$ . На расстоянии  $(5 \dots 6)d$  от закручивающего устройства спираль сжимается, шаг винтовой линии становится равным  $(1 \dots 1,5)d$ .

Визуализация границы разделения периферийного и приосевого вихрей выполнена с помощью введения через тонкую иглу в приосевую область подкрашенной воды (рис. 1). Несмотря на то, что мгновенного смещения периферийного и приосевого потоков не происходит, на видимой границе постоянно возникают мелкомасштабные вихри распространяющиеся вдоль границы раздела и срывающиеся в радиальном направлении периферийного вихря с частотой порядка 720 Гц. Это подтверждает интенсивный перенос массы между свободным и вынужденным вихрем в камере энергоразделения.

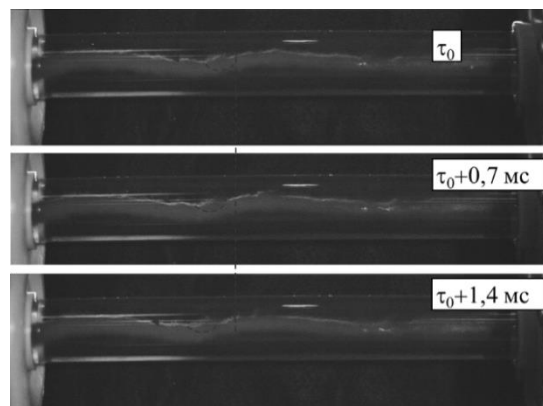


Рис. 1. Визуализация приосевого вихря красителем при  $\pi = 1,2$  и  $\mu = 1$

Образующиеся в зоне смешения противоточного закрученного течения вихревые спиралевидные структуры нестационарны, а их взаимодействие с окружающим потоком приводит к возникновению радиальных пульсаций, привносящих значительный вклад в энергообмен между приосевым и периферийным потоками.

## Список литературы

1. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект (Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование). Москва: ООО «Научтехлитиздат», 2012. 342 с.
2. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. Vol. 34, № 8. P. 1367–1374.
3. Ahlborn B., Groves S. Secondary flow in a vortex tube // *Fluid Dyn. Res.* 1997. Vol. 21, № 2. P. 73–86.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).*

Глуздов Д.С.<sup>1,2</sup>, Гагапова Е.Я.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2

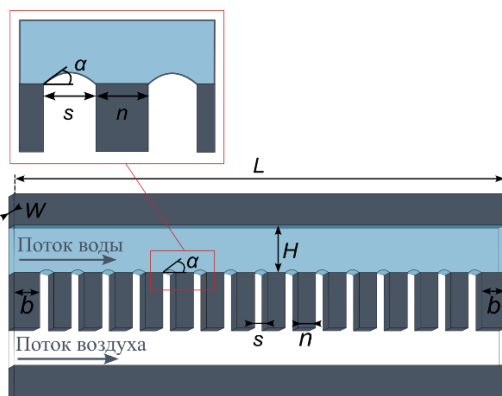
Микрофлюидика — это развивающаяся междисциплинарная область, которая манипулирует жидкостями в микромасштабных средах, обычно порядка микролитров. Микрофлюидика обеспечивает точный контроль над потоком жидкости, позволяя манипулировать клетками, частицами и молекулами с очень высокой точностью. Первоначально разработанная для применения в химии и биотехнологии, микрофлюидика быстро распространилась на различные области, включая медицину, науку об окружающей среде и материаловедение [1].

Многие работы посвящены улучшению микрофлюидных систем, в частности через манипулирование граничными условиями [2-6]. Ранее нами был проведен литературный обзор, содержащий десятки примеров граничных условия для уменьшения перепада давления в микроканалах [7]. Область микрофлюидики активно развивается и ещё актуальны исследования в области оптимизации геометрических параметров микроканалов. Ранее мы выбрали подход для проведения подобных расчетов и валидировали его с помощью экспериментального исследования [8]. В данной работе мы добавили в расчеты учет граничного условия Навье, реализованного в неявном виде и провели серию расчетов для микроканала со сложной структурой на границе (рисунок 1), с целью исследования оптимальных параметров микроканала.

Метод дискретизации условия Навье в неявном виде представлен в формуле ниже:

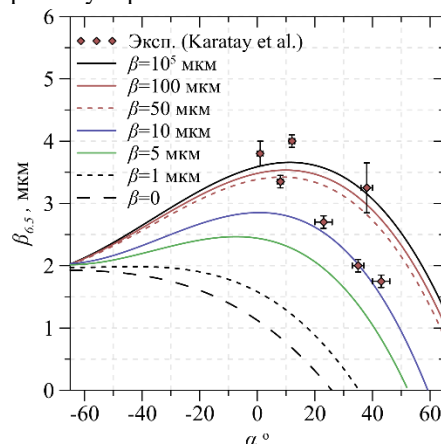
$$u_f = \frac{\beta/n}{1 + \beta/n} u_c$$

где  $u_f$  — скорость на границе,  $u_c$  — скорость в соседней ячейке,  $\beta$  — длина проскальзывания,  $n$  — расстояние нормали от центра ячейки к границе.



**Рисунок 1:** Микроканал с контролируемым пузырьковым матрасом, впервые представленный в работах Karatay E. и Haase A. [9]

Использование условия Навье и валидированного ранее численного метода расчета позволило исследовать влияние длины проскальзывания на течение в микроканалах разной геометрии. Результаты были сравнены с экспериментальными данными из статьи [9] (рисунок 2). Параметры микроканала: высота 50 мкм, длина 800 мкм, начальная скорость 0,2 м/с, ширина пузырьков  $s=20$  мкм.



**Рисунок 2:** Зависимость усредненной длины проскальзывания от угла выступа пузырьков и заданной длины проскальзывания на пузырьках

#### Список литературы:

1. Convery N. and Gadegaard N. 30 years of microfluidics // *Micro and Nano Engineering*. 2019. № 2. С. 76-91.
2. Ou J., Perot B. and Rothstein J. P. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces // *Phys. Fluids*. 2004. Т. 16. С. 4635-4643.
3. Rothstein J. P. Slip on superhydrophobic surfaces // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2010. Т. 42, С. 89-109.
4. Raayai-Ardakani S. and McKinley G. H. Geometric optimization of riblettextured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows // *Phys. Fluids*. 2019. Т. 31.
5. Hossain M. Z. and Floryan J. M. On the role of surface grooves in the reduction of pressure losses in heated channels // *Phys. Fluids*. 2020. Т. 32.
6. Lee C., Choi C. and Kim C. Superhydrophobic drag reduction in laminar flows: A critical review // *Exp. Fluids*. Т. 57. С. 1-20.
7. Gluzdov D.S. and Gatapova E.Y. Microchannel surface structures for drag reduction // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2023. Т. 32. №. 2. С. 214-241.
8. Gluzdov D.S. and Gatapova E.Y. Friction reduction by inlet temperature variation in microchannel flow // *Physics of Fluids*. 2023. Т. 33. №. 6.
9. Karatay E., Haase A., Visser C., et al. Control of slippage with tunable bubble mattresses // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. Т. 110. № 21. С. 8422-8426

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 20-19- 00722-П,  
<https://rscf.ru/project/20-19-00722/>.



## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ ЗА ОТВЕРСТИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Колесова А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А.

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,  
ул. Пушкина, д. 53, Рыбинск, 152934, Россия

Технология заградительного охлаждения активно начала исследоваться в 1960 годах и развивается до настоящего момента. Наиболее широкое применение она получила в газотурбинных двигателях для охлаждения сопловых и рабочих лопаток двигателя, которые подвержены воздействию высокими температурами газа на выходе из камеры сгорания. При заградительном охлаждении холодный воздух вдувается на защищаемую поверхность через отверстия и позволяет защитить, как область вдува, так и поверхность, расположенную за ней. На практике наиболее широкое распространение получили отверстия цилиндрической формы из-за простоты в изготовлении. Однако большинство научных исследований показывают, что применение отверстий веерной формы способствуют повышению эффективности охлаждения газовой завесы [1].

Численное моделирование истечения струи охладителя на практике обычно выполняется с применением RANS подходов. Согласно экспериментальным исследованиям по визуализации формирования и взаимодействию струи охладителя с основным потоком за местом вдува образуется большое количество вихревых структур, которые оказывают негативное влияние на эффективность газовой завесы [2]. RANS подход не позволяет предсказать формирование вихрей малого масштаба у защищаемой поверхности. Однако выявление данных вихревых структур важно, при выполнении работ по повышению эффективности заградительного охлаждения и требует выполнения численного моделирования с применением LES подхода.

В данной работе, выполнено высокоточное численное моделирование истечения струи охладителя из одиночного отверстия цилиндрической, веерной формы с коротким диффузорным участком (длина расширяющейся части - 1 калибр) и веерным отверстием с длинным диффузорным участком (3 калибра) в плоском канале. Для выполнения численного моделирования была построена неструктурированная расчётная сетка, состоящая из 140 млн. элементов. В качестве граничных условий на вход основного и вторичного потока задавалась полная температура 293К и 473К, соответственно. Полное давление на вход основного потока задавалось равным 103,2 кПа, на вход струи охладителя полное давление подбиралось в зависимости от параметра вдува  $m$  (1), который изменялся от 0,5 до 1,5.

$$m = \frac{\rho_{\text{охл}} * V_{\text{охл}}}{\rho_{\text{г}} * V_{\text{г}}} \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{охл}}$ ,  $\rho_{\text{г}}$  – плотность холодного и охлаждающего воздуха соответственно;

$V_{\text{охл}}$ ,  $V_{\text{г}}$  – скорость холодного и горячего воздуха.

На первом этапе работ, численное моделирование формирования струи охладителя за отверстиями различной геометрической формы осуществлялось с при-

менением RANS подхода и SST модели турбулентности, что обуславливалось необходимостью начального распределения для запуска LES расчета. По результатам моделирования было получено, что за отверстием цилиндрической формы и веерной формы с коротким диффузорным участком формируется вихревая пара, вращающаяся в противоположном направлении и способствующая подмешиванию основного потока к защищаемой поверхности. За веерным отверстием с длинным диффузорным участком, так же формируется пара вихрей, вращающаяся в направлении от защищаемой поверхности и подмешивания основного потока к поверхности не происходит. За отверстием цилиндрической формы отрыв защитной пелены от поверхности происходит при  $m > 1$ .

По результатам LES моделирования было получено, что за отверстием цилиндрической и веерной формы с коротким диффузорным участком происходит подмешивание основного потока к защищаемой поверхности, формируется почкообразный вихрь. С увеличением параметра вдува наблюдается увеличение продольной и поперечной компоненты скорости, что свидетельствует о глубоком проникновении струи охладителя за данными формами отверстий в ядро основного потока. За отверстием цилиндрической формы отрыв защитной пелены от поверхности происходит при  $m = 1$ . За веерным отверстием с длинным диффузорным участком наблюдается формирование большого количества мелкомасштабных вихревых структур, которые препятствуют подмешиванию основного потока к защищаемой поверхности. Средняя эффективность охлаждения за данной формой отверстия на 80% выше эффективности охлаждения за веерным отверстием с коротким диффузорным участком. На всех исследуемых режимах за всеми формами отверстий струя охладителя имеет нестационарный характер истечения.

Таким образом, применение веерных отверстий с длинным диффузорным участком позволяет избежать подмешивания основного потока к защищаемой поверхности и тем самым повысить эффективность пленочного охлаждения.

### Список литературы

1. Z. Tao, X. Wang, G. Xie, H. Li, Z. Zhou, Effects of structural parameters of laidback fan-shaped hole on film cooling effectiveness on convex surface// Applied Thermal Engineering. 2024. V. 236, P. 121636. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121636.
2. Shao, H., Qenawy, M., Zhang, T., Peng, D., Liu, Y., and Zhou, W. Experimental Study of Oscillating Freestream Effect on the Spatiotemporal Distributions of Leading-Edge Film Cooling // ASME. J. Turbomach. January 2021; 143(1): 011002. doi: 10.1115/1.4048794.
3. doi: 10.1115/1.4048794.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00666.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИНТОВОГО ВИХРЯ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНО-ИНДУКЦИОННОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Куйбин П.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Вихревые течения широко распространены в природе и в технических приложениях. Например, за рабочим колесом гидротурбины, работающей в неоптимальных режимах, поток имеет достаточно сильную закрутку, что приводит к формированию крупномасштабного прецессирующего винтообразного вихревого жгута. В проведенных ранее экспериментах на упрощенной модели отсасывающей трубы было обнаружено, что сам винтовой вихрь может быть неустойчивым. Соседние витки вихревой спирали сближаются друг с другом и происходит процесс вихревого перезамыкания с образованием вихревых колец [1]. Один из наиболее экономичных методов численного моделирования динамики вихревых нитей основан на применении локально-индукционного приближения (Local Induction Approximation – LIA). Salman [2] сопоставил решение на основе закона Био-Савара с полученным по LIA и показал, что последний позволяет предсказывать ситуацию, предшествующую перезамыканию. В цитируемой работе был рассмотрен классический бесконечный винтовой вихрь. В реальности же, в частности, в следе за гидротурбиной возникает конический винтовой вихрь.

В локально-индукционном приложении нелокальным вкладом пренебрегают и записывают скорость движения участка вихревой нити в виде [3, 4]

$$\vec{u} = \frac{\Gamma}{4\pi} \kappa \vec{b} \left( \ln \frac{2L}{\varepsilon} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – интенсивность вихревой нити,  $\kappa$  – кривизна,  $2L$  – длина локального участка,  $\varepsilon$  – радиус вихревой нити,  $\vec{b}$  – единичный вектор бинормали. Вводя множитель  $(\Gamma/4\pi)(\ln 2L/\varepsilon - 1)$  в масштаб времени и учитывая формулы Френе, записывают локально-индукционное уравнение (Local Induction Equation – LIE)

$$\frac{\partial \vec{X}}{\partial t} = \vec{X}' \times \vec{X}'' , \quad (2)$$

Здесь  $\vec{X}$  – радиус-вектор точки на вихревой нити, а штрих означает производную вдоль дуговой координаты.

Чаще всего уравнение вида (2) с помощью преобразования Hasimoto приводят к нелинейному уравнению Шредингера и исследуют волновые решения, в том числе – солитонные. При этом решение ищется в переменных «кривизна - кручение». Для восстановления геометрии в обычных переменных требуется решать дополнительную задачу. В рассматриваемой задаче целесообразно использовать непосредственно локально-индукционное уравнение и описывать вихревую нить в декартовых координатах, задавая зависимости вида

$$\begin{aligned} x &= r(z, t) \cos(\lambda t) \\ y &= r(z, t) \sin(\lambda t) \end{aligned} \quad (3)$$

Координата  $z$  направлена вдоль потока. Дуговая координата выражается через интеграл

$$s = \int_{z_0}^z \sqrt{x_z^2 + y_z^2 + 1} dz. \quad (4)$$

В качестве начального условия рассмотрен винтовой вихрь, радиус спирали которого нарастает по закону гиперболического тангенса

$$r_0(z) = \{1 + \tanh[k(z - h)]\}/2. \quad (5)$$

Формулы (3, 5) по сути обеспечивают гладкую сшивку полубесконечного прямолинейного вихря с полубесконечным цилиндрическим винтовым вихрем. Величина  $2\pi/\lambda$  в (3) – это шаг винтовой спирали, а коэффициент  $k$  в (5) характеризует быстроту смены радиуса от нуля до единицы. На расстоянии  $4.6/k$  слева от точки перегиба, ( $z = h$ ), радиус отличается на  $10^{-6}$  от нуля, и от единицы – справа от точки перегиба. Граничные условия для уравнения (2) ставятся при  $z \rightarrow \pm\infty$ , а при численной реализации, соответственно при  $z = h \pm 5/k$ . На левой границе ставятся нулевые условия на функцию  $X(s)$  и ее производную. На правой границе – условия перехода в классическую винтовую спираль.

При численной реализации решения уравнения (2) возникают проблемы, обусловленные нелинейностью. В частности, конечно-разностная схема оказывается неустойчивой. Сложность удается обойти, если применить аппроксимацию сплайном. Причем общепринятый кубический сплайн здесь не подходит, т.к. вторая производная у него кусочно-линейная. Выбран сплайн четвертого порядка с гладкой второй производной. Условия на производные в конечных точках сформулированы на основе рекуррентных соотношений, полученных из асимптотических разложений формул (3). Нам требуется аппроксимировать векторную функцию  $X(s)$  с взаимосвязанными компонентами. Разрешить проблему удастся, введя комплексную функцию  $\phi(s) = x(s) + i y(s)$ .

В результате серии расчетов установлено, что с течением времени форма винтовой спирали искажается и формируется петля, являющаяся предвестником вихревого перезамыкания. Изучены зависимости быстроты процессов от параметров задачи.

### Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А. Явление вихревого перезамыкания в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, Вып. 7. С. 516-521.
2. Salman H. Breathers on Quantized Superfluid Vortices // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. P. 165301-1-165301-5.
3. Da Rios L.S. On the motion of an unbounded fluid with a vortex filament of any shape (in Italian) // Rend. Circ. Mat. Palermo. 1906. V. 22. P. 117-135.
4. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦАХ СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА, ПОДОГРЕВАЕМОГО СНИЗУ, НА ОСРЕДНЕННУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СЛОЯ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВА ПРИ ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ РЭЛЕЯ

Локтионов В.Д.<sup>1,2</sup>, Мухтаров Э.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
ул. Красноказарменная, д. 14 стр. 1, г. Москва, 111250, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций» (АО «ЭНИЦ»),  
г. Электрогорск, Московской области, 142530, Россия

В работе представлен анализ влияния геометрических (аспектное число) и температурных условий на границах плоского слоя расплава стали, подогреваемого по его нижней поверхности, на среднюю температуру слоя в условиях смешанной естественной конвекции расплава при высоких числах Рэлея. Рассматриваемая задача связана с проблемой тяжелых аварий (ТА) [1] в корпусных ядерных реакторах, когда внутри корпуса формируется стратифицированная ванна расплава кориума, в которой имеется верхний металлический (сталь, цирконий) слой расплава, нагреваемый от нижерасположенной оксидной части расплава кориума. Для подобного стратифицированного расплава важно знать температурные условия как на граничных поверхностях расплава, так и значения осредненных по объему температур в каждом из таких слоев (стального, оксидного). Учитывая, что осредненное по объему значение температуры слоя зависит от ряда параметров (теплофизических свойств, геометрии, граничных условий), нахождение обобщенных корреляций для определения осредненной температуры слоя представляет нетривиальную задачу.

Объектом исследования в работе является цилиндрический металлический слой расплава стали, который формируется при ТА. На верхней поверхности слоя осуществляется теплообмен с внутренним объемом корпуса, а боковая поверхность слоя находится в контакте со стальной стенкой корпуса реактора, которая оплавляется и охлаждается с внешней ее поверхности. В течение ТА температурные условия на нижней (подогреваемой) и верхней поверхностях слоя могут изменяться и влиять на температурное состояние слоя и характер теплообмена в нем. Для оценки влияния геометрических (величина аспектного числа) и температурных условий на поверхностях слоя на величину осредненной температуры слоя (СТ) в работе была разработана многопараметрическая корреляция для средней (по объему) температуры слоя расплава стали в зависимости от его геометрических размеров (аспектное число) и осредненных значений температур его нижней, боковой и верхней поверхностей. Корреляция была получена на основе математической обработки результатов CFD моделирования естественной конвекции в слое расплава, которое выполнялось с использованием расчетного кода ANES [2] и модели турбулентности типа  $k-w$ .

Выполненный параметрический анализ влияния на среднюю температуру металлического слоя его геометрических размеров и граничных условий на его поверхностях показал существенное влияние как раз-

ницы температур между нижней и боковой поверхностями слоя, так и разницы между температурами его нижней и верхней поверхностей. Также, в работе был выполнен анализ влияния рассматриваемых граничных условий и геометрических размеров слоя на отклонение средней температуры слоя, определенной на основе разработанной корреляции, от «условной средней» (как средняя между температурами нижней и верхней поверхностей слоя) температуры (УСТ) слоя. В частности, анализ показал, что отклонения между температурами СТ и УСТ могут быть существенными. Так, при разнице температур равной 400 °С между нижней (1850 °С) и боковой (1450 °С) поверхностями слоя разница между температурами СТ и УСТ достигает ~100 и 200 градусов для слоев с аспектным ( $h/R$ ) отношением равным 0.1 и 0.6, соответственно. Для рассматриваемого случая разница между температурами нижней и верхней поверхностей слоя составляла 100 градусов. При этом, увеличение разницы температур между нижней и верхней поверхностями слоя приводит к тому, что знак разницы между температурами СТ и УСТ может изменяться с изменением величины разницы температур между нижней и боковой поверхностями слоя.

Полученная многопараметрическая корреляция для величины средней температуры слоя расплавленной стали, подогреваемого по его нижней поверхности, позволяет существенно снизить консервативность при получении оценок тепловых нагрузок, действующих на корпус ядерного реактора при ТА, и может быть использована для оперативной оценки величины внутренних коэффициентов теплообмена (и чисел Нуссельта) [3] в стратифицированной ванне расплава, а также может быть использована в расчетных программах при анализе подобных систем в условиях протекания ТА.

### Список литературы

1. Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996. *Invessel Coolability and Retention of a Core Melt*. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1.
2. ANES team «ANES/20XE : Код для численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена. Описание математических моделей кода». - 2015.
3. Loktionov, V., 2024. "Modified correlations for the Nusselt numbers at the boundaries of a bottom-heated molten metal layer in a stratified corium melt pool and an assessment of heat transfer conditions during a severe accident". *Nuclear Engineering and Design*. No. 112760. (2024). p. 13.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВАЕМЫХ ТРУБ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ РЕШЕТКАМИ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ**

**Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

В работе приводятся результаты экспериментального исследования распределения температуры стенок нагреваемых труб плотной 7-ми стержневой упаковки при течении газового теплоносителя в условиях сильной неоднородности тепловыделения отдельными элементами сборки. Рассмотрен случай, когда 5 элементов сборки имели равное однородное тепловыделение, а 2 соседних периферийных элемента имели нулевое тепловыделение. Проведено сравнение распределения температуры стенки нагреваемых труб при неоднородном тепловыделении с аналогичными распределениями, полученными ранее при однородном тепловыделении. Для фиксации труб использованы 8 дистанционирующих решеток, совмещенных с продольными вытеснителями в виде стаканов изготовленных методом SLA 3D печати из термостойкого UV-отверждаемого пластика. Решетки шириной 10 мм расположены на расстояниях 0, 210, 354, 498, 642, 786, 930 и 1074 мм от начала сборки. Стенки решетки имеют толщину 0.95 мм. Реализовано равномерное поле расходов газа в приосевых и периферийных каналах за счет подбора толщин внешних стенок периферийных каналов таким образом, чтобы эквивалентные диаметры каналов в решетке были одинаковыми.

В качестве рабочего тела использован воздух. Рабочий участок, используемый для проведения опытов, содержал 7 тонкостенных нихромовых труб длиной 1084 мм и внешним диаметром 12.85 мм. Для нагрева труб использован переменный электрический ток. Поперечное сечение трубного пучка в области расположения решетки, а также расположение ненагреваемых (1, 2) и нагреваемых (3, 4, 5, 6, 7) труб показано на рис. 1.

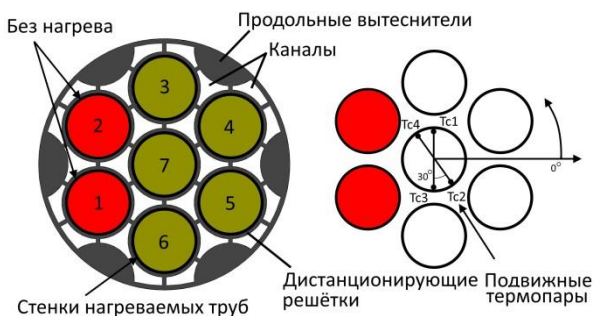


Рис. 1. Поперечное сечение рабочего участка, система полярных координат от оси центральной трубы, используемая для построения распределений температуры стенок.

Измерение распределений температуры стенки по азимутальному направлению нагреваемых центральной (7) и одной из периферийных труб (6) производилось с помощью подвижных термопарных зондов с четырьмя медь-константановыми термопарами. Началь-

ное расположение термопар по отношению к соседним нагреваемым и ненагреваемым трубам показано на рис. 1. Сборка труб размещалась в замкнутом газовом контуре, в котором циркуляция газа обеспечивалась компрессором.

На рис. 2 представлено распределение температуры стенки по окружности центральной нагреваемой трубы при течении воздуха с числом Рейнольдса 5200 перед дистанционирующей решеткой на расстоянии 752 мм от входа в сборку и сразу за решеткой на расстоянии 812 мм.

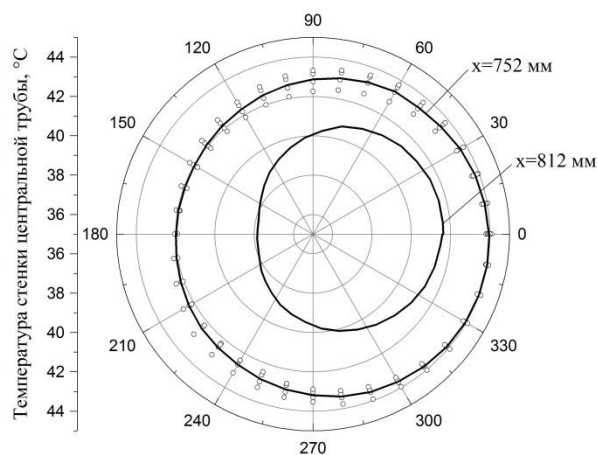


Рис. 2. Азимутальное распределение температуры стенки центральной трубки в условиях неоднородного тепловыделения при числе Рейнольдса 5200: линии – средние значения температуры, полученные в результате измерений четырьмя термопарами в одних и тех же точках, круги – показания отдельных термопар.

Наблюдается периодический рост температуры стенки трубы при приближении к дистанционирующей решетке и снижение температуры за отрывной областью после решетки. Следует отметить, что со стороны ненагреваемых труб сборки снижение температуры центральной трубы более выраженное, что связано с захватом более холодного газа от ненагреваемых труб отрывной областью и переносом его к нагретой центральной трубе. При симметричном нагреве азимутальное распределение температуры стенки центральной трубы равномерное, как перед решеткой, так и за ней.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

## О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ДИФFUЗОРА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В ОДИНОЧНОЙ ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

Перераспределение полной температуры между частями газового потока, протекающего через сверхзвуковое сопло и сопряженный с соплом дозвуковой канал принято называть газодинамическим энергоделением, а устройства, в которых реализуются такие

диффузоры представлены на рис. 3. Здесь же приведено изменение площади поперечного сечения по длине кольцевого сопла, относительно площади поперечного сечения в критическом сечении (1). Простой одномерный расчет показывает постоянный рост

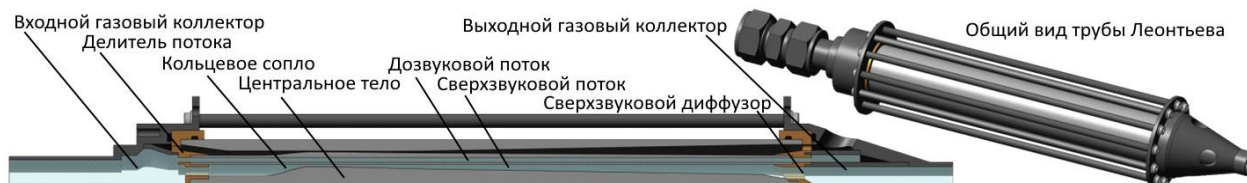


Рис. 1. Общий вид и геометрия проточной части одиночной трубы Леонтьева с центральным телом.

течения – трубами Леонтьева [1]. Эффективность энергоделения в рабочей части одиночной трубы Леонтьева с гладкой и оребренной разделительной стенкой хорошо изучена, в основном с применением численного моделирования. Однако для практического применения газодинамического энергоделения необходимо учитывать и негативные факторы, связанные с формированием и торможением сверхзвукового потока во входном и выходном газовых коллекторах, в сопле и сверхзвуковом диффузоре. В данной работе показано, что торможение потока в сверхзвуковом диффузоре может оказаться критически важным процессом, снижающим эффективность энергоделения на рабочем участке одиночной трубы Леонтьева с центральным телом.

На рис. 1 представлена конфигурация исследуемой трубы Леонтьева с учетом газовых коллекторов и сверхзвукового диффузора. Различные формы сверхзвукового диффузора представлены на рис. 2. Рассматривались формы в виде 8 круглых отверстий, 3-х и 4-х секторных отверстий с прямыми и скошенными перегородками.

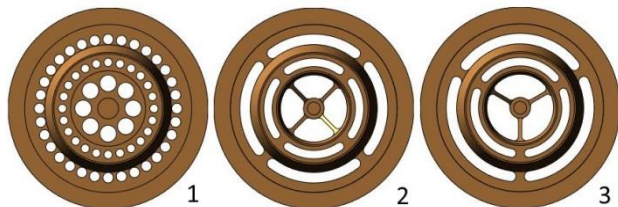


Рис. 2. Формы проточных частей сверхзвукового коллектора: 1 – 8 отверстий диаметром 4 мм, 2 – 4 секторных отверстия, 3 – 3 секторных отверстия со скошенными перегородками.

Исследования проведены для гелий-ксеноновой газовой смеси с массовой концентрацией гелия 5%. Число Прандтля – 0.23. Полное давление на входе в трубу 7.5 атм., полная температура 295 К. Методика моделирования описана в работе [2].

Результаты расчета числа Маха в сверхзвуковом сопле с учетом торможения потока в сверхзвуковом

диффузоре представлены на рис. 3. Здесь же приведено изменение площади поперечного сечения по длине кольцевого сопла, относительно площади поперечного сечения в критическом сечении (1). Простой одномерный расчет показывает постоянный рост

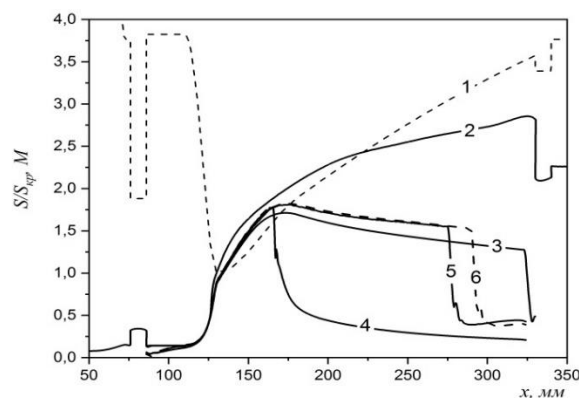


Рис. 3. Изменение числа Маха в ядре потока в кольцевом сверхзвуковом сопле с учетом влияния диффузора на выходе из трубы.

### Список литературы

- Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (review) // High Temperature. – 2014. – V. 52(2). – p. 297–307.
- Makarov M.S., Naumkin V.S., Vitovsky O.V., Lebeda K.S. Investigation of hydraulic resistance and heat transfer in the flow of He-Xe mixture with a small Prandtl number in a quasi-triangular pipe // ИЖТ. – 2022. – V. 199. – P.123427.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕТАЛИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ 3D-МОДЕЛИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПЕШЕХОДНОГО ВЕТРОВОГО КОМФОРТА

Мешкова В.Д.<sup>1,2</sup>, Филимонов С.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Ветров А.Л.<sup>3</sup>, Литвинцев К.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный 79, г. Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,

ул. Букирева 15, г. Пермь, 614068, Россия

В настоящее время особую популярность для изучения уровня пешеходного комфорта в условиях городской застройки получил метод моделирования турбулентности, базирующийся на осреднённых по времени уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) [1-2]. Однако возникает вопрос о достоверности полученных численных результатов. Как правило, применяемые для данного класса задач микромасштабные метеорологические модели верифицируются на макетах зданий в аэродинамических трубах [2]. Следующим этапом является переход от изучения макетов к моделям реальных объектов с учетом климатических характеристик окружающей среды. Также стоит отметить, что опыт расчётных исследований показывает, что геометрическое и архитектурное представление объекта исследования влияет на количественные характеристики аэродинамики потока, что в свою очередь влияет на определение условий ветрового пешеходного комфорта. В связи с этим, в данной работе представлены результаты комплексного исследования – верификация микромасштабной математической модели на данных полевых исследований; апробация предложенных численных алгоритмов на реальном квартале городской среды, в котором определен уровень второго комфорта в пешеходной зоне, а также результаты исследования как геометрическое подобие зданий, надземных переходов и городской инфраструктуры влияет на качество результатов численного моделирования.

В качестве репрезентативной территории рассматривался кампус Пермского государственного национального исследовательского университета. Для оценки ветрового режима кампуса и сбора необходимых данных для численного исследования были проведены натурные наблюдения на территории кампуса, где полученные значения скорости ветра в точках в дальнейшем использовались для валидации программного модуля «SigmaEco» (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема объекта исследования и расположение точек мониторинга

Для изучения влияния геометрического подобия на результаты численного моделирования было реализовано две расчетные модели кампуса: в первом варианте здания представлены в упрощённом виде, крыши рассматривались плоскими и наземные переходы не воспроизводились. Для данного варианта была построена неструктурированная расчетная сетка. Во втором варианте было реализовано наиболее полное геометрическое подобие зданий, воспроизводились формы крыш и надземные переходы, была построена неструктурированная полиэдральная расчетная сетка.

Полученные результаты позволили определить, что геометрическая детализация объекта исследования необходима для качественного прогнозирования условий аэрационного режима территории. Так как полученные количественные результаты при реализации второго варианта демонстрируют лучшее сопоставление с натурными данными. Так же стоит отметить, что наличие наземных переходов в застройке приводит к появлению областей с зонами локальных ускорений, которые нельзя игнорировать, так как скоростной режим в данных областях увеличивается в два раза.

Анализируя территорию кампуса с точки зрения функционального зонирования по уровням пешеходного ветрового комфорта было определено, что при рассматриваемых граничных параметрах, преобладают благоприятные ветровые условия, скорости ветра не превышают 5 м/с, что, согласно нормативу, NEN 8100 относятся к А и В классу комфортности среды.

Разработанную модель можно использовать для моделирования условий ветровой пешеходной комфортности.

### Список литературы

1. Quoc, Bang. 2012. Urban Air Pollution. In Air Pollution - Monitoring, Modelling and Health, InTech. <http://www.intechopen.com/books/air-pollution-monitoring-modelling-and-health/urban-air-pollution>.
2. Xiong, Jianwu, Jin Li, Fei Gao, and Yin Zhang. 2023. City Wind Impact on Air Pollution Control for Urban Planning with Different Time-Scale Considerations: A Case Study in Chengdu, China. Atmosphere 14(7): 1068. <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/7/1068>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-61-00098), <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>.

## ПРОПУЛЬСИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

**Нурiev А.Н., Анисимов В.Д., Зайцева О.Н.**

Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
ул. Кремлевская 18, Казань, 420008, Россия

Поступательно-вращательные колебания тел (или их частей, например крыльев, плавников) в жидкости широко используются для движения в живой природе птицами, крылатыми насекомыми и рыбами. Исследование аэрогидродинамики такого движения началось в 20-х годах прошлого века с задачи о машущем крыле. В классических работах машущее крыло обычно представляется в виде цилиндрического тела с острой кромкой (которая является естественной точкой отрыва потока), например, с поперечным сечением в виде профиля Жуковского, профиля НАСА или тонкой пластины. Движение таких тел наиболее изучено, в том числе широкое развитие получила математическая теория машущего крыла (см., например, [1-3]). В то же время ясно, что гидродинамические механизмы пропульсивного движения колеблющегося тела не связаны исключительно с наличием острой кромки, а носят более общий характер.

Данная работа посвящена исследованию гидродинамического механизма пропульсивного движения цилиндрического тела круглого сечения, совершающего одновременно вращательные и поступательные колебания в вязкой несжимаемой жидкости. Течение жидкости около тела описывается полной нестационарной системой уравнений Навье-Стокса, которая решается методом последовательных асимптотических разложений [4]. Исследуются крейсерские режимы движения, формирующиеся в условиях гармонических вращательных и мультигармонических поступательных колебаний.

Полученное в работе решение позволяет определить нестационарные гидродинамические силы, действующие на цилиндр и крейсерскую скорость движения как нелинейные функции безразмерной частоты, амплитуды вращательных колебаний и параметров мультигармонического закона поступательных колебаний.

Ключевые результаты исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Нелинейное взаимодействие временных гармоник вращательных и поступательных колебаний приводит к возникновению ненулевой средней скорости движения тела. Анализ структуры решения показывает, что присутствие нечетных гармоник в законе поступательных колебаний отвечает за возникновение средней скорости в направлении перпендикуляром оси поступательных колебаний, в свою очередь, присутствие четных гармоник приводит к появлению средней скорости в направлении параллельном оси колебаний.

2. Пропульсивное движение, индуцированное поступательными колебаниями по нечетным гармоникам является существенно более эффективным. При этом вклад в крейсерскую скорость от первой гармоники является определяющим. Вклад более высоких

гармоник во всей исследованной области не превышал 2%. Вследствие чего синхронное движение, когда поступательные колебания совпадают по частоте с вращательными и, можно считать практически оптимальным.

3. Результаты решения задачи минимизации энергозатрат в классе синхронных режимов движения показывают, что оптимальная (по относительным энергозатратам) крейсерская скорость рассматриваемого цилиндрического крыла практически не зависит от безразмерной частоты колебаний. Ее значение варьируется в диапазоне [0.85, 0.9].

4. Анализ применимости асимптотической модели, проведенный на основе прямого численного моделирования, показывает, что развитая теория справедлива в широком диапазоне параметров. Наиболее существенные ограничения накладываются для значений безразмерной амплитуды поступательных колебаний  $\gamma$  (обезразмеренной на радиус цилиндра) при фазовом сдвиге между вращательными и поступательными колебаниями  $\phi \approx \pi/2$ , где верхний предел применимости равен  $\gamma < 0.1$ .

### Список литературы

1. Келдыш М. В. К теории колеблющегося крыла // Техн. заметки ЦАГИ. 1935. Т. 45. С. 48–52.
2. Birnbaum W. Der Schlagflügelpropeller und die Kleinen Schwingungen elastisch befestigter Tragflügel // Z. Flugtech. Motorluftschiffahrt. 1924. V. 15. P. 128–134.
3. Rozhdestvensky K. and Ryzhov V., Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors // Prog. Aerosp. Sci. 2003. V. 39, P. 585–633.
4. Nuriev A.N. Asymptotic theory of a flapping wing of a circular cross-section // Journal of Fluid Mechanics. 2022. V. 941. A23.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10033).*

## СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОНВЕКЦИИ РЭЛЕЯ-БЕНАРА

Пермякова Э.В.<sup>1</sup>, Голдобин Д.С.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Академика Королева 1, Пермь 614013, Россия<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614990, Россия

В работе рассматривается проблема возбуждения тепловой конвекции в горизонтальном слое с изотермическими недеформируемыми свободными границами при случайной модуляции силы тяжести. Для системы получены уравнения стохастической динамики амплитуды малых возмущений поля температуры  $\theta$  и функции тока  $\Psi$ :

$$\frac{d}{dt}\psi = -D\psi - \frac{kRa_0}{D}\theta - \frac{k\sigma Ra_0}{D}\xi(t)\theta, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\theta = -\frac{sk}{Pr}\psi - \frac{D}{Pr}\theta, \quad (2)$$

где  $D = \pi^2 + k^2$ ,  $Pr$ - число Прандтля,  $k$  - волновое число течения,  $\sigma$ - амплитуда случайных вибраций: зависящее от времени число Рэлея  $Ra(t) = Ra_0(1 + \sigma\xi(t))$ ,  $Ra_0$ - порог конвективной неустойчивости системы в отсутствие случайных вибраций,  $s = +1$ - параметр, отвечающий за подогрев снизу,  $s = -1$ - за подогрев сверху.

Для системы стохастических уравнений (1)-(2) выводятся уравнения роста среднеквадратичных значений, которые используются в качестве критерия возбуждения конвективных движений в системе (см. рис.1):

$$\frac{d}{dt}\langle\Psi^2\rangle = -2D\langle\Psi^2\rangle - \frac{2kRa_0}{D}\langle\Psi\theta\rangle - \frac{2\sigma^2k^2Ra_0^2}{D^2}\langle\theta^2\rangle, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}\langle\Psi\theta\rangle = -\frac{sk}{Pr}\langle\Psi^2\rangle - \frac{Pr+1}{Pr}D\langle\Psi\theta\rangle - \frac{kRa_0}{D}\langle\theta^2\rangle, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\langle\theta^2\rangle = -\frac{2sk}{Pr}\langle\Psi\theta\rangle - \frac{2D}{Pr}\langle\theta^2\rangle, \quad (5)$$

где  $\psi = \Psi(t)\cos kxs\sin\pi z$  и  $\theta = \theta(t)\sin kxs\sin\pi z$ , осреднение  $\langle \dots \rangle$  производится по реализациям шума. Возбуждение течений описано как для случая подогрева снизу ( $s = +1$ ), так и для подогрева сверху ( $s = -1$ ).

Проверено, что найденные моды самого быстрого роста среднеквадратичных значений при всех значениях параметров лежат в области фазового пространства, имеющей физический смысл. В противоположность случаю высокочастотных периодических вибраций [1,2] белый гауссов шум всегда оказывает дестабилизирующее воздействие на состояние механического равновесия (см. рис.2) [3,4]. Случаи белого гауссова шума и гармонических высокочастотных вибраций также сопоставлены в общем виде.

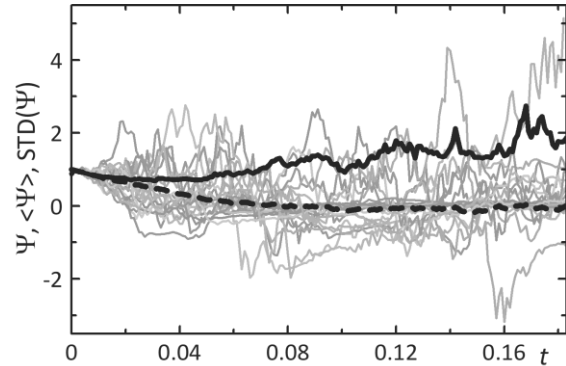


Рис.1. Динамика системы выше порога стохастического возбуждения: зависимость  $\Psi(t)$  (бледные кривые) для 20 реализаций шума, осреднение  $\langle\Psi(t)\rangle$  (штриховая кривая) и  $(\langle\Psi^2(t)\rangle)^{1/2}$  (жирная кривая) производится по 250 реализациям шума

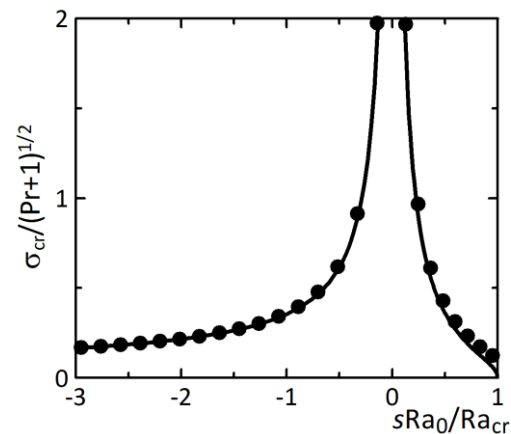


Рис.2. Границы линейной неустойчивости состояния механического равновесия системы, выше которых возбуждаются конвективные движения

## Список литературы

1. Зеньковская С. М., Симоненко И. Б. О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 5. С. 51–55.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Юрков Ю.С. О конвективной устойчивости при наличии периодически меняющегося параметра // Прикладная математика и механика. 1970. Т. 34, № 3. С. 470–483.
3. Пермякова Э. В., Голдобин Д. С. Стохастическое параметрическое возбуждение конвекции Рэлея-Бенара // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 34–44.
4. Permyakova E. V., Goldobin D. S. Stochastic parametric excitation of convective heat transfer // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A. 2023. Vol. 381. P. 20220084.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).



Булат П.В.<sup>1</sup>, Вокин Л.О.<sup>1</sup>, Волков К.Н.<sup>1</sup>, Ренев М.Е.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф. УСТИНОВА, Санкт-Петербург, 190005, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Малогабаритные газотурбинные двигатели (МГТД) могут быть использованы для малых транспортных средств, для малых электростанций (турбовальные варианты с электромашиной) [1]. Такие двигатели в разы легче поршневых двигателей (бензин, дизель), проще устроены и дешевле в производстве. Однако у них есть ряд проблем. Среди них низкая топливная эффективность. Фактически газотурбинные двигатели выбрасывают горячие выхлопные газы в атмосферу. На их нагрев было затрачено топливо. Решением этой проблемы является установка в турбовальный двигатель после турбины рекуператора: теплообменника для потоков газа после компрессора и после турбины. Таким образом воздух попадает в камеру сгорания более горячим и можно снизить расход топлива с получением той же температуры перед турбиной, что и без рекуператора. А выхлопные газы становятся холоднее.

Распространенные МГТД устроены так, что для эффективной работы требуется создавать высокую степень сжатия воздуха компрессором и большие потоки воздуха в камеру сгорания. Как правило жаровая труба, турбина делаются из жаропрочных нержавеющей сталей, однако которые не должны быть перегреты до значений порядка 1200 К и выше, иначе быстро прогорают. Сам рекуператор должен быть большим в связи с большими потоками воздуха и относительно малой разницы температур входящих потоков. Установка таких тяжелых рекуператоров на летательные аппараты может не иметь практического смысла.

Перспективные МГТД [2,3] планируют изготавливать из керамики, предельная температура которой значительно выше. Тогда можно снизить поток воздуха для ее охлаждения, уменьшить давление. Совместно с этим возрастет разница температур между двумя потоками газов в рекуператоре. Керамические рекуператоры могут потенциально быть легкими и одновременно эффективными.

В рамках данной работы численно исследуется одна секция теплообмена керамического рекуператора (совершенный газ, сопряженный теплообмен газ-тело-газ) с условиями симметрии (см. рис. 1) для разрабатываемых двигателей [2,3] (3 и 11 кВт турбовальные МГТД). Анализируется степень рекуперации, увеличение топливной эффективности и экономии. Поток через одну секцию варьируется (рекуператор от 100 до 1000 секций) так, чтобы суммарный поток совпадал со значениями [2,3]. Дополнительно произведен расчет рекуператора из стали для современного МГТД по типу JetCat P100-RX.

Для получения степени рекуперации хотя бы 11 % и, соответственно топливной эффективности + 7% в случае JetCat P100-RX требуется рекуператор весом

22 кг. Гораздо более лучшая ситуация с керамическими МГТД (см. рис. 2). Например, даже при весе всего 1 кг можно достигать экономии топлива 15 % от исходного расхода.

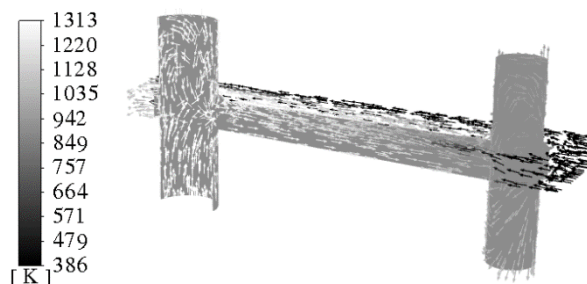


Рис. 1. Геометрия контура для горячего потока (серые стенки) и вектора движения горячего, холодного потоков с указанием локальной температуры цветом.

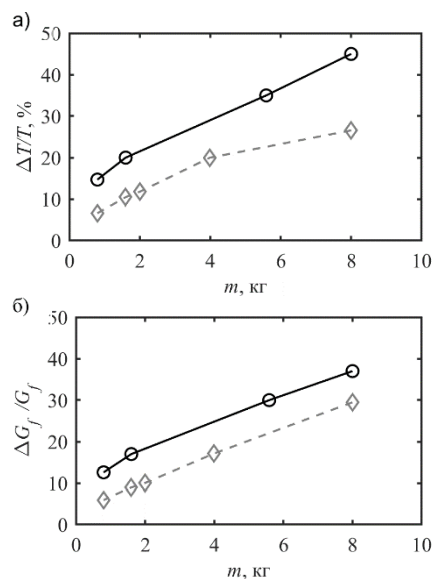


Рис. 2. Степень рекуперации (а) и топливная экономия (б) в зависимости от массы рекуператора для двигателей 3 кВт [2] (сплошная линия) и 11 кВт [3] (пунктир).

### Список литературы

1. Reale F., Sannino R. Numerical Modeling of Energy Systems Based on Micro Gas Turbine: A Review // Energies. 2022. Vol. 15, № 3. P. 900.
2. Vick M.J. High efficiency recuperated ceramic gas turbine engines for small unmanned air vehicle propulsion. London: Imperial College London, 2012. 185 p.
3. Tuttle S. et al. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Tests. Seoul, South Korea, 2016.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № FZWF-2024-0004.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ В БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ СВОБОДНОЙ ПЛОСКОЙ СТРУИ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ВДУВЕ НА КРОМКЕ СОПЛА

Сорокин М.И.<sup>1</sup>, Кушнарев Д.А.<sup>1,2</sup>, Токарев М.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

Свободные струи являются предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [1-3]. Такие исследования позволяют понять механику массопереноса струйных течений для их применения в химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях [4]. Такое применение зачастую сопровождается процессом горения компонент смеси на выходе струи, одним из важных факторов которого является перемешивание струи с окружающей средой, за которое отвечают мелкомасштабные вихревые структуры. Интенсифицировать процесс перемешивания можно путем принудительного разрушения крупномасштабных вихревых структур, для этого можно использовать методы пассивного и активного управления. В ближней области струи важную роль играют азимутальные неоднородности, так, дальнейшее развитие струи вниз по течению особенно чувствительно к начальным условиям, к которым относятся геометрия выходного сечения сопла [5] или внешние возмущения.

В представленной работе для исследования динамики крупных вихрей были объединены методы пассивного и активного управления. На выходе из сопла прямоугольного сечения, с размерами 40 мм × 20 мм, (показанного на рисунке 1) был реализован аксиальный и радиальный периодический вдув. Были проведены серии PIV экспериментов с высоким пространственным разрешением (45 пикселей/мм с размером изображения 16 Мп) для числа Рейнольдса  $Re = 5100$ . Вторичные струи несли в себе 5% и 15% от расхода основной струи. Реализованы режимы постоянного вдува и периодического вдува на частотах, соответствующих числам Струхала  $St = 0,3$ ,  $St = 0,5$  и  $St = 1$ .

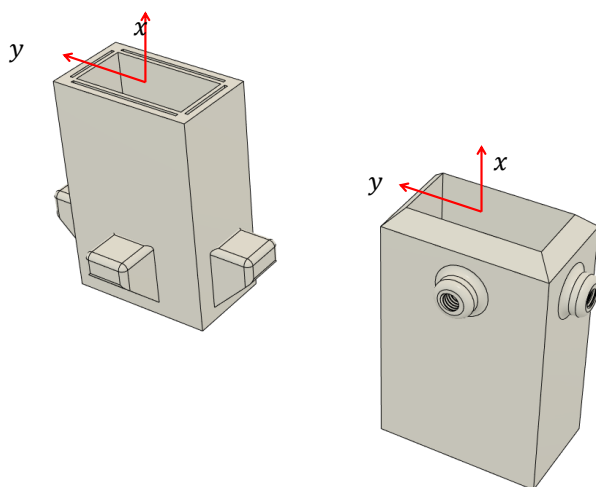


Рис. 1. Насадки на сопло с реализацией аксиального вдува (слева) и радиального вдува (справа).

В результате проведенных исследований были получены поля средней скорости, с осями, нормированными на гидравлический диаметр сопла, показанные на рисунке 2, и поля вторых моментов скорости для различных режимов периодического воздействия струями на кромке сопла. Показано, что использование представленных методов управления приводит к более быстрому распаду ядра струи, а уменьшение длительности подачи струи при одних и тех же частотах и расходе приводит к усилению данного эффекта.

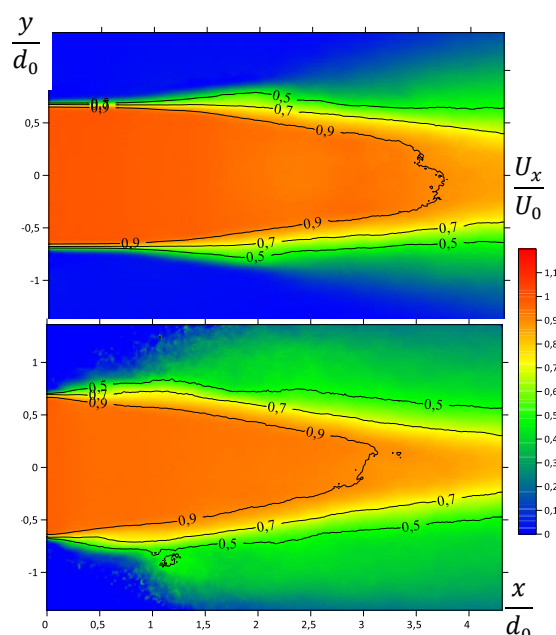


Рис. 2. Поля средней продольной компоненты скорости для струи без управления (сверху) и с периодическим вдувом на частоте  $St = 0,3$  (снизу).

### Список литературы

1. Quinn W. R. Turbulent mixing in a free jet issuing from a low aspect ratio contoured rectangular nozzle //The Aeronautical Journal. – 1995. – Т. 99. – №. 988. – С. 337-342.
2. Wu Z. et al. Jet mixing optimization using machine learning control //Experiments in Fluids. – 2018. – Т. 59. – С. 1-17.
3. Zhou Y. et al. Artificial intelligence control of a turbulent jet //Journal of Fluid Mechanics. – 2020. – Т. 897. – С. A27.
4. Knowles K., Saddington A. J. A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2006. – Т. 220. – №. 2. – С. 103-127.
5. Chen N., Yu H. Mechanism of axis switching in low aspect-ratio rectangular jets //Computers & Mathematics with applications. – 2014. – Т. 67. – №. 2. – С. 437-444.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 19-79-30075).  
<https://rscf.ru/project/23-79-33008/>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ЗАЗОРЕ МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЯЧЕЙКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ

Шестаков М.В., Токарев М.П.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В области ядерной энергетики широко используются теплообменные аппараты на основе пучка труб или стержней, например, парогенераторы и тепловыделяющие сборки. Тепловыделяющая сборка представляет собой пучок стержней - твэлов, расположенных в треугольной или прямоугольной компоновке при помощи дистанцирующих элементов. Свободное пространство между стержнями образует систему подканалов, соединенных зазорами между стержнями. Тепловыделяющие сборки (ТВС) с плотной упаковкой (см. рис. 1, справа) считаются перспективными для повышения степени конверсии и теплопередачи в малых модульных реакторах.

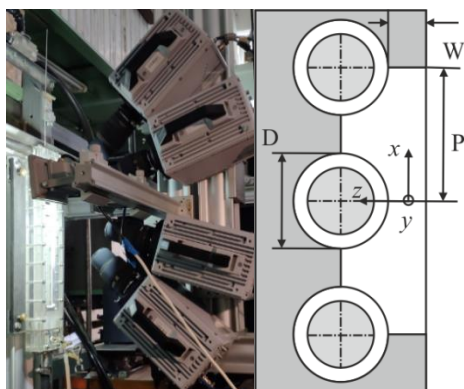


Рис. 1. Одна из конфигураций для PIV измерений (слева), схема поперечного сечения рабочего участка (справа).

При продольном обтекании пучка стержней основная часть теплоносителя протекает в подканалах, при этом зазоры обеспечивают межканальный обмен теплоносителя между подканалами. Исследования структуры потока зазорах выявили значительное влияние относительного шага пучка  $S=P/D$  на структуру потока, в частности на интенсивность турбулентности, напряжение сдвига и кинетическую энергию. Характерной особенностью течения в зазорах пучков стержней с плотной упаковкой являются крупномасштабные квазипериодические колебания скорости [1, 2].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования нестационарной гидродинамической структуры потока в зазоре, образованном цилиндром и плоской стенкой, который моделирует периферийную ячейку тепловыделяющей сборки для двух упаковок  $S=1,077$  и  $1,4$  ( $D=13$  и  $10$  мм, а  $W=2$  и  $4$  мм). Исследования выполнены в диапазоне числа  $Re$  от 6300 до 18900 (см. рис. 2, 3). Эксперименты проводились с использованием методов измерения скорости по изображениям частиц с высоким временным разрешением (PIV) сканированием в плоскости [3], а также трехмерные томографические PIV измерения в узких зазорах вблизи криволинейных стенок (см. рис. 1, слева). В исследуемом диапазоне параметров нормированные профили осредненной скорости,

пульсаций скорости и касательных напряжений Рейнольдса имеют слабую зависимость от числа  $Re$ . Получены новые данные о нестационарном характере течения в межканальном зазоре, в частности, о влиянии числа  $Re$  на модуляцию меандрирования течения в зазоре [3].

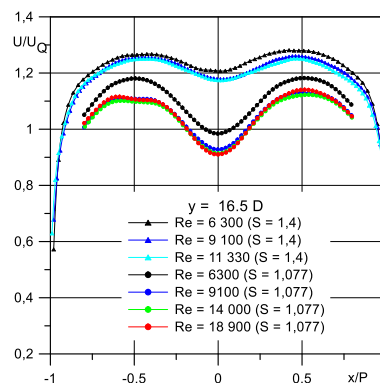


Рис. 2. Сравнение профилей средней продольной скорости в центральном сечении в позиции  $y/D=16,5$  для набора чисел Рейнольдса и двух вариантов упаковки  $S=1,4$  и  $1,077$ .

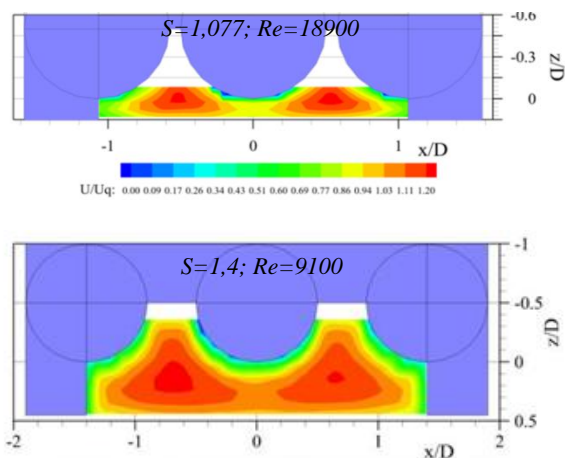


Рис. 3. Сравнение распределений средней продольной скорости в поперечном сечении  $y/D=16,5$  для двух упаковок.

### Список литературы

1. Meyer L. From discovery to recognition of periodic large scale vortices in rod bundles as source of natural mixing between subchannels — A review // Nucl. Eng. Design. 2010. V. 240, P. 1575–1588.
2. Möller S.V. On phenomena of turbulent flow through rod bundles // Exp. Thermal. Fluid Sci. 1991, V. 4, N 1, P. 25–35.
3. Шестаков М.В., Токарев М.П. Модуляция меандрирования течения в зазоре модели периферийной ячейки ТВС // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, №6. С. 1041-1053.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00587).

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В СМЕЖНЫХ ЯЧЕЙКАХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Тюлькина И.В.<sup>1</sup>, Голдобин Д.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Академика Королева 1, Пермь 614013, Россия

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614990, Россия

В данной работе строится фазовое описание колебательной термоконцентрационной конвекции с учетом эффекта Сорэ в смежных прямоугольных ячейках пористой среды, подогреваемых снизу при наличии поля тяжести. Горизонтальные границы ячеек полагаются непроницаемыми (в том числе для примеси), тепловой поток через них – фиксированным. Вертикальные границы имеют малую теплопроводность. Уравнения для тепловой конвекции записываются в приближении Дарси–Буссинеска [1] и учитывают эффект Сорэ:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla P_i - \frac{vm}{K} \vec{v}_i + g(\beta T_i - \beta_c C_i) \vec{e}_z, \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla C_i &= D \Delta C_i - \frac{\alpha_T C_0 D}{T_0} \Delta T_i, \\ \frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{1}{b} \vec{v}_i \nabla T_i &= \chi \Delta T_i + Q_i(\vec{r}, t), \\ \nabla \cdot \vec{v}_i &= 0, \\ z = 0, h: \quad \frac{\partial T_i}{\partial z} &= -A, \quad v_{iz} = 0, \quad j_{iz} = 0, \\ & \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$

где  $\vec{v}$  – средняя скорость жидкости в порах,  $\nu$  – кинетическая вязкость,  $m$  – пористость среды,  $K$  – коэффициент проницаемости,  $\chi$  – температурапроводность,  $\vec{e}_z$  – вектор ускорения свободного падения,  $b$  – отношение теплоемкости пористой среды, насыщенной жидкостью, к части этой теплоемкости, приходящейся на жидкость в порах,  $Q$  – распределенный источник тепла. Индекс  $i$  означает номер ячейки.

Для описания теплообмена между ячейками в рассматриваемой системе вводится слагаемое распределенного источника/стока тепла для каждой ячейки. Таким образом, в уравнениях для конвекции Сорэ в ячейках появляется связь через поле температуры.

Поскольку вопрос о коллективных эффектах актуален для колебательных режимов, далее мы ограничиваемся случаем колебательной неустойчивости, возникающей выше порогового значения числа Релея–Дарси  $Ra_0 = (12 + 12S)/(1 - N)$ .

В рамках фазового описания [2] получаем систему связанных уравнений для фазы колебаний вида:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \Omega_0 + |K|(\sin(\varphi_2 - \varphi_1 + \beta) - \sin\beta), \\ \dot{\varphi}_2 &= \Omega_0 + |K|(\sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \beta) - \sin\beta). \end{aligned}$$

где  $\Omega_0$  – частота колебательного течения при  $Ra = Ra_0 + \delta Ra$ ,  $\beta$  – фазовый сдвиг связи,  $K$  – сила связи.

Это система типа Курамото–Сакагучи [3] – классическая модель для изучения коллективных колебаний в нелинейной динамике.

В данной системе режим синхронных колебаний существует при  $|\sin\delta\varphi| < 1$  и расстройке частот  $|\Omega_{01} - \Omega_{02}| < 2|K||\cos\beta|$  и для устойчивого синхронного режима имеем

$$\cos\delta\varphi = \frac{\sqrt{4|K|^2 \cos^2\beta - (\Omega_{01} - \Omega_{02})^2}}{2|K|\cos\beta},$$

и индекс синхронизации

$$r = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{(\Omega_{01} - \Omega_{02})^2}{16|K|^2 \cos^2\beta}}}$$

который изменяется от 0 до 1, где 0 это асинхронность, а 1 полная синхронизация колебательных течений в смежных ячейках.

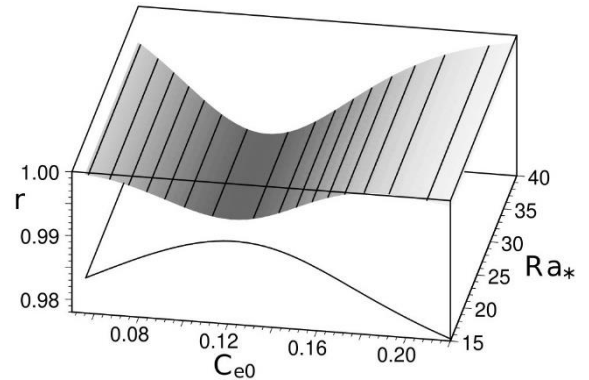


Рис.1. Зависимость индекса синхронизации от числа Рэлея–Дарси и массовой доли спирта.

На Рис.1 представлена зависимость индекса синхронизации от параметров системы. Здесь пористый скелет этой кварцевый песок, жидкость – раствор спирта в воде, общая стенка между ячейками – аэрогель.

### Список литературы

1. Convection in Porous Media / D. A. Nield, A. Bejan. Publisher: Springer Verlag, New-York. 1998. 546 p.
2. Winfree T. Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators // Journal of Theoretical Biology. 1967. Vol. 16. P. 15–42.
3. Sakaguchi H., Kuramoto Y. A Soluble Active Rotator Model Showing Phase Transitions via Mutual Entertainment // Progress of Theoretical Physics. 1986. V. 76. P. 576–81.

*Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).*

## ПОТЕРЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ И РОЖДЕНИЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ В НОВОМ КЛАССЕ КОНИЧЕСКИХ МГД ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ МАГНИТНОГО ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ, СООТВЕТСТВУЮЩЕГО РАБОЧИМ ТЕМПЕРАТУРАМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АТОМНЫХ РЕАКТОРАХ

**Яворский Н.И.**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Представлен новый класс точных решений уравнений магнитной гидродинамики, содержащий пять критериев подобия. Решения описывают трехмерные течения вязкой несжимаемой проводящей жидкости, принадлежащие классу конических течений Джеффри-Гамеля. Источником движения является линейный источник проводящей жидкости, который одновременно является источником магнитного поля, линейным проводником электрического тока и вихревой нитью. Таким образом, имеется четыре разных источника движения. В общем случае можно построить четыре критерия подобия в виде чисел Рейнольдса для каждого вида движения. Пятым критерием подобия является магнитное число Прандтля.

В случае отсутствия магнитного поля, электрического тока и вихревой нити решения задачи совпадает решением задачи Джеффри-Гамеля для линейного источника массы. В работе [1] было показано, что в такой постановке задача имеет бесконечное число решений, которые возникают в результате бифуркаций классического осесимметричного решения. При этом возникающие в результате бифуркаций решения отличаются наличием струй, симметрично расположенных в азимутальном направлении. Был обнаружен парадоксальный факт, связанный с тем, что даже при нулевом расходе линейного источника, вместо ожидаемого покоя, имеется бесконечное число нетривиальных решений.

В настоящей работе показано, что в случае МГД течения появляются дополнительные бифуркации упомянутого выше множества решений, которые соответствуют возникновению многоячейстых пространственных течений в направлении оси  $z$ , перпендикулярной плоскости течения Джеффри-Гамеля. Соответственно, от каждого решения задачи Джеффри-Гамеля ответвляется бесконечное множество решений, отличающихся количеством восходящих и нисходящих струй. Все эти решения сопровождаются генерацией осевой и радиальной компонент магнитного поля, порождающими электрический ток в объеме проводящей жидкости. Новые решения уже не являются осесимметричными, но обладают симметрией при повороте вокруг линейного источника на угол, равный  $\pi/n$ , где  $n$  – число возникающих струй пар струй. Каждая пара состоит из одной восходящей и одной нисходящей струи. Это множество струй в работе было получено для исходного течения типа Джеффри-Гамеля с одной радиальной струей. Однако, подобные множества восходящих и нисходящих струй появляются и для течений со многими радиальными струями. Для получения всех этих решений достаточно задать линейный источник магнитного поля, совмещенный с линейным источником массы.

Отличительной особенностью настоящей работы является изучение бифуркаций, приводящих к интенсивному пространственному течению, для широко применяемого в атомных реакторах теплоносителя – свинца. Магнитное число Прандтля для такого теплоносителя при рабочих температурах очень мало  $R_{tm}=1,8 \cdot 10^{-7}$ . Несмотря на это, в задаче при этом магнитном числе Прандтля появились дополнительные нетривиальные свойства точных решений магнитной гидродинамики. Первое – потеря существования решения. Оказалось, что одно решение из двух решений первой моды, которое появляется парами в результате бифуркации при наложении критической интенсивности источника магнитного поля, исчезает с увеличением расхода жидкости от линейного источника проводящей жидкости. При этом решение перестает существовать в связи с уменьшением интенсивности источника поля до нуля при некотором критическом расходе линейного источника массы. Этот факт свидетельствует о том, что при этом критическом расходе может возникнуть глобальная неустойчивость, которая может привести к дестабилизации работы атомного реактора. Знание таких свойств решений уравнений магнитной гидродинамики, возможно, будет важно для обеспечения безопасности работы атомных реакторов, в которых в качестве теплоносителя используется расплавленный свинец. Второе нетривиальное свойство решений МГД уравнений связано с появлением новых решений, которые также рождаются парами при дальнейшем увеличении интенсивности расхода (как будто из ничего). Следует отметить, что эти решения перестают существовать с уже существующими решениями, так что оставшееся решение первой моды приобретает свойства далекой второй моды с большим количеством восходящих и нисходящих струй.

В работе также обсуждаются дополнительные особенности новых решений, если на оси симметрии расположить линейный проводник электрического тока и вихревую нить. Указывается на возможность генерации завихренности при включении электрического тока в проводнике.

### Список литературы

1. Яворский Н.И. Течение Джеффри-Гамеля для точечного источника. Всероссийская конференция и школа для молодых ученых, посвященные 100-летию академика Л.В. Овсянникова «Математические проблемы механики сплошных сред», 13-17 мая 2019 г. Тезисы докладов. Новосибирск: Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН. 2019. С. 227-228.

*Работа поддержана бюджетным проектом  
(код проекта FWNS-2021-0009).*

## АКТИВНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУЙНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

Яковенко С.Н., Ванькова О.С., Демиденко Н.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,  
ул. Институтская 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

Затопленная круглая струя исследована численно при помощи OpenFOAM, ANSYS с вариацией типов и амплитуды источников возмущений, чисел Струхала ( $St = f D/U$ ) и Рейнольдса ( $Re = UD/\nu$ ), где  $D$  — диаметр сопла,  $U$  — среднерасходная скорость на входе,  $\nu$  — молекулярная вязкость. Определяющие уравнения решены в широких диапазонах  $St \leq 0,5$  и  $Re \leq 5000$ , с постоянной скоростью  $u(r < D/2) = U$  на входе  $x = 0$ . Детали реализации расчета приведены в [1, 2]. Применены следующие способы управления течением: осевые (частотой  $fa = 2f$ ), винтовые ( $fh = f$ ), раскачивающие ( $ff = f$ ) колебания входного профиля скорости с амплитудами  $A = Aa = Ah = Af$  [1, 3], поперечная вибрация входного сечения с частотой  $fv = f$ , амплитудой  $Z$  [1, 2], колебания на боковых границах (имитирующее один [2, 4] или несколько [5] источников звука). Также изучены их комбинации.

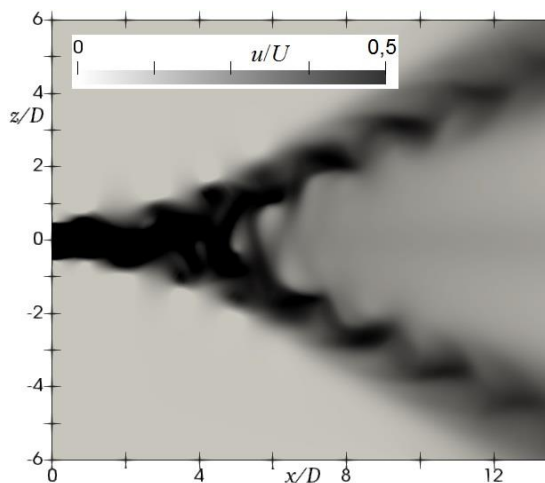


Рис. 1. Мгновенная скорость в плоскости бифуркации  $y = 0$  с комбинацией вибраций сопла и продольного возмущения при  $Re = 500$ ,  $St = 0,2$ ,  $Z/D = 0,04$ ,  $A/U = 0,17$ ,  $t = 196D/U$ .

Как и в измерениях [4-5], выявлено расщепление струи (рис. 1) для широких диапазонов  $St$ ,  $Re$  и амплитуд возбуждения ( $A/U \leq 0,25$ ,  $Z/D \leq 1$ ). Вибрация сопла оказывает такое же влияние, как и поперечное акустическое поле [1, 2], однако первое оказывается более эффективным методом управления, чем акустическое воздействие или винтовое и раскачивающие возмущение скорости на входе. Характерная толщина  $d$  струи, угол расширения  $\alpha$  в плоскости бифуркации, найденный по кривой  $d(x)$ , значения средней скорости  $\langle u \rangle$  или скаляра  $\langle c \rangle$  на оси могут параметризовать интенсификацию перемешивания, вызываемую возбуждением струи [1-5]. Эффективность смещения растет с увеличением  $d$  и  $\alpha$ , что соответствует большей области расширения и меньшим значениям  $\langle u \rangle$  и  $\langle c \rangle$  на осевой линии. Верификация и валидация кода показывают хорошую сходимость сетки (рис. 2) и согласие с данными опытов [5] (рис. 3).

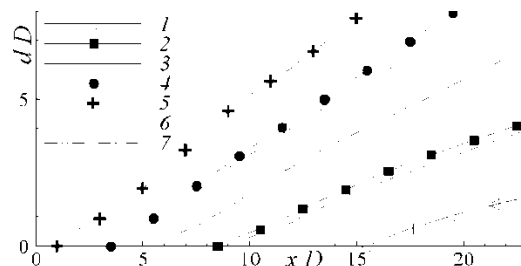


Рис. 2. Толщина  $d = z(\langle u \rangle = \langle u \rangle_{max})$ , где  $\langle u \rangle_{max}$  — максимум скорости при  $x = const$  при  $Re = 500$ ,  $St = 0,15$ : 1–5 — расчеты на мелкой сетке,  $Z/D = 0,0025, 0,010, 0,025, 0,1, 0,5$ ; 6, 7 — расчеты на грубой сетке,  $Z/D = 0,01, 0,1$ .

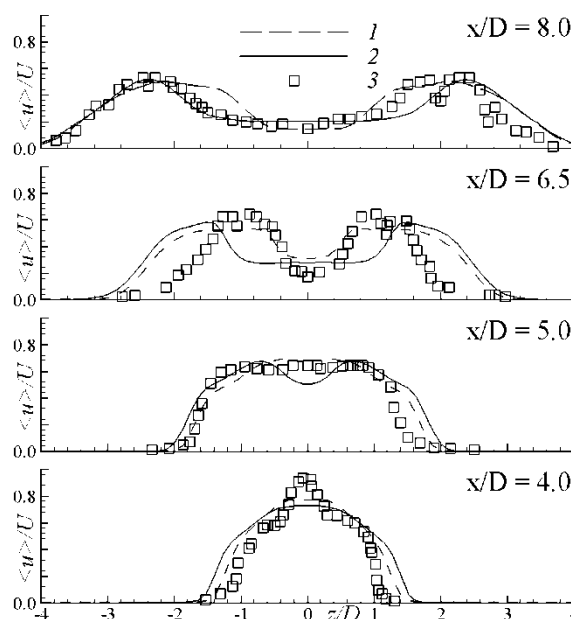


Рис. 3. Профили продольной средней скорости в различных сечениях струи: вычисления, продольное + поперечное колебания на входе при  $Re = 500$ ,  $St = 0,2$ ,  $A = 0$  (1),  $0,17U$  (2),  $Z = 0,04D$ ; измерения [5], продольное + азимутальное колебания,  $Re = 4300$ ,  $0,2 \leq St \leq 0,3$ ,  $A = 0,17U$ ,  $Z = 0,04D$  (3).

### Список литературы

1. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Numerical study of flow control methods and splitting effects in a round submerged jet // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. V. 28, Is. 3. P. 353–368.
2. Vankova O.S., Yakovenko S.N. Numerical simulations of a subsonic round jet with transverse acoustic and mechanical forcing // E3S Web Conf. 2023. Vol. 459. Paper 03002. P. 1–6.
3. Tyliczszak A., Geurts B.J. Parametric analysis of excited round jets — Numerical study // Flow, Turbul. Combust. 2014. V. 93. P. 221–247.
4. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микро-струи в поперечном акустическом поле // Вест. НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.
5. Reynolds W., Parekh D., Juvet P., Lee M. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. V. 35. P. 295–315.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-27-00310,  
<https://rscf.ru/project/23-27-00310/>.

Выполнено моделирование импактной струи, истекающей со скоростью  $U$  и температурой  $T = 293$  К из сопла диаметром  $D$  при различных числах Рейнольдса  $Re (= UD/\nu) \leq 40\,000$  и натекающей на пластину, нагретую до температуры  $T = 304$  К и расположенную на расстоянии  $H$  от входа.

В качестве пассивного метода управления потоком во входном сечении встроены решетки различной формы (рис. 1), что способствует [1-2] интенсификации смешения и тепломассопереносу по сравнению с невозмущенной струей (рис. 2).

Для моделирования круглой струи с решеткой на входе и без решетки, как и в [3], определяющие уравнения решены численно в области с прямоугольными ячейками при помощи открытого пакета OpenFOAM. На твердой стенке применены условия прилипания, на остальных границах – условия свободного втекания/вытекания (inletOutlet) для скорости и неотражающие условия (advective) для давления.

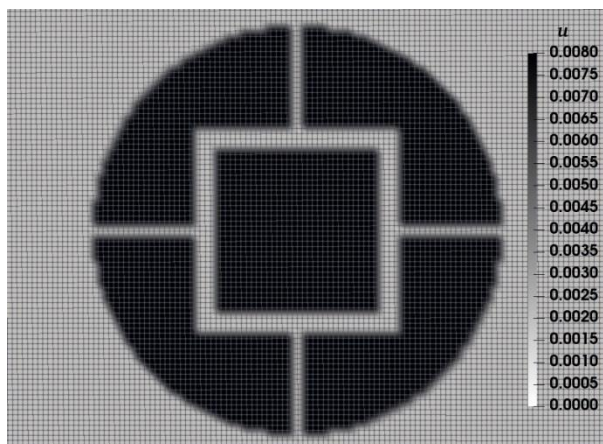


Рис. 1. Схема течения в окрестности круглого сопла на входной границе: изолинии скорости, квадратные ячейки равномерной сетки и элементы решетки на входе для конфигурации SG2 [2].

Результаты численного моделирования для полей температуры и скорости согласуются с имеющимися данными теории, измерений и вычислений. В частности, получен эффект увеличения числа Нуссельта (коэффициента теплообмена на нагреваемой пластине) с ростом числа Рейнольдса.

В качестве решетки рассматривается как наиболее простая конфигурации SG2 (рис. 1), так и конфигурации RG (регулярная решетка с мелкими ячейками), SFG (фрактальная решетка с мелкими и крупными ячейками) из [1, 2]. Также варьируются расстояния  $H/D$  от 1 до 7 от входа струи до нагретой стенки.

Проверены возможности вихреразрешающих методов DNS, LES и статистического RANS-подхода со стандартными и модифицированными моделями турбулентности, а также пределы их применимости. Предварительные оценки и численные эксперименты показывают неприменимость DNS-метода при числе

Рейнольдса  $Re > 5000$  для указанной задачи (из-за резкого роста требований к компьютерным ресурсам) и гораздо меньшую вычислительную эффективность LES по сравнению с RANS-подходом. Поэтому применение подходящих моделей турбулентного переноса импульса, тепла и вещества, как и в других случаях течения сложной геометрии с тепломассообменом [4] здесь представляется целесообразным.

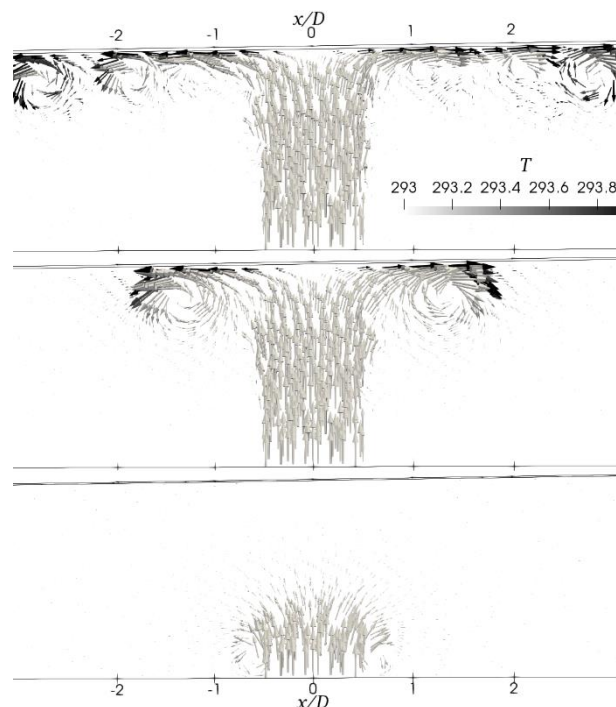


Рис. 2. Вихревая структура и теплоперенос в струе и у нагретой стенки в сечении  $y = 0$  для  $tU/D = 0,73; 5,82; 10,92$  (снизу вверх) без решетки на входе при  $Re = 23\,200$ : температура (цветом), вектор скорости (стрелками).

#### Список литературы

1. Cafiero G., Discetti S., Astarita T. Heat transfer enhancement of impinging jets with fractal-generated turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 173–183.
2. Cafiero G., Castrillo G., Greco C.S., Astarita T. Effect of the grid geometry on the convective heat transfer of impinging jets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 39–50.
3. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. С. 379-395.
4. Li H., Yakovenko S.N., Ivashchenko V., Lukyanov A., Mullyadzhanov R., Tokarev M. Data-driven turbulence modeling for fluid flow and heat transfer in peripheral subchannels of a rod bundle // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36. 025141. P. 1–19.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-27-00310,  
<https://rscf.ru/project/23-27-00310/>.





СЕКЦИЯ 2  
Гидродинамика и теплообмен  
в многофазных системах, включая  
нефтегазовые технологии





## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЗАПОЛНЕННУЮ ЖИДКОСТЬЮ ЗАКРЫТУЮ ОБЛАСТЬ С ТРУБЧАТОЙ РЕШЕТКОЙ

Алексеев М.В., Лежнин С.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

В своих предыдущих работах авторами было проведено численное моделирование истечения газа при высоком давлении в закрытую трубную область, в осесимметричной, двухмерной постановке [1] и в трехмерном случае [2]. Показано, что за счет более высокой инерционности свинца происходит формирование снаряда в отличие от образования струи газа в воде и в той и в другой постановке. Также в «двух- и трехмерных» расчетах значения амплитуд давления были близки. В трехмерном случае дополнительно наблюдалось уменьшение амплитуд продольных колебаний за счет перераспределения энергии в асимметричные колебания.

В прикладном плане постановка задачи в виде истечения газа в закрытую трубную область с жидкостью адекватна ряду технических, в частности, энергетических устройств, в которых также могут находиться патрубки, дистанцирующие решетки, втулки, стойки. Наличие элементов конструкции может существенно изменить процесс истечения газа в жидкость. В работе [3] проведено численное моделирование инжекции газа в жидкость (вода, свинец) в закрытую трубную область с наличием внутри неё преграды. В продолжении данной работы было решено исследовать динамику истечения с наличием трубной решетки.

Целью настоящей работы является детальное изучение нестационарного процесса инжекции газа (воздуха) в частично заполненную жидкостью (вода или свинец) закрытую область в двумерной постановке при наличии внутри «шахматной» решетки из трубок.

Для расчета использовался пакет OpenFOAM [4]. Канальный участок имел внутренний размер 0.2 м и высоту 0.5 м. Уровень жидкости устанавливался на высоте 0.4 м. Верхняя часть объема заполнялась воздухом. На верхнем торце ставилось граничное условие типа стенка. Начальное давление в рабочей области было 2 МПа. Внизу рабочего участка был патрубок диаметром 0.02 м, из которого подавался воздух с давлением 18 МПа. Начальная температура воздуха и жидкого свинца равнялась 650 К, а воды 585 К. Внутри объема устанавливалась трубная шахматная решетка с внешним диаметром трубы 0.02 м. Расстояние между слоями решетки и между трубами в слое равнялось внешнему диаметру трубы.

На рисунке 1 и 2 представлено распределение объемной доли жидкости и линии тока в разные моменты времени для воды и для жидкого свинца соответственно. Было замечено, что в случае с водой скорость истечения газа выше, чем для более тяжелой жидкости. Трубная решетка дробит газовый пузырь так, что течение при инжекции в воду и жидкий свинец становится схожим. Время первой пульсации верхнего газового объема составляет: для воды 5 мс, для свинца 15 мс.

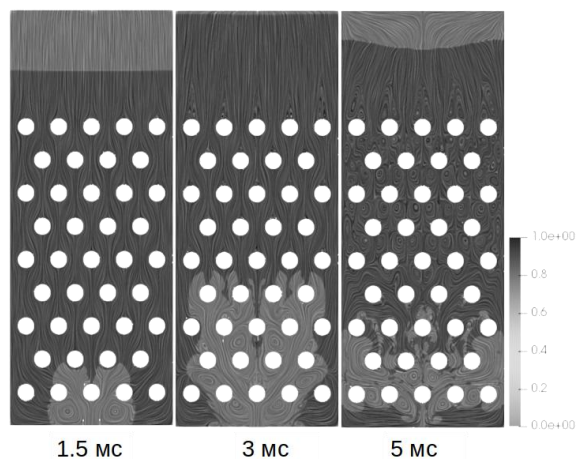


Рис. 1. Распределение объемного содержания воды и линии тока в моменты времени 1.5, 3, 5 мс.

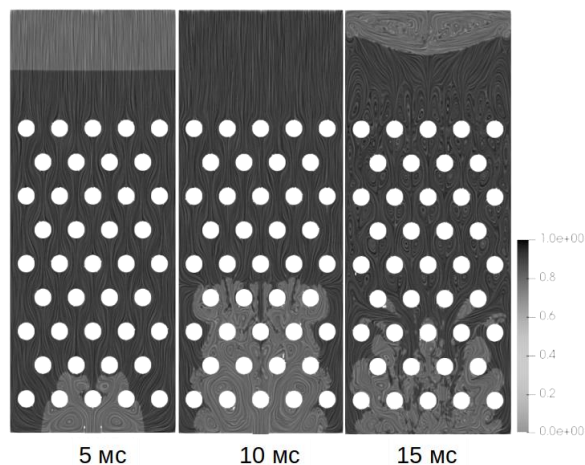


Рис. 2. Распределение объемного содержания жидкого свинца и линии тока в моменты времени 5, 10, 15 мс.

### Список литературы

1. Алексеев М. В., Вожаков И. С., Лежнин С. И. Пульсации давления при инжекции газа в заполненный жидкостью закрытый объем при больших перепадах давления // Теплофизика и аэромеханика. – 2019 – Т. 26 – №. 5 – С. 833-836.
2. Алексеев М. В., Вожаков И. С., Лежнин С. И. Нестационарные характеристики процесса истечения газа в жидкость // Многофазные системы. – 2019 – Т. 14 – №. 2 – С. 82-88.
3. Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И. Исследование пульсаций давления при истечении газа в закрытую трубную область с дисковой преградой, заполненную жидкостью // Тезисы докладов Всероссийской конференции «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», 14 – 16 сентября 2021, Новосибирск <https://openfoam.org>

Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4).

**ЭФФЕКТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ВСПЛЕСК ЖИДКОСТИ**

**Базилевский А.В., Рожков А.Н.**

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
пр. Вернадского 101, корп. 1, Москва, 119526, Россия

Передаче инфекций воздушно-капельным путём способствует фрагментация патогенных капель на более мелкие при их столкновении с твёрдым препятствием [1]. В экспериментах разрушение капель моделировалось столкновением капель с небольшим диском [2] или тонким цилиндром [3]. Эксперименты с диском (рис. 1) выявили сохранение сплошности капли воды при столкновении при ударных числах Вебера  $We < O(100)$ , в противном случае ( $We > O(100)$ ) формирующийся всплеск разрушается на более мелкие капли.

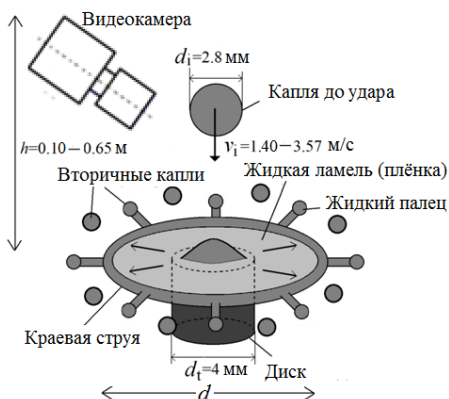


Рис. 1. Экспериментальная конфигурация. Всплеск жидкости формируется в результате удара падающей капли по диску.

Настоящая работа предпринята с целью установления особенностей влияния поверхностного натяжения на динамику и разрушение всплесков. Испытаниям подвергнуты капли этилового спирта. Рисунок 2 представляет кадры видеозаписи удара капли этилового спирта по диску для двух разных высот падения капль 0.1 и 0.18 м.

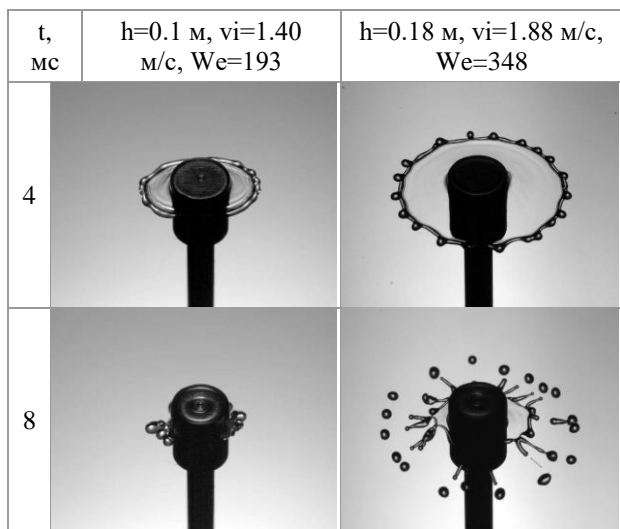


Рис. 2. Всплеск этилового спирта схлопывается без разрушения при  $v_i=1.4$  м/с, но разрушается при увеличении скорости удара до 1.88 м/с.

Рисунки 3 и 4 показывают траектории движения краевой струи и максимальные разлёты всплесков для воды и этилового спирта. Данные для воды заимствованы из исследований водных всплесков [2].

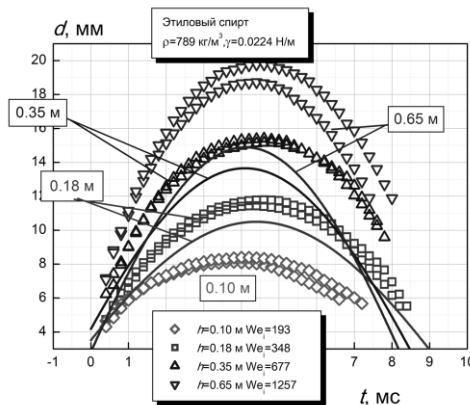


Рис. 3. Диаметры всплесков этилового спирта и воды как функции времени. Значками показаны данные для спирта, сплошными линиями – для воды.

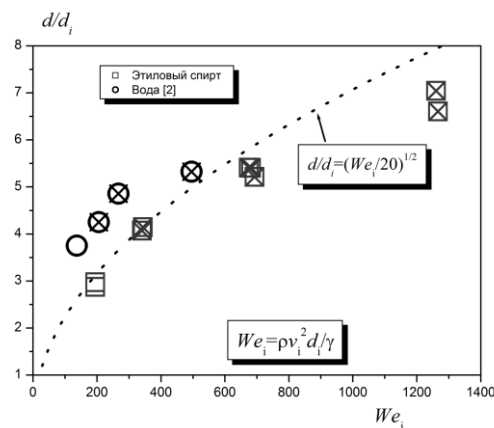


Рис. 4. Максимальные диаметры всплесков как функции числа Вебера. Крестики показывают разрушающиеся всплески.

Полученные данные свидетельствуют, что снижение поверхностного натяжения ведёт к росту диаметров всплесков. В тоже время, поверхностное натяжение слабо влияет на зависимость диаметра всплеска от числа Вебера и на критическое число Вебера, отвечающее за переход всплеска к разрушению.

**Список литературы**

1. Dbouk T., Drikakis D. On respiratory droplets and face masks // Phys. Fluids. 2020. V. 32. P. 063303.
2. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Feduyushkin A., Vignes-Adler M. Fragmentation of water drops in collision with a small obstacle // Atomization and Sprays. 2023. V. 33, N 10. P. 1–15.
3. Базилевский А.В., Рожков А.Н. Удар микроструи по микроволокну // Известия РАН. МЖГ. 2023. № 5. С. 110–118.

Работа поддержана РФФ (грант № 23-19-00451).

## МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ БИДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С., Романдин В.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

В природе и в различных технических системах многие процессы включают образование и эволюцию жидко-капельного аэрозольного облака при его гравитационном осаждении. Примерами таких процессов являются образование осадков из грозовых облаков, распространение токсичных веществ при отделении отработанных ступеней жидкостных ракет-носителей, аварийный сброс авиационного топлива и процессы, связанные с применением авиационных технологий тушения пожаров. Один из распространенных способов тушения сильных пожаров, особенно в труднодоступных местах, включает сброс хладагента (например, воды) в зону возгорания с летательного аппарата, такого как самолет или вертолет, с использованием специального оборудования [1]. Для повышения эффективности авиационных систем пожаротушения требуется изучить процессы формирования, осаждения и испарения жидко-капельного аэрозольного облака.

В настоящей работе рассматривается методика экспериментального исследования процесса осаждения и испарения бидисперсного кластера капель. Результаты экспериментального исследования осаждения и испарения бидисперсного кластера капель позволяют определить особенности его динамики и испарения, что углубляет понимание отдельных элементарных процессов, проверку точности моделей, применяемых для их описания, и, как следствие, повышение надежности физико-математических моделей и компьютерных программ для анализа многофазных течений с каплями различных размеров [2].

Для создания кластера бидисперсных капель был предложен способ формирования облака, состоящего из крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций, включающих капли одинакового заданного размера. Способ формирования бидисперсного кластера капель аналогичен методу создания монодисперсного облака капель, описанному в [3]. Отличие заключается в том, что подающая емкость состоит из двух герметично разделенных цилиндрических камер, расположенных одна над другой. При этом формирование капель происходит на концах капилляров разного диаметра, равномерно размещенных в нижней крышке подающей емкости. На рис. 1 представлены видеок cadры осаждения кластера бидисперсных капель (диаметр мелкой фракции 2.0 мм, крупной 3.2 мм) в разные моменты времени после отрыва от капилляров.

Для определения скорости испарения кластера капель в высокотемпературной среде использовалась установка в виде нагревателя, состоящего из трех состыкованных керамических труб с внутренним диаметром 250 мм, общая высота нагревателя составляет 1 м [3]. Проведены экспериментальные исследования закономерностей гравитационного осаждения группы бидисперсных капель дистиллированной воды с диаметрами (2.8÷3.6) мм в высокотемпературной среде

(296÷700) К. Капилляры в устройстве для подачи капель располагались в шахматном порядке на расстоянии 5 мм друг от друга. Количество капель в кластере составляло 40 капель (20 капель одного диаметра и 20 капель другого диаметра).

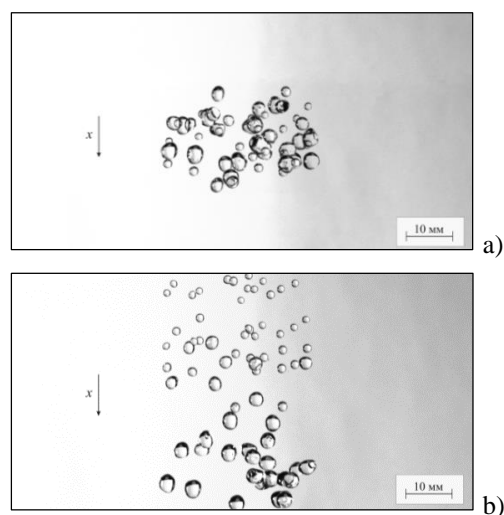


Рис. 1. Видеокadры осаждения бидисперсного кластера капель в разные моменты времени: а)  $t=200$  мс, б)  $t=400$  мс.

В процессе осаждения бидисперсного кластера (рис. 1а) происходит его разделение на два монодисперсных (рис. 1б). Концентрация капель в каждом из этих отдельных кластеров снижается до состояния «частично продуваемого облака», что приводит к снижению их скорости гравитационного осаждения и сближению этой скорости с таковой для одиночных капель, из которых состоят эти кластеры. Это, в свою очередь, влияет на скорость испарения бидисперсного кластера. В результате снижения скорости его осаждения время пребывания в высокотемпературной среде увеличивается, что приводит к ускорению испарения.

### Список литературы

1. Асовский В.П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Научный вестник МГТУ ГА: Аэрoмеханика и прочность. 2009. № 138. С. 142-149.
2. В.А. Архипов, С.А. Басалаев, О.В. Матвиенко, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, Генерация и эволюция жидко-капельного аэрозольного облака в поле силы тяжести (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2022).
3. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Динамика осаждения кластера монодисперсных капель // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50, № 5 С. 19–21.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.*

## ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА НА ТРАНСПОРТ ПРИМЕСИ В НАКЛОННОЙ ПОРИСТОЙ КОЛОННЕ

Беляева А.В., Марышев Б.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Ак. Королева 1, Пермь, 614013, Россия

Не смотря на несомненный интерес исследователей к транспорту примеси в пористой среде, большинство работ посвящено стационарному фильтрационному потоку и процессу смешивания на границе раздела. При этом естественные системы редко находятся в стационарном состоянии. Временные колебания фильтрационного потока приводят к изменениям поля скоростей, что может способствовать наиболее эффективному вытеснению примеси. При этом повышение эффективности выноса загрязняющих веществ из пористой среды является одной из ключевых задач, не только в природных, но и в промышленных приложениях.

В данной работе мы анализируем кривые выхода высококонцентрированной смеси конечного объема. Проведена оценка эффективности процесса фильтрации при наклоне пористого слоя и наличия переменного фильтрационного потока.

Эксперименты проводились в акриловом цилиндре длиной  $L = 500$  мм и внутренним диаметром  $d = 16$  мм. В качестве пористой среды использован кварцевый песок с размером фракций 0.8 – 1.2 мм. В качестве прокачиваемой смеси использованы водные растворы NaCl массовой концентрации  $C_0$  от 1 до 10 %. Первые эксперименты были проведены для горизонтального положения пористой колонны и переменного фильтрационного потока. Амплитуда пульсаций расхода  $A$  варьировалась в пределах от 10 до 50 % от стационарного значения, период колебаний расхода  $T$  выбирался соответственно параметрам эксперимента. Вторая серия экспериментов проведена для стационарного фильтрационного потока и различных углов наклона пористой колонны относительно горизонтали. Закачка примеси всегда осуществлялась сверху. Третий цикл экспериментов был проведен для угла наклона  $\alpha = 450$  при наличии пульсаций фильтрационного потока.

Экспериментальные данные представляют собой набор из пары временных зависимостей – массового расхода  $Q_0$  и мгновенной концентрации примеси в жидкости на выходе из пористой колонны. В качестве параметра эффективности использована безразмерная величина  $\tilde{T}$ , которая отражает скорость транспортировки примеси в пористой среде. В качестве управляющего параметра введен параметр  $F$ .

$$\tilde{T} = Pe \cdot \frac{T_c \cdot D}{k}; Pe = \frac{Q_0 \cdot L}{\rho_w \cdot S \cdot D}; F = \frac{T \cdot A \cdot D}{k \cdot Q_0},$$

где  $T_c$  соответствует пику кривой концентрации,  $D$  – коэффициент диффузии,  $k$  – проницаемость,  $\rho_w$  – плотность воды,  $S$  – площадь поперечного сечения колонны.

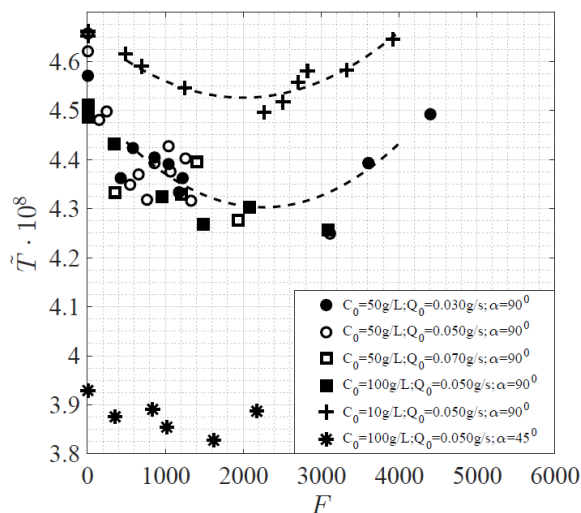


Рис. 1. Зависимость эффективности выноса примеси от параметра пульсаций расхода.

Показано, что для горизонтальной пористой колонны ( $\alpha = 900$ ) в определенном диапазоне параметров пульсаций расхода возможно увеличение эффективности выноса примеси на 10 % (см. рис.1). Однако этот показатель может быть увеличен путем изменения проницаемости среды. При этом пульсации ослабляют влияние возникающих в системе конвективных течений на процессы переноса примеси.

Наклон пористой колонны способствует интенсификации процесса фильтрации. Конвективные движения подавляются (до определенного угла наклона), транспорт примеси в среде происходит быстрее. Так для угла  $\alpha = 450$  эффективность процесса фильтрации выросла на 15 %. При этом наличие пульсаций расхода в наклонной пористой колонне имеет слабое влияние на процессы транспорта примеси в пористой среде.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 20-11-20125).*

## ЭФФЕКТИВНАЯ ДИФФУЗИЯ РАСТВОРЕННОГО В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ВЕЩЕСТВА В ДВУМЕРНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Бушуева А.В., Полежаев Д.А.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,  
ул. Сибирская 24, Пермь, 614990, Россия

Исследование посвящено экспериментальному изучению массопереноса растворенного в осциллирующей жидкости вещества в пористой среде, представляющей собой прямоугольную ячейку Хеле-Шоу, заполненную цилиндрами или шариками. Положение цилиндров в ячейке контролируется и выбирается таким образом, что ось цилиндров перпендикулярна направлению колебаний жидкости, а их высота толщине ячейки. Шарик занимает случайное положение внутри ячейки под действием силы тяжести. Диаметр шариков выбирается таким образом, что они образуют монослой внутри прямоугольной ячейки [1]. В качестве рабочей жидкости используется вода, в качестве растворенного вещества - родамин Б.

Когда жидкость покоится, перенос растворенного вещества происходит только благодаря молекулярной диффузии. При колебаниях жидкости в узких прямых каналах возникает дополнительный массоперенос благодаря дисперсии Тейлора [2]. Если канал имеет переменную толщину, то массоперенос в жидкости осуществляется в том числе благодаря осредненным течениям [3]. Эксперименты, проведенные в "пустой" прямоугольной ячейке и в такой же ячейке, заполненной случайным образом расположенными шариками, показывают, что при сравнимых частотах и амплитудах колебаний жидкости соответствующие коэффициенты эффективной диффузии  $D_{eff}$  отличаются в десятки и сотни раз [1].

Результаты экспериментов с шариками и цилиндрами хорошо согласуются на плоскости безразмерных параметров  $Pe$ ,  $R$  (рис. 1). Здесь  $Pe$  — число Пекле,  $R = \frac{D_{eff}}{D_p} - 1$  — безразмерный коэффициент диффузии, показывающий, во сколько раз темп диффузии, обусловленный колебаниями жидкости, превышает темп молекулярной диффузии в пористой среде ( $D_p$  — коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде).

Эксперименты с шариками проведены в пределе вязкого течения жидкости, когда безразмерная частота колебаний  $\omega$  имеет величину порядка единицы. Результаты этих экспериментов хорошо согласуются между собой и не зависят от  $\omega$ : в изученном диапазоне чисел Пекле параметр  $R \sim Pe^2$  (темные значки на рис. 1). Эксперименты с цилиндрами проведены в области умеренных безразмерных частот колебаний. Обнаружено, что  $R$  также пропорционален  $Pe^2$ . Интересно, что этот результат можно получить в предположении, что перенос растворенного вещества происходит благодаря осредненным течениям, возникающим внутри пор вследствие неоднородности амплитуды колебаний жидкости. Для подтверждения этой гипотезы следует изучить поля мгновенной и осредненной по времени скорости течения жидкости внутри пор.

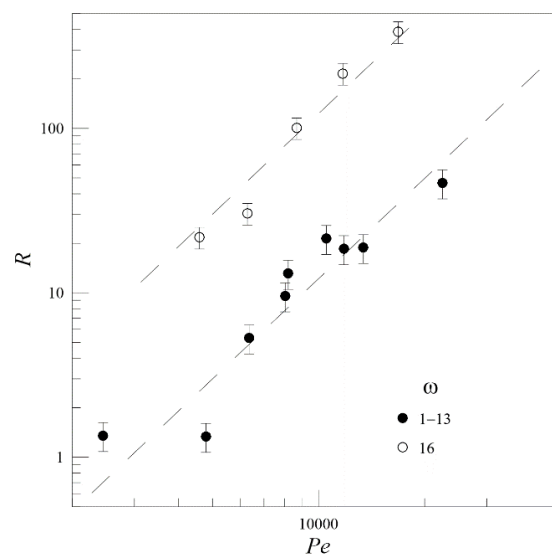


Рис. 1. Зависимость безразмерного коэффициента диффузии  $R$ , характеризующего влияние колебаний жидкости на массоперенос растворенного в воде родамин Б, от числа Пекле в экспериментах с ячейкой Хеле-Шоу, заполненной шариками (темные символы) или цилиндрами (светлые символы). Пунктирные линии соответствуют  $R \sim Pe^2$ .

Результаты, полученные в экспериментах с шариками и цилиндрами, не согласуются между собой, по видимому, по двум причинам: вследствие различной формы пор и потому что эксперименты проведены при отличающихся безразмерных частотах колебаний.

### Список литературы

1. A. Bushueva and D. Polezhaev. Mass transfer of solute in an oscillating flow in a two-dimensional channel. *Phys. Fluids*, 2024. 36(4). 045150.
2. E. J. Watson. Diffusion in oscillatory pipe flow. *J. Fluid Mech.*, 1983. 133. 233-244.
3. O. Vlasova, I. Karpunin, D. Latyshev, V. Kozlov. Steady flows of a fluid oscillating in an axisymmetric channel of variable cross-section, versus the dimensionless frequency. *Microgravity Sci. Tec.* (2020). 32. 363-368.

Работа выполнена при поддержке Российского  
Научного Фонда (проект 23-21-00311).

**СТАБИЛИЗАЦИЯ СУСПЕНЗИЙ НАНОЧАСТИЦ В РАСТВОРАХ С ВЫСОКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ****Ваганов Р.А.<sup>1</sup>, Жигарев В.А.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Пряжников М.И.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В процессе нефтедобычи попутно добывается пластовая вода, которая отличается от обычной встречающейся на поверхности и в верхних водоносных горизонтах слоев пресной воды. Она обладает высокой степенью минерализации и содержит большое количество химических элементов. Такая вода является загрязнителем окружающей среды, её необходимо утилизировать. Востребованными способами утилизации пластовых вод является их очистка и последующее повторное использование для технологических нужд, например, в системах поддержки пластового давления, приготовления буровых растворов и т.д. Одним из возможных вариантов повторного использования могло бы стать приготовление вытесняющих жидкостей с наночастицами (суспензий). Состав и свойства пластовых вод имеют большое значение для разработки залежей нефти и газа и их добычи, так как от них зависит течение многих процессов в дренируемом пласте. В зависимости от места залегания, пластовые воды характеризуются неоднородным химическим составом. Среди химических элементов, которыми насыщены такие воды, преобладают натрий, калий, кальций, магний, железо, алюминий, хлор, сера, азот, бром, йод, кислород, углерод, водород.

Суспензии наночастиц с наночастицами оксида кремния на дистиллированной воде имеют очень высокую коллоидную устойчивость. Силы электростатического отталкивания превышают силы притяжения, поскольку размер наночастиц очень маленький [1]. Для суспензий, приготовленных на основе пластовой воды, может наблюдаться выпадение осадка. Это связано с высокой минерализацией пластовой воды. В литературе упоминается, что в воде с высокой минерализацией частицы имеют высокий дзета-потенциал. Также стоит отметить, что с уменьшением размера частиц, удельная поверхность растёт, что в свою очередь приводит к увеличению реакционной способности системы. Большая удельная поверхность и высокий дзета-потенциал частиц приводят к тому, что они, отталкиваясь друг от друга, взаимодействуют с ионами раствора. Всё это приводит к выпадению осадка.

Пластовая вода характеризуется минерализацией, содержанием в ней растворённых солей (в г/л). Существует понятие критического значения минерализации, выше которого суспензии склоны к выпадению осадка. По разным литературным данным, например, для солей хлорида натрия это значение может составлять от 5 до 40 г/л. Однако, на месторождения можно встретить рассолы, минерализация которых составляет больше 50 г/л.

Проведено исследование устойчивости суспензий с наночастицами SiO<sub>2</sub> на основе растворов соли хлорид натрия. Минерализация растворов варьировалась от 100 до 300 г/л. Массовая концентрация наночастиц

составляла 0,5 %. Использовались наночастицы оксида кремния с удельной поверхностью 149 м<sup>2</sup>/г, определённая методом БЭТ. Характерный средний размер составлял 18 нм. Водно-солевая дисперсная система приготавливалась с применением ультразвуковой обработки (200 Вт, 22 кГц, 10 мин). Произведено фотографирование суспензий сразу после приготовления и спустя сутки. После приготовления проводился анализ седиментационной устойчивости суспензий при помощи анализатора Turbiscan (Formulation, Франция) в течение 24 часов. Данный прибор основан на измерении профилей светопропускания и обратного рассеяния (880 нм). На основе данных профилей восстановлена кинетика дестабилизации суспензий.

Общая минерализация пластовых вод на нефтяных месторождениях может достигать 300 г/л солей, что требует стабилизации наносуспензий. В работах [2-3] приведены результаты использования ЭДТА и глицерина для стабилизации золь наночастиц CdS и TiO<sub>2</sub>.

Проведено исследование устойчивости суспензий различными стабилизаторами. Для максимальной исследуемой концентрации хлорида натрия (300 г/л) стабилизаторы синтанол, крахмал и ЭДТА ускоряют процессы разделения суспензии на 2 фазы. Добавки виннокислый аммоний и цитрат натрия стабилизируют суспензию. Особенно явно выражается замедление скорости флокуляции и оседания частиц в первые 5 часов жизни суспензии. Виннокислый аммоний в умеренно-солевой суспензии (минерализация 200 г/л) в 2,5 раза снижает скорость оседания наночастиц. Устойчивость суспензии сопоставима с суспензией SiO<sub>2</sub> без стабилизатора. Цитрат натрия проявляет стабилизирующие свойства в моносоловом растворе с высокой минерализацией (300 г/л NaCl). Таким образом, было показано, что подбором добавок можно стабилизировать наносуспензии в солевых растворах даже очень высокой минерализации.

**Список литературы**

1. Agista M. N., Guo K., Yu. Z. A State-of-the-Art Review of Nanoparticles Application in Petroleum with a Focus on Enhanced Oil Recovery // Appl. Sci. 2018. V.8. N. 871. P.1–29.
2. Кожевникова Н.С., Ворох А.С., Ремпель А.А. Использование этилендиаминтетрауксусной кислоты для получения стабильного коллоидного раствора сульфида кадмия CdS // ЖОХ. 2010. Т. 80, Вып. 2. – С. 250.
3. Бобыренко Ю.Я. Стабилизация дисперсий оксида титана комплексными соединениями многоатомных спиртов и титана (IV) // Коллоидный журнал. 1990. Т. 52, № 3. С. 563–565.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).*



## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ ПРИ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЖИДКОСТИ

Гореликова А.Е.<sup>1</sup>, Волков С.М.<sup>1,2</sup>, Воробьев М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Пузырьковые турбулентные потоки широко распространены в теплоэнергетике, в химической и микробиологической промышленности и других областях. Корректное описание поведения потоков, в том числе распределения газовой фазы по сечению канала, диаметров и скоростей пузырей имеет большое значение для увеличения надежности оборудования и предотвращения внештатных ситуаций.

Динамика пузыря может иметь нелинейный и сложный характер [1]. На движение пузырьков может оказывать влияние не только геометрия канала, но и способ ввода газа в жидкость [2], расход газа [3], характеристики жидкости [4]. Малые добавки поверхностно-активных веществ также могут оказывать существенное влияние на поверхностное натяжение и, как следствие, на размер и характер движения газовых пузырей [5].

Целью настоящей работы было изучение влияние угла наклона трубы с неподвижной жидкостью на динамику пузырьков газа, инжестрированных одиночным капилляром при малых концентрациях поверхностно активных веществ в жидкости.

В работе использовалась установка, подробно описанная в работе [6]; характеристики газовых пузырей были получены с помощью метода теневой фотосъемки. В качестве рабочей жидкости использовался раствор спирта с массовой долей 1%, расход газа составлял  $Q_g = 8$  мл/мин, угол наклона трубы –  $\theta = 30^\circ$ – $60^\circ$ . Расстояние от места ввода газа до места получения кадров с пузырями варьировалось в диапазоне  $L = 100$ – $600$  мм.

На рисунке 1 представлены характерные кадры групп пузырей при разных углах наклона канала на расстоянии  $L = 200$  мм от места ввода газа в жидкость, при расходе  $Q_g = 8$  мл/мин.

Переход к использованию рабочей жидкости с добавлением малой доли ПАВ приводит к подавлению коалесценции пузырей. Из-за этого происходит уменьшение среднего размера газовых пузырей и увеличение их числа. При малых углах наклона трубы расстояние между отдельными пузырями достаточно велико. При движении, пузыри осциллируют перпендикулярно направлению движения вдоль стенки наклонной трубы, т.к. для малых углов наклона трение недостаточно велико, чтобы значительно уменьшить поперечную компоненту скорости. При увеличении угла наклона происходит уменьшение отрывного диаметра пузырей, уменьшение скорости движения газовых пузырей и уменьшение поперечных осцилляций из-за увеличения силы трения о верхнюю стенку наклонной трубы. При таких условиях происходит активное формирование кластеров пузырей.

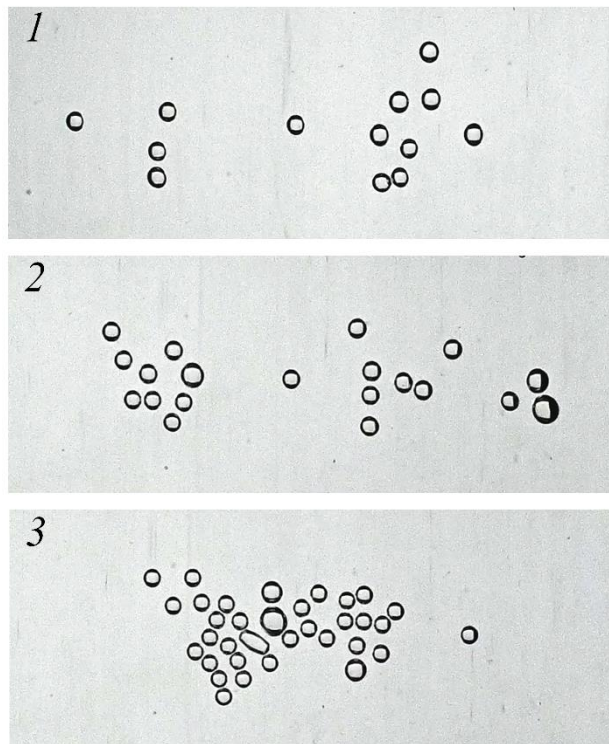


Рис. 1. Газовые пузыри от одиночного капилляра в наклонной трубе, расход газа  $Q_g = 8$  мл/мин, концентрация ПАВ 1%, расстояние до капилляра  $L = 200$  мм, угол наклона: 1 –  $\theta = 30^\circ$ , 2 –  $\theta = 45^\circ$ , 3 –  $\theta = 60^\circ$ .

### Список литературы

1. Feng Z.C., Leal L.G. Nonlinear bubble dynamics // *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 1997. Vol. 29. P. 201–244.
2. Li M., Hu L. Experimental investigation of the behaviors of highly deformed bubbles produced by coaxial coalescence // *Exp Therm Fluid Sci.* Elsevier Inc., 2020. Vol. 117.
3. М. А. Воробьев О. Н. Кашинский П.Д.Лобанов, А.В.Чинак. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // *Механика жидкости и газа.* 2012. Vol. 4. P. 75–81.
4. Jamialahmadi M. et al. Study of bubble formation under constant flow conditions // *Chemical Engineering Research and Design.* 2001. Vol. 79, № 5. P. 523–532.
5. Xia G.D., Chai L. Influence of surfactant on two-phase flow regime and pressure drop in upward inclined pipes // *Journal of Hydrodynamics.* 2012. Vol. 24, № 1. P. 39–49.
6. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Чинак А.В. Формирование кластеров-цепочек при движении пузырей от одиночного капилляра в наклонной трубе. *Прикладная механика и техническая физика*, 2023. [10.15372/PMTF202315357](https://doi.org/10.15372/PMTF202315357).

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда (№24-21-20023,  
<https://www.rscf.ru/project/24-21-20023/>)  
и финансовой поддержки Правительства  
Новосибирской области  
(соглашение № p-90 от 22.03.2024).*

## ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА КАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПУТНОГО ОПУСКНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ РАСХОДАХ ФАЗ

Курдюмов А.С., Воробьев М.А., Кашинский О.Н.  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В настоящее время разностороннее применение газожидкостных течений опережает процесс их детального исследования. Для эффективного моделирования пузырьковых течений необходимы эмпирические данные о локальной структуре газожидкостных потоков. Структура двухфазных пузырьковых течений существенно зависит от ориентации канала и направления течения [1–3]. На сегодняшний день восходящие пузырьковые потоки хорошо изучены. Принципиальное отличие локальной структуры опускных пузырьковых течений от структуры восходящих впервые было показано в работах группы В.И. Субботина. В последние десятилетия в литературе появилось множество работ по спутным опускным пузырьковым течениям [4–7]. В настоящее время режимы с малыми расходами фаз по-прежнему остаются малоизученными. При этом, в случае малых расходов фаз могут наблюдаться весьма интересные режимы течения. Так, если групповая скорость всплытия пузырьков близка к средней скорости движения жидкости, реализуется так называемый режим зависания газовой фазы, когда пузырьки практически не перемещаются относительно внешнего наблюдателя. При таком режиме течения величина истинного газосодержания может варьироваться в широком диапазоне значений при практически нулевом расходе газосодержаний. В работе [8] представлено исследование опускного пузырькового потока таком режиме. Но из-за особенностей подачи газа в работе пузыри в потоке представлены в широком диапазоне размеров, при этом их распределение по размерам существенно меняется вверх по течению в связи с активной коалесценцией, что приводит к значительному изменению параметров потока вниз по течению.

В представленной работе проведено экспериментальное исследование таких характеристик спутного опускного пузырькового течения как касательное напряжение на стенке и истинное газосодержание. Измерение напряжения трения было проведено электродиффузионным методом. Истинное газосодержание было рассчитано исходя из баланса сил и экспериментальных данных о перепаде давления на столбе газожидкостной смеси и о касательном напряжении на стенке канала (Рис. 1). Измерения проводились при малых расходах жидкости и газа вблизи режима зависания газовой фазы. Исследования показали, что в случае приближения непосредственно к режиму зависания газовой фазы происходит интенсификация процесса коалесценции пузырьков, что приводит к лавинообразному переходу течения от пузырькового режима к снарядному. Измерения проводились в вертикальных трубах внутренним диаметром 14 и 42 мм, чтобы показать влияние диаметра трубы как на измеряемые характеристики течения, так и на интенсивность коалесценции пузырьков в потоке.

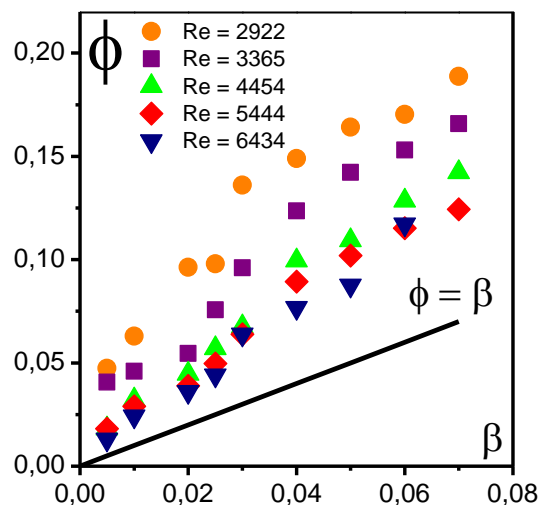


Рис. 1. Истинное газосодержание; Диаметр канала 14 мм.

### Список литературы

1. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas–liquid flow in a vertical pipe // Int. J. Multiph. Flow. - 1999. - V. 25. - № 1. - P. 109–138.
2. Chinak A.V., Gorelikova A.E., Kashinsky O.N., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // Int. J. Heat Mass Transf. - Elsevier Ltd, 2018. - V. 118. - P. 785–801.
3. Bhagwat S.M., Ghajar A.J. Experimental investigation of non-boiling gas–liquid two phase flow in downward inclined pipes // Exp. Therm. Fluid Sci. - 2017. - V. 89. - P. 219–237.
4. Shi S., Wang Y., Qi Z., Yan W., Zhou F. Experimental investigation and new void-fraction calculation method for gas–liquid two-phase flows in vertical downward pipe // Exp. Therm. Fluid Sci. - Elsevier Inc., 2021. - V. 121. - № September 2020. - P. 110252.
5. Schmid D., Verlaat B., Petagna P., Revellin R., Schiffmann J. Flow pattern observations and flow pattern map for adiabatic two-phase flow of carbon dioxide in vertical upward and downward direction // Exp. Therm. Fluid Sci. - Elsevier Inc., 2022. - V. 131. - № September 2021. - P. 110526.
6. Chu X., Liu Y., Wang W., Yang G., Weigand B., Nemati H. Turbulence, pseudo-turbulence, and local flow topology in dispersed bubbly flow // Phys. Fluids. - AIP Publishing, LLC, 2020. - V. 32. - № 8.
7. Chalgeri V.S., Jeong J.H. Flow regime transition criteria for vertical downward two-phase flow in rectangular channel // Nucl. Eng. Technol. - Korean Nuclear Society, 2022. - V. 54. - № 2. - P. 546–553.
8. Ганчев Б.Г., Пересадыко В.Г. Процессы гидродинамики и теплообмена в опускных пузырьковых потоках // ИФЖ. - 1985. - Т. 49. - № 2. - С. 181–189.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСИЛЕНИЯ РАСТВОРЕНИЯ МЕТАНА И КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» В ПРИСУТСТВИИ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНОЛА**Гец К.В.<sup>1,2</sup>, Жданов Р.К.<sup>1,2</sup>, Божко Ю.Ю.<sup>1,2</sup>, Белослудов В.Р.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

Одной из основных проблем широкого применения газовых гидратов для хранения и транспортировки различных газов (например, водорода, углекислого и природного газа) является высокое индукционное время и медленная кинетика гидратообразования. Для решения этой проблем было предложено множество механических, «химических» и др. типов промоторов гидратообразования [1], влияющих на термодинамические и кинетические аспекты этого процесса.

Среди т. н. «химических» промоторов наиболее распространёнными являются тетрагидрофуран, циклопентан, четвертичные соли и лаурилсульфат натрия. При этом метанол почти всегда рассматривается как ингибитор. Однако в недавних работах было показано, что метанол и другие низкомолекулярные спирты в малых концентрациях способны выступать в качестве кинетических промоторов и могут рассматриваться в качестве поверхностно-активных веществ [2,3] в двухфазных системах. В других системах эффект так же наблюдается, однако его степень различна для различных типов систем [4,5]. При этом механизм влияния метанола про процесс гидратообразования остаётся малоизученным.

В данной работе проводится исследование влияния молекул метанола на процессы растворения метана, перестроения сетки водородных связей на различных этапах растворения газа и образования газовых гидратов метана при помощи метода молекулярной динамики. Для этого была сконструирована серия двухфазных моделей, состоящих из газовой и жидкой фаз. Газовая фаза содержала 942 молекулы метана. Жидкая фаза содержала 3600 молекул воды, а также 0, 1 и 5 масс.% метанола. В случае 1 масс.% метанол изначально был распределён равномерно в жидкой фазе. Для моделей, содержащих 5 масс.% метанола, рассматривалось равномерное распределение и такое распределение, где лишь небольшая часть метанола была растворена, а остальной метанол находился на границе раздела фаз. Для наибольшей термодинамической точности моделирования, для описания молекул воды была выбрана модель TIP4P/Ice, а для описания молекулы метана и метанола — полноатомная модель OPLS-AA.

В ходе моделирования строилась зависимость числа растворённых молекул метана от времени для различных систем. Наряду с этим, в зависимости от времени и концентрации метанола определялись число и геометрия водородных связей, степень соответствия ближнего порядка молекул воды идеальному тетраэдрическому упорядочению, а также соответствие торсионных углов между молекулами воды значениям, свойственным гидратам, воде или льду. Ха-

рактеристики упорядочения водной структуры измерялись как для всей системы, так и для отдельных молекул в зависимости от близости молекул метанола и метана. Также проводился анализ геометрии образуемых вокруг молекул метана водных структур на соответствие гидратным или гидратоподобным структурам, свойственным ранним этапам гидратообразования.

Показано, что содержание 1 масс.% не оказывает значительного влияния на процесс растворения метана в широкой области температур. Содержание 5 масс.% метанола приводит к более быстрому растворению метана в воде и перестроению водной структуры раствора, которое свойственно ранним этапам гидратообразования, при более низких температурах и высоком давлении. Способ растворения метанола не оказал значительного влияния — в системах обоих типов около 80% метанола оказалось на границе раздела фаз, а остальные 20% — в объёме.

Также показано, что метанол разупорядочивает структуру сетки водородных связей находящихся вблизи него молекул воды. Растворённые молекулы метана оказывают обратный эффект.

Разрушение сетки водородных связей в поверхностном слое воды молекулами метанола способно снижать энергетический барьер для проникновения метана в воду, а небольшая концентрация растворённых молекул метанола немного увеличивает диффузию метана в воде. Это ускоряет транспорт молекул газа сначала на поверхностный слой, а затем в толщу воды, что позволяет быстрее создавать высокое локальное пересыщение, необходимое для образования зародышей гидрата.

**Список литературы**

1. Xia Z., Zhao Q., Chen Z., Li X., Zhang Y., Xu C., Yan K. Review of methods and applications for promoting gas hydrate formation process // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2022. V. 101. P. 104528.
2. Kvamme B. Small Alcohols as surfactants and hydrate promoters // *Fluids*. 2021. V. 6. N. 10. P. 345.
3. Pandey J.S., Khan S., von Solms N. Screening of low-dosage methanol as a hydrate promoter // *Energies*. 2022. V. 15. N. 18. P. 6814.
4. Devlin J.P. Catalytic activity of methanol in all-vapor subsecond clathrate-hydrate formation // *J. Chem. Phys.* 2014. V. 140. N. 16. P. 164505.
5. Choudhary N, Kushwaha O.S., Bhattacharjee G., Chakrabarty S., Kumar, R. Molecular dynamics simulation and experimental study on the growth of methane hydrate in presence of methanol and sodium chloride // *Energy Procedia*. 2017. V. 105. P. 5026-5033.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда № 22-19-00428,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00428/>.*

Груздь С.А., Салтыков И.Р.

Удмуртский государственный университет,  
ул. Университетская 1, Ижевск, 426034, Россия

Применение технологии высокотемпературной пайки достаточно широко распространено, поскольку обладает такими преимуществами как высокая прочность соединения и устойчивость к высоким температурам. Осуществляется такое соединение благодаря межмолекулярному взаимодействию, которое позволяет рассматривать такую технологию и для пайки при разных уровнях гравитации. В работах [1-3] в рамках космического эксперимента "Реал" рассматривалось смачивание алюминиевых поверхностей различных форм. Однако далеко не на все вопросы у авторов получилось ответить.

Для обеспечения прочного паянного соединения необходимо убрать окисидный слой с поверхности изделия, чтобы компоненты припоя имели возможность проникнуть в матричный материал для улучшения адгезии. В связи с чем встает вопрос о том, что в ранее разработанных математических моделях смачивания алюминиевых поверхностей необходимо учесть диффузию, которая будет влиять на контактный угол смачивания.

В представленной работе рассматривается влияние диффузии компонентов припоя на смачивание поверхностей. Предложена математическая модель движения двухфазной системы "воздух-припой" на поверхности твердой подложки из алюминиевого сплава АМг6. В начальный момент времени твердый припой на основе цинка находится в центральной части на поверхности пластины АМг6, в других местах поверхность алюминиевой пластины граничит с воздухом. Под действием постоянного теплового потока на верхней границе области система нагревается до температуры на 50К выше температуры плавления припоя, выдерживается и далее охлаждается.

Математическая модель включает в себя: уравнение неразрывности, уравнение баланса импульса для двух компонент скорости, уравнение баланса энергии, уравнение конвективной диффузии для цинка и алюминия, а также уравнение Кана-Хиллиарда для фазовой переменной [4]. Система считается не сжимаемой. Все термодинамические свойства материалов, а также коэффициент диффузии компонентов являются функциями температуры, а теплота фазового перехода припоя учтена в эффективной теплоемкости. Граничные условия на смачиваемой поверхности пластины описываются уравнением Юнга на равновесный контактный угол смачивания, который в свою очередь вводится как функция концентрации цинка, проникнувшего в матричный материал.

Температура плавления алюминиевой пластины выше температуры плавления припоя. По этой причине нагрев производится до таких температур, какие не вызовут плавления матричного материала, но при этом расплавят припой. После плавления припоя, активный цинк начинает диффундировать в пластину, вызывая изменение химического состава поверхност-

ного ее слоя. Температура плавления такого слоя понижается и происходит изменение равновесного контактного угла смачивания. Если систему выдерживать при высоких температурах долго, то диффузия цинка может привести к разупрочнению пластины. Математические модели для таких задач помогают корректно смоделировать температурные поля в системе, а также отследить глубину проникновения компонентов.

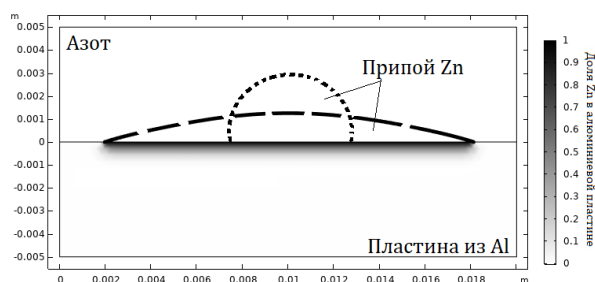


Рис. 1. Расчетная область. Верхняя часть газ и припой. Мелкий пунктир – исходное положение припоя, длинный пунктир – равновесное положение после смачивания. Нижняя область – алюминиевая пластина, цветная шкала – доля диффундирующего Zn в пластину.

Серия численных расчетов позволила отработать влияние разных скоростей нагрева, охлаждения и времени выдержки при температурах плавления припоя. Подобраны такие режимы, при которых припой успевает смочить поверхность, а цинк из припоя не успевает диффундировать глубоко в пластину.

Проведен ряд расчетов, результатами которых является поведение системы при различных условиях гравитации, для наземной гравитации результаты представлены на рисунке (см. рис. 1). При микрогравитации припой меньше растекается по поверхности пластины, форма его напоминает полуовал, в то время как при земном уровне гравитации припой стремится вытянуться в пленку. Площадь контакта припоя с пластиной отличается при различных уровнях гравитации, что сказывается и на доле цинка, диффундирующего в пластину.

### Список литературы

1. Груздь С.А., Кривилев М.Д., Самсонов Д.С. Математическая модель процесса смачивания вертикальной стенки при пайке твердым припоем сколов и трещин космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2022. №2(125). С. 66-74.
2. Груздь С.А., Самсонов Д.С., Кривилев М.Д. Исследование движения припоя в трубке методом фазового поля // Сборник докладов Всероссийской конференции "XXXIX Сибирский теплофизический семинар". 2023. Новосибирск. С. 135.
3. Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S.D. Non isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al Si Melt Under Terrestrial and Microgravity Conditions // Microgravity Science and Technology. 2022. V. 34(4).
4. Fu H., Dehsara M., Krivilyov M.D., Mesarovic S.D., Sekulic D.P. Kinetics of the molten Al-Si triple line movement during a brazed joint formation // J. Mater. Sci. 2016. V.51. P. 1798-1812.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 24-21-00413).

## ЛЕВИТАЦИЯ МИКРОКАПЕЛЬ НАД ИСПАРЯЮЩИМСЯ СЛОЕМ ВОДЫ

Деревянников И.А., Кочкин Д.Ю., Марчук И.В., Кабов О.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Микрокапли конденсата могут парить над горячей поверхностью раздела жидкость-газ из-за восходящего потока пара [1-3]. Эти капли не сливаются друг с другом и создают упорядоченные структуры, состоящие из десятков и сотен капель [1]. Исследование данного феномена актуально благодаря потенциалу его применения в микрофлюидике и медицине для разработки перспективных методов дозирования и транспортировки жидких веществ.

В литературе левитация капель жидкости исследуется, как правило, над локальными нагревателями с характерными линейными размерами от одного до нескольких миллиметров, в представленной же работе левитация исследуется над относительно большим нагревателем с размерами  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка включает в себя медный блок с размерами  $40 \times 40 \times 100$  мм<sup>3</sup>, нагреваемый патронным нагревателем. Температура жидкости измеряется с помощью термопары, установленной под подложкой, на которой формируется слой жидкости. В качестве исследуемой жидкости используется дистиллированная дегазированная вода. Для поддержания постоянной высоты слоя жидкости используется система сообщающихся сосудов. Процесс левитации микрокапель (рис. 2) визуализируется с помощью оптического шпирен-метода.

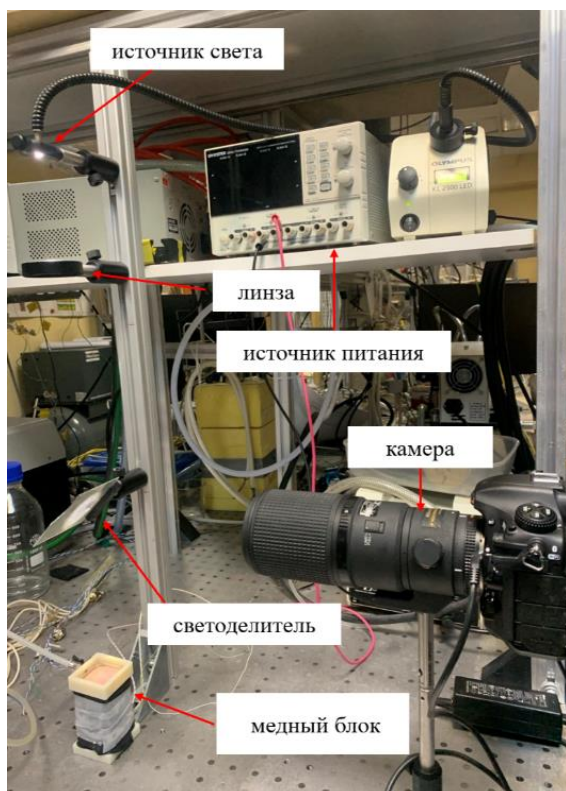


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования левитирующих капель жидкости.

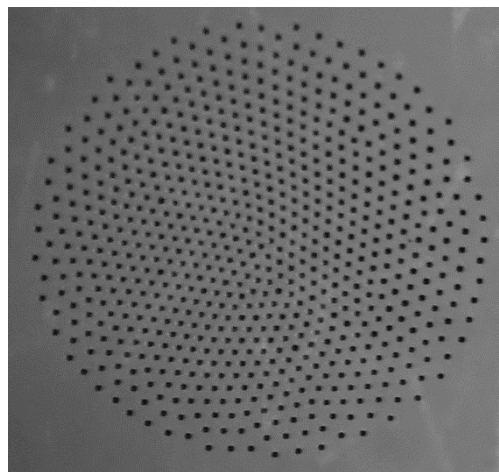


Рис. 2. Фото микрокапель, левитирующих над слоем жидкости.

Генерация капель происходит вследствие конденсации пара, который поднимается от испаряющегося слоя жидкости и конденсируется выше по потоку в более холодной области. В то же время восходящий поток удерживает капли конденсата на весу некоторое время, пока их масса не превысит критического значения, при котором капли коалесцируют со слоем жидкости.

## Список литературы

1. Fedorets A. A., Droplet cluster //JETP Lett. 2004. V. 79. P. 372–374.
2. Zaitsev D. V., Kirichenko D. P., Kabov O. A., Ajaev V. S. Levitation conditions for condensing droplets over heated liquid surfaces // Soft Matter. 2021. V. 17. P. 4623–4631.
3. Zaitsev D. V., Kirichenko D. P., Shatekova A. I., Ajaev V. S., Kabov O. A. Experimental and theoretical studies of ordered arrays of microdroplets levitating over liquid and solid surfaces // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2018. V. 3, N 6. P. 219-230.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00919).

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЦЕПТУР ЖИДКОСТЕЙ ГРП С ДОБАВКАМИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК****Жигарев В.А.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Неверов А.Л.<sup>1</sup>, Пряжников М.И.<sup>1</sup>, Суходаев П.О.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Гидравлический разрыв пласта в настоящее время является одним из важных методов разработки нетрадиционных пластов. Многие страны сталкиваются с проблемой традиционных месторождений нефти и газа, поэтому технология гидроразрыва пласта стала быстро развивающейся технологией, позволяющей заполнить разрыв между спросом и предложением.

Некоторые жидкости гидроразрыва не отвечают свойствам, предъявляемым к ним требованиям, поэтому требуется их модификация. Наноматериалы улучшают характеристики добавок (например, сшивающих агентов, разрушителя, вязкоупругого поверхностно-активного вещества (ПАВ), биоцида и т. д.), характеристики жидкости и способность различных пропантов удерживать трещины.

Основной целью процедуры гидроразрыва пласта является искусственное создание сети трещин с высокой проводимостью, через которую пластовые флюиды могут течь в ствол скважины с меньшим сопротивлением [1].

Проведены лабораторные физико-химические исследования по разработке рецептур жидкостей ГРП с добавками углеродных нанотрубок и сравнение их эффективности с жидкостями, модифицированными сферическими наночастицами ( $\text{SiO}_2$ ). Выполнено систематическое исследование коллоидной устойчивости, реологических и упругих свойств, характеристик смачивания, межфазного натяжения и капиллярного впитывания, а также фильтрационных потерь жидкостей для ГРП, модифицированных различными наноматериалами. В качестве гелеобразователей для получения гелей ГРП использовались натуральные и синтетические полимеры (несколько марок гуаровой камеди, ксантановая камедь, полиакриламид, высоковязкая полианионная целлюлоза). В качестве сшивающего агента использовался сшиватель на основе тетрабората натрия. В качестве нанодобавок использовались одностенные углеродные нанотрубки. Отработана рецептура и методика приготовления устойчивых линейных и сшитых гелей, модифицированных наночастицами. В качестве базовой модели жидкости ГРП использовался сшитый гуаровый полимер.

Проведено исследование смачиваемости, межфазного натяжения и скорости капиллярной пропитки песчаника наномодифицированными гелями для ГРП. Постановка экспериментов была следующая: на пластинку керн, выпиленную из песчаника, помещалась капля геля, которая постепенно впитывалась в образец. Весь процесс фиксировался на камеру. Далее с помощью программного обеспечения DropImage Advanced [2] определялся объем капли во времени в процессе пропитки. Исследовано влияние концентрации размера и материала наночастиц на изменение от-

носительного объема капли. По форме капли определялись также краевой угол смачивания и межфазное натяжение.

Капиллярное впитывание – процесс самопроизвольного вытеснения жидкости или газа из пористой среды другой несмешивающейся жидкостью под действием капиллярных сил. Капиллярные силы обусловлены поверхностными явлениями, происходящими на границе соприкосновения жидкости с другой средой [3]. Возникновение подобных явлений связано с искривлением поверхности этой жидкости в результате возникающих поверхностных натяжений. Безусловно, капиллярная пропитка является комплексным процессом. Скорость пропитки зависит не только от смачиваемости, но и от относительной проницаемости, вязкости, поверхностного натяжения жидкостей, а также от структуры порового пространства и начальной водо- и нефтенасыщенности. Однако, полученные результаты, наряду с данными по фильтрационным потерям, можно использовать для оценки скорости внедрения гелей для ГРП в горную породу.

В результате было показано, что скорость пропитки наномодифицированных гелей существенно зависит от концентрации наночастиц. Так, например, добавка 0,2 масс.% наночастиц оксида кремния (18 нм) снижает скорость впитывания геля в 1,8 раза, а добавка 0,05 масс.% ОСУНТ в 3 раза. При этом, в случае сферических наночастиц зависимость скорости пропитки от концентрации также носит немонотонный характер. Минимум скорости пропитки наблюдается при концентрациях нанодобавок, при которых наблюдался максимум увеличения краевого угла смачивания и эффективной вязкости гелей.

**Список литературы**

1. Blunski J., Wang J., Ertekin T. Hydraulic fracturing mechanisms in coal: A review // International Journal of Oil Gas and Coal Technology. 2017, V. 14. N 3. P. 247-263.
2. Minakov, A. V., Pryazhnikov, M. I., Suleymanova, Y. N., Meshkova, V. D. An experimental study of the effect of the addition of silicon oxide nanoparticles on the wettability characteristics of rocks with respect to oil // Technical Physics Letters. 2020. V. 46. P. 1238-1240.
3. Zhang, X., Ye, Q., Deng, J., Zhu, W., Tian, W., Kuang, S. Experimental study and mechanism analysis of spontaneous imbibition of surfactants in tight oil sandstone. // Capillarity, 2023. V. 7 N 1. P. 1-12.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского  
научного фонда № 23-79-30022,  
<https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.*

## УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Козлов В.Г., Зимасова А.Р., Козлов Н.В.

Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет,  
ул. Пушкина 42, Пермь, 614990, Россия

Экспериментально исследуется устойчивость тонкого слоя вязкой жидкости на внутренней границе длинной цилиндрической полости, совершающей модулированное вращение с угловой скоростью  $\Omega = \Omega_{rot}(1 + \varepsilon \cos(\Omega_{lib}t))$ . Здесь  $\Omega_{lib}$  и  $\varepsilon$  – циклическая частота и амплитуда модуляции скорости. Кювета заполнена вязкой тяжелой и маловязкой легкой жидкостями и располагается горизонтально. Обнаружено, что с повышением амплитуды модуляции на осесимметричной границе раздела пороговым образом развивается квазистационарный двумерный рельеф в виде вытянутых вдоль оси вращения холмов (см. рис. 1). В [1] показано, что квазистационарный рельеф, «замороженная» волна, развивается в результате осцилляционной неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Теоретическое описание и безразмерные параметры, определяющие устойчивость граница раздела, приведены в работе [2], где рассмотрена система двух несмешивающихся жидкостей с высоким контрастом вязкостей в неравномерно вращающейся круглой ячейке Хеле – Шоу. Настоящая работа посвящена изучению влияния контраста вязкостей жидкостей и толщины слоя вязкой жидкости на устойчивость межфазной границы.

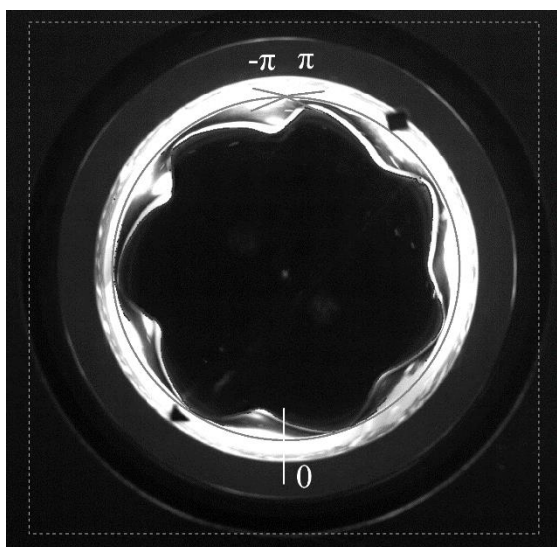


Рис. 1. Фотография межфазной границы в поперечном сечении.

В качестве вязкой плотной жидкости используется глицерин. Полость заполняется маслом меньшей плотности, вязкость которого варьируется в интервале от 0.65 сСт до 23 сСт. Вязкая жидкость визуализируется родамином, не растворимым в маловязкой жидкости, который люминесцирует в свете зеленого лазерного ножа, плоскость которого перпендикулярна оси вращения и расположена в центре полости. Кювета совершает быстрое вращение, при котором тяжелая вязкая жидкость располагается у стенки полости в виде тонкой пленки. Частота модуляции скорости

$f_{lib} = \Omega_{lib}/2\pi$  и амплитуда варьируются в интервале  $f_{lib} = 3 - 8$  Гц,  $\varepsilon = 0.26 - 0.72$ . Толщина слоя вязкой жидкости варьируется в интервале  $h = 2.2 - 5.8$  мм.

Размерных параметрами, измеряемыми в эксперименте, являются длина волны  $\lambda$  и высота  $\xi$  холмов. Длина "замороженной" волны, формирующейся на границе, вычисляется путем деления длины невозмущенной границы на азимутальное волновое число. Высота холмов определяется из азимутального профиля границы раздела жидкостей (см. рис. 2), полученного с помощью программы, написанной в Matlab.

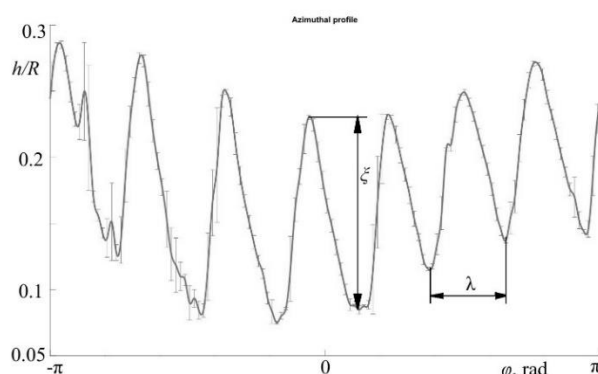


Рис. 2. Азимутальное распределение относительной толщины слоя вязкой жидкости  $h/R$ , здесь  $R$  – радиус полости.

По результатам экспериментов проведен анализ зависимости порогового значения амплитуды модуляции скорости возникновения квазистационарного рельефа на границе  $\varepsilon$  от скорости вращения  $f_{rot} = \Omega_{rot}/2\pi$ , частоты либраций  $f_{lib}$  и толщины вязкого слоя  $h$ . Исследования обнаружили сильное стабилизирующее воздействие силы Кориолиса; критическое значение безразмерного параметра, определяющего порог возникновения осцилляционной неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, повышается с безразмерной скоростью вращения.

### Список литературы

1. Kozlov V. G., Zimasova A. R., Kozlov N. V. Stability of liquid - liquid interface in unevenly rotating horizontal cylinders //Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2024. – Т. 12. – №. 1.
2. Kozlov V., Petukhova M., Kozlov N. Dynamics of liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating Hele-Shaw cell //Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2023. – Т. 381. – №. 2245. – С. 20220082

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-11-00242).

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРА ЧАСТИЦ В КОЛЛОИДНЫХ КАПЛЯХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ СОУДАРЕНИЙ

Исламова А.Г., Ткаченко П.П., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина, 30, Томск, 634034, Россия

Проблемы пылеулавливания при добыче полезных ископаемых открытым и шахтным способами остаются довольно острыми [1]. В связи с текущим энергетическим и геополитическим кризисами прогнозируется рост темпов добычи угля в мире и его широкого использования в ближайшие несколько лет [2]. Взвешенные в воздухе твердые частицы могут стать причиной крупных техногенных аварий, пожаров и взрывов, а также заболеваний дыхательной системы человека [1]. Осаждение пыли на движущихся частях механизмов увеличивает трение между ними и приводит к ускоренному износу оборудования. Из-за этого увеличиваются издержки на техническое обслуживание и ремонт. При очистке газов, содержащих частицы несгоревшего топлива, золу или пыль, применяются различные способы осаждения твердых частиц, в частности [3]: сухая и мокрая очистка, фильтры и электрофильтры и др. Эффективность мокрого способа очистки газов снижается при вторичном выпадении твердых частиц в атмосферу. Одна из основных причин связана со столкновениями капель, содержащих твердые частицы на высокой скорости. Цель настоящей работы состояла в построении карт режимов соударений капель жидкостей, содержащих твердые частицы малой концентрации, между собой в газовой среде при варьировании размеров и концентрации твердых частиц.

В качестве исследуемой жидкости при проведении экспериментов использовались коллоидные растворы, содержащие стеклянные микросферы МС-ВП-А9 (с размерами частиц 20–160 мкм) и частицы каменного тощего угля (с фракционным составом 60–80 мкм). Концентрация твердых частиц варьировалась в диапазоне от 0,01 до 1%. Характеристики процесса соударения капель, содержащих твердые частицы, между собой регистрировались на основе теневых изображений. Подробное описание методики проведения экспериментальных исследований приведены в [3].

На рис. 1 представлена карта режимов взаимодействия капель суспензии с разными концентрациями и размерами частиц, учитывающая безразмерный линейный параметр ( $B$ ) и числа Вебера ( $We$ ). Определено, что увеличение концентрации ( $C$ ) и размеров твердых частиц ( $l$ ) в составе капель суспензий привело к существенному смещению границ реализации режима дробления, т.е. при меньших скоростях относительного движения и размерах родительских капель. Эти закономерности можно объяснить эффектом агломерации твердых частиц в каплях. Чем выше их концентрация и размеры, тем значительнее вклад этого процесса в трансформацию формирующейся общей капли. Этим можно объяснить наглядное смещение критических значений  $We$  (соответствуют переходу от коагуляции и разлета к дроблению). Важным фактором для оптимизации работы технологических

установок является изменение параметров аэрозольного потока в зависимости от типа витающих в воздухе твердых частиц. При рассмотрении влияния свойств твердых частиц изучалось положение границ режимов соударения капель суспензий угля и микросфер стекла. Можно отметить очень близкое расположение границ начала режима дробления для суспензии угля и суспензии микросфер стекла (1–2%). Незначительные различия характерны и для границ режимов коагуляции и разлета (1–3%).

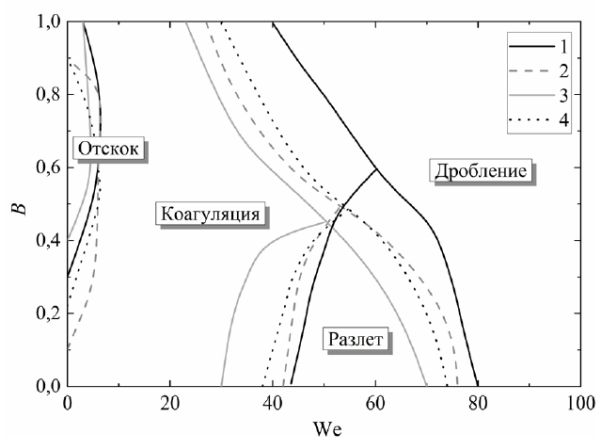


Рис. 1. Карта режимов взаимодействия капель, содержащих твердые частицы, между собой в системе  $B(We)$ : 1 – вода; 2 – суспензия угля  $C = 0,1$  масс. %,  $l = 60$  мкм; 3 – суспензия угля  $C = 0,5$  масс. %,  $l = 60$  мкм; 4 – суспензия микросфер стекла  $C = 0,1$  масс. %,  $l = 20-120$  мкм.

При анализе рис. 1 сформулирован вывод о слабом влиянии свойств твердых частиц на характеристики взаимодействия капель суспензий в данном диапазоне чисел Вебера. Это обусловлено малой концентрацией твердых частиц в суспензии. Различия свойств твердых частиц оказывают слабое влияние на положение границ режимов взаимодействия капель суспензий. Гораздо большее влияние на положение границ режимов оказывает само наличие твердых частиц в каплях, увеличение их концентрации и размеров.

### Список литературы

1. Zhou Q., Qin B., Li H., Hou J. Changes of physical properties of coal dust with crush degrees and their effects on dust control ability of the surfactant solution spray // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. V. 29. P. 33785–33795.
2. Suvorova I., Kravchenko O., Goman V., Baranov I. Criteria for assessing the energy-ecological effectiveness of using the sludge of waste treatment plants as components of liquid composite fuels // *Eur. J. Sustain. Dev.* 2020. V. 9. P. 328–336.
3. Islamova A.G., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Influence of collision conditions between aerosol flows of liquid droplets and solid particles typical for wet vortex dust collectors // *Energy.* 2024. V. 298. P. 131373.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-71-10040).



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ И ВИБРАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ ФАЗОВОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ МЕНЯЮЩИМСЯ ВДОЛЬ ОСИ ПРОФИЛЕМ

Карпунин И.Э.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет  
ул. Сибирская 24, Пермь, 614990, Россия

Для повышения эффективности тепло- и массообмена во многих технологических процессах используются различные методы. Одним из наиболее простых и эффективных подходов является использование реакторов проточного типа определенной конструкции, включающих в себя каналы с периодически изменяющимся вдоль длины сечением. Вихревое движение, возникающее вблизи искривленных границ, значительно ускоряет скорость перемешивания жидкости и интенсивность теплообвода при постоянном потоке жидкости. Значительное число работ [1-3] посвящено исследованию структур течения в каналах с различной площадью поперечного сечения в условиях непрерывного или периодического течения жидкости в плоских или осесимметричных каналах различной кривизны. При этом учитывается влияние формы канала (кривизны профиля), средней скорости и кинематической вязкости жидкости (числа Рейнольдса). Экспериментальным исследованиям, изучающим явление осцилляций жидкости при нулевом среднем расходе потока в геометрии осесимметричного канала, особенно в контексте наличия в потоке жидкости свободных фазовых включений, не уделялось достаточного внимания.

В исследовании [4], проведенном при осцилляции жидкости в канале переменного сечения, было выявлено, что колебания жидкости при среднем нулевом расходе приводят к возникновению интенсивного осредненного потока в каждой ячейке канала. Структура и скорость зависят от частоты колебаний и физических характеристик жидкости. В работе [5] описана разработанная и сконструированная экспериментальная установка (см. рис. 1), позволяющая задавать периодический расход жидкости в канале с одновременной возможностью ввода фазового включения непосредственно в осциллирующий поток. На фоне интенсивных осредненных потоков жидкости, обнаружено, что колебания жидкости могут привести к полной остановке сквозного движения тела через канал. При фиксированной частоте осцилляций столба жидкости повышение амплитуды колебаний приводит к интересному вибрационному эффекту [6]. С повышением амплитуды осцилляций жидкости наблюдается эффект квазистационарного удерживания тела в "подвешенном" состоянии в одной из ячеек. При этом, на фоне его "подвеса", тело совершает колебания относительно некоторого среднего положения, зависящего от частоты и амплитуды вибраций.

Настоящая работа посвящена исследованию структуры и характеристики интенсивности осредненных потоков, возникающих при колебательном движении столба жидкости в вертикальном канале с переменным вдоль оси радиусом (периодически меняющимся профилем). В качестве характеристики интенсивности осредненных потоков рассмотрена скорость в осевом

сечении канала. Проведено сравнение случая с телом и без него в зависимости от частоты и амплитуды колебаний столба жидкости.

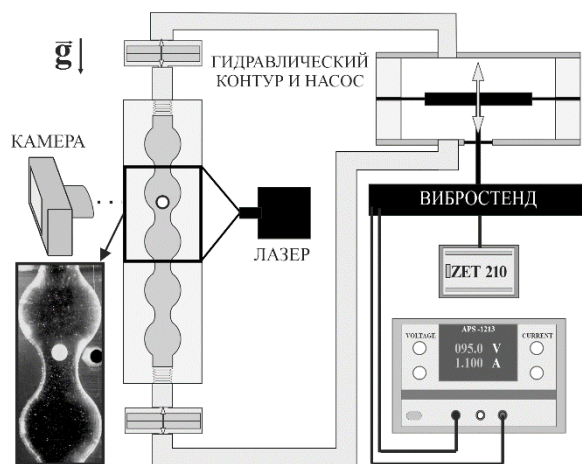


Рис. 1. Экспериментальная установка и фрагмент канала переменного сечения с фазовым включением.

Внимание уделено рассмотрению случая свободного фазового включения с твердой или деформируемой границей (пластиковая сфера/газовый пузырек), помещенного в осциллирующий поток жидкости в канале заданной геометрии. Подробно изучено поведение фазового включения в зависимости от заданных параметров эксперимента для случая обнаруженного эффекта вибрационного "удерживания" тела вблизи сужения канала.

### Список литературы

1. Nishimura T., Murakami S., Arakawa S., Kawamura Y. Flow observations and mass transfer characteristics in symmetrical wavy-walled channels at moderate Reynolds numbers for steady flow // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1990. V. 33, N 5. P. 835–845.
2. Zhang L., Tian L., Zhang A., Chen H. Effects of the shape of tube and flow field on fluid flow and heat transfer // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2020. V. 117. P. 104782.
3. Subbotin S., Kozlov V., Shiryaeva M. Effect of dimensionless frequency on steady flows excited by fluid oscillation in wavy channel // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31, N 10. P. 103604.
4. Vlasova O., Karpunin I., Latyshev D., Kozlov V. Steady flows of a fluid oscillating in an axisymmetric channel of variable cross-section, versus the dimensionless frequency // *Microgravity Sci. Technol.* 2020. V. 32. P. 363–368.
5. Карпунин И.Э. Поведение сферического тела в осциллирующем потоке в осесимметричном канале переменного сечения // *Конвективные течения...* 2023. № 11. С. 88–99.
6. Karpunin I. Oscillatory Dynamics of a Spherical Solid in a Liquid in an Axisymmetric Variable Cross Section Channel // *Fluid Dyn. Mater. Process.* 2024. V. 20, N 4. (In print)

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-71-01103).*

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ТОРЦЕ ВОЛНОВОДА

Косяков В.А., Фурсенко Р.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
ул. Институтская 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

Механизм процесса недогретого кипения, вблизи торца тонкого лазерного волновода, погруженного в холодную жидкость, заключается в следующем. По волноводу подается лазерное излучение, которое приводит к нагреву и последующему испарению жидкости вблизи его торца. В результате испарения происходит рост парового пузырька диаметром от одного до нескольких калибров волновода зависимости от мощности лазера и длины волны излучения. За стадией роста пузырька следует стадия схлопывания, вызванная конденсацией пара в результате его охлаждения окружающей жидкостью и разницей давлений между паровой и жидкой фазой, возникающей вследствие неравновесного расширения пузырька [1]. В результате почти полной конденсации пара и схлопывания пузырька образуется струя жидкости кумулятивного характера, направленная от торца оптического волокна в сторону жидкости [2].

Данная струя имеет схожесть со струями, которые образуются при кавитации. Однако в рассматриваемом процессе струя имеет повышенную температуру (40-60 градусов Цельсия), что позволяет использовать ее в медицинских приложениях [3]. В работах [4,5], численно и экспериментально исследовалось генерация струи на торце волновода. В частности, была проведена оценка влияния потока тепла, передаваемого со струей, на органы и сосуды в человеческом теле. Было показано, что с помощью нее можно лечить некоторые заболевания, например, варикозное расширение вен. Поэтому исследования, связанные с изучением тепловых характеристик таких струй и возможностью контролировать их, представляют практический и фундаментальный интерес.

В настоящее время физические механизмы влияющие на повышение температуры рассматриваемых струй не до конца изучены.

В данной работе выдвинута гипотеза, согласно которой температура струи связана с нагревом жидкости лазерным излучением на стадии, предшествующей росту парового пузырька.

Численные исследования в широком диапазоне параметров задачи позволили подтвердить эту гипотезу. В частности, анализ результатов моделирования и доступных экспериментальных данных показал, что только 1-3 % нагретой излучением воды переходит в пар, в то время как оставшаяся часть воды с повышенной температурой окружает паровой пузырь тонким слоем, который с ростом пузыря утончается (см. рис.1). На стадии схлопывания эта нагретая вода вовлекается в движение и непосредственно участвует в формировании кумулятивной струи, что объясняет ее повышенную температуру.

Сопоставление результатов численного моделирования с имеющимися экспериментальными данными продемонстрировало хорошее качественное и количественное согласие.

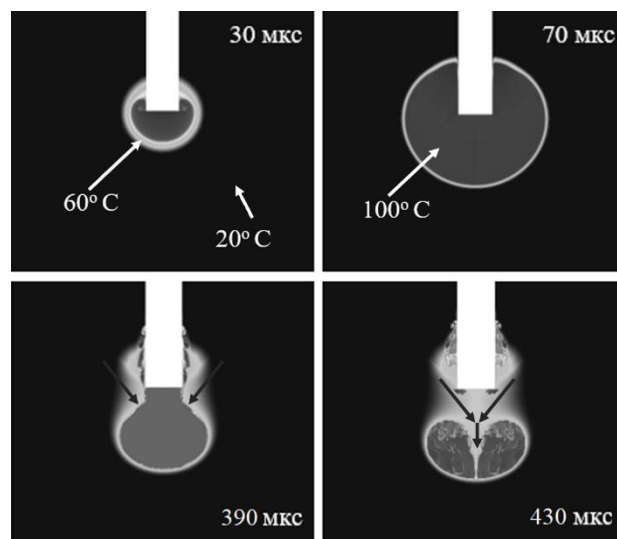


Рис. 1. Численное моделирование эволюции парового пузырька.

### Список литературы

1. Kosyakov V.A. et al. Physical mechanisms controlling a vapor bubble collapse and formation of a liquid jet during a laser-induced subcooled boiling near the end face of a thin waveguide // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023. Vol. 148. 107053. ISSN 0735-1933.
2. Adamov T. et al. Spontaneous boiling of submerged jets, generated during the collapse of vapor bubbles // Technical Physics Letters. 2022. Vol. 1. P. 16.
3. Chudnovskii V. et al. Foaming of blood in endovenous laser treatment // Lasers in Medical Science. 2018. Vol. 33. No. 8. P. 1821–1826.
4. Chudnovskii V. et al. Laser induced boiling of biological liquids in medical technologies // Quantum Electronics. 2017. Vol. 47. No. 4. P. 361–370.
5. Yusupov V., Chudnovskii, V. The origin of loud claps during endovenous laser treatments // The Journal of the Acoustical. 2023. Vol. 153. No. 3. P. 1525–1533.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00189).

**КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ГРАФЕНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ****Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В., Белослудцев В.В., Архипов В.Е., Кабов О.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Кипение жидкости встречается во многих технологических процессах, в том числе в системах термостабилизации, где отвод тепла происходит за счет скрытой теплоты парообразования. Одним из способов интенсификации теплообмена при кипении являются нанопокртия. В представленной работе экспериментально исследовался процесс кипения воды в микканале с локальным нагревателем, покрытым графеном.

Эксперименты проводились на рабочем участке, представляющем собой плоский микканал шириной 30 мкм и высотой 1 мм с нагревателем 10x10 мм<sup>2</sup> на нижней стенке канала. Верхняя стенка канала выполнена из стекла, что позволяет проводить визуализацию процесса кипения. Нижняя стенка канала – пластина из нержавеющей стали со встроенной заподлицо сменной подложкой из меди, которая нагревается снизу медным стержнем. В качестве источника тепла используются омические нагреватели. Тепловой поток определяется при помощи термопар, встроенных в медный стержень и пластину из нержавеющей стали. Жидкость подается в микканал при помощи регулируемого насоса. Расход жидкости измеряется при помощи ультразвукового расходомера. В качестве рабочей жидкости используется сверхчистая дистиллированная вода Milli-Q.

На рисунке 1 представлена динамика кипения воды на медной подложке, одна половина которой была покрыта графеном, в то время как со второй половины подложки графен был удален, чтобы явно исследовать разницу в динамике паровых пузырей и частоте нуклеации в одинаковых условиях. Для сравнения динамики паровых пузырей на двух поверхностях использовались усредненные данные (рис. 2), полученные при обработке нескольких паровых пузырей. Как можно заметить, на начальном этапе роста динамика паровых пузырей практически одинакова для обоих типов поверхности, однако на медной поверхности без графена максимальный размер парового пузыря несколько больше, чем на поверхности, покрытой графеном. Стоит отметить, что в ходе экспериментов на поверхности, покрытой графеном, наблюдалось значительно большее количество пузырей, чем на поверхности без графена, что свидетельствует о более высоком коэффициенте теплоотдачи по сравнению с «чистой» медной поверхностью.

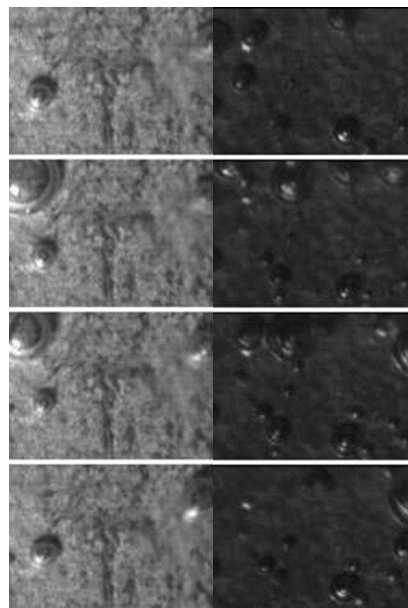


Рис. 1. Характерная картина кипения на медной подложке (слева) и медной подложке покрытой слоем графена (справа). Порядок кадров сверху вниз, временной интервал между кадрами 5 мкс. Температура стенки 128 °С. Размер области визуализации 618x464 мкм.

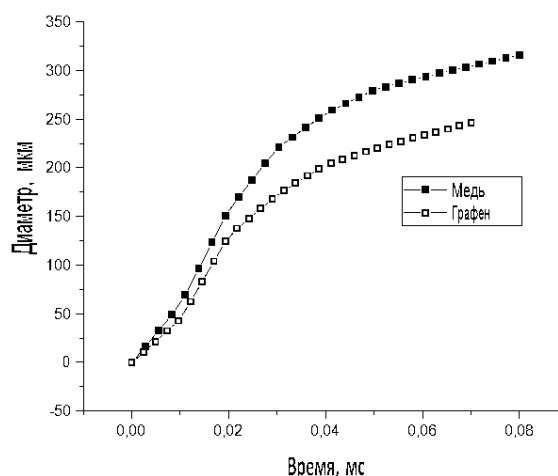


Рис. 2. Осредненная динамика паровых пузырей на «чистой» медной подложке и медной подложке, покрытой графеном.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-49-08018).

## ПРОБЛЕМЫ АНОМАЛЬНОГО СНИЖЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Диева Н.Н.<sup>1</sup>, Кравченко М.Н.<sup>1,2</sup>, Сафиева Р.З.<sup>1</sup>, Косач А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,

Ленинский пр. 65, Москва, 119991, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия

Проведен цикл лабораторных и численных исследований, направленных на повышение коэффициента извлечения высоковязкой нефти путем нагнетания растворителей с целью снижения вязкости и повышения подвижности нефти. В качестве вытеснителей-растворителей на практике применяются: азот, углеводородные (УВ) газы и газы горения. Азот слаборастворим в нефти и фактически не влияет на подвижность нефти. Считающиеся перспективными технологии закачки диоксида углерода и УВ газов за счет их высокой растворимости в нефти могут существенно повышать подвижность пластового флюида за счет понижения его вязкости и плотности (эффекта набухания), однако, с ростом массовой концентрации растворителя в нефти и температуры, когда ожидаемо должно произойти усиление эффективности воздействия, наблюдается аномальное снижение проницаемости насыщенного нефтяного коллектора при достижении предельных значений концентрации некоторых растворителей (СО<sub>2</sub>, гептана, смеси и др.). Данный эффект связан с изменением структуры пластового флюида, проявляющегося в разделении нефти на легкую и тяжелую фракции и выпадения асфальто-парафиновых отложений (АСПО) [1]. Для определения характера агрегации и устойчивости асфальтенов в нефтяных дисперсных системах, а также для прогнозирования влияния этих процессов на извлечение углеводородов из коллектора авторами разработан алгоритм экспериментальных исследований, позволяющий оценить предел устойчивости углеводородных систем, индукционный период агрегирования и скорость осаждения в зависимости от состава углеводородного флюида, типа растворителя и его концентрации.

Практическая значимость представляемых исследований заключается в том, что математическое моделирование лабораторных и промысловых экспериментов процессов достижения седиментационно-диффузионного равновесия в нефти как асфальтеносодержащей системе позволяет выявить количественные показатели кинетики этих процессов. На данном этапе авторами в качестве растворителя для исследования оптическими методами процессов агрегации/седиментации асфальтенов выбран растворитель гептол (классический вариант модельной системы на основе осаждающего агента-гептана и растворяющего агента-толуола). В качестве диспергирующей системы рассматривались как очищенные асфальтеновые фракции, так и природные нефти. На рис.1 приведены результаты экспериментов для одной из модельных жидкостей, позволяющие установить предельную концентрацию растворителя (для гептана это 80% при нормальных условиях). Индукционный период в этом случае составляет около 80 мин, время седиментации около 185

мин, что установлено методом динамического рассеяния света.

На основе полученных экспериментальных значений определяется кинетика процесса разделения фаз, влияние этого процесса на подвижность пластового флюида и изменение фильтрационно-емкостных характеристик насыщенного коллектора (пористости, абсолютной и относительных проницаемостей) за счет трансформации распределения пор по размерам при диспергировании и осаждении АСПО на пористую матрицу. Математическая модель также учитывает изменение в динамике характера фильтрационного течения по псевдопластическому типу [2].

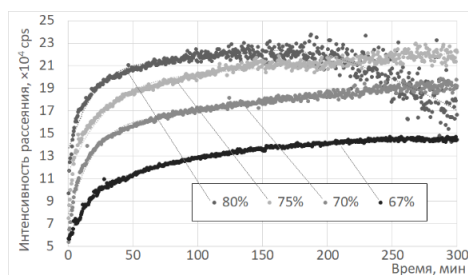


Рис.1. Эксперименты по агрегированию и седиментации тяжелых фракций нефти в присутствии растворителя.

Используя лабораторные данные, в результате численного моделирования процесса закачки растворителя в модельный пласт (с пористостью 24%), насыщенный высоковязкой нефтью, было получено, что в прилегающей к скважине зоне полное разделение нефти на легкую и тяжелую фракции с завершением процесса выпадения АСПО происходит примерно за 48 часов с падением значений абсолютной проницаемости примерно на 8% (плотности нефти 867,7 кг/м<sup>3</sup> с массовым содержанием смол и асфальтенов 7,27). Процессы диспергирования и седиментации имеют различное характерное время, и в динамике приводят к снижению вязкости пластового флюида до предельного значения, отвечающего смеси легких компонент нефти. Результаты носят качественный характер, так как требуется продолжение исследований на реальных нефтях с расширением диапазона давлений и температур и применением комплексных составов растворителей.

### Список литературы

1. Косач А.В., Кравченко М.Н., Сафиева Р.З., и др. Новый метод контроля устойчивости асфальтеносодержащих дисперсных систем. // Петролеумика, 2024, №1, 15 с.
2. Кравченко М.Н., Сафиева Р.З., Аминев Д.А., Лесина Н.В. Особенности математического моделирования экспериментов на кернах по вытеснению тяжелых нефтей с использованием газов-растворителей. // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2023, №2(311), с. 128-142.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-77-10081).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

Кукшинов Н.В., Дмитриева А.А., Метелешко Л.И., Морской Д.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ул. 2-я Бауманская 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Проведены экспериментальные исследования образования поверхности раздела фаз при кипении дистиллированной воды на цилиндрической поверхности диаметрами 1 и 3 мм. В процессе эксперимента обеспечивался пузырьковый режим кипения, характеристики пузырьков определялись с помощью высокоскоростной съемки методом PSV (particle shadow velocimetry). Определены отрывные диаметры и скорость роста пузырей на поверхности.

Экспериментальная установка и параметры исследования

Экспериментальная установка представляет собой герметичный сосуд с прозрачными стенками. В качестве поверхности кипения используются трубки диаметрами 1 и 3 мм. На поверхности трубки установлены две термопары для определения температуры стенки при кипении. Подвод теплоты осуществляется электрическим нагревом с помощью лабораторного автотрансформатора. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Вода нагревалась до состояния насыщения, которое поддерживалось в течение эксперимента. Плотность теплового потока изменялась от 30 кВт/м<sup>2</sup> до 160 кВт/м<sup>2</sup>. Определялись размеры пузырей при различных тепловых нагрузках и их статистические распределения по размерам. Для среднего диаметра пузыря определялась скорость роста путем покадровой обработки массива изображений.

Результаты исследования

Полученные экспериментально отрывные диаметры сравнивались с отрывными диаметрами, определенными по формуле, предложенной в [1]:

$$\tilde{d}_0 = a \cdot \sqrt{1 + b \cdot K} \quad (1)$$

где  $K = (Ja/Pr)^2 / Ar$  - безразмерный комплекс, включающий в себя свойства теплоносителя и температурный напор  $\Delta T$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  являются эмпирическими и равны  $a = 0,25$ ,  $b = 105$ . Показано, что данная функция удовлетворительно описывает экспериментальные данные для диаметра поверхности 3 мм (рисунок 2) и неудовлетворительно для диаметра 1

мм, что связано с соотношением между отрывным диаметром пузыря и диаметром трубки.

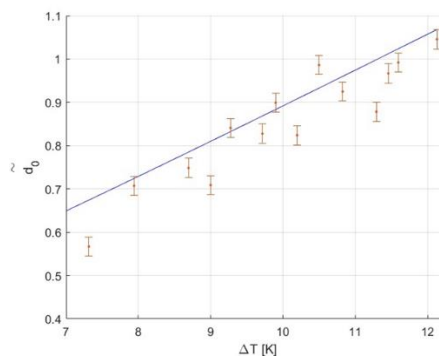


Рис. 2. Зависимость безразмерного отрывного диаметра от температурного напора для трубки диаметром 3 мм: по формуле (1) - синяя линия, эксперимент - красные точки.

Полученная экспериментально зависимость скорости роста пузыря сравнивалась с функцией, предложенной в [2]. Среднее для всех режимов относительное отклонение составило 22,5 % для цилиндра диаметром 1 мм и 17,6 % для цилиндра диаметром 3 мм.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что формула (1), удовлетворительно описывает зависимость отрывного диаметра от температурного напора для цилиндрической поверхности диаметром 3 мм, при этом для поверхности диаметром 1 мм необходимо использовать отличные от оригинальных эмпирические коэффициенты. Функция для скорости роста пузыря на поверхности, предложенная в [2], согласуется с полученными экспериментальными результатами.

### Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Гогонин И.И. Скорость роста и отрывной диаметр парового пузыря при кипении насыщенной жидкости в условиях свободной конвекции // ТВТ. 1979. Т. 17, №4. С. 792–797.
2. Лабунцов Д.А., Кольчугин Б.А., Головин В.С., Захарова Э.А., Владимиров Л.Н. Исследование при помощи скоростной кино съемки роста пузырьков при кипении насыщенной воды в широком диапазоне изменения давлений // ТВТ. 1964. Т. 2, №3. С. 446–453.

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ГРУПП ПУЗЫРЬКОВ И МАЛЫХ ПУЗЫРЕЙ ТЕЙЛОРА В НИСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Лобанов П.Д.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Исследования двухфазных потоков проводятся в течение многих лет. В основном они посвящены восходящим течениям ввиду их большой распространённости в технике. Нисходящие течения исследованы в меньшей степени, однако они также имеют большую практическую значимость. Такие потоки могут возникать в химических реакторах, при добыче полезных ископаемых, в медицине и т.д. Нисходящие потоки могут возникать в различных элементах ядерных энергетических установок.

Необходимо проведение экспериментальных и теоретических работ по исследованию локальной гидродинамической структуры и теплообмена в нисходящих потоках. В зависимости от расходов газа/пара и жидкости могут быть реализованы различные режимы течения. Одними из наиболее практически значимых являются пузырьковый и снарядный.

В последние годы исследования опускных пузырьковых потоков носят весьма интенсивный характер [1-4]. Снарядный режим течения рассмотрен в большом количестве работ, однако исследования были посвящены определению характеристик движения газовой фазы (распределения длин пузырей, их скоростей, формы и пр.) в жидкостях с различными физическими свойствами.

В последнее время появились исследования локальных характеристик движения жидкой фазы в привязке к положению в "одиночной ячейке" снарядного течения (перед снарядом, пленка жидкости вокруг снаряда, зона отрывного течения за снарядом). Исследования проводились с помощью PIV и ультразвукового метода определения скорости.

Развитие и доступность термографических методов исследования позволяет проводить исследования теплоотдачи в снарядном режиме течения в привязке к положению в "одиночной ячейке" [5].

Исследования пузырькового и снарядного течения в нисходящих потоках на данный момент ограничены. Данных о локальной гидродинамической структуре и теплообмене с нагреваемыми стенками каналов практически не представлено.

Целью работы является проведение исследования взаимодействия жидкой фазы с газовыми включениями (группа мелких пузырей, пузырь Тейлора) в нисходящем потоке жидкости, и их влияние на теплообмен.

Визуальные наблюдения показывают, что при движении группы пузырей происходит их хаотическое перемещение в сечении канала. Это связано как с взаимодействием пузырей с жидкостью, так и друг с другом. На термограммах, полученных в нагреваемой части рабочего участка, форма "пятна", в котором наблюдается интенсификация теплообмена из-за прохода пузырей, изменяется со временем в горизонтальном и вертикальном направлении. Важно от-

метить, что изменение температуры стенки по азимутальной координате распределено неравномерно, что вызвано особенностями обтекания пузырей.

Скорость движения пузырей Тейлора выше, чем группы мелких пузырей, что связано с меньшей скоростью всплытия в неподвижной жидкости. Пузырь Тейлора в отличие от группы пузырей движется равномерно, значительных колебаний скорости не наблюдается. Известно, что в нисходящих потоках форма пузырей Тейлора несимметрична относительно оси трубы, что было хорошо заметно в рамках проведенных экспериментов.

Влияние пузыря Тейлора на теплоотдачу нагреваемой стенки трубы сравнимо со случаем движения группы пузырей, но несколько выше. Наиболее интересная структура распределения коэффициента теплоотдачи наблюдается в отрывной области за дном пузыря. Здесь происходит взаимодействие спиралевидно закрученных вихрей, что выражено в чередовании областей с относительно высокими и низкими температурами. Визуальные наблюдения показывают, что срыв вихрей со дна снаряда происходит с двух точек. Непосредственно под пузырем Тейлора также наблюдается снижение температуры стенки, однако температура распределена более равномерно.

Полученные данные могут быть использованы для развития методов предсказания гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков.

### Список литературы

1. Kashinsky O.N. and Randin V.V., Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe, *Int. J. Multi-phase Flow*, 1999, vol. 25, No. 1, pp.109-138.
2. Hibiki T., Coda H., Kim S., Ishii M. and Uhle J., Experimental study on interfacial area transport of a vertical downward bubbly flow, *Experiments in Fluids*, 2003, vol. 35, pp. 100-111
3. Sun X., Paranjape S., Ishii M. and Uhle J., LDA measurements in air-water downward flow, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 2004, vol. 28, pp.317-328.
4. Lu J., Biswas S. and Tryggvason G., A DNS study of laminar bubbly flows in a vertical channel, *Int. J. Multiphase Flow*, 2006, vol. 32, No 6, pp. 643-660
5. Fershtman, A., Shemer, L., Barnea, D., 2016. In-stantaneous heat transfer rate around consecutive Tay-lor bubbles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 95, 865–873.

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

## О СХОДСТВЕ ЯВЛЕНИЙ ВЕТРОВОГО ВЫНОСА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ

Малиновская Е.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
пер. Пыжевский, 3, Москва, 119017, Россия

**Введение.** Ветровое воздействие на аридных территориях определяет интенсивность поверхностного источника пыльного аэрозоля в атмосфере [1]. При превышении пороговых значений скорости ветра крупные частицы почвы (песка, размеры от 70 до 150 мкм), отрываемые ветром, движутся в приповерхностном слое скачкообразно. Такой процесс ветрового выноса называется сальтацией.

Сальтационный поток частиц в атмосферу связан нелинейной зависимостью с динамической скоростью трения ( $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ , где  $\tau$  — напряжение сдвига,  $\rho$  — плотность воздуха [1]).

Подстилающая поверхность из песчаных подвижных частиц является пористой средой [2]. Изменение локальных характеристик приповерхностного слоя воздуха на микромасштабах способствует возникновению вторичных течений: струй и вихрей [2, 3].

Под влиянием сальтирующих у поверхности частиц может происходить откалывание пылинок, в областях усиления турбулентной энергии вблизи поверхности создаются условия для выноса пыли на некоторую высоту.

**Основная идея.** В соответствии с теорией сальтационных движений вынос частиц определяется влиянием разности давлений при обтекании, силой Магнуса, вязкими силами микроциркуляции, турбулентными течениями [4] и наличием микровихрей вблизи приповерхностного слоя [5].

Каждое из приведенных воздействий имеет место при различных условиях. Остается открытым вопрос о влиянии возникающих в приповерхностном слое турбулентных течений при условии, что скорости движения воздуха у поверхности малы [6].

С позиции процессов переноса в зернистых слоях сальтационный процесс может быть представлен как двухслойная среда: верхний слой подстилающей поверхности глубиной несколько миллиметров и сальтационный слой подпрыгивающих над поверхностью частиц. По оценкам [7] максимально возможная объемная концентрация твердой фазы частиц  $\zeta$ , составляющих песчаную поверхность, близка к 0.76. В слое сальтации частиц  $\zeta$  варьируется в зависимости от величины  $u_*$  от 0.0001 до 0.01.

**Разность давлений.** Полагая, что воздушный поток движется в порах верхнего слоя, падение давления  $p$  для потока будет в соответствии с [8]:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{3}{4} \frac{24}{\text{Re}} \frac{\zeta}{1-\zeta} \rho \frac{v_0^2}{\psi^3},$$

где  $\psi = 1 - 1.164\zeta^{2/3}$ ,  $\text{Re}$  - число Рейнольдса,  $v_0$  - скорость в незагруженном сечении. Возникновение перепада давления при движении воздушного потока в каналах между частицами, лежащими на поверхности, создает условие для выталкивания частиц. Сила, рассчитанная относительно формулы для давления

близка по значению  $\sim 10^{-7}$  Н. В слое скорость движения в каналах резко падает, однако у поверхности ее значение будет поддерживаться ветровым потоком.

3. Силы сцепления при струйном обтекании. Известная из теории сальтационного движения сила Ван-дер-Ваальса для частиц среднего размера имеет порядок величины  $F_a \sim 10^{-7}$  Н. Исходя из предположения о струйном обтекании частиц на границе и считая внешний поток возмущением, определена критическая скорость, при которой возможен выход частицы вертикально вверх из горизонтальной струи:

$$C \pi r r^2 v_0 / \left[ \pi r r_0^2 v_0^2 \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 \sin \chi + \frac{4}{3} \pi \rho_p r^3 \right] = 1,$$

где  $C$  - коэффициент сопротивления,  $r$  - радиус частицы,  $r_0$  и  $r_1$  - радиусы струи до и после взаимодействия с частицей,  $\chi$  - угол отклонения струи,  $\rho_p$  - плотность частицы. Эти скорости зависят от размера частиц в слое и размеров каналов, соответствует значениям  $v_0 = 0.1 - 0.7$  см/с.

4. Возникновение турбулентных пульсаций. Считая, что частицы как бы фильтруют движущийся относительно них поток, часть энергии воздушного потока расходуется на генерацию пульсационных составляющих в приповерхностном слое. Получена связь потери средней скорости частиц с величиной пульсационных составляющих скорости воздушного потока в сальтационном слое.

5. Влияние тепла. Разогрев поверхности приводит к росту сопротивления [8], что увеличивает критическую  $v_0$ , разность давлений, выталкивающих частицу, и пульсации в приповерхностном слое.

### Список литературы

1. Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes. Springer, 1973. 265 p.
2. Chou Y.J., Fringer O.B. A model for the simulation of coupled flow bed form evolution in turbulent flows // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C10041.
3. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: Физматлит, 2007. 238 с.
4. Малиновская Е.А. Модель отрыва песчаной частицы ветром // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 5. С. 588-596.
5. Dey S., Ali S.Z. Advances in modeling of bed particle entrainment sheared by turbulent flow // Phys. Fluids. 2018. Vol. 30. 061301.
6. Greeley R., Iversen D.J. Wind as geological process of Earth, Mars, Venus and Titan. New York: Cambridge University press, 1985. 333 p.
7. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. Об условиях ветрового выноса частиц почвы // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 2. С. 175-188.
8. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. - Новосибирск, 1984. - 164 с.

*Работа поддержана РФФ (грант № 23-27-00480).*

## КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ СМЕСИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЗАКУПОРКИ

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН,  
пр. Ак. Королева 1, Пермь, 614990, Россия

В настоящей работе исследуется транспорт тяжелой примеси через наклонный слой пористой среды при наличии осаждения (иммобилизации) частиц примеси на твердый скелет среды и учете закупорки среды. Течение примеси создается постоянным перепадом давления на концах слоя. На верхней и нижней границах поддерживается постоянная разность концентрации примеси (см. рис.1).

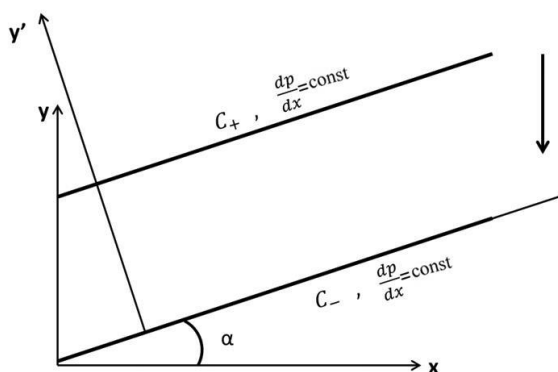


Рис.1 Конфигурация задачи.

На основе законов сохранения массы для подвижной примеси и несущей жидкости выведены уравнения, описывающие динамику системы. Настоящая система получена в приближении Буссинеска, с использованием условия Козени-Кармана и в рамках подхода мобильной/немобильной среды (ММ) [1,2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi C + Q) = \text{div}(\phi D \nabla C - \phi v \rightarrow C),$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \alpha_d((q_0 - Q)C - K_d Q),$$

$$u \rightarrow = -\frac{\kappa(\phi)}{\eta}(\nabla p + \rho \beta_c \vec{g} C),$$

$$\text{div} u \rightarrow = 0,$$

$$\kappa(\phi) = \gamma \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2}, \quad \phi = \phi_0 - Q.$$

Здесь  $C$  – объемная концентрация мобильной части примеси,  $Q$  – объемная концентрация осевшей (иммобильной) части примеси,  $\phi$  – текущая пористость среды,  $\phi_0$  – пористость чистой среды без примеси.  $u \rightarrow = (u_x, u_y, u_z)$  – скорость фильтрации,  $p$  – давление,  $\kappa(\phi)$  – проницаемость среды,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\rho$  – плотность несущей жидкости,  $\beta_c$  – коэффициент концентрационного расширения,  $\vec{g} = (-g \sin \alpha, -g \cos \alpha, 0)$  – гравитационное ускорение.  $\gamma$  – параметр Козени-Кармана, связанный с геометрическими свойствами пористой среды,  $\alpha_d, K_d$  – коэффициенты массопереноса и коэффициент распределения примеси соответственно.

Рассмотрены приближения сильной и слабой закупорки. Предположение слабой закупорки заключалось в том, что влияние осевших частиц на пористость

считалось незначительным и учитывалось только в уменьшении проницаемости среды.

Показано, что настоящая задача допускает режим стационарной фильтрации. Для случая слабой закупорки распределение примеси совпадает с известным ранее линейным законом, для сильной закупорки наблюдаются искривления профиля концентрации. При этом в обоих случаях скорость фильтрации вдоль слоя является функцией поперечной координаты и зависит от угла наклона.

Исследована устойчивость найденного стационарного решения по отношению к малым возмущениям. Численно получены нейтральные кривые в широком диапазоне параметров задачи. Построены карты устойчивости и определены критические значения управляющих параметров. Показано, что возможно возникновение конвективного течения как колебательным так и монотонным образом. Рассмотрены два типа возмущений: плоские и спиральные. Показано, что в отсутствии закупорки учет иммобилизации и прокачки никак не влияет на устойчивость системы по отношению к спиральным возмущениям, неустойчивость носит монотонный характер и результаты полностью совпадают с известными ранее [2]. В то время как для плоских возмущений, учет прокачки приводит к появлению колебательной моды, а учет иммобилизации повышает устойчивость системы в целом. Эти результаты качественно совпадают с тем, что наблюдается и в случае горизонтального слоя. Учет закупорки в целом приводит к повышению устойчивости режима стационарной фильтрации и замедлению колебательной динамики системы. Определены границы применимости распространенной в литературе линейной ММ модели которая учитывает осаждение примеси, но не учитывает закупорку среды.

### Список литературы

1. Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media //Society of Petroleum Engineers Journal. – 1963. – Т. 3. – №. 01. – С. 49-52.
2. Nield D. A., Bejan A, Convection in porous media. – New York : springer, 2006. – С. 629-982..
3. Caltagirone J. P., Bories S. Solutions and stability criteria of natural convective flow in an inclined porous layer //Journal of Fluid Mechanics. – 1985. – Т. 155. – С. 267-287.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 20-11-20125).



**ГАЗОГИДРАТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕСНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ****Мелешкин А.В.<sup>1</sup>, Сагидуллин А.К.<sup>1,2</sup>, Марсанов Н.В.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН  
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

В течение длительного времени специалисты со всего мира проявляют интерес к газовым гидратам. Исходные исследования фокусировались на предотвращении образования гидратов в газопроводах при добыче газа в северных регионах, что могло привести к их закупориванию и, как следствие, к затратам на аварийные работы. Около 80% природного газа находится в виде газогидратов в зонах вечной мерзлоты и на дне океанического шельфа. Исследования по искусственным (техногенным) газовым гидратам обладают значительным потенциалом в различных отраслях промышленности, включая транспортировку газа, очистку воды, хранение холода, разделение газов, пищевую промышленность и т.п. Данный доклад посвящен газогидратному способу опреснения и очистки воды.

За последние несколько десятилетий морская вода стала важным источником пресной воды, поскольку она является одним из самых богатых ресурсов на Земле. 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. Газовые гидраты – это супрамолекулярное соединение воды и газа, где молекулы воды формируют трехмерную полость, в объеме которой заперта молекула гидратообразующего газа и удерживается там силой Ван-дер-Ваальса. Газогидратный метод опреснения воды ближе всего к методу вымораживания, однако, имеет существенное преимущество – при повышенном давлении газовый гидрат может образовываться при положительных температурах, сокращая энергопотребление процесса.

Для улучшения кинетических характеристик гидратообразования в соленой воде было предложено несколько методов, таких как перемешивание, барботажная колонна, распылительная колонка, неподвижный слой с кварцевым песком и стеклянных шариков. Для удаления адсорбированной соли и окклюдированного кристаллами гидрата рассола после образования гидрата используются процессы промывки, центрифугирования и т. д., эти вторичные процессы обработки влияют на эффективность процесса и экономику процесса. Однако полноценная экономически целесообразная технология для промышленного опреснения воды на основе гидратообразования не была создана из-за дополнительных технических проблем. В

первую очередь это связано с низкой скоростью гидратообразования и, соответственно с небольшой производительностью установок, сделанной на их основе, что делало процесс дорогостоящим. Образование гидрата является энергоемким процессом, потому что он требует низких температур и условий высокого давления наряду с дополнительным расходом энергии для отделения кристаллов гидрата от рассола. В основе всех газогидратных технологий в первую очередь должны лежать эффективный метод синтеза газовых гидратов, который обеспечивает экономическую целесообразность их технологического применения. В связи с этим стоит задача разработки быстрых и эффективных способов получения газогидратов в больших объемах за короткий промежуток времени.

В настоящий момент разрабатывается метод получения газовых гидратов, основанный на самоорганизующемся циклическом процессе кипения и конденсации гидратообразующего газа в объеме воды. Данный метод выгодно отличается от остальных высокой скоростью образования газогидрата, которая связана с набором критериев, приводящих к интенсификации процесса получения: сжиженное состояние газа позволяет ввести в реакционную среду сразу значительный объем газа; при кипении сжиженный газ создает развитую обновляемую поверхность контакта газа и воды на всплывающих пузырьках; переохлаждение реакционной среды относительно термобарических условий образования гидрата позволяет уменьшить время индукции. Одновременное наложение этих факторов значительно сокращает время образования гидрата. Особенностью метода, применительно к опреснению и очистке воды, является возможность быстро образовывать гидрат без использования химических или кинетических промоторов (часто используемых при синтезе гидрата).

В качестве гидратообразующего газа использовался фреон 134a и гексафторид серы. Оба газа имеют массу преимуществ. Первое и самое основное – они могут образовывать гидрат при очень низких избыточных давлениях, также он имеет относительно небольшие давления насыщения, что позволяет существенно сократить стоимость производственных установок. Второе – при атмосферном давлении газовый гидрат этих газов стабилен при положительных температурах, что позволяет совершать над готовыми образцами различные манипуляции: отбор, промывка, отжим и т.д. Третье – они низкорастворимы в воде, что минимизирует потери газа при потоковом получении.

*Экспериментальные исследования проводились в рамках РНФ (проект № 22-79-10330),  
<https://rscf.ru/project/22-79-10330/>.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО НЕСМЕШИВАЮЩЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНОГО УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА

Новоселов К.В.

Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Многофазные течения в пористых средах – актуальная тема в контексте добычи углеводородов. Традиционные методы CFD, такие как volume-of-fluid (VOF) и метод level set (LS), моделируют многофазные потоки путем решения макроскопических уравнений Навье-Стокса вместе с надлежащим методом отслеживания межфазного интерфейса. Использовать методы VOF и LS для моделирования многофазных течений в пористых средах в масштабе пор сложно из-за трудностей моделирования и отслеживания динамических границ раздела фаз. Кроме того, у них возникают трудности с учетом межфазных эффектов жидкость-твердое тело (например, смачиваемость поверхности) в сложных пористых структурах, которые являются следствием микроскопических взаимодействий жидкость-твердое тело.

В отличие от традиционных методов CFD, которые основаны на решении макроскопических переменных, таких как скорость, давление и плотность, метод решеточного уравнения Больцмана (LBM) представляет собой мезоскопический метод, который отслеживает эволюцию функции распределения частиц по скоростям в пространстве и построен на основе мезоскопических кинетических уравнений. Макроскопические переменные получаются путем интегрирования по моментам функции распределения частиц. Даже вскоре после своего появления, более 35 лет назад [1], LBM стал привлекательной альтернативой прямому численному решению уравнения Стокса для однофазных течений в пористых средах и сложной геометрии в целом. В LBM для моделирования многофазного потока граница раздела жидкость-жидкость представляет собой не бесконечно тонкую поверхность, а размытую границу раздела конечной ширины. Эффективное скольжение линии контакта вызвано относительной диффузией двух компонентов жидкости вблизи линии контакта. Кроме того, в отличие от традиционных методов CFD, в методах диффузного интерфейса нет необходимости использовать сложные методы отслеживания/захвата/восстановления интерфейса. Скорее, формирование, деформация и перенос интерфейса возникают в результате моделирования (метод сквозного счета).

Работа посвящена построению модели многофазного несмешивающегося течения в пористой среде с помощью решеточного уравнения Больцмана методом цветного градиента [2]. Моделирование течений проводилось на двумерной D2Q9 и трехмерной D3Q19 решетках.

Модель была верифицирована на выполнение закона Лапласа в двухфазной среде в двумерной и трехмерной постановках. Также было проверено выполнение закона Лапласа в трехфазной среде на примере различных конфигураций жидких линз в двумерной и трехмерной постановках.

Удалось реализовать возможность задавать различные углы смачивания флюида с твердой поверхностью. Были проведены численные эксперименты и получены различные конфигурации капель на твердой подложке в зависимости от заданных краевых углов смачивания.

В модели было реализовано граничное условие на перепад давления методом Zou He [3]. После этого было проведено сравнение численных расчетов динамики движения границы фронта при двухфазном вытеснении в прямом канале с аналитическими результатами.

Удалось загрузить в расчетный модуль цифровую модель зерна и провести расчет трехфазного вытеснения в поровом пространстве образца (рис. 1).

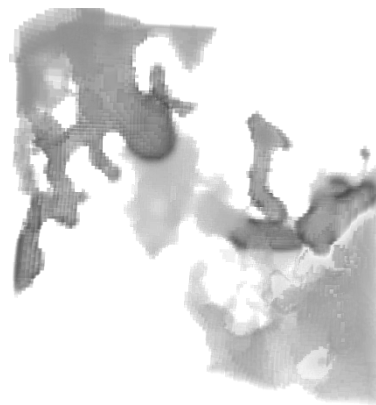


Рис. 1. Трехфазное вытеснение в поровом пространстве.

Работа выполнялась при поддержке Научно-технического центра Газпромнефти.

### Список литературы

1. McNamara G.R., Zanetti G. Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1988. Vol. 61, № 20. P. 2332–2335.
2. Leclaire S., Reggio M., Trépanier J.-Y. Progress and investigation on lattice Boltzmann modeling of multiple immiscible fluids or components with variable density and viscosity ratios // Journal of Computational Physics. 2013. Vol. 246. P. 318–342.
3. Zou Q., He X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model // Physics of Fluids. 1997. Vol. 9, № 6. P. 1591–1598.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА

Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Евдокименко И.А., Филиппский К.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Движение газовых пузырьков при обтекании двухфазным потоком поперечно расположенного одиночного цилиндра тела или пакета труб часто встречается во многих промышленных приложениях, связанных с тепломассопереносом. Присутствие дисперсной фазы ограничивает применение хорошо известных для однофазного течения методов расчета гидродинамики и теплообмена. Прежде всего это связано с особенностями взаимодействия пузырька с поверхностью обтекаемого тела. Отличительной особенностью двухфазных течений вокруг обтекаемых тел является образование области чистой жидкости, расположенной непосредственно за обтекаемым телом. Кроме того, в работах [1–3] было обнаружено, что отрыв потока вызывает значительное уменьшение сопротивления и изменение статического давления в области течения вокруг тела. Газожидкостное течение вокруг цилиндра неравномерное и характеризуется образованием вихрей. Размер и частота образования вихрей могут изменяться в зависимости от размера пузырьков и размера обтекаемого тела.

В данной работе экспериментально исследована эволюция пузырьков газа в двухфазном потоке, обтекающем горизонтально установленный цилиндрический стержень и систему стержней. Рассматривается также движения пузырьков газа при пузырьковом течении в канале с вертикально расположенным цилиндром.

В основу методики экспериментального исследования пузырьковых течений двухфазных сред был положен метод фиксации движения среды на цифровую скоростную камеру с последующим распознаванием объектов изображения и их цифровой обработки. Как результат была получена информация о линейной скорости и форме пузырьков, распределения газосодержания, так и выстроены двух и трехмерные траектории движения каждого из пузырьков в пузырьковой струе с определением осредненных и пульсационных значений скорости, 2D и 3D компонент вектора скорости, восстановлен вектор скорости.

Выполнены исследования взаимодействия пузырьков газа с поверхностью обтекаемого цилиндра, изменения структуры течения, распределения газосодержания, дисперсности газовой фазы, захвату пузырьков во вторичные течения, формируемые в канале. Показано, что отличительной особенностью двухфазного течения в канале с горизонтально установленным цилиндром является образование за ним области течения с дисперсностью газовой фазы отличающейся от дисперсности набегающего на тело двухфазного потока. Параметры течения, частота образования вихрей изменяются в зависимости от размера пузырьков и размера обтекаемого тела.

В докладе обсуждается также изменение размера и концентрации пузырьков газа в канале с цилиндрическим телом при различных параметрах двухфазного течения.

Особое внимание в экспериментальном исследовании было уделено взаимодействию пузырька с поверхностью цилиндрического тела, формированию течения за телом, дроблению и захвату вторичным течением дочерних пузырьков газа. Высокоскоростные изображения двухфазного потока использовались для определения параметров течения в области вихревого следа, возникающего за цилиндром и условий эволюции пузырьков газа в нем. Исследования были проведены при различных числах Рейнольдса, размерах пузырьков и расхода газа.

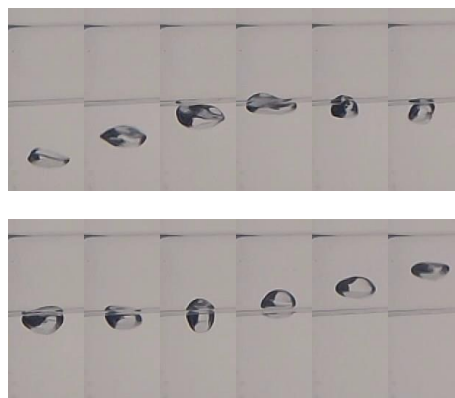


Рис. 1. Взаимодействие одиночного пузырька газа с горизонтальным цилиндром, задержка между кадрами 1/64 сек.

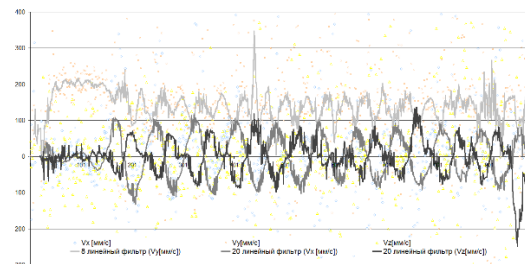


Рис. 2. Пример изменение компонент вектора скорости газового пузырька.

Полученные данные расширяют верификационную базу программных средств расчета двухфазных течений.

### Список литературы

- Inoue, A., Kozawa, Y., Yokosawa, M., Aoki, S., 1986. Studies on two-phase cross flow. Part I: flow characteristics around a cylinder. *Int. J. Multiph. Flow* 12, 149–167.
- Joo, Y., Dhir, V.K., 1994. An experimental study of drag on a single tube and on a tube in an array under two-phase cross flow. *Int. J. Multiph. Flow* 20, 1009–1019.
- Murai, Y., Sasaki, T., Ishikawa, M., Yamamoto, F., 2005. Bubble-driven convection around cylinders confined in a channel. *J. Fluids Eng.* 127, 117–123.

## ДВИЖЕНИЕ УПРУГОЙ КАПЛИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ В ТОНКОЙ ПЛАСТИНЕ

Руденко А.О., Рожков А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
пр. Вернадского 101, корп. 1, Москва, 119526, Россия

Исследованы удары капель воды и полимерных растворов по тонкой пластине с одиночным круглым отверстием [1] (рис. 1). Моделируется защита от инфекции, передаваемой воздушно-капельным путём [2, 3] с помощью медицинской маски. В экспериментах диаметры капель и отверстия приблизительно совпадали и имели диаметры 3 мм. Капли падали с высоты  $h_0 = 5, 10$  и 20 мм и достигали скорости перед ударом  $v_i = 0.31, 0.44$  и 0.63 м/с. Капли пролетали через отверстие, слегка касаясь его краёв. Методами высокоскоростной фотографии зафиксированы различные стадии столкновения капли с препятствием.

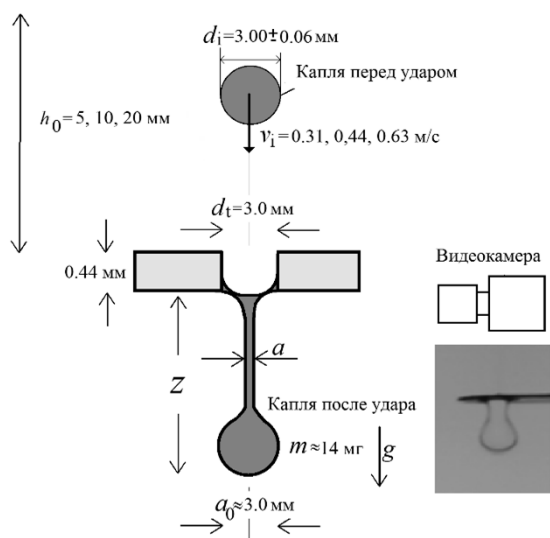


Рис. 1. Экспериментальная конфигурация.

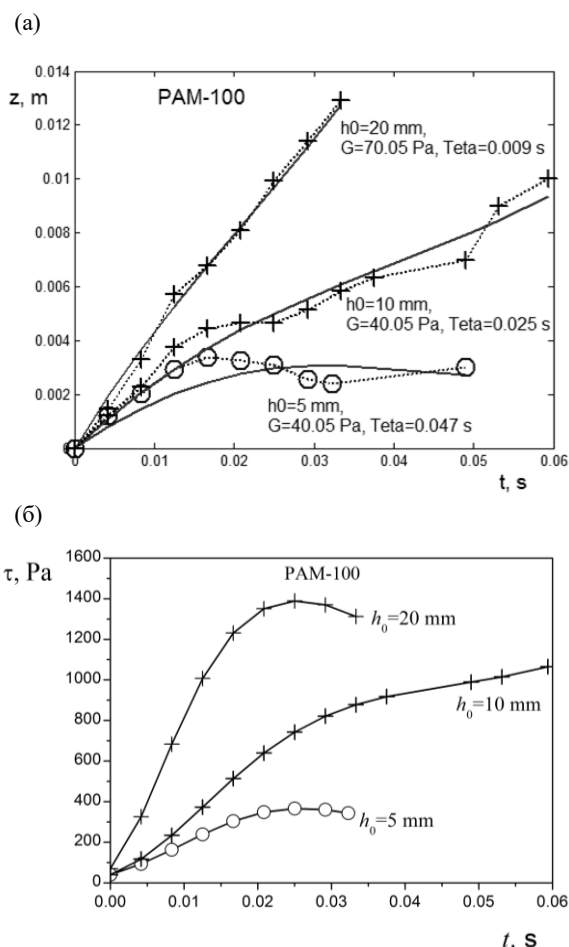
Исследованы вода и растворы полиакриламида молекулярной массы 11 млн. и концентраций 100 и 1000 млн-1 (ПАА-100 и ПАА-1к). Данные растворы моделируют реологию ротовой жидкости [3]. Обнаружено, что при изученных параметрах удара наблюдается замедление струи отверстием вплоть до полной остановки полёта капли (рис. 2а).

Движение головной капли описывается балансом капиллярных сил, сил тяжести и упругих сил в рамках модели Олдройда-Б [4,5]. По сравнению со случаем метания струи [4], здесь дополнительно рассмотрены эффекты поверхностного натяжения и сил тяжести.

На рис. 2 представлены экспериментальные наблюдения, теоретические зависимости и оценки для случая полимерного раствора ПАА-100.

Крестики – описывают случай, когда капля отрывается от пластины, нолики – капля задерживается в отверстии в пластине. Реологические параметры  $G$  и  $\theta$  ( $G$  и  $Teta$  [5]) оценены путём подбора наилучшего приближения методом наименьших квадратов.

Графики показывают, что наряду с моделированием проникновения капель через медицинские маски, эксперименты по метанию капель через отверстие в пластине могут служить реологическим тестом упругих жидкостей.

Рис. 2. (а) - Длина струи (капли), как функция времени для раствора ПАА-100 (РАМ-100) для различных высот падения. (б) - Изменение упругих напряжений в струе  $\tau$ , как функция времени.

## Список литературы

1. Lorenceau E., Quere D. Drops impacting a sieve // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. V. 263. P. 244-249.
2. Bourouiba L. Fluid Dynamics of Respiratory Infectious Diseases // Annu. Rev. Biomedical Engineering. 2021. V. 23. P. 547-577.
3. Рожков А.Н. Упругость и релаксационные свойства ротовой жидкости // Российский журнал биомеханики. 2021. Т. 25. № 4. С. 393-405.
4. Базилевский А.В., Мейер Д.Д., Рожков А.Н. Динамика и разрушение импульсных микроструй полимерных жидкостей. // Известия РАН. МЖГ. 2005. № 3. С. 45-63.
5. Базилевский А.В., Рожков А.Н. Всплеск упругой жидкости – реологический тест полимерных растворов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2018. Т. 60. № 3. С. 235-248.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-19-00451).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ АВТО-ГРП

Сибин А.Н.<sup>1,2</sup>, Абдуллин Р.Ф.<sup>1,2</sup>, Байкин А.Н.<sup>1,2</sup>, Калинин С.А.<sup>3</sup>, Копейкин Р.Р.<sup>3</sup>, Дмитрачков Д.К.<sup>1,2</sup>, Головин С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Группа компаний «Газпром нефть»,  
ул. Почтамтская 3-5, Санкт-Петербург, 190000, Россия

Анализ возникновения и самопроизвольного распространения трещин гидроразрыва пласта (авто-ГРП) на нагнетательных скважинах является одной из актуальных инженерных задач при проектировании и эксплуатации системы поддержания пластового давления на месторождении. Моделирование процесса заводнения залежей с учётом эффекта авто-ГРП является сложной комплексной задачей. Физика данного процесса включает в себя взаимовлияния давления флюида, заключенного в поровом пространстве продуктивного пласта, и деформаций вмещающей ее породы. Одновременно с этим необходимо также отслеживать возможный рост трещины авто-ГРП. Помимо этого, на процесс заводнения могут влиять такие физические эффекты, как кольматация порового пространства вблизи нагнетательных скважин и трещин авто-ГРП, деформации породы, связанные с разностью пластовой температуры и температуры закачиваемой жидкости, распределение потоков жидкости по портам на горизонтальных или наклонных скважинах, многофазная фильтрация флюида.

В настоящей работе предлагается математическая модель развития трещин авто-ГРП, которая основана на решении уравнений пороупругости, двухфазной фильтрации в продуктивном пласте и переноса флюида по трещине в приближении теории смазки (уравнение Рейнольдса). В качестве основного метода для реализации численного решения был выбран метод конечных объемов, который обеспечивает консервативность разностной схемы на неструктурированных сетках. Модель развития трещины в пороупругой среде также дополняется возможностью расчета горизонтальных скважин с несколькими активными портами.

Разработан численный алгоритм для учета двухфазной фильтрации при решении сопряженной задачи пороупругости в пласте и роста трещины авто-ГРП. Исследованы две разностные схемы: неявная для давления и явная для насыщенности (IMPES), полностью неявная разностная схема. Численная реализация была верифицирована на известных решениях из литературы и путем сравнения с широко распространенным программным пакетом tНавигатор [2].

Разработан алгоритм динамической адаптации сеток с помощью платформы INMOST [3]. Для метода конечных объемов со степенями свободы, заданными в геометрических центрах ячеек и граней, предложен алгоритм переинтерполяции решений между сетками. На рисунке 1 приведен пример использования адаптивной сетки при моделировании распространения

трещины авто-ГРП. Сетка уточняется вблизи кончиков трещины. Расчет ускоряется в четыре раза без потери точности при использовании адаптивной сетки.

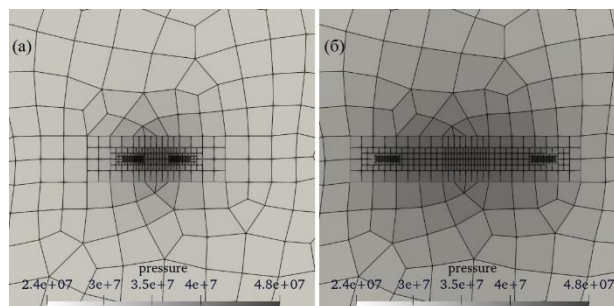


Рис. 1. Распределение давления (Па) и уточнение сетки вблизи кончиков трещины при  $t=20$  дней (а) и  $t=200$  дней (б).

Разработанный автономный расчетный модуль позволяет: анализировать сектор, включающий несколько вертикальных и горизонтальных скважин для поперечной и/или продольной системы разработки; оценить динамику фронта вытеснения с учетом роста трещин авто-ГРП; избежать неэффективной добычи из-за преждевременного обводнения добывающих скважин и выбрать оптимальный режим поддержания пластового давления с контролем длины трещин авто-ГРП.

### Список литературы

1. Golovin S.V., Baykin A.N. Influence of pore pressure on the development of a hydraulic fracture in poroelastic medium // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2018, V. 108, P. 198–208.
2. Эйдинов Д.А. tNavigator — гидродинамический симулятор нового поколения // НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ XXI ВЕК, 2015. С. 62-69
3. Parallel Finite Volume Computation on General Meshes / Y. Vassilevski, K. Terekhov, K. Nikitin, Ivan Kapurin. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 186 p.

*Работа выполнена при поддержке Передовой инженерной школы НГУ, Научно-образовательного центра «Газпромнефть-НГУ» и Научно-технического центра Газпромнефти. Вклад А.Н. Байкина также поддержан стипендией Президента РФ (грант № СП-1703.2022.1).*

Паровой взрыв – явление теплового взаимодействия при контакте горячей (расплав) и холодной (вода) жидкостей. В случае, когда паровая пленка, ограничивающая скорость теплопередачи, теряет устойчивость, взаимодействие может протекать взрывным образом. Исследование парового взрыва актуально в связи с проблемами безопасности, в особенности для оценки опасностей тяжелых аварий на ядерных реакторах [1].

Для изучения фундаментальных аспектов взаимодействия расплавов с водой часто рассматривают паровой взрыв одиночной капли в объеме холодной воды. Предложено несколько объяснений быстрой фрагментации (гидродинамический, термический механизмы). Целью данной работы является прямое численное моделирование взаимодействия капли расплава олова в воде и выявление особенностей возникающих многофазных течений.

Начальное состояние соответствует пленочному кипению на поверхности капли, инициирование осуществляется резким кратковременным импульсом давления, имитирующим волну парового взрыва или триггеринг. Изучается динамика паровой пленки, воды и жидкого расплава путем численного моделирования трехфазного взаимодействия «расплав-вода-пар». Для описания трехфазной системы используется модель VOF (Volume of Fluid), реализованная в программном комплексе OpenFOAM в виде собственного расчетного модуля fciFoam [2].

Расчеты проводились в трехмерной постановке. Изначально, расчетная область покрывается сеткой размером  $100 \times 100 \times 200$  кубических ячеек со стороной 100 мкм. Применение метода адаптивного сгущения сетки (AMR) позволило лучше разрешить межфазную границу, отслеживать мелкие капли и пузырьки, возникающие при взаимодействии, а также достичь минимального линейного размера кубической ячейки в 25 мкм. При этом общее число ячеек к концу расчетного периода превышает 10 млн. ячеек.

В работе рассматривается несколько вариантов, отличающихся начальной формой капли расплава или паровой пленки, а также параметрами инициирующего взаимодействие импульса давления.

В частности, рассматривается капля расплава диаметром 5 мм со сферической выемкой в верхней части. Температура олова 973 К, воды – 338 К, инициирующий импульс давления имеет амплитуду 10 бар и продолжительность 20 мкс. На рис. 1 представлена эволюция формы капли расплава во времени. Начальная асимметрия капли приводит к сильной фрагментации капли, возникновению тонких струек и мелких капель расплава. Под действием начальной разницы давлений паровая пленка схлопывается, далее в паровой области внутри сферической выемки возникает высокоскоростная струя, бьющая по поверхности капли (см. рис. 2), что и дает начало стремительной фрагментации капли. После второго схлопывания паровой

пленки (момент времени 1 мс), возникает вторичная водяная струя, удар которой приводит к сквозному пробиванию капли.

В расчетах получены некоторые количественные характеристики процесса. Так, в ходе взаимодействия площадь поверхности расплава увеличивается в 3 раза, а начальный объем паровой пленки – более чем в 10 раз. При этом данные характеристики связаны между собой – схлопывания паровой пленки приводят к росту скорости изменения площади поверхности расплава (см. рис. 3).

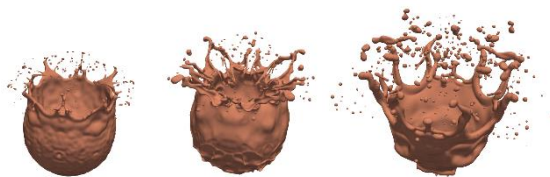


Рис. 1. Изоповерхность расплава в моменты времени  $t=0.5, 1$  и  $2.5$  мс (слева направо).



Рис. 2. Развитие взаимодействия в плоскости симметрии в моменты времени  $t=0.2, 0.5$  и  $2.5$  мс (слева направо).

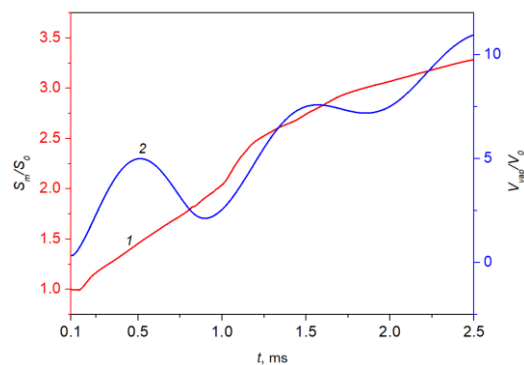


Рис. 3. Изменение относительной площади поверхности расплава (1) и относительного парового объема (2).

### Список литературы

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. М., ИПМез РАН, 2020, 276 с.
2. Yakush S.E., Sivakov N.S. Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water // Annals of Nuclear Energy. 2023. V. 185. Paper 109718.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМех РАН (номер гос. регистрации 124012500440-9).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ КАПЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Субботин С.В., Ширяева М.А., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,  
ул. Сибирская, 24, Пермь, 614990, Россия

Экспериментально исследуется осцилляционная динамика капельного включения в заполненном жидкостью канале круглого сечения. Капля полностью заполняет всю ширину канала ( $d = 6$  мм) и не смешивается с окружающей жидкостью. Для возбуждения осциллирующего движения концы канала подключены к гидравлическому насосу, прокачивающего жидкости по гармоническому закону. В качестве рабочих пар взяты водные растворы глицерина и силиконового масла различной вязкости. При этом в разных экспериментах в качестве капельного включения рассматривается как та, так и другая жидкость. Для примера на рис. 1а приведена фотография масла в воде, которое плохо смачивает стеклянные стенки канала. При инвертированном расположении жидкостей капля с боков имеет вогнутую форму и лучше смачивает стенки. В экспериментах варьируются вязкости обеих жидкостей, относительный объем включения, поверхностное натяжение.

Структура течения исследуется при помощи PIV-метода. Для компенсации оптических искажений при наблюдении сбоку канал дополнительно помещается в корректирующую прозрачную «рубашку» в виде параллелепипеда. Для создания светового ножа используется непрерывный лазер. Для визуализации движения жидкость засеивается светорассеивающими частицами из полиамида диаметром 20 мкм (см. рис. 1а).

При включении вибраций небольшой амплитуды, линии контакта капли с границами канала остаются практически неподвижными. Колебания же совершает межфазная граница, что сопровождается периодическим изменением формы капли и величины краевого угла. Обнаружено, что в результате колебаний внутри капли возникают осреднённые течения в виде тороидальных вихрей. Так, на рис. 1б показано осреднённое по периоду вибраций поле скорости в сечении, проходящем через ось симметрии канала. Вихревые структуры расположены в непосредственной близости от межфазных границ. Эксперименты показывают, что структура осреднённого течения зависит от безразмерной частоты вибраций  $\omega = \Omega d^2 / 4\nu$ , характеризующей отношение ширины канала к толщине пограничного слоя  $\delta = \sqrt{2\nu/\Omega}$ . Здесь  $\Omega$  – циклическая частота,  $\nu$  – кинематическая вязкость капельного включения. Учитывая, что характерный поперечный размер составляет несколько миллиметров, в большинстве экспериментах система находится в области низких безразмерных частот  $\omega < 50$ . Полученные результаты находятся в хорошем согласии с работами [1, 2], где исследовались скорость и структура вибрационных потоков в модели осциллирующей капли, покрытой адсорбционной пленкой. С увеличением амплитуды колебаний  $b$  скорость осреднённого движения жидкости увеличивается по закону  $V \sim b^2$ . При

чем, при экстремально больших амплитудах наблюдается отрыв линии контакта от границ полости. В этом случае масляная капля совершает поршневые колебания вдоль оси канала, практически не меняя со временем свою форму.

Полученные результаты играют важную роль для разработки технологий интенсификации жидкостной экстракции. Это связано с тем, что вибрационные потоки способствуют быстрой доставке вещества из объема капли к межфазной границе, что значительно увеличивает темп массопереноса.

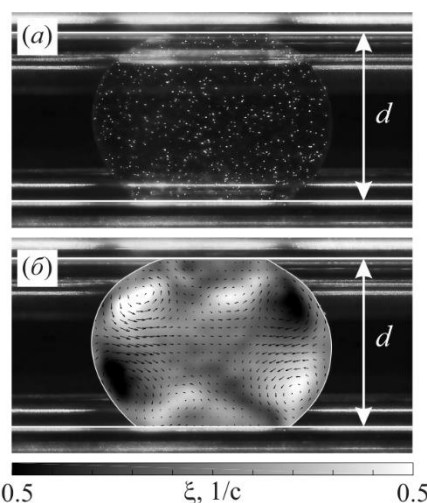


Рис. 1. Фотография капли масла ПМС-100, засеянной PIV-частицами (а), и структура осреднённого течения при безразмерной частоте вибраций  $\omega = 1.13$  (б), оттенками серого показана завихренность.

### Список литературы

1. Козлов В.Г., Сабиров Р.Р., Субботин С.В. Осредненные течения в осциллирующей сфероидальной полости с эластичной стенкой // Изв. РАН. МЖГ. 2018. №2. С. 16–26 (2018).
2. Kozlov V., Subbotin S., Sabirov R. Steady flows in deformed elastic sphere subject to rotational oscillations // Phys. Fluids. 2018. V. 30, N 9. P. 093606.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-11-00242).

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ С ВАРЬИРОВАНИЕМ ВОЛАТИЛЬНОГО КОМПОНЕНТА

Антонов Д.В., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

В последние десятилетия микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель привлекает все большее внимание ученых, исследующих явления с многокомпонентными и многофазными системами и разрабатывающих новые материалы и технологии [1, 2].

Этот процесс представляет разрушение капель, содержащих в составе две и более жидкостей, при воздействии внешней тепловой энергии. Соответствующая фрагментация приводит к образованию микро- и даже наночастиц. Важным элементом в этом процессе является летучий компонент (чаще вода), который определяет критические условия и характеристики фрагментации. Достижение метастабильного состояния именно этого компонента инициирует зарождение пузырьков пара, приводящее далее к разрушению капли. Вторичное измельчение капель жидкостей за счет микро-взрывных эффектов исследуется экспериментально [3, 4] и теоретически [5]. Наиболее часто применяются два вида исходных капель: неперемешанные и стабилизированные эмульсии с разной структурой (в том числе микро, нано) [4]. Механизм микро-взрыва довольно хорошо изучен. Стадии могут отличаться при варьировании состава исходных капель, но механизм остается единым. Он состоит в перегреве менее летучего компонента до состояния кипения [5]. Вследствие его вскипания и достижения метастабильного состояния происходит зарождение паровых пузырьков в объеме капли. За счет роста давления размеры пузырьков увеличиваются и при достижении критических значений способствуют распаду капель с формированием мелкодисперсного спрея [4].

Цель настоящей работы – определение отличий режимов и характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с варьированием менее летучего компонента, выделение наиболее рационального состава с учетом мультикритериального анализа.

По результатам экспериментальных исследований рассчитаны интегральные показатели эффективности для составов с варьированием летучего компонента. В настоящем исследовании использовался подход многокритериального анализа. Для многофакторной оценки эффективности использования различных летучих компонентов использован метод взвешенных сумм, характеризующийся сравнительной простотой вычислений и процедурой нормирования критериев. Нормированное значение критерия оценки является безразмерным и не превышает значения 1. Сумма всех весовых коэффициентов равна 1. Наилучшим считается тот вариант (летучий компонент), у которого взвешенная сумма критериев характеризуется наибольшим значением из выборки всех возможных вариантов.

В качестве основных параметров оценки выбраны время задержки распада ( $\tau_d$ ), продолжительность

фрагментации ( $\tau_d$ ), а также отношения площадей поверхности жидкости до и после распада капель ( $S_1/S_0$ ). Для показателей времени задержки распада, продолжительности фрагментации лучшим является наименьшее значение. Для отношения площадей поверхности жидкости до и после распада капель лучшим является наибольшее значение. Рис. 1 иллюстрирует сравнение значения показателя эффективности варьирования летучих компонентов при температуре газовой среды около 800 К.

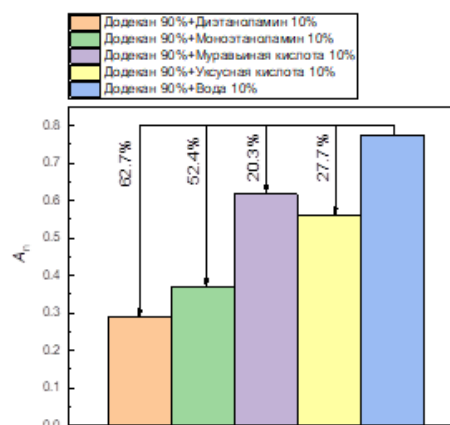


Рис. 1 – Сравнение интегральных показателей эффективности варьирования летучего компонента при температуре газовой среды около 800 К.

### Список литературы

1. Avulapati M.M., Ganippa L.C., Xia J., Megaritis A. Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends // Fuel. 2016. Vol. 166. P. 59-66.
2. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Rashid A., Aziz B.A. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 131. P. 815-821.
3. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Verzhinina K.Y. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 96. P. 534-546.
4. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 142. – P. 30-41.
5. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 161. P. 120238.

Работа выполнена при поддержке Национального исследовательского Томского политехнического университета (Приоритет-2030-ЭБ-018-202-2024).



## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ДИНАМИКУ ДВИЖЕНИЯ КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ДРУГОЙ НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
пр. Ленина 36, Томск, 634050, Россия

Движение капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества (ПАВ) находит применение в нефтегазовой, пищевой, химической, косметической промышленности, в фармацевтической индустрии, в биотехнологиях, а также в производстве лекарственных препаратов [1, 2]. В частности, в нефтяной промышленности эмульгаторы и ПАВ используются для стабилизации в нефтепереработке. В химической промышленности ПАВ применяются для регулирования процессов смешивания и реакции различных жидкостей. Для анализа дисперсной двухфазной системы в стационарном режиме для всех перечисленных практических приложений необходимо знать величину относительной скорости (или коэффициента сопротивления) между жидкими фазами.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования динамики всплытия кластера монодисперсных капель базового изопарафинового масла в дистиллированной воде и водно-глицериновом растворе в присутствии и в отсутствие ПАВ при числах Рейнольдса  $Re=(0.01 \div 1)$  в режиме «частично продуваемого» облака, когда поток дисперсионной среды частично обтекает кластер капель и частично проходит сквозь нее [3]. В работе число Рейнольдса  $Re$  вычислялось по скорости и диаметру отдельной капли, входящей в кластер, поскольку экспериментально обнаружено, что скорость капель, входящих в кластер, равна скорости движения центра масс кластера. Экспериментальные исследования проведены для двух типов ПАВ: анионного (лаурилсульфат натрия) и неионогенного (синтанол АЛМ-10, диламид). Во всех экспериментах ПАВ вводилось в дисперсионную (внешнюю) жидкость.

В проведенных экспериментах диаметр капель, входящих в кластер, варьировался в диапазоне  $d=(2.7 \div 5.0)$  мм, начальная объемная концентрация кластера капель –  $CV=5 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-2}$ , начальный диаметр кластера капель –  $D=(5 \div 10)$  см, равновесный коэффициент межфазного натяжения –  $\sigma=(2.2 \div 20.2)$  мН/м

Проанализирована общая картина всплытия кластера капель при различных режимах обтекания (числах Рейнольдса). Анализ полученных видеоклипов показал, что наблюдаются два типа движения капель в кластере: контактное (наличие столкновений между каплями в кластере) и бесконтактное (отсутствие столкновений между каплями в кластере) взаимодействия.

На основе экспериментальных данных, полученных в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=(0.01 \div 1)$ , найдена эмпирическая зависимость для коэффициента сопротивления компактного кластера монодисперсных капель, движущихся в другой несмешивающейся

жидкости в присутствии ПАВ при контактном и бесконтактном взаимодействии капель  $C_D = 16k(1 - C_V)/Re^a$  (где  $k, a$  – эмпирические коэффициенты).

В экспериментах показано, что качественно и количественно динамика кластера монодисперсных капель в присутствии анионного ПАВ совпадает с закономерностями движения кластера капель при наличии неионогенного ПАВ, то есть не выявлено влияния типа ПАВ на динамику всплытия группы монодисперсных капель.

Экспериментально обнаружено, что при введении ПАВ скорость кластера капель уменьшается. В области чисел Рейнольдса  $Re=(0.01 \div 1)$  для диапазона изменения коэффициента межфазного натяжения  $\sigma=(6.2 \div 12.1)$  мН/м обнаружено влияние концентрации ПАВ на скорость кластера капель – по мере увеличения концентрации ПАВ скорость кластера уменьшается. При этом динамика всплытия кластера монодисперсных капель в присутствии ПАВ аналогична закономерностям всплытия группы монодисперсных газовых пузырьков при наличии ПАВ на свободной поверхности раздела фаз [4]. При движении кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости, также как для процесса всплытия кластера пузырьков, большое влияние на характеристики исследуемого процесса оказывает время достижения равновесного межфазного натяжения на межфазной границе. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что для капель меньшего размера быстрее достигается равновесное межфазное натяжение в процессе движения и наблюдается наибольшее уменьшение скорости, чем для капель большего размера.

### Список литературы

1. Martinez-Palou R., Aburto J. Ionic liquids as surfactants – applications as demulsifiers of petroleum emulsions // InTech open science. 2015. Chapter 11. P. 305-326.
2. Singh A., Hamme J.D. Van, Ward O.P. Surfactants in microbiology and biotechnology: Part 2. Application aspects// Biotechnology Advances. 2007. N 25. P. 99-121.
3. Механика аэрозолей / Фукс Н.А. М.: Изд-во Ан СССР, 1955. 531с.
4. Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А. Влияние природы поверхностно-активного вещества на динамику всплытия одиночного пузырька и группы пузырьков в дистиллированной воде // VIII Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика»: тезисы докладов. (4-10 сентября 2023г), г. Махачкала. С. 63.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-79-10028,  
<https://rscf.ru/project/22-79-10028/>.*

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА СМЕСИ ЧЕРЕЗ ПРЯМОУГОЛЬНУЮ ОБЛАСТЬ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ЗАКУПОРКИ

Хабин М.Р., Марьшев Б.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Академика Королёва 1, Пермь, 614013, Россия

Исследуется течение конечного объема смеси через массив пористой среды при постоянном перепаде давления. Перепад давления может изменяться гармонически, таким образом происходит модуляция внешнего фильтрационного потока.

Рассматривается двумерная задача о транспорте растворенного вещества в прямоугольной области пористой среды (см.рис.1). Предполагается, что вертикальный размер области в 10 раз меньше горизонтального. Такой транспорт описывается в рамках нелинейной МММ модели [1] учитывающей конечность объема примеси, который может осесть на стенках пор. Фильтрационный процесс описывается в приближении Дарси-Буссинеска [2]. На горизонтальных границах области ставятся условия непротекания и непроницаемости, на выходе – условие свободного вытекания.

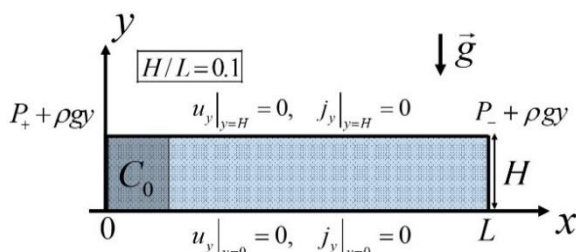


Рис. 1. Постановка задачи.

Поставленная задача математически выражается в следующей безразмерной форме в приближении слабой закупорки ( $\zeta \ll 1$ ) [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( c + \frac{\zeta}{C_0} q \right) &= \Delta c - \vec{u} \cdot \nabla c, \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= a(1-q)c - bq, \\ \kappa(\phi) &= \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}, \quad \phi = \phi_0(1 - \zeta q), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\vec{u} = -\kappa(\phi)(\text{Re}(t)\nabla p + \text{Re}c\vec{k}), \quad \text{div } \vec{u} = 0,$$

$$\text{Re}(t) = \text{Re} + A \sin \omega t.$$

Здесь  $c, q$  – концентрация мобильной и немобильной компоненты соответственно,  $p$  – давление. Также уравнения (1) содержат ряд безразмерных параметров:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\kappa_0(P_+ - P_-)}{\eta D \phi_0}, \quad \text{Rp} = \frac{\kappa_0 \rho_0 g \beta_c C_0 L}{\eta D \phi_0}, \\ \zeta &= \frac{Q_0}{\phi_0}, \quad a = \alpha C_0 \frac{L^2}{D}, \quad b = \alpha K_d \frac{L^2}{D}. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\kappa, \phi$  – проницаемость и текущая пористость среды соответственно,  $\phi_0$  – исходная пористость,  $a, b$  – коэффициенты адсорбции и десорбции,  $\rho$  – плотность несущей жидкости,  $\beta_c$  – коэффициент концентрационного расширения,  $g$  – ускорение свободного падения.  $\eta$  – динамическая вязкость,  $\alpha, K_d$  – коэффициенты переноса и распределения примеси,  $D$  – коэффициент диффузии,  $Q_0$  – предельное значение немобильной концентрации,  $C_0$  – концентрация примеси в про-

качиваемого объеме смеси,  $\text{Re}$  – число Пекле, отвечающее горизонтальному фильтрационному потоку,  $\text{Rp}$  – число Релея-Дарси в системе характеризует конвективное движение.

Двумерная задача о течении конечного объема смеси через прямоугольную область пористой среды решается численно методом конечных разностей. Получены поля концентрации, давления и функции тока в различные моменты времени. Построены кривые концентрации и расхода на выходе из рабочей области. Наблюдается характерное снижение расхода, в момент, когда пик концентрационного импульса доходит до выхода из рабочей области.

Проанализировано влияние амплитуды и частоты модуляции на время выхода примеси из рабочей области. Показано наличие «резонансных» частот, значительно снижающих время выхода, то есть увеличивающих эффективность выноса смеси из рабочей области. Рост амплитуды снижает это время тем интенсивнее чем частота ближе к «резонансной».

### Список литературы

1. P. Gouze, T. Le Borgne, R. Leprovost, G. Lods, T. Poidras, P. Pezard Non-Fickian dispersion in porous media: 1. Multiscale measurements using single-well injection withdrawal tracer tests //Water Resources Research. 2008. V. 44. N. 6., W06426.
2. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. New York: springer, 2006. P.640.
3. Хабин М.Р., Марьшев Б.С. Идентификация параметров транспорта примеси через пористую среду с учётом закупорки// Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2021., № 3. С. 44–55.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 20-11-20125).

## УПРАВЛЕНИЕ КРУПНЫМИ ВОЛНАМИ НА СТЕКАЮЩИХ И ОБДУВАЕМЫХ ГАЗОМ ПЛЕНКАХ ЖИДКОСТИ ВДАЛИ ОТ ВХОДА В КАНАЛ

Черданцев А.В., Исаенков С.В., Маркович Д.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Управление волновым течением жидких пленок путем наложения пульсаций расхода на входе в канал применяется в течение долгого времени, начиная с пионерской работы [1]. Наложение пульсаций заданной частоты позволяет облегчить исследование характеристик волн в зависимости от частоты следования [2], включая получение дисперсионных соотношений в ходе эксперимента [3]. Помимо научного интереса, метод может использоваться для оптимизации тепло-массообмена в пленочных аппаратах в различных отраслях промышленности.

Метод хорошо зарекомендовал себя при работе с тонкими пленками жидкости (числа Рейнольдса жидкости порядка 10) в условиях слабого обдува газом (скорости обдува до 10 м/с), однако его применимость в условиях дисперсно-кольцевого течения с высокими расходами жидкой и газовой фазы до недавнего времени не была представлена в литературе. В работе [4] было проведено исследование развития искусственных возмущений дисперсно-кольцевого течения на начальном участке длиной 47 см. Пространственно-временные записи толщины пленки жидкости были получены методом лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ) [5].

Было показано, что управление характеристиками волн возмущения возможно в сравнительно узком диапазоне частот, близком к частоте волн возмущения без наложения пульсаций расхода вдали от входа в канал. В этом диапазоне наложение пульсаций приводит к быстрой регуляризации волн возмущения и стабилизации их характеристик на всей длине рабочей области. В отсутствие газового потока высокочастотные пульсации создают регулярные волны заданной частоты, однако их регулярность разрушается на первых 15-20 см от входа в канал. Целью данной работы является выяснение устойчивости регулярных волн возмущения при сильном обдуве на больших расстояниях от входа в канал, а также определение возможностей управления крупными волнами в отсутствие обдува.

Эксперименты проведены в вертикальной трубе с внутренним диаметром 20 мм на расстояниях 145 - 180 см от входа в канал при помощи ЛИФ-метода в диапазоне плотностей орошения от 1 до 4 см<sup>2</sup>/с и средне-расходных скоростей газа от 0 до 45 м/с. Гармонические пульсации расхода жидкости на входе в канал создавались колебаниями мембраны, приводимой в движение сердечником соленоида. Система позволяла варьировать частоту и амплитуду колебаний.

Было показано, что в пределах диапазона восприимчивости волны возмущения сохраняют регулярность на больших расстояниях от входа. Сохранение регулярности легко определяется по наличию выраженного пика во временном спектре сигнала на частоте наложенных колебаний (рисунок 1а). В отсутствие газового потока создание крупных волн с устойчивой регулярностью возможно в диапазоне малых

частот (рисунок 1б), причем этот диапазон расширяется с ростом расхода жидкости. Поверхность крупных волн на толстых пленках жидкости, стекающих в отсутствие газового потока, покрыта мелкомасштабными волнами, однако, в отличие от волн возмущения, скорость мелких волн не превышает скорость несущей их крупной волны.

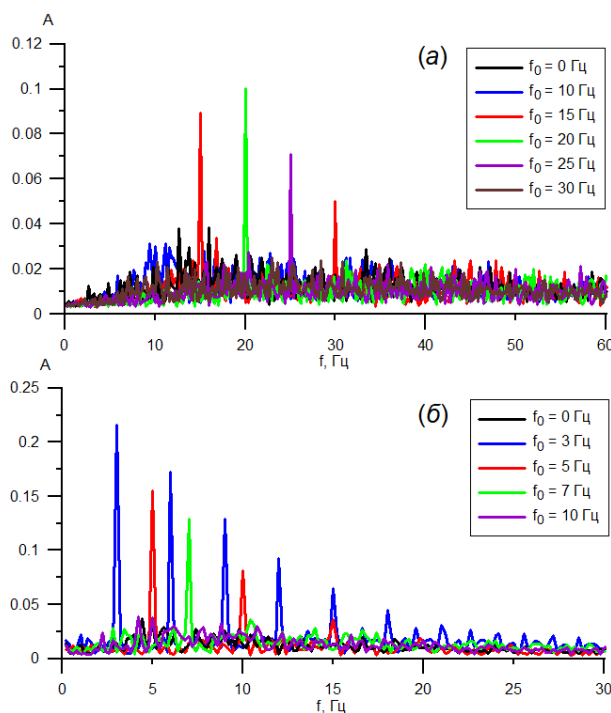


Рис. 1. Усредненные по длине области измерений временные спектры сигнала при различных частотах возбуждения. Плотность орошения 3 см<sup>2</sup>/с. (а)  $V_G=0$  м/с; (б)  $V_G=30$  м/с.

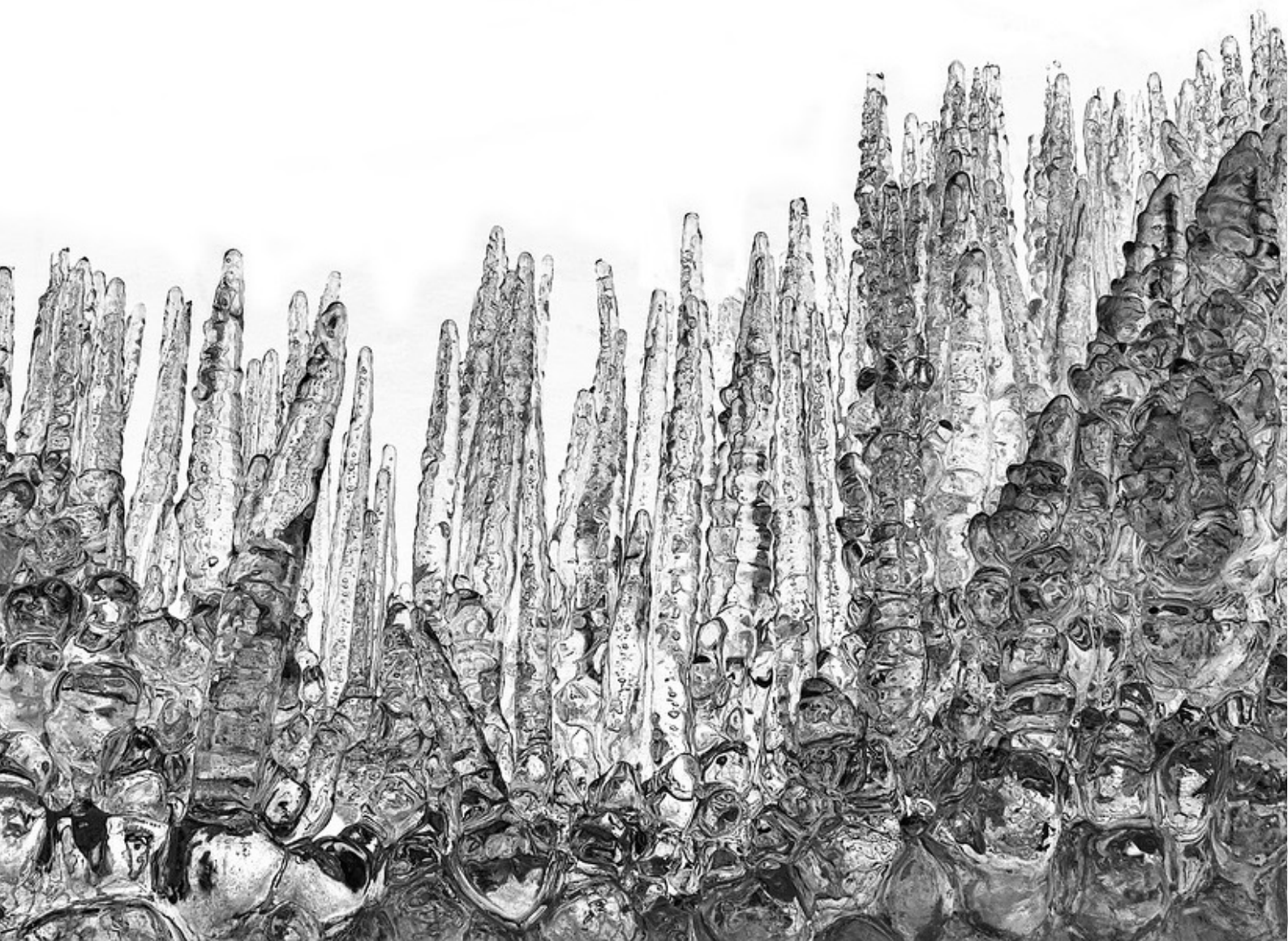
### Список литературы

- Капица П.Л., Капица С.П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. III. Опытное изучение волнового режима течения. ЖЭТФ, 1949, 19(2), 105-120.
- Charogiannis A., An J. S., Markides C. N. A simultaneous planar laser-induced fluorescence, particle image velocimetry and particle tracking velocimetry technique for the investigation of thin liquid-film flows. Exp. Therm. Fluid Sci., 2015, 68, 516-536.
- Alekseenko S.V., Aktershev S.P., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M. Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream. Int. J. Multiph. Flow, 2009, 35(7), 617-627.
- Cherdantsev A.V., Isaenkov S.V., Cherdantsev M.V., Markovich D.M. The effect of high-frequency oscillations on the disturbance waves in annular flow. Int. J. Multiph. Flow, 2021, 143, 103754.
- Cherdantsev A., Bobylev A., Guzanov V., Kvon A., Kharlamov S. Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview. Int. J. Multiph. Flow, 2023, 168, 104570.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 19-79-30075).



СЕКЦИЯ 3  
Фазовые переходы





## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСИЛЕНИЯ РАСТВОРЕНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ СУПЕРГИДРОФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИНАМИКУ ВСКИПАНИЯ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ ВОДЫ

Васильев М.М.<sup>1,2</sup>, Родионов А.А.<sup>1</sup>, Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>, Старинская Е.М.<sup>1,2</sup>, Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Процесс взаимодействия капли с нагретой поверхностью представляет собой ключевое явление в спрейном охлаждении [1,2], способное отводить значительный тепловой поток и обладающее большим потенциалом для применения в охлаждении электронных устройств [3]. Динамика взаимодействия капель с нагретой поверхностью является сложным процессом, зависящим от множества параметров, включая условия окружающей среды, характеристики капли и поверхности, такие как шероховатость, микро- и наноструктура [4,5], а также свойства смачиваемости [6].

В данной работе исследовано влияние свойств смачивания, а также микро- и наноструктуры на динамику взаимодействия капли воды с поверхностью при различных температурах выше и ниже критической точки (точки Лейденфроста). В рамках экспериментов использовались необработанный кремний (Si) и четыре супергидрофильные поверхности с различной морфологией: кремний с оксидом цинка (Si+ZnO), лазерно-текстурированный кремний с различной морфологией (BlackSi, GraySi), лазерно-текстурированный кремний с оксидом цинка (BlackSi+ZnO). На рис. 1 представлена динамика взаимодействия капли воды с поверхностью BlackSi+ZnO при различных температурах. В зависимости от температуры наблюдаются различные режимы. При  $T = 206\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  формируется струя воды разной высоты, направленная вверх, вследствие испарения и повышения давления под каплей. При  $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается формирование более высокой струи, что свидетельствует о более интенсивном испарении и высоком давлении под каплей. При  $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$  капля отпрыгивает сплошной пленкой. Таким образом, экспериментальные данные показывают, что температурные условия существенно влияют на динамику взаимодействия капель с микро- и наноструктурированными поверхностями. Получена карта режимов взаимодействия и кипения капель для каждой поверхности в диапазоне температур от комнатной температуры до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  и чисел  $We$  от 1 до 32. Результаты исследования показали, что микро- и наноструктура поверхности, а также ее свойства смачиваемости значительно влияют на режимы удара и кипения капель, что имеет важное значение для разработки эффективных методов теплообмена.

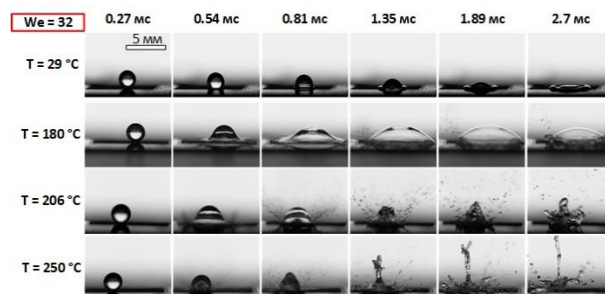


Рис. 1. Динамика взаимодействия капли воды с диаметром  $D_0 = 2,2\text{ мм}$  с супергидрофильной поверхностью BlackSi+ZnO для  $We = 32$ ,  $Re = 2800$  при температурах поверхности  $T = 29; 180; 206; 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Список литературы

1. Visaria M., Mudawar I. Application of two-phase spray cooling for thermal management of electronic devices //IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2009. – Т. 32. – №. 4. – С. 784-793.
2. Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. – Т. 28. – №. 4. – С. 753-767.
3. Udaya Kumar G. et al. A review on the role of laser textured surfaces on boiling heat transfer // Appl. Therm. Eng. Elsevier, 2020. Vol. 174. P. 115274.
4. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Т. 106. – С. 103-126.
5. Tran T. et al. Droplet impact on superheated micro-structured surfaces //Soft Matter. – 2013. – Т. 9. – №. 12. – С. 3272-3282.
6. Ma Q., Wu X., Li T. Droplet impact on superheated surfaces with different wettabilities //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 141. – С. 1181-1186.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 24-19-00664).*

## ДИНАМИКА РОСТА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ ПРИ ЕГО ДЕКОМПРЕССИИ: ЭФФЕКТ БАРОДИФФУЗИИ

Чернов А.А.<sup>1,2</sup>, Давыдов М.Н.<sup>1,3</sup>, Ерманиук Е.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Исследование вулканических извержений имеет давнюю историю. Основной целью работ, посвященных данной тематике, является предсказание степени потенциальной опасности тех или иных вулканов, в особенности действующих. Главной проблемой здесь является отсутствие прямых методов наблюдения за процессами, происходящими в земной коре, что делает проблематичным получение какой-либо достоверной информации о том, что происходит в канале активного вулкана при его извержении, даже при непрерывном за ним наблюдением.

Теоретическому моделированию нуклеации и роста как одиночного пузырька, так и ансамбля пузырьков в магматическом расплаве посвящено большое количество работ. И все же, одному эффекту, который при определенных условиях может оказать существенное влияние на скорость роста пузырька, большинство исследователей до сих пор не уделяли должного внимания. Это наличие бародиффузионного потока, который возникает вследствие формирования вокруг пузырька большого градиента давления, который, в свою очередь, обусловлен формированием диффузионного погранслоя. Учету данного эффекта, но только в качестве поправочного к диффузионному, посвящена недавняя работа авторов [1].

Моделирование массообменных процессов при наличии бародиффузии, однако, сопряжено с определенными трудностями. Дело в том, что бародиффузия теоретически в достаточной степени исследована только для газовых сред. Для жидких сред известно только, что, как и в газах в процессе бародиффузии тяжелые молекулы стремятся перейти в область повышенного, а легкие в область пониженного давления. Единственным способом нахождения коэффициента бародиффузии здесь остается только экспериментальный, и это является отдельной проблемой.

В работе представлена математическая модель роста газового пузырька в высоковязком газонасыщенном магматическом расплаве, подвергшемся быстрой декомпрессии. Модель включает в себя классические уравнения – уравнение импульсов и уравнение диффузии и описывает все стадии рассматриваемого процесса: от скоротечной инерционной до асимптотической диффузионной. Новизной представленной модели является учет бародиффузии, возникающей вследствие формирования в жидкости вокруг пузырька большого градиента давления, который, в свою очередь, обусловлен формированием диффузионного погранслоя. Для учета данного эффекта в уравнение диффузии было добавлено соответствующее слагаемое.

Для построенной модели в работе получено аналитическое решение задачи о росте газового пузырька в магматическом расплаве, подвергшемся быстрой декомпрессии в случае, когда бародиффузионный поток может быть не только поправочным, но и определяющим. Полученное решение позволяет определить, при каких условиях бародиффузия должна быть учтена, а когда ей можно пренебречь. Аналитическое решение основано на существовании квазистационарного состояния для процесса роста пузырька [2]. Это позволило редуцировать исходную краевую задачу с подвижной границей к решению интегро-дифференциального уравнения. Показано, что бародиффузия проявляется на начальной и переходной стадиях процесса, ее вклад увеличивается с увеличением исходной степени метастабильности. Со временем поток, обусловленный бародиффузией, уменьшается и на диффузионной стадии постепенно убывает до нулевых значений. Получены оценочные соотношения, позволяющие определить, при каких условиях и на каких временах бародиффузия должна быть учтена, а когда ей можно пренебречь.

Проведенное численное моделирование в большом диапазоне значений степени метастабильности (величины отличались на порядок) показало хорошее соответствие численных результатов аналитическим. В случае большой степени метастабильности численно показано, что на переходной стадии в течении небольшого интервала времени бародиффузионный поток становится в несколько раз больше диффузионного, также существенно увеличивается и скорость роста пузырька. В дальнейшем эффект уменьшается, рост пузырька продолжается по диффузионному закону, но радиус пузырька остается значительно больше, чем в случае без бародиффузионного эффекта.

Таким образом, неучет данного эффекта может привести к существенной ошибке как в описании эволюции одиночного пузырька в частности, так и всего процесса дегазации в целом.

### Список литературы

1. Чернов А.А., Давыдов М.Н., Лежнин С.И. Влияние бародиффузии на динамику роста газового пузырька в магматическом расплаве // *ТИА*. 2023. Т. 30, № 4. С. 763-774.
2. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Phys. Fluids*. 2014. V. 26. № 11. P. 116602.

*Работа поддержана РФФ (грант № 22-19-00092).*



## КИНЕТИКА НУКЛЕАЦИИ И РОСТА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ ПРИ ЕГО ДЕКОМПРЕССИИ С КОНЕЧНОЙ СКОРОСТЬЮ

Чернов А.А.<sup>1,2</sup>, Давыдов М.Н.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Уже несколько десятилетий внимание исследователей привлекает проблема вулканических извержений. Это связано с необходимостью определения степени потенциальной опасности того или иного вулкана (особенно для извержений катастрофического эксплозивного характера). Отсутствие прямых методов наблюдения за процессами, происходящими в канале активного вулкана, не позволяет получить необходимую информацию о характере их протекания. Современными методами диагностики можно предсказать лишь начало самого извержения, и то только по косвенным признакам. Некоторые сведения о протекающих в магме фазовых превращениях можно получить либо по структуре магматического потока на выходе из канала, либо по конечным образцам затвердевшей магмы. В связи с этим, построение моделей течения магмы в канале вулкана, а также исследование динамики различных режимов вулканических извержений методами механики многофазных сред, с целью понимания механизмов, определяющих тип и характер извержения, представляется особенно актуальным. В теоретических и экспериментальных постановках прежде всего следует обратить внимание на следующие проблемы: особенность формирования трехфазного состояния магмы при ее декомпрессии; эволюцию структуры потока при подъеме магмы по каналу вулкана; кинетику фрагментации сильно вспененной и частично закристаллизованной магмы с образованием газовзвеси; влияние реологии магмы на процесс извержения в целом. Надо отметить, что все сформулированные задачи чрезвычайно сложны для теоретического и экспериментального исследования, и представляют собой отдельные научные проблемы. В настоящей работе представлена математическая модель нуклеации и роста ансамбля газовых пузырьков в газонасыщенном магматическом расплаве, подвергшемся быстрой декомпрессии (рассматриваются случаи как мгновенной декомпрессии, так и декомпрессии с конечной скоростью). Данный процесс в значительной степени определяет тип и характер вулканического извержения.

Модель роста газового пузырька учитывает как динамические, так и диффузионные эффекты, и включает в себя известные классические уравнения - уравнение импульсов и уравнение диффузии, записываемые с учетом процесса десорбции газа на межфазной границе. Отдельное внимание уделено эффекту бародиффузии, который, как показано, может быть существенен при определенных условиях на начальной и переходной стадиях процесса (в работе [1] была сделана попытка учета данного эффекта, но только в ка-

честве поправочного к диффузионному). Найдено аналитическое решение, построение которого основано на существовании квазистационарного состояния для процесса роста пузырька. Это позволило редуцировать исходную краевую задачу с подвижной границей к решению сравнительно простого интегро-дифференциального уравнения. Полученное решение справедливо в широком диапазоне достигаемых пересыщений и на всех стадиях процесса, включая переходную, в том числе при изменяющихся внешних условиях (в работе [2] такое решение найдено для случая мгновенной декомпрессии; аналогичное решение для роста парового пузырька в перегретой жидкости можно найти в работе [3]). Получено, что длительность переходной стадии существенно зависит от скорости декомпрессии, так как на определенной стадии процесса преобладающими могут быть различные факторы, на него влияющие.

Разработанная в работе кинетическая модель нуклеации и роста ансамбля газовых пузырьков корректно учитывает изменение пересыщения магматического расплава в процессе его дегазации и влияние этого изменения на скорость процесса дегазации. Это сделано посредством выделения вокруг растущих пузырьков так называемой "запрещенных" зон, которые формируют в объеме расплава "исключенный" объем, нуклеация новых зародышей в которых подавлена (что связано с экспоненциально сильной зависимостью частоты нуклеации от пересыщения). В отличие модели, предложенной авторами ранее [4], новая модель учитывает эффект перекрытия "запрещенных" зон на поздней стадии процесса, когда объемная доля газовой фазы уже велика. Получены простые аналитические зависимости для числа образующихся пузырьков, времени стадии нуклеации и скорости изменения объемной доли газовой фазы, в зависимости от величины начальной декомпрессии.

### Список литературы

1. Чернов А.А., Давыдов М.Н., Лежнин С.И. Влияние бародиффузии на динамику роста газового пузырька в магматическом расплаве // *ТИА*. 2023. Т. 30, № 4. С. 763-774.
2. Chernov A.A. et al. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. V. 123. P. 1101-1108.
3. Chernov A.A. et al. New semi-analytical solution of the problem of vapor bubble growth in superheated liquid // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 16526.
4. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Phys. Fluids*. 2014. V. 26. № 11. P. 116602.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00092).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

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

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Для лучшего понимания физики кипения, включающей в себя взаимосвязь многочисленных эффектов, и дальнейшего приложения в космической отрасли настоящий эксперимент выполнен на Международной космической станции в период с 2019 по 2021 год [1]. Эксперимент представляет собой кипение в наиболее упрощенной его форме: рост одиночного парового пузыря на поверхности нагрева в строго контролируемых условиях. Микрогравитация увеличивает пространственное и временное разрешение задачи, что позволяет изучить быстротечные эффекты, скрывающиеся в земных условиях плавучестью, а также детально исследовать механизмы теплопередачи и динамику роста парового пузыря при кипении.

Экспериментальная ячейка заполнена диэлектрической жидкостью FC-72. Паровой пузырь инициализируется лазерным импульсом длительностью 20 мс в искусственном центре зарождения – в специальной каверне на нагревателе, через определенное время после его включения, названное временем ожидания  $t_{wait}$ . Джоулевый нагреватель толщиной 800 нм напылен на прозрачную в ик диапазоне подложку из фторида бария. Снизу поля температур нагревателя регистрируется ик камерой с частотой 240 Гц, сбоку эволюция пузыря записывается высокоскоростной черно-белой камерой с частотой 500 Гц. Установка снабжена датчиками давления и микротермопарами, что позволяет проводить эксперимент в строго контролируемых условиях. Детальное описание установки, настройки и проведения эксперимента, обработки данных скоростной черно-белой визуализации представлено в работах [1, 2].

Рассчитаны тепловые потоки с поверхности нагревателя в жидкость при различных параметрах эксперимента. Для их определения в программной среде Matlab решено трехмерное уравнение теплопроводности в подложке методом расщепления (метод дробных шагов). Вычислено количество теплоты: необходимое на образование пузыря данного объема и переносимое с различных зон. Рассмотрены следующие зоны: область контактной линии – кольцо с диаметрами  $\pm 15\%$  от диаметра контактной линии, где происходит наиболее интенсивное испарение (наблюдаются максимумы тепловых потоков); область с центра под пузырем (круг с диаметром  $-15\%$  от диаметра контактной линии); и межфазная граница жидкость-пар. Вклады испарения с исследуемых зон в рост пузыря представлены на рисунке 1.

Несмотря на то, что область контактной линии занимает меньшую площадь по сравнению с другими зонами, она вносит существенный вклад в рост пузыря. На начальных стадиях роста значительную роль играет испарение с межфазной границы жидкость-пар, поскольку пузырь еще полностью растет в слое

перегретой жидкости (по оценкам, проведенным в программе COMSOL Multiphysics, толщина перегретого слоя жидкости составляет  $\sim 0.8$  мм на момент образования пузыря при рассматриваемых параметрах эксперимента). По мере увеличения объема пузыря, когда его большая часть выходит за пределы слоя перегретой жидкости, вклад с рассматриваемой зоны уменьшается. При этом на начальных этапах роста вклад испарения с области контактной линии и с центра под пузырем может быть недооценен ввиду недостаточного разрешения ик камеры и малых диаметров контактных линий.

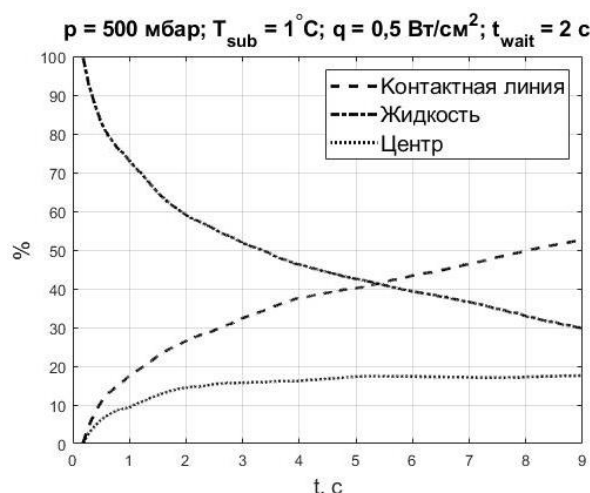


Рис. 1. Вклад в рост пузыря с различных зон. Давление жидкости  $p = 500$  мбар, температура недогрева  $T_{sub} = 1$  °C, усредненная по площади плотность теплового потока с нагревателя  $q = 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>, время предварительного нагрева жидкости  $t_{wait} = 2$  с.

Исследована динамика роста одиночного парового пузыря: определены степенные зависимости диаметра пузыря от времени, значения контактного угла при различных параметрах эксперимента ( $p$ ,  $t_{wait}$ ,  $T_{sub}$ ). Проведено сравнение экспериментальной зависимости диаметра пузыря с корреляцией Ягова и Лабунцова [3]. Получено хорошее соответствие с экспериментальными данными при малых недогревах жидкости.

### Список литературы

1. Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview //Applied thermal engineering. – 2022. – С.
2. Oikonomidou O. et al. Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis //Advances in Colloid and Interface Science. – 2022. – С. 102751.
3. Лабунцов Д. А., Ягов В. В. Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ОБЛАСТИ РАЗМЫТИЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ТИПА**

**Арушанян Р.Р., Колесников Б.П.**

ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет,  
Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия

В неоднородных 3-х мерных средах перколяционного типа с параметром  $p$ , означающим долю фазы, при достижении критической концентрации  $p = p_c$  - порога протекания, возникает бесконечный кластер (БК). Образование БК является геометрическим аналогом появления параметра порядка в теории фазовых переходов второго рода и возникновения нового состояния. Критическое поведение эффективной проводимости в области размыва фазового перехода, называемой в теории перколяции областью размзки  $\Delta$ , исследовалось в работе [1] на примере двухфазных сред ( $p_1 + p_2 = 1$ ), в которых роль поля  $h$  играет соотношение проводимостей фаз  $h = \lambda_2/\lambda_1 \leq 1$ . В результате «сшивки»  $\lambda_{e1}|_{\Delta} = \lambda_{e12}|_{\Delta}$  двух типов поведения эффективной проводимости  $-\lambda_{e1} \sim \lambda_2(p_c - p_1)^t$  при  $p_1 > p_c$  и  $\lambda_{e12} \sim \lambda_2(p_c - p_1)^{-q}$  при  $p_1 < p_c$  ( $t, q$ - критические индексы) было получена зависимость  $\Delta = h^{1/(t+q)}$ . Однако эффективные проводимости  $\lambda_{e1}$  и  $\lambda_{e12}$  представляют собой только проводимости бесконечных кластеров, соответственно, фазы-1 с  $\lambda_1$  - БК-1 (с права) и БК-12 (с лева) - «смешанного» типа, составленного из конечных кластеров фазы-1 связанных между собой через кластеры фазы-2 проводимостью  $\lambda_2$ , в тоже время эффективная проводимость системы при  $h \neq 0$  определяется всей совокупностью бесконечных и конечных кластеров двух фаз.

В настоящей работе, с целью учета вклада всех структурных составляющих среды, при моделировании поведения эффективной проводимости в области размзки производили «сшивку» двух моделей, разработанных на базе [2], описывающих поведение эффективной проводимости  $\lambda_e$  системы в целом. Первая - для случая  $p > p_c$ , когда структура представляет собой совокупность фрактального БК-1 и однородного БК-2, в также конечных кластеров обеих фаз:

$$\lambda_{e1} = \frac{\lambda_e}{\lambda_1} = P_{01} + P_{02}h + \frac{h(1-P_{01}-P_{02})^2}{h(p_1-P_{01})+(p_2-P_{02})}$$

где  $P_{01} = \lambda_{e1}/\lambda_1$ ,  $P_{02} = \lambda_{e2}/\lambda_2$ ,  $\lambda_{e2}$  - эффективная проводимость БК-2 ( $P_{0i}$  - мощность активной части БК). Вторая - при  $p < p_c$ , в которой структуру моделировали в виде совокупности БК-2, БК-12 с  $P_{012} = \lambda_{e12}/\lambda_2 = p_c^4/[h p_1^2 + (P_c^2 - p_1^2)] - p_c^2$  и конечных кластеров двух фаз:

$$\lambda_{e2} = \frac{\lambda_e}{\lambda_2} = P_{012} + P_{02} + p_1^2 + \frac{(1 - P_{02})^2}{h(p_1 - p_1^2) + (p_2 - P_{02} + p_1^2)}$$

На рис. 1 приведены зависимости сопротивлений, соответствующих проводимостям  $\lambda_{e1}$ ,  $\lambda_{e2}$  при различных значения  $h$  в масштабе  $\psi = p/2p_c$  и показаны области размзки  $\Delta = |(p \pm p_c)/p_c|$  удовлетворяющие условию  $\lambda_{e1}|_{\Delta} = \lambda_{e2}|_{\Delta}$ . Из рисунка следует, что зависимость проводимости  $\lambda_{e2}$  при  $h < 10^{-3}$  практически остается неизменной, а значения  $\Delta$  уменьшаются с уменьшением  $h$ , причем при  $h \rightarrow 0$ ,  $\Delta \rightarrow 0$ .

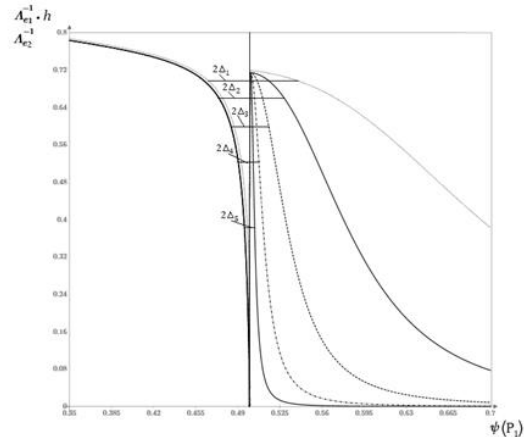


Рис. 1. Зависимости сопротивлений  $\Lambda_{e1}^{-1}h$  и  $\Lambda_{e2}^{-1}$  при  $h = 10^{-2}(\Delta_1)$ ,  $h = 10^{-3}(\Delta_2)$ ,  $h = 10^{-4}(\Delta_3)$ ,  $h = 10^{-5}(\Delta_4)$ ,  $h = 10^{-6}(\Delta_5)$ .

Сравнение полученных значений  $\Delta$  с [1] показывает увеличение расхождений между ними при  $h \rightarrow 0$  (при  $h = 10^{-2}$  оно составляет порядка 8%, при  $h = 10^{-7}$  - в три раза) за счёт учёта всех структурных составляющих среды. Результаты расчетов подтверждают адекватность предложенной модели, которая выдерживает все предельные переходы, не имеет внутренних противоречий и не противоречит физическим закономерностям.

**Список литературы**

1. Снарский А. А., Безсуднов И. В., Севрюков В. А. Процессы переноса в макроскопически неупорядоченных средах: От теории среднего поля до перколяции. М.: ЛКИ, 2007. 304 с.
2. Колесников Б.П. Эффективная проводимость перколяционной модели макроскопически неупорядоченных сред до и после порога протекания // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ: Сборник трудов, Санкт-Петербург, 17-18 мая 2017 года. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. - С. 203-209.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПИПАНИЯ ПОТОКА НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Левин А.А.<sup>1,2</sup>, Хан П.В.<sup>1,2</sup>, Сафаров А.С.<sup>1,2</sup>, Филатов И.А.<sup>3</sup>, Москвин М.К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
ул. Лермонтова, 130, Иркутск, 664033, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО,

Кронверкский пр., д. 49, лит. А., г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

Как показано в обзорных исследованиях [1–3], интенсификация теплообмена при поверхностном кипении может достигаться как за счет активного воздействия в окрестности места реализации фазовых переходов – паровых пузырьков, так и за счет воздействия пассивного типа: изменяя локальную или глобальную смачиваемость, а также микрогеометрию поверхности и создавая тем самым особые условия для микроконвекции, роста и отрыва паровых пузырьков. Анализ имеющихся наблюдений свидетельствует о большом потенциале пассивных типов управления протекающими на микромасштабе процессами при пузырьковом кипении. Теоретическое описание наступления кризиса кипения в подобных системах довольно затруднительно, в том числе из-за сложного характера возникающих условий для эффективного управления движением генерируемого пара и недогретой жидкости. При этом подавляющее число экспериментов производится в условиях стационарных или близких к таковым.

В рамках представляемого доклада исследуются влияние нестационарного характера тепловыделения на динамику вскипания и ключевые характеристики кипения на модифицированной поверхности. Эксперименты осуществлялись на установке ЦКП «Высокотемпературный контур». Рабочий участок представляет собой вертикальный канал длиной 120 мм с квадратным сечением со стороной 18 мм, внутри которого расположен нагреватель в виде стальной трубки марки 12X18Н10Т с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм. В канал поступает вода при давлении 0,29 МПа с начальной температурой ниже температуры насыщения на  $\Delta T_{\text{sub}}=20..130$  К и средней по сечению скоростью 0,52 м/с. Динамика паровых пузырьков на поверхности нагревателя записывалась на скоростную видеокамеру Phantom v2012 с частотой 180000 кадров/сек, пространственным разрешением 5,5 мкм на пиксель и размером кадра 256×256 пикселей. Скорость роста температуры нагревателя составляла в различных опытах от 400 до 19000 К/с. Лазерная обработка поверхности осуществлялась при помощи системы МиниМаркер-2 (ООО «Лазерный Центр») с волоконным наносекундным лазером (IPG-Photonics) длиной волны 1064 нм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 50 мкм на уровне  $1e2$ . Методом лазерно-эрозионной обработки были сформированы цилиндрические структуры диаметром и высотой 200 мкм, расположенные в узлах прямоугольной сетки с шагом 400 мкм (см. рис. 1). На основании экспериментов на гладкой и модифицированной поверхности установлено, что на гладкой поверхности пузырьки появляются при температуре нагревателя

меньше на 5 К, чем на модифицированной. Активирующиеся центры парообразования находились исключительно в окрестности или между цилиндрическими выступами, но не на выступах. Эти наблюдения можно объяснить следующим рядом факторов.

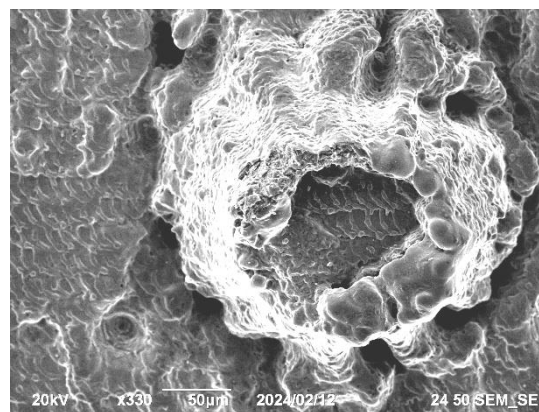


Рис. 1. Поверхность нагревателя после воздействия лазерным излучением и формировании цилиндрически подобных выступов.

К моменту достижения температуры нуклеации толщина перегретого слоя существенно больше на модифицированной поверхности, как показали результаты численного моделирования. Также, распределение температуры на поверхности нагревателя существенно неоднородно – цилиндрические выступы обладают меньшей температурой, как и поверхность вблизи них, так как они являются проводниками теплоты в более холодные слои жидкости. В некотором смысле, влияние этих выступов на нестационарный теплообмен двойственно и неоднозначно: они позволяют увеличить эффективную поверхность в режиме конвективного теплообмена, но уменьшают площадь поверхности с активизирующимися центрами нуклеации.

### Список литературы

1. Liang G., Mudawar I. Review of Pool Boiling Enhancement by Surface Modification // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 128. P. 892.
2. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика, 2019, № 12, с. 18–54.
3. Володин О. А., Печеркин Н. И., Павленко А. Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур, 2021, том 59, № 2, с. 280–312.

Исследование поддержано РФФ № 22-19-00092,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00092/>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СЛИЯНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ТОНКОЙ ФОЛЬГЕ

Мурадов. Э.Б., Чеверда В.В., Сомванши П.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В данной работе рассматривается теплообмен в капле жидкости при падении на изотермическую и нагреваемую поверхность. Исследован процесс падения одиночной капли и слияния капель на нагреваемой тонкой фольге и описаны механизмы возникающих при этом явлений.

Измерить скорость контактной линии, температуру фольги и плотность теплового потока при падении одиночной капли и при слиянии двух капель.

Исследование жидких капель (распыление, испарение, динамика, смачивание и др.) получило большое внимание в научной литературе. [1]. Теплообмен в испаряющейся капле на горизонтальной нагретой поверхности изучался в [2], [3]. Несмотря на развитие современных методик, эти задачи еще не решены полностью, что может несколько задержать развитие соответствующих приложений.

Проведено экспериментальное исследование процесса падения капли жидкости на нагреваемую горизонтальную подложку.

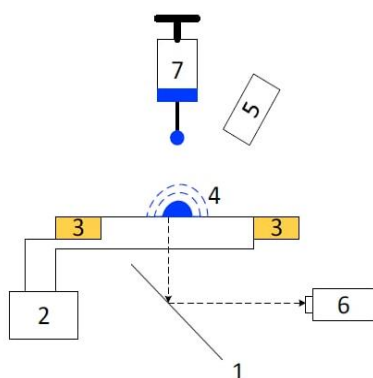


Рис. 1. 1 – зеркало, 2 – источник питания, 3 – латунные электроды с натянутой между ними константановой фольгой (25 мкм), 4 – испаряющаяся жидкая капля, 5 – высокоскоростная камера Mega speed MS140K, 6 – ИК сканер Титаниум 570М, 7 – шприцевой насос.

В качестве подложки использовалась фольга (CuNi) теплопроводностью 23 Вт/(К·м), которая с помощью латунных электродов-держателей была подключена к источнику питания постоянного тока. Таким образом осуществлялся нагрев фольги и регулировалась тепловая мощность, выделяемая на фольге в диапазоне от 0,2 до 2 Вт. В экспериментах температура поверхности фольги изменялась в диапазоне 25 – 35°C. Температура окружающей среды составляла примерно 25°C. Температура фольги измерялась с помощью тепловизора TitaniumHD 570 M. Разрешение инфракрасной камеры в экспериментах составляло 640×512 пикселей, частота сканирования – 50 Гц, температурное разрешение – 0,1 К. Обратная сторона фольги была покрыта слоем черной графитовой краски с коэффициентом излучения, приблизительно равно к 1. Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности фольги к

окружающему воздуху находился в пределах 16 – 20 Вт/м<sup>2</sup>·К. Эти данные были получены с помощью расчета с использованием термограмм поверхности фольги без капли.

Для визуализации процессов теплообмена при падении капли на нагретую поверхность были использованы инфракрасные и высокоскоростные камеры. Проведено наблюдение за изменением температуры фольги.

Было проведено исследование, направленное на изучение процесса теплообмена при падении капли воды на нагретую горизонтальную поверхность. Эта работа имеет большое значение в контексте современной электроники и другого оборудования, где системы охлаждения играют ключевую роль, например, спрейная система. Полученные данные будут использованы в дальнейших исследованиях для улучшения систем охлаждения.

### Список литературы

1. Zhang L., Li Z.-D., Zhao J.-F., Rebound of Liquid Droplets Caused by Sudden Decrease of Gravity // IPHT. 2014. V. 2, №. 1. P. 41–54.
2. Moraila-Martínez C.L., Cabrerizo-Vilchez M.A., Rodríguez-Valverde M.A., Controlling the Morphology of Ring-Like Deposits by Varying the Pinning Time of Driven Receding Contact Lines // IPHT. 2013. V. 1, №. 1. P. 195–205.
3. Padday J. F. Sessile Drop Profiles: Corrected Methods for Surface Tension and Spreading Coefficients // Proc. R. Soc. Lond. A. 1972. №. 330. P. 561–572.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ВВЭР-1000 И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПАРОВОЙ ЭЛЕКТРОЛИЗ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

Соколова Е.А., Садеги Х., Газзи С.Х., Найпак К.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ул. Политехническая 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия

Согласно прогнозам, устойчивый рост спроса на водород и внедрение более чистых технологий его производства, применение топлива на его основе позволят избежать до 60 Гт выбросов CO<sub>2</sub> в 2021–2050 годах при условии нулевых выбросов, что составляет 6 % от общего сокращения выбросов. Водород можно перевозить на большие расстояния, использовать в сталелитейной и других отраслях тяжелой промышленности, а также в грузоперевозках, судоходстве и авиации [1]. Энергия, содержащаяся в килограмме водорода, эквивалентна энергии, содержащейся в 3,8 литрах дизельного топлива. Таким образом, водород может использоваться как в качестве аккумулятора для накопления и хранения энергии, так и в качестве ее непосредственного источника. Однако этот элемент не встречается в природе в чистом виде и существует только в сочетании с другими химическими элементами, такими как кислород, образующий воду, или углерод, образующий органические соединения.

Высокотемпературный паровой электролиз (ВТПЭ) – одно из немногих решений, которое может внести свой вклад в смягчение глобальных последствий изменения климата, особенно в сочетании с атомной электростанцией (АЭС). При соответствующей комбинации совместной генерации на основе легководных реакторов с оптимизированной системой рекуперации энергии можно обеспечить требования к установкам для производства водорода на основе ВТПЭ и АЭС. Основным преимуществом интеграции системы ВТПЭ в легководный реактор является использование небольшой части генерируемого тепла в ядерном реакторе для превращения питательной воды водорода в пар. В типичной системе ВТПЭ огромное количество энергии должно быть затрачено на генерацию пара перед ячейкой. Таким образом, основное преимущество интеграции ВТПЭ в легководный реактор заключается в том, что для превращения воды в пар и последующего повышения температуры пара примерно до 800 °С потребуется небольшая часть генерируемого в реакторе тепла, если использовать вспомогательный котел, небольшую солнечную электростанцию или электрический нагреватель [2].

Основной целью данного исследования является оценка эффективности гибридной энергетической системы, включающей реактор ВВЭР-1000 и высокотемпературный паровой электролиз для производства. Все моделирование в данном исследовании выполнено с использованием Aspen HYSYS, современного симулятора стационарных химических процессов.

Технически в атомных когенерационных установках может использоваться любой тип ядерного реактора. В данной работе в качестве движущего источника энергии для установки ВТПЭ используется крупномасштабный коммерческий водоохлаждаемый реактор ВВЭР-1000. Атомные электростанции с ВВЭР

обычно состоят из двух основных контуров. Хотя первый контур имеет наибольшее значение с точки зрения производства энергии и безопасности, второй контур играет самую важную роль в системах совместной генерации, поскольку прямое подключение вторичной установки к ядерному реактору крайне опасно и неэффективно.

Одним из наиболее значимых результатов технического анализа является КПД энергосистемы. На рис. 1 показан электрический КПД АЭС после извлечения определенного количества тепла и проведено сравнение с общим КПД когенерационной установки. Как видно, хотя электрический КПД АЭС снижается при увеличении водородной мощности, общая эффективность когенерации (утилизация тепловой энергии) возрастает. Например, при извлечении 188 МВт тепла для производства водорода при производительности 8 кг/с эффективность гибридной системы достигает 39 %, что примерно на 13 % больше, чем эффективность автономной АЭС.

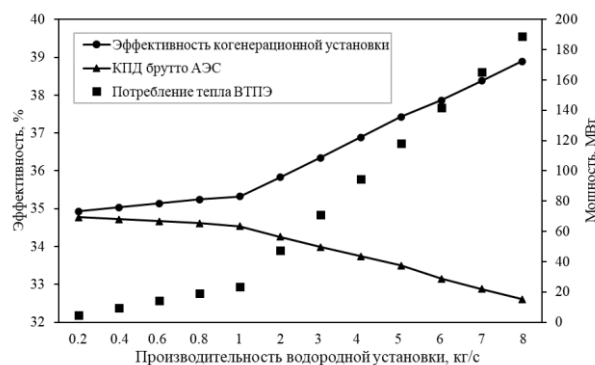


Рис. 1. Сравнение эффективности использования электроэнергии и эффективности совместной генерации системы при различных значениях извлеченного тепла, потребление электроэнергии ВТПЭ – 819,13 МВт с 40 модулями ВТПЭ.

### Список литературы

1. Pleshivtseva Y. Comparative analysis of global trends in low carbon hydrogen production towards the de-carbonization pathway // International Journal of Hy-drogen Energy, 2023. V. 48, P. 32191-32240.
2. Frick K. Technoeconomic assessment of hydrogen cogeneration via high temperature steam electrolysis with a light-water reactor // Applied Energy, 2022. V. 306: P. 118044.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00135).*

## СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КОНДЕНСАЦИОННОМ ОБОРУДОВАНИИ ТЭС И АЭС

Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Сейфельмлюкова Г.А.

Национальный исследовательский университет "МЭИ",

ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, вн.тер.г. Муниципальный округ Лефортово, Москва, 111250, Россия

Одним из возможных способов улучшения технико-экономических показателей, увеличения тепловой и электрической нагрузки на тепловых и атомных электрических станциях (ТЭС и АЭС) является интенсификация теплообмена в конденсационном оборудовании (конденсаторах турбин и сетевых подогревателях).

Процесс конденсации является эффективным методом отвода тепла, поэтому широко применяется в технике. Известно, что при капельной конденсации коэффициенты теплоотдачи значительно выше, чем при пленочной конденсации. Капельная конденсация реализуется в тех случаях, когда жидкость не смачивает поверхность теплообмена, что может быть достигнуто путём её гидрофобизации [1].

Известные методы получения капельной конденсации не обеспечивают её стабильности или их применение в технике проблематично. Для применения в промышленности важны надёжность и стабильность эффекта с течением времени, стоимость производства. Разрушение покрытия теплообменного оборудования ТЭС и АЭС – это потери эффективности оборудования. Поэтому активно исследуют гидрофобные покрытия и их влияние на смачивание. Одним из способов достижения гидрофобного эффекта является механическая обработка теплообменной поверхности с созданием определенного микрорельефа и последующее нанесение на него плёнки гидрофобизаторов.

Предлагаемый в [2] способ формирования гидрофобной текстуры на поверхности металла основан на создании шероховатой текстуры. Шероховатую текстуру формируют продавливанием поверхности металла равномерно расположенными мелкодисперсными твердыми сферическими частицами размерами примерно 80 мкм и нанесением слоя наночастиц углерода из газовой фазы, обеспечивая на полученной текстурированной поверхности краевые углы от 140 до 150 градусов. Недостатком данного способа является технологически сложный процесс, связанный с необходимостью использования прессы для продавливания, поэтому реализация его для теплообменных трубок конденсаторов и сетевых подогревателей ТЭС и АЭС, поверхности теплообмена которых исчисляются тысячами м<sup>2</sup>, достаточно затратительна.

Авторами предложен упрощенный метод гидрофобизации поверхности [3], отличием которого является замена продавливания поверхности на пескоструйную обработку с нанесением слоя пасты из наночастиц углерода (рис.1). Для формирования микроструктуры применяют обработку потоком абразивных частиц размером примерно 80 мкм со скоростью более 50 м/с. В результате чего формируют микрорельеф.

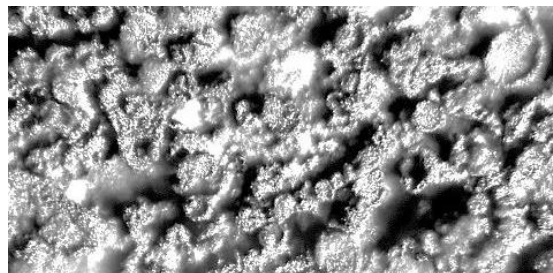


Рис. 1. Медная подложка с покрытием.

Установлено, что с покрытием, образованным формированием микроструктур на поверхности с помощью абразивного песка и нанесением слоя наночастиц, краевой угол возрастает до 155 градусов.

Выявлено, что в течение месяца отклонение коэффициента теплоотдачи от средней величины не превышает 10 %, что свидетельствует о сохранении гидрофобных свойств поверхности.

На рис. 2 показано изменение коэффициента теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с течением времени. Результаты согласуются с известными закономерностями.

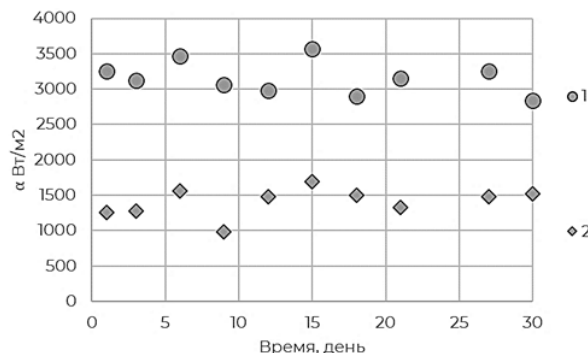


Рис. 2. Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на трубе с покрытием (1) и без покрытия (2).

Из рис. 2 видно, что реализация предложенного метода позволяет значительно увеличить коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации и этот эффект сохраняется в исследованных условиях.

### Список литературы

1. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах // Под ред. Кузмы-Кичты Ю.А. М.: ФГУП ЦНИИ АТОМИНФОРМ. – 2008. – 532 с.
2. Пат. № 2769107. Способ формирования комбинированной супергидрофобной структуры поверхности / Ю.А. Кузма-Кичта, Д.В. Чугунков, А.В. Лавриков, Н.С. Иванов. Опубл. 2022.
3. Пат. № 2803714. Способ формирования гидрофобной структуры поверхности теплообмена / Д.В. Чугунков, Ю.А. Кузма-Кичта, Н.С. Иванов, Г.А. Сейфельмлюкова и др. Опубл. 2023.

Работа выполнена по заказу АО "ДГК"  
(Договор № 1473/23-21/2160210).

Плёночная и капельная конденсация является важными процессами в электроэнергетике, системах кондиционирования воздуха, охлаждении электронных устройств, дистилляционной промышленности и т.д. Улучшение конденсационной теплопередачи будет способствовать широкому спектру применений.

Часто конденсационное оборудование на тепловых и атомных электрических станциях (ТЭС и АЭС) представляет собой кожухо-трубные теплообменники с горизонтально расположенными трубами, внутри которых протекает охлаждающая среда, а конденсация водяного пара происходит на их внешней поверхности.

Установлено, что акустические волны оказывают стимулирующее действие на устранение капель тумана и время конденсации может быть сокращено до 94% по сравнению с естественным рассеянием [1]. Поэтому одним из эффективных методов интенсификации теплообмена при конденсации является создание звуковых колебаний, которые воздействуют на конденсат на поверхности горизонтальных трубок теплообменного оборудования [2].

Звуковые волны эффективно стимулируют процессы коагуляции частиц. Частота и интенсивность воздействующих звуковых волн оказывают большое влияние на конденсацию.

Моделирование и эксперименты подтвердили, что звуковые волны могут способствовать улучшению коагуляции, при этом оптимальная частота распространения звуковых волн находится в диапазоне от 200 Гц до 700 Гц. Зная частоту звуковой волны, уровень звукового давления, плотность частиц, их распределение по размерам, можно получить их временную эволюцию по размерам и соответствующие статистические результаты.

Применение звукового воздействия способствует созданию на поверхности теплообменных трубок капель различного размера, которые характерны для капельной конденсации. Переход от плёночного режима конденсации к капельному способствует улучшению теплопередачи [3]. Интенсификация теплообмена даст возможность повысить эффективность работы, например, конденсаторов турбин, сетевых подогревателей на ТЭС и АЭС, а также улучшить их технико-экономические показатели.

Авторами предложено устройство для акустического воздействия на конденсацию в оборудовании (рис. 1). В нем с помощью источников звука генерируются акустические колебания в паровом пространстве внутри конденсационного оборудования. В устройстве осуществляется контроль поведения конденсата на поверхности горизонтальных трубок с использованием оптической системы и акустических колебаний с помощью анализатора спектра и их уровня [4]. Экспериментальным путём выбирают и фиксируют ча-

стоты и уровни акустических колебаний в момент, когда происходит переход от плёночной к капельной конденсации.

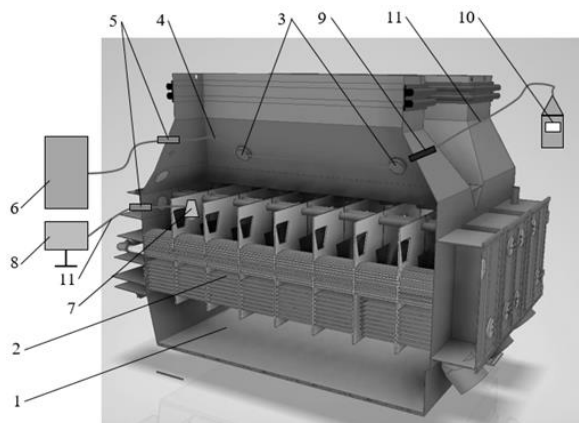


Рис. 1. Устройство акустического воздействия на конденсацию в оборудовании: 1 – конденсатор; 2 – горизонтальная трубная система; 3 – источник акустических колебаний; 4 – термостойкий кабель; 5 – гермоввод; 6 – генератор акустических колебаний с усилителем; 7 – видеокамера; 8 – монитор; 9 – микрофон; 10 – анализатор спектра акустических колебаний; 11 – кабель.

Для конденсаторов турбин в системе акустического воздействия необходимо применять оборудование с влагозащищенностью по IP65, которое способно эксплуатироваться при температурах среды свыше 120 °С и абсолютном давлении ниже 5 кПа.

Эксперименты показали, что предложенное устройство способствует снижению температурного напора в теплообменном оборудовании, что свидетельствует об увеличении коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на трубах. В результате улучшится вакуум в конденсаторах турбин, что приведёт к повышению выработки электроэнергии на ТЭС и АЭС и экономии топлива.

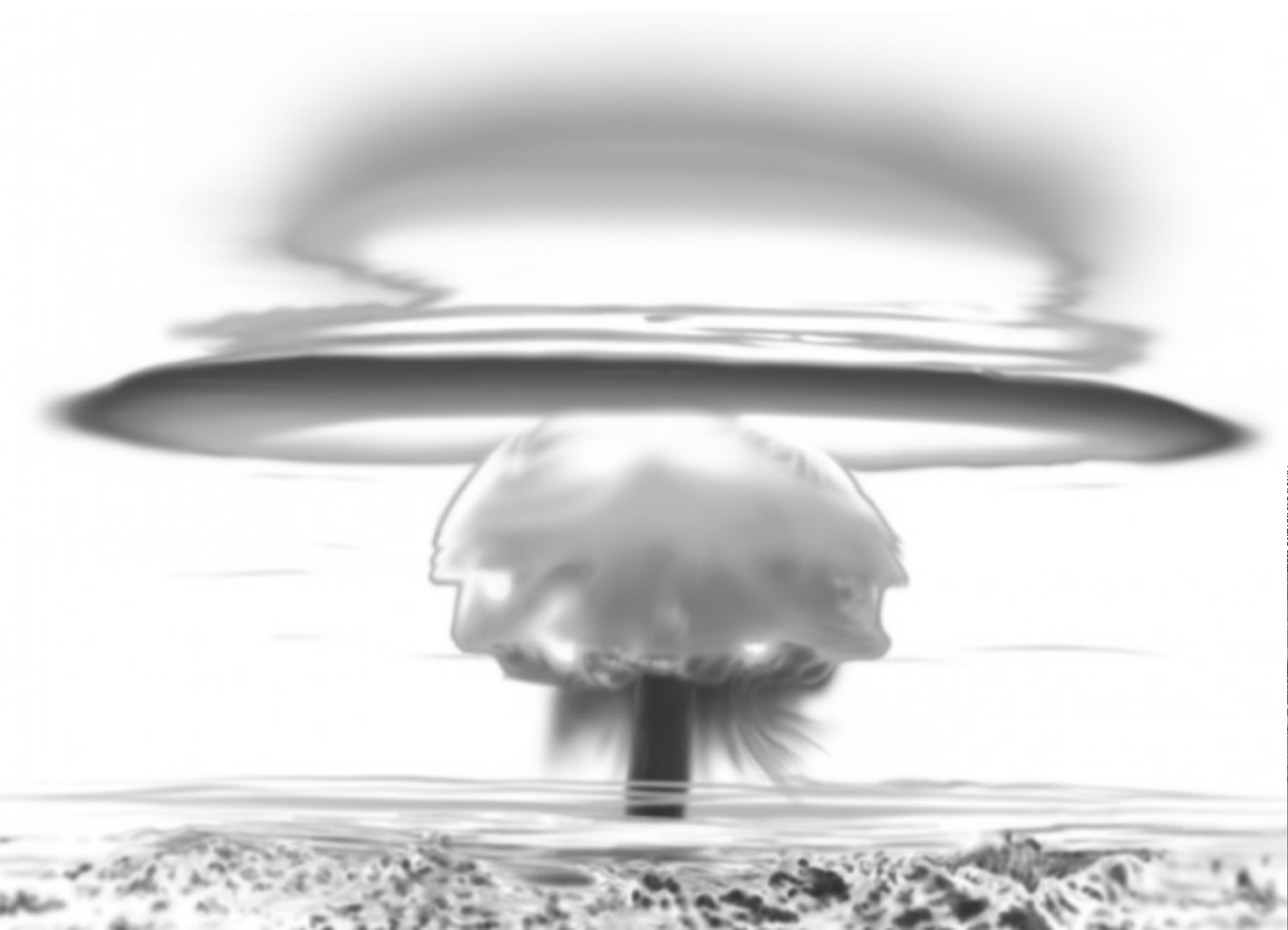
#### Список литературы

1. Zhang G.X. et al. Numerical simulation of acoustic agglomeration based on improved area algorithm [J]. *Combustion Science and Technology*, 18(1): 44-49, 2012.
2. Немцов Б.Е., Эйдмай В. Л. Коллективный эффект конденсации капель под действием звука // *Акустический журнал* Т. 35 № 5 стр. 882-886.
3. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах // Под. ред. Кузма-Кичты Ю.А. М.: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ. – 2008. – 532 с.
4. Пат. № 2797726. Способ акустического воздействия на конденсационное оборудование / Д.В. Чугунков, Г.А. Сейфельмлюкова, А.Е. Герасименко, Е.А. Журавлев. Оpubл. 2023.

Работа выполнена по заказу АО "ДГК"  
(Договор № №1290/23-21).



СЕКЦИЯ 4  
Гидрогазодинамика реагирующих сред,  
детонационные процессы





Закрутка потока является одним из наиболее широко применяемых способов интенсификации теплофизических процессов в современных энергетических установках. Взаимосвязь процессов газодинамики, теплообмена и горения в закрученном течении определяет особенности формирования в нем крупномасштабных вихревых структур, прецессирующего вихревого ядра, формы и положения фронта пламени.

Перспективной технологией организации горения является структуризация течения в виде массивов различной размерности, основу которых составляют элементарные реагирующие струи. В таких течениях имеет место целый комплекс теплофизических процессов, включающий формирование крупной и мелко-масштабной турбулентности, наличие ламинарно-турбулентных переходов, отрывные явления в присутствии химических и фазовых превращений.

Наиболее актуальным вопросом организации массивов реагирующих струй является вопрос концептуального выбора схемы течения и механизма горения в отдельных элементах системы. Организация горения в противоточном закрученном течении соответствует большинству из требований, предъявляемых к перспективным концепциям сжигания топлива. В силу особенностей газодинамики закрученных течений, когда расход воздуха, подаваемый на вход в противоточный горелочный модуль, преодолевает расстояние вдоль оси устройства не менее двух раз, возникают эффективные условия для качественного перемешивания топлива и окислителя, надежного воспламенения образующейся смеси и ее стабильного горения. Формирование крупномасштабных тороидальных вихревых структур вблизи области подачи топлива приводит к значительному увеличению времени его пребывания в зонах смешения и горения, повышению полноты сгорания и снижению эмиссии монооксида углерода. Одновременно с этим появляется возможность существенного расширения области режимов работы противоточных вихревых горелок по соотношению топливо-окислитель, что позволяет реализовать процесс горения в более "бедных" топливом условиях, снизить среднюю температуру горения и сократить, а в ряде случаев полностью устранить образование оксидов азота NO<sub>x</sub>.

В настоящее время нестационарная турбулентная структура в массивах закрученных противоточных течений с закруткой изучена лишь частично. В литературе практически отсутствуют данные об особенностях взаимодействия и горения таких струй в массивах. Численное моделирование выполнялось с использованием определенного набора моделей турбулентности, что абсолютно не позволяет прогнозировать поведение таких потоков при создании новых технических устройств, а также выбрать возможные подходы к интенсификации процессов горения, что особенно актуально при переходе на сжигание низкоуглеводных и смешанных топлив. Не обоснованы

многопливные режимы горения, оптимальные условия конвективной тепловой защиты.

В работе реализованы такие способы изучения структуры реагирующих противоточных закрученных течений, как экспериментальное исследование бесконтактными оптическими методами, в частности PIV и высокоскоростной визуализацией. Это позволит получить новые результаты и знания об особенностях нестационарной турбулентной структуры и механизмах горения в противоточных закрученных течениях (рис. 1 и 2).

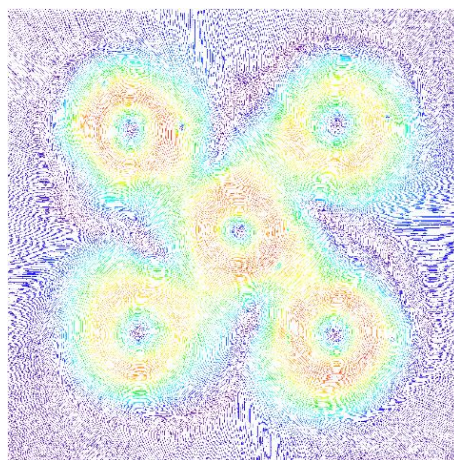


Рис. 1. Поле скорости в плоском массиве из 5 струй.



Рис. 2. Визуализация воспламенения центральной струи плоского массива.

### Список литературы

1. An experimental study of the flow structure in arrays of cold bidirectional swirling jets / O.A. Evdokimov, A.I. Guryanov, S.V. Veretennikov // *Physics of Fluids*, 2024. Vol. 36(4). P. 045115.
2. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // *Int J Energy Res*. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Комова О.В., Гурьянов А.И.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва  
Пушкина 53, г. Рыбинск, 152934, Россия

Важным требованием к современным камерам сгорания энергетических установок является расширение диапазона устойчивого горения, обеспечение низкого уровня выбросов загрязняющих веществ, а также достижение высокой эффективности горения. Организация горения в условиях противоточного закрученного течения позволяет удовлетворить большинству перечисленных требований. Вместе с этим использование синтетического многокомпонентного водородсодержащего топлива (МВТ) позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ, таких как оксиды азота  $\text{NO}_x$  и монооксид углерода  $\text{CO}$  [1]. Особенности газодинамики противоточного закрученного течения обеспечивают эффективное конвективное охлаждение внутренней части камеры сгорания, что позволяет снизить температуру ограждающих зону реакции стенок.

В работе показаны результаты исследования совместного горения смесей метана и МВТ в противоточном закруженном течении. Полученные результаты могут использоваться для повышения эффективности камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Для получения МВТ использована технология парциальной каталитической конверсии метана.

Выявлено качественное и количественное влияние объёмной доли МВТ  $\text{гмвт}$  на процесс горения в вихревой противоточной КС.

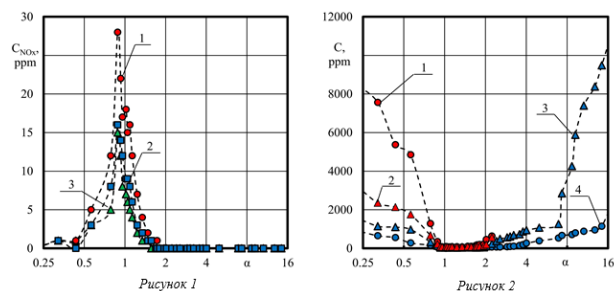


Рис. 1. Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ : 1 – при горении метана  $\text{CH}_4$ ; 2 – при горении смеси ( $\text{CH}_4$  и МВТ) с объёмной долей добавки МВТ равной 15%; 3 – при горении МВТ.

Рис. 2. Зависимость концентрации загрязняющих веществ в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха: 1 – концентрация  $\text{СхНу}$  при сжигании метана; 2 – концентрация  $\text{СО}$  при сжигании метана; 3 – концентрация  $\text{СО}$  при сжигании МВТ; 4 – концентрация  $\text{СхНу}$  при сжигании МВТ.

Влияние добавок МВТ к метану на эмиссионные характеристики горения в противоточном закруженном течении показано на рисунках 1 и 2. Результаты эксперимента показали, что горение МВТ в противоточном закруженном течении сопровождается двукратным снижением выбросов оксидов азота по сравнению с горением метана (рисунок 1). Значение объёмной доли МВТ  $\text{гмвт} = 15\%$  по сравнению с горением

метана позволяет снизить выбросы  $\text{NO}_x$  в 1,5 раза во всем диапазоне коэффициента избытка воздуха. При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,57$  концентрация  $\text{NO}_x$  становится равной нулю и сохраняет это значение вплоть до бедного срыва. Это подтверждает целесообразность совместного сжигания МВТ и метана для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в перспективных камерах сгорания, работающих на синтетических видах топлива с содержанием водорода. Исследование эмиссионных характеристик при горении метана, МВТ и их совместного горения при  $\text{гмвт} = 15\%$  показало, что соответствующие кривые на рисунке 1 имеют эквидистантный характер с максимальным значением вблизи стехиометрии.

На рисунке 2 представлены экспериментальные результаты зависимостей выбросов  $\text{СхНу}$  и  $\text{СО}$  от коэффициента избытка воздуха. Переход с метана на МВТ сопровождается значительным снижением выбросов  $\text{СхНу}$  и  $\text{СО}$  в диапазоне  $\alpha$  от 0,15 до 1. С увеличением  $\alpha$  наблюдается значительный рост выбросов  $\text{СхНу}$  и  $\text{СО}$ . В этом случае горение углеводородов практически прекращается в «сверхбедной» области по  $\alpha$ , а тепловой эффект экзотермической реакции, поддерживающий горение, обеспечивается при окислении водорода, входящего в состав МВТ.

Исследования горения синтетического многокомпонентного водородсодержащего топлива в противоточном закруженном течении подтвердили целесообразность использования развиваемой технологии горения для повышения эффективности перспективных камер сгорания энергоустановок на основе газотурбинных двигателей.

### Список литературы

- Guryanov AI et al., An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.004>.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).*

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫГОРАНИЯ ВОДОРОДА ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА

Арефьев К.Ю.<sup>1,2</sup>, Гуськов О.В.<sup>1</sup>, Кукшинов Н.В.<sup>1,2</sup>, Мамышев Д.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, 111116, Россия

<sup>2</sup> «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ)», 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, Москва, 105005, Россия

На сегодняшний день существуют разные способы подачи топлива в рабочий тракт. Каждый из них имеет свои особенности и может по-разному влиять на характеристики потока, в частности, на коэффициент полноты сгорания топлива, который является важным критерием при рассмотрении задач горения [1]. В данной работе проводится численное моделирование горения водорода в модельном канале при высоких скоростях потока для двух вариантов подачи горючего.

Исследование проводится на примере модельного цилиндрического канала с постоянной и расширяющейся площадью поперечного сечения. Высокоскоростной поток окислителя создается за счёт профилированного сопла. Подача водорода осуществляется с помощью соосно-спутной и пристеночной форсунки (рис.1).



Рис. 1. Разная организация подачи водорода в модельном канале.

Расчеты проводятся на структурированной многоблочной сетке, содержащей около 200 000 ячеек. На входе в расчетную область задаются полные параметры потока (давление  $p_0 \approx 5$  МПа, полная температура  $T_0$ , превышающая  $\sim 2.5$  раза температуру самовоспламенения) и состав квазивоздуха. На форсунках задается расход в зависимости от давления квазивоздуха при коэффициенте избытка окислителя  $\approx 1$  и полная температура  $T_0 = 300$  К. На выходе – статическое давление. На стенках – условия прилипания и заданной температуры. В качестве модели турбулентности используется модель  $\gamma$ -Re $\Theta$  [2], в качестве химико-кинетического механизма модель [3] и для учёта взаимодействия турбулентности и химической кинетики используется квазиламинарная аппроксимация (QLA), (LFR). Сходимость по сетке проводится на основе коэффициента полноты сгорания топлива и распределения давления на стенке вдоль канала.

Валидация расчетных моделей проводится на основе известных экспериментов [4-7].

В результате моделирования получены расчетные поля температур, давления, чисел Маха и компонент при горении водорода в высокоскоростном потоке воздуха в модельном канале. Показаны основные отличия в структурах течения, в частности, объем участвующего в окисления горючего. Определены коэффи-

циенты полноты сгорания топлива для разных способов подачи водорода. Характерное распределение коэффициента полноты сгорания для спутной подачи представлено на рис. 2.

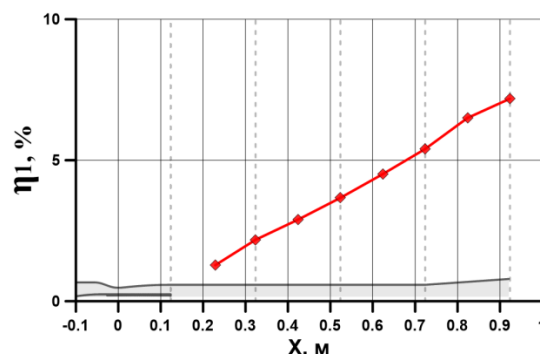


Рис. 2. Распределение коэффициента полноты сгорания вдоль канала для поперечных сечений.

На следующем этапе проводится моделирование с варьированием значения коэффициента избытка окислителя и полных параметров на входе в сопло. На основе полученных данных предлагается обобщенная зависимость для оценки коэффициента полноты сгорания.

### Список литературы

1. Арефьев К.Ю., Кукшинов Н.В., Серпинский О.С. Методика экспериментального определения полноты сгорания потоков топливной смеси в каналах переменного сечения // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2017, №5. С. 90-102.
2. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, 2009. pp. 2894-2906.
3. Hong Z., Davidson D. F., Hanson R. K. An improved H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements // Combustion and Flame, Vol. 158, 2011. pp. 633-644.
4. Kukshinov N.V., Batura S.N. Numerical simulation of hydrogen combustion in oxidizer supersonic flow in flowpaths of various configurations // J.Phys.:Conf.Ser, No. 1359 012064, 2019.
5. Kukshinov N.V., Mamyshev D.L. Numerical simulation of the shock-wave structure of a reacting hydrogen-air mixture in a model channel // J.Phys.:Conf.Ser, No. 2057 012067, 2021.
6. Zakharov V.S., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoy V.N. Computational and experimental study of the influence of the shape of nozzle supersonic part on the flow structure in the gas-dynamic flow path of a model high-altitude test facility // Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28(2), стр. 153-173.
7. Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л. Расчетное исследование горения водородно-воздушной смеси в модельном канале при ударно-волновой структуре течения // Теплофизика высоких температур, Т. 60, № 5, 2022. с. 763-773.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГТД В УСЛОВИЯХ ВХОДНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

**Носкова К.Р., Гурьянов А.И., Евдокимов О.А., Гурьянова М.М.**

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва  
ул. Пушкина 53, Рыбинск, 152934, Россия

Известно, что при проектировании современных малоэмиссионных камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД) существует необходимость учета предыстории потока, так как возникающая на выходе несимметричность эпюры скорости вызывает увеличение потерь полного давления и коэффициента гидравлических потерь в диффузоре КС [1, 2]. Поэтому существует необходимость в исследованиях, связанных с влиянием несимметричности профиля скорости за компрессором на интегральные и локальные параметры камеры сгорания с помощью проведения численного моделирования с валидацией расчетов методом цифровой трассерной визуализации (PIV).

Выполнены расчетно-экспериментальные исследования влияния несимметричности профиля скорости за компрессором на рабочий процесс камеры сгорания ГТД с изучением локальной газодинамической структуры течения методом PIV.

Оценка несимметричности профиля скорости за компрессором проводится коэффициентом  $K$ , определяемым по формуле (1):

$$K = \frac{v_1}{v_2}, \quad (1)$$

где  $v_1, v_2$  – соответственно осредненная скорость потока в верхней и нижней половине поперечного сечения диффузора, м/с.

Получены эпюры с  $K=1, K=1,5$  и  $K=0,2$ . Искаженные профили скорости представлены на рис.1, которые на этапе численного моделирования заданы на вход в преддиффузор КС.

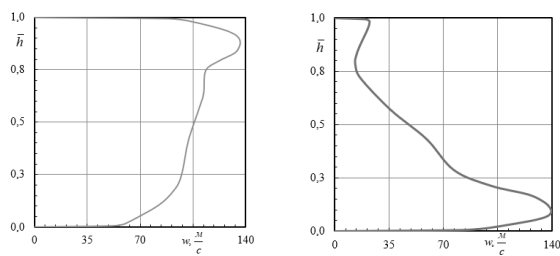


Рис.1. Профили входной скорости: а) -  $K=1,5$ ; б) -  $K=0,2$ .

По результатам расчетно-экспериментальных исследований получено, что при симметричной входной эпюры скорости основное влияние на течение оказывают два вихря, формирующиеся в области внезапного расширения, наружный и внутренний кольцевые каналы (КК), фронтное устройство равномерно заполняются массами воздуха.

При искажении эпюры скорости на выходе из генератора несимметричности, например при  $K=0,2$ , преимущественно расход воздуха направлен в нижний КК. Интенсивность отрывной зоны в области внезапного расширения существенно возрастает, наблюдается нелобовое столкновение максимального им-

пульса струи с обтекателем, явный максимум в нижнем КК и недостаток расхода охлаждающего воздуха в верхнем.

При учете предыстории потока в виде несимметричности профиля скорости за компрессором происходит перераспределение расхода воздуха по основным элементам камеры: в кольцевых каналах, через фронтное устройство.

По результатам численного моделирования получено, что в КС ГТД минимальное значение коэффициента гидравлических потерь (2) при симметричном профиле скорости:  $\xi=0,61$ . Максимальное значение коэффициента гидравлических потерь в КС  $\xi=1,33$  в области  $K=0,2$ , что на 55% превышает минимум при симметричной картине течения, что также свидетельствует об ухудшении газодинамической эффективности камеры при искажении входной эпюры скорости. В случае симметричной эпюры скорости величина сохранения полного давления максимальна. При внесении искажений на входе в виде несимметричности, газодинамика значительно изменяется. Это сопровождается увеличением потерь полного давления в камере в целом и в основных элементах и снижением его величины.

$$\xi = (p_{вх}^* - p_{вых}^*) / 0,5\rho v^2, \quad (2)$$

$p_{вх}^*, p_{вых}^*$  – полное давление на входе и выходе из КС соответственно,  $\rho$  – плотность,  $v$  – среднерасходная скорость.

Полученные результаты по влиянию несимметричности профиля скорости за компрессором на рабочий процесс в камере сгорания доказывают необходимость ее учета при проектировании современных камер сгорания ГТД.

### Список литературы

1. Гурьянова, М. М. Аэродинамика камеры сгорания с отрывным диффузором / М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – №11. – С. 1-7.
2. Guryanova, M. M. Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber / M. M. Guryanova, K. R. Timofeeva, A. I. Guryanov // AIP Publishing. – 2020. – №2211. – Pp. 1-5.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).*

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО ПОДЖИГА СВЧ-ПЛАЗМОЙ ПРОПАН-ВОЗДУШНОЙ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ

Булат П.В.<sup>1</sup>, Волков К.Н.<sup>1</sup>, Ренев М.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф. УСТИНОВА, Санкт-Петербург, 190005, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Актуальна проблема исследования свойств плазменного поджига и горения для задач сжигания бедных "трудных" смесей в камерах сгорания и повышения их эффективности [1]. Плазменное зажигание неравновесной протяженной по камере сгорания плазмой должно позволить эффективно сократить время индукции, ускорить сгорание топливной смеси. За сотни наносекунд, единицы микросекунд можно создать неравновесную плазму с помощью различных устройств (электроды открытые/ с барьером, СВЧ-излучение) с горячим электронным газом и осуществить поджиг тепловым воздействием, плазменной конверсией [1,2], ионной химией и т.д.

В работе [3] представлен эксперимент по поджигу СВЧ-разрядом (500 кВт, 6 мкс импульс) с инициаторами на кварцевой трубке в трубе топливной смеси пропан-воздух (1 Бар). Оценивается эффективность 10 % затрат энергии СВЧ, свечи 1 %. В рамках данной работы производится численный анализ СВЧ-поджига для условий [3] с использованием новой поэтапной моделью с целью ее валидации, что нужно для ее дальнейшего применения в исследованиях такого перспективного способа поджига.

Метод исследования: три этапа численного моделирования, где промежуточный результат используется на следующем этапе. Первый этап: расчет коэффициентов электронных реакций с компонентами невозмущенной среды (упругие соударения, ионизация, диссоциация) [2], решаются кинетические уравнения Больцмана, парные столкновения, 0-мерная модель.

Второй этап: итеративный анализ СВЧ-излучения в камере сгорания (см. рис. 1) в присутствии инициаторов, искусственно заданных плазматидов (фиксирована форма, размеры, проводимость). Промежуточный результат – сведения о поглощении излучения заданной наперед плазмой, интегральные оценки плазменных реакций в ней. Итеративно самая развитая плазма: введен критерий "Баланс": разница скоростей ионизации и прилипания с рекомбинацией.

Третий этап: подобранная плазма (геометрия, усредненное по ее объему только тепловое воздействие) импортируется в модель газодинамики горения (сжимаемый совершенный газ со схемой реакций "Grimech 3.0"). Анализируется и сопоставляется с [3] динамика роста давления в камере сгорания, а также рассматривается степень сгорания, температура.

Основной результат – сравнение динамики давления, проведены и газодинамические расчеты в измененных моделях (см. рис. 2). Сжигание чистого пропана давало превышение давления в 2 и 1,5 (с учетом излучения) раза. Проведен расчет с 15 % метана по объему вместо пропана ("автомобильного"), что дало совпадение по амплитуде давления, однако процесс горения происходил значительно медленнее.

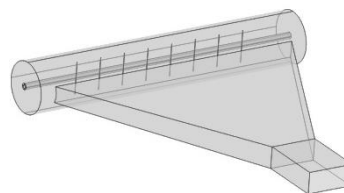


Рис. 1. Геометрия цилиндрической камеры сгорания с системой подачи СВЧ-излучения и инициаторами (8 игл) на кварцевой трубке.

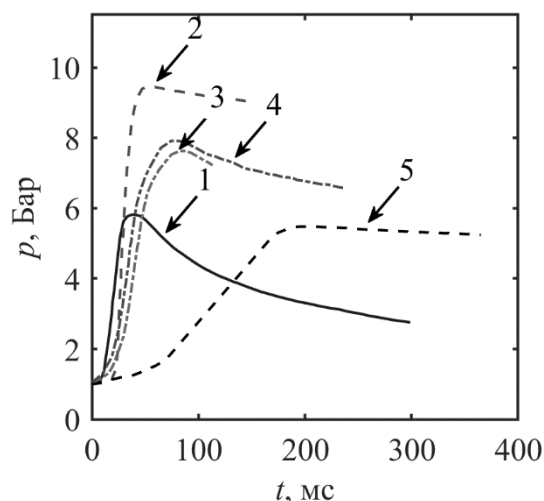


Рис. 2. Статическое давление в торце трубы от времени: 1) эксперимент [3], 2) пропан-воздух, поджиг без излучения, 3) и 4) поджиги с излучением с увеличенным СВЧ-нагревом, 5) поджиг с учетом 15 % метана в топливе и излучением.

Делается вывод, что в эксперименте [3] вероятно сжигалась смесь с примесью, а неучтенные в текущих расчетах иные плазменные эффекты кроме теплового в таком случае могут дать ускорение сжигания до 4 раз (к 50 мкс максимум вместо 200 нс).

### Список литературы

1. Starikovskiy A., Aleksandrov N., Rakitin A. Plasma-assisted ignition and deflagration-to-detonation transition // Proc. R. Soc. A. 2012. Vol. 370, № 1960. P. 740–773.
2. Janev R.K., Reiter D. Collision processes of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> hydrocarbons with electrons and protons // Physics of Plasmas. 2004. Vol. 11, № 2. P. 780–829.
3. Bulat P. et al. Multi-point ignition of air/fuel mixture by the initiated subcritical streamer discharge // Acta Astronautica. 2022. Vol. 194. P. 504–513.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № FZWF-2024-0004.

## РАСЧЁТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ И ВЛИЯНИЯ АКУСТИКО-ВИХРЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ИНЖЕКТОРЕ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ СПУТНОЙ ПОДАЧЕ

Прохоров А.Н., Гуськов О.В., Ильченко М.А., Серебряков Д.И.

ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», 111116,  
ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, Россия

Рассматривается возможность интенсификации смешения и горения водорода при спутной подаче посредством акустико-вихревых колебаний, генерируемых в инжекторе.

Представлены результаты расчётных исследований влияния акустико-вихревых колебаний на интенсификацию смешения и горения газообразного водорода в модельном канале, проведённых в двумерной нестационарной постановке. Модельный канал представляет собой канал переменного сечения, в который поступает воздушный поток и спутно ему через форсунку инжектора подаётся водород (рис. 1). Непосредственно в канале инжектора устанавливается прямоугольный в поперечном сечении профиль. В результате поочередного схода отрывных зон с верхней и нижней сторон профиля создаётся цепочка вихрей, представляющая собой дорожку Кармана [1]. Генерируемые таким образом акустико-вихревые колебания в канале инжектора вызывают пульсацию водородной струи на выходе из форсунки как по газодинамическим параметрам, так и по направлению (рис. 1).

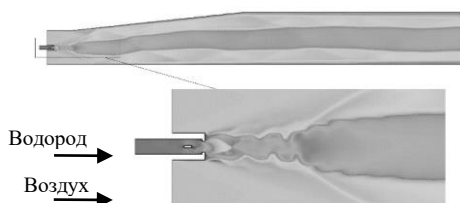


Рис. 1. Пульсации потока, вызванные акустико-вихревыми колебаниями в инжекторе.

Проведена оценка степени влияния акустико-вихревых колебаний на интенсификацию смешения и горения водорода путём сравнения полученных результатов со случаем стационарного истечения водорода из форсунки. Было получено что в рассмотренном диапазоне параметров расчётной модели акустико-вихревые колебания в канале инжектора увеличивают полноту сгорания в модельном канале на величину до 0,1 (рис.2).

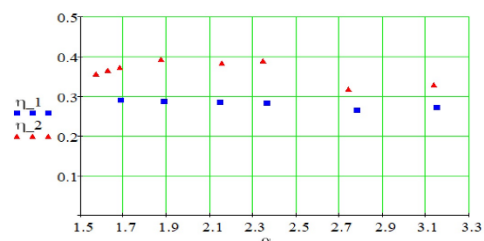


Рис. 2. Значение коэффициента полноты сгорания водорода в модельном канале без акустико-вихревых колебаний ( $\eta_1$ ) и при их генерации ( $\eta_2$ ) в зависимости от коэффициента избытка окислителя ( $\alpha$ ).

При решении волнового уравнения (1) для акустического потенциала  $\varphi$ , описывающего распространение акустических колебаний в потоке с постоянной

средней скоростью [2], была разработана математическая модель собственных продольно-поперечных колебания газа в рассматриваемом канале инжектора с профилем (2):

$$(1 - M_x^2) \cdot \varphi_{xx} + \varphi_{yy} - \frac{2 \cdot M_x}{c} \cdot \varphi_{xt} = \frac{1}{c^2} \cdot \varphi_{tt} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varphi_I &= (A_I \cdot e^{i \cdot k_x^+ \cdot x} + B_I \cdot e^{i \cdot k_x^- \cdot x}) \cdot \sin(k_y) e^{-i \cdot \omega \cdot t} \\ \varphi_{II} &= (A_{II} \cdot e^{i \cdot \frac{\omega}{c} \cdot x} + B_{II} \cdot e^{-i \cdot \frac{\omega}{c} \cdot x}) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} \\ \varphi_{III} &= (A_{III} \cdot e^{i \cdot k_x^+ \cdot x} + B_{III} \cdot e^{i \cdot k_x^- \cdot x}) \cdot \sin(k_y) e^{-i \cdot \omega \cdot t} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – акустический потенциал;  $M$ ,  $c$  – число Маха и скорость звука в канале инжектора;  $A$ ,  $B$  – константы;  $k_x$  и  $k_y$  – волновые числа; индексы I, II, III – обозначение расчётных областей.

По разработанной математической модели были оценены частоты собственных акустических колебаний в инжекторе. Было установлено, что вихревой звук (дорожка Кармана) в инжекторе реализуется на частоте близкой или равной одной из собственных его акустических частот (рисунок 3). Аналогичный результат был получен в ходе проведения экспериментальных исследований в работе [3]. Наиболее интенсивные пульсации водородной струи на выходе из инжектора происходят на частотах, соответствующих чисто поперечным колебаниям в канале на участке до профиля.

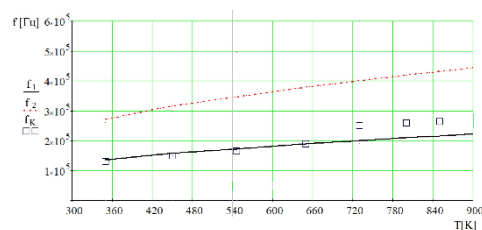


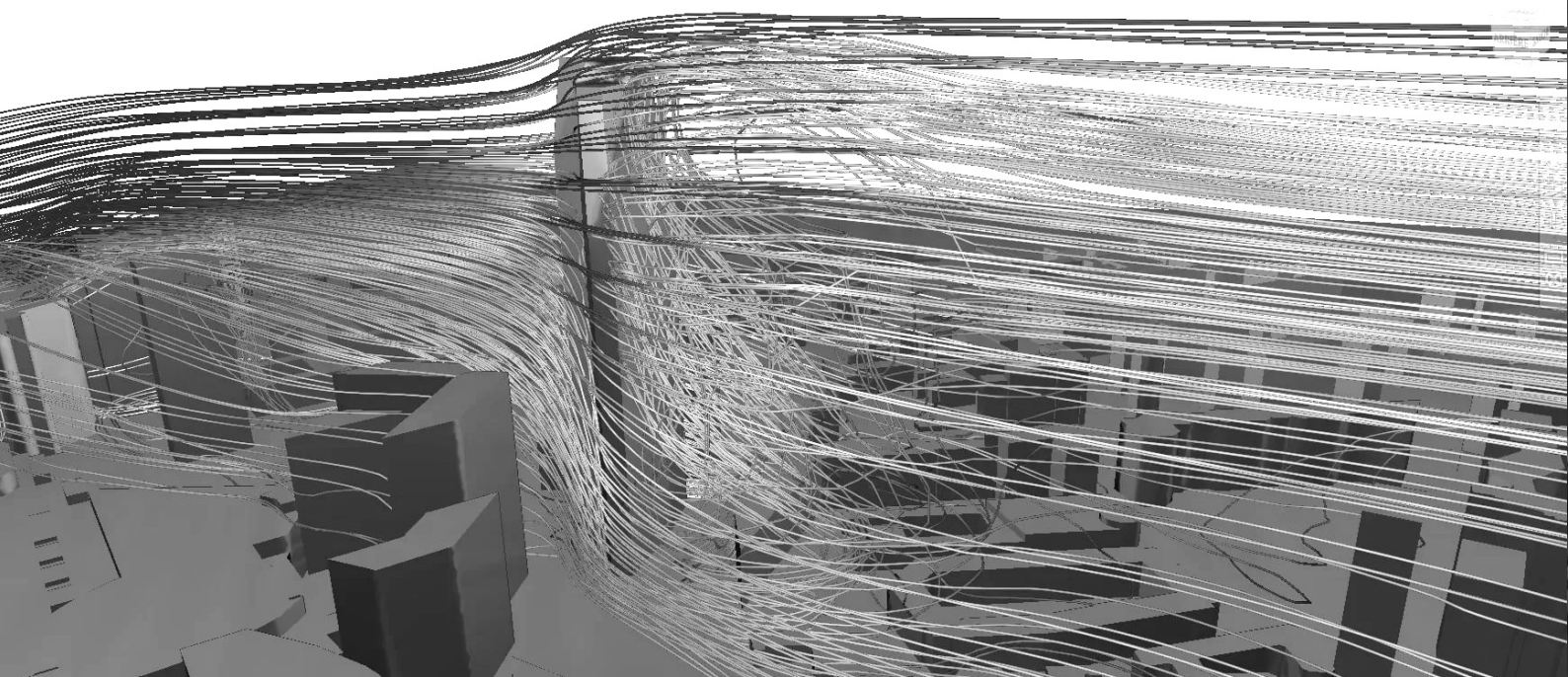
Рис. 3. Расчётная зависимость частот первых мод акустических колебаний ( $f_1, f_2$ ) в инжекторе и частота реализуемого вихревого звука ( $f_k$ ) от температуры ( $T$ ) водорода на входе в инжектор.

### Список литературы

1. Милен - Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. – М.: Мир, 1964. 660-661 с.
2. Ильченко М.А., Крюченко В.В., Мнацаканян Ю.С. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1995. 40-41 с.
3. Ильченко М.А., Руденко А.Н., Эпштейн В.Л. Исследование генерации вихревого звука при обтекании профиля в канале. Акустический журнал. 1980. Т XXVI, №5, 708-717 с.



СЕКЦИЯ 5  
Численные методы  
в теплофизике и физической  
газодинамике





Подробное моделирование турбулентных высокоскоростных течений газа и плазмы, цифровое описание природных и астрофизических явлений самого разного масштаба, ведется с использованием суперкомпьютерных систем. Для решения трудоемких задач вычислительной гидродинамики создано много программ, в частности, к ним можно отнести отечественные программы, представленные в [1, 2]. В современных CFD задачах резко вырос объем выходных данных. Анализ и интерпретация результатов вычислений ведутся в системах визуализации разной мощности и назначения. Качество анализа и увеличение производительности визуальной обработки повышается при параллельной обработке результатов моделирования с использованием методов топологического анализа вихревых структур [3].

В настоящей работе обсуждаются возможности авторизованной системы визуализации, применяемой при решении задач гидро- и газодинамики, теплофизики, при исследовании горения в энергетических устройствах, в задачах астрофизического моделирования. В среде системы можно вести комплексную обработку результатов вычислений с интерактивным визуальным анализом изменения основных физических полей и генерацией новых, производных и символических данных, отражающих особенности газодинамических и технологических процессов. Для выделения турбулентных структур используется широкий набор опций для генерации производных скалярных, векторных и тензорных величин, что дополняет графическое представление в интерпретации вычислительных экспериментов. Обогащение информации при преобразовании физических и дополнительных полей, ведется с выделением особенностей в градиентных зонах вблизи ударных волн, скачков и разрывов, и в других, важных для анализа областях течений. Рендеринг видеосцен сопровождается анимацией нестационарных процессов, представленных в комбинированном виде.

Возможности системы визуализации показаны на примерах обработки результатов ряда задач вычислительной гидродинамики, решенных с использованием вычислительной программы [1], результатов, полученных при анализе развития неустойчивости в объеме молекулярного облака при его взаимодействии с ударной волной от взрыва сверхновой звезды [4], при анализе дефлаграционного горения в ротационном детонационном двигателе [5]. Обсуждаются вопросы вихреобразования в сверхзвуковых потоках газа, особенности распространения ударных волн и сверхзвукового горения, примеры развития течений газа и жидкости в некоторых энергетических устройствах.

На рис. 1. дается иллюстрация использования опций системы визуализации для показа формирования вихревой шпильчатой структуры (hairpins structures) с характерной формой вытянутой вихревой нити в резком изгибе и переходе в дугообразную вихревую

петлю, структуры, определяемой в переходной зоне ударной деформации остатков молекулярного облака.



Рис. 1. Идентификация вихревой структуры с выделением одной из изоповерхностей  $Q$ -критерия, тензорного инварианта поля скорости.

Совмещение комбинированных методов визуализации и топологического анализа течений позволило выявить особенности динамики распространения завихренности и спиральности в газовых потоках разного масштаба при переходе к турбулентности и определяющем влиянии неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на образование вихревых структур.

#### Список литературы

1. Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев, Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии, Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»), Научно-технические ведомости СПбГПУ (Физико-математические науки), 2004, Вып. 2.
2. Rybakin B. P. Modeling of 3-D problems of gas dynamics on multiprocessing computers and GPU, Computers & Fluids, 2013, 80, P. 403-407.
3. H.K. Moffatt, Some topological aspects of fluid dynamics, J. Fluid Mech. 2021, Vol. 914, P. 1-56.
4. B. Rybakin, V. Goryachev, Modeling of density stratification and filamentous structure formation in molecular clouds after shock wave collision, Computers & Fluids, 2018, Vol. 173, P. 189-194.
5. E.V. Mikhailchenko, V.F. Nikitin, V.D. Goryachev. Simulation of the Operation of a Detonation Engine, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, P. 98–107.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИ ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный 79, Красноярск 660041, Россия

При проектировании и оптимизации циклических движителей для изучения аэродинамических характеристик широко применяется численное моделирование. В большинстве работ [1-2] рассматривается идеализированная геометрия ротора, представляющая собой либо просто набор лопастей, либо набор лопастей, ограниченный плоскими боковыми дисками (рис.1).

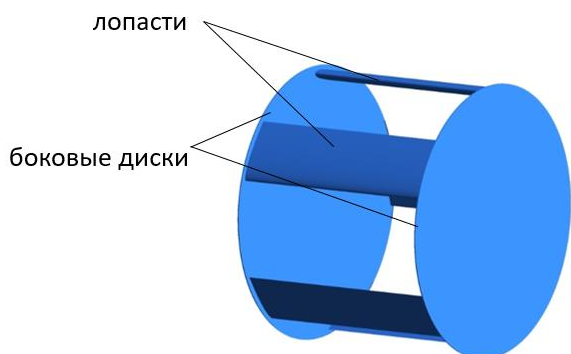


Рис. 1. Геометрия ротора в идеальной постановке.

В ходе разработки и первичной оптимизации циклоидального ротора нами также было использовано численное моделирование с использованием идеализированной геометрической постановки. Такая постановка позволяет минимизировать время на подготовку расчетной области и экономить вычислительные ресурсы за счет относительно небольшой детализации расчетной сетки. Расчеты в идеальной постановке использовались для выбора оптимального профиля и количества лопастей, подбора диаметра и длины ротора под необходимые тяговые характеристики, оптимизации кинематической схемы изменения углов лопастей.

В последующем, при проведении измерений на экспериментальном роторе было обнаружено заметное расхождение между экспериментальными и расчетными данными, как по тяге ротора, так и по затрачиваемой мощности.

Для приближения модели к условиям реального эксперимента в расчетную геометрию были добавлены зазоры между дисками и лопастями, вал ротора с элементами крепежа, управляющие тяги лопастей, элементы системы управления и силовой установки, а также части экспериментального стенда, взаимодействующие с потоком. Плоские диски были заменены дисками с реалистичным рельефом (рис.2).

В таблице 1 представлены результаты моделирования и экспериментальные данные тягово-энергетических характеристик для циклоидального ротора диаметром 600 мм и длиной лопасти 500 мм при частоте вращения 1000 об/мин.

Механическая мощность, измеренная в эксперименте с помощью датчика момента, включает потери

на ременной передаче, в расчетах эти потери не учитываются, а по оценкам они составляют около 5%.

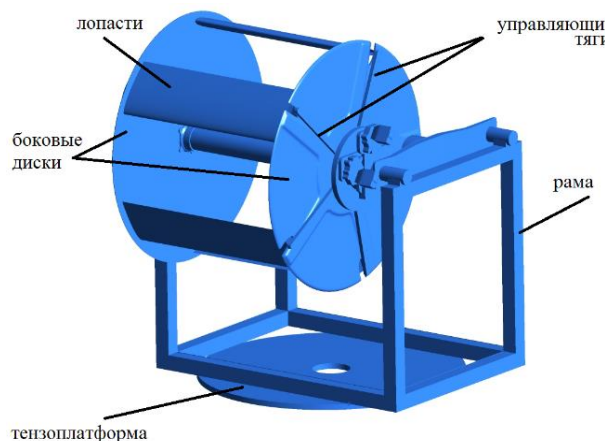


Рис. 2. Геометрия ротора в подробной постановке.

Как видно из таблицы подробное описание геометрии объекта позволяет существенно приблизить результаты моделирования к данным эксперимента, как по генерируемой ротором тяге, так и по затрачиваемой мощности.

Таблица 1. Сравнение расчетных и экспериментальных параметров ротора

	Тяга, кгс	Мощность, кВт
Идеализированная модель	11,6	1,84
Подробная модель	10,3	2,0
Эксперимент	10,6	2,12

Подробная модель, не только улучшила точность моделирования, но и позволила проводить анализ влияния отдельных элементов конструкции реального ротора на его характеристики. Так, дальнейшая оптимизация геометрии управляющих тяг лопастей, рельефа дисков и др. позволила повысить энергетическую эффективность циклоидального ротора.

### Список литературы

- Xisto, C. M., Leger, J. A., Páscoa, J. C., Gagnon, L., Masarati, P., Angeli, D., & Dumas, A. (2017). Parametric analysis of a large-scale cycloidal rotor in hovering conditions. *Journal of Aerospace Engineering*, 30(1), 04016066.
- Gagnon, L., Quaranta, G., & Schwaiger, M. (2019, January). Open-Source 3D CFD of a Quadrotor Cyclogyro Aircraft. In *OpenFOAM®: Selected Papers of the 11th Workshop* (pp. 373-388). Cham: Springer International Publishing.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО РАСТВОРА В ДВУМЕРНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Денисенко В.В., Фортова С.В.

Институт автоматизации проектирования РАН,  
ул. 2-Я Брестская, д.19/18, Москва, 123056, Россия

Полимерный раствор обладает необычными реологическими свойствами, связанными с упругими свойствами полимеров. Эти свойства проявляются в том случае, когда полимеры оказываются сильно растянутыми. Сильное растяжение происходит как в ламинарных, так и в хаотических потоках. Эффективность растяжения определяется безразмерным числом Вайссенберга  $Wi = U/\gamma_0 L$ , равным отношению градиента скорости течения к темпу линейной релаксации полимерной молекулы  $\gamma_0$ . Сильное растяжение полимеров (coil-stretch transition) происходит при  $Wi \approx 1$ . При дальнейшем увеличении  $Wi$  возможен переход в состояние эластической турбулентности, которое является хаотическим состоянием с сильными флуктуациями потока [1-2].

В работе исследовались характеристики течения полимерного раствора, находящегося под воздействием внешней периодической силы (задача Колмогорова) в периодической квадратной области размером  $2\pi \times 2\pi$ . Рассматривались медленные течения с числом Рейнольдса  $Re \sim 1$ . Для них изучалось формирование различных режимов эластической турбулентности и исследовались их характеристики (влияние параметра, характеризующего степень обратного влияния полимеров на поток  $A$  на динамику поля растяжения  $R$ , скейлинг для скорости и растяжения полимеров на масштабах накачки и т.д.). Для понимания закономерностей перекачки энергии от гидродинамического потока к полимерной составляющей течения построены спектральные характеристики гидродинамического поля течения и поля полимерной компоненты.

Опишем постановку рассматриваемой задачи. Используется следующая система уравнений, описывающая динамику полимерного раствора [3]:

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

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} - \rho G \sin(ky) \cos(kx) + \mu \Delta u + A \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) \{R^x\}^2] + A \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) R^x R^y],$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho G \sin(kx) \cos(ky) + \mu \Delta v + A \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) \{R^y\}^2] + A \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) R^x R^y],$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \vec{V}^2/2 + e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \vec{V} \left( \frac{\rho \vec{V}^2}{2} + p + e \right) \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \right. \right. \\ &- \left. \frac{\partial v}{\partial y} \right) + A u \gamma(R) (R^x)^2 + v \mu \rho \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ &+ A v \gamma(R) R^x R^y \left. \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \rho \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + A u \gamma(R) R^x R^y + \right. \\ &v \mu \rho \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) + A v \gamma(R) (R^y)^2 \left. \right) - \\ &u \rho G \sin(ky) \cos(kx) + v \rho G \sin(kx) \cos(ky), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial R^x}{\partial t} + u \frac{\partial R^x}{\partial x} + v \frac{\partial R^x}{\partial y} - R^x \frac{\partial u}{\partial x} - R^y \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma(R) R^x = C_d \Delta R^x,$$

$$\frac{\partial R^y}{\partial t} + u \frac{\partial R^y}{\partial x} + v \frac{\partial R^y}{\partial y} - R^x \frac{\partial v}{\partial x} - R^y \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma(R) R^y = C_d \Delta R^y,$$

$$p = \sigma \rho e, \sigma = \frac{2}{3}, \gamma(R) = \gamma_0 (1 + R^2/R_m^2), \vec{V} = (u, v)^T.$$

Здесь  $A$  – коэффициент концентрации полимеров в растворе,  $C_d$  – коэффициент искусственной диффузии полимеров, введенный для стабилизации численного решения,  $\gamma(R)$  – модель релаксации полимерной молекулы,  $G$  – интенсивность внешней силы. В качестве модели упругости полимеров использовано приближение модели FENE-P [4], когда  $R \ll R_m$ :  $\gamma(R) = \gamma_0 (1 + R^2/R_m^2)$ . Здесь  $R_m$  – максимальная величина растяжения полимерной молекулы.

Для численной аппроксимации системы (1) использовалась гибридная численная методика. Уравнения Навье-Стокса аппроксимировались линейризованным методом Годунова [5]. Последние два уравнения, описывающие динамику вектора растяжения полимерной молекулы  $\vec{R} = (R^x, R^y)$  решались численной методикой Курганова-Тедмора [6]. Данная аппроксимация довольно хорошо себя зарекомендовала в предыдущих работах по исследованию данных типов течений [3].

### Список литературы

1. S. Berti and G. Boffetta. Elastic waves and transition to elastic turbulence in a two-dimensional viscoelastic Kolmogorov flow. // Phys. Rev. E 82, 036314 (2010)..
2. Alexander Groisman and Victor Steinberg. Elastic turbulence in curvilinear flows of polymer solutions. // New Journal of Physics. March 2004 DOI: 10.1088/1367-2630/6/1/029.
3. Денисенко В. В., Фортова С. В. Численное моделирование эластической турбулентности в ограниченной двумерной ячейке. // Сибирский Журнал Индустриальной Математики, Т. 26, №1(93), 2023, С. 55-64.
4. Victor Steinberg. Elastic Turbulence: An Experimental View on Inertialless Random Flow. // Annu. Rev. Fluid Mech. 2021.53.
5. С. К. Годунов, В. В. Денисенко, Д. В. Ключинский, С. В. Фортова, В. В. Шепелев. Исследование энтропийных свойств линейризованной редакции метода Годунова. // ЖВМиМФ, 2020, Т 60, номер 4, С 639–651.
6. Alexander Kurganov and Eitan Tadmor, New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection-Diffusion Equations. // Journal of Computational Physics 160, 241–282 (2000).

*Работа выполнена по госзаданию № 124022400174-3  
«Вычислительный эксперимент на суперкомпьютерах в задачах механики сплошных сред».*

## CFD-DEM МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА С ЧАСТИЦАМИ БИОМАССЫ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ

Ершов М.И.<sup>1,2</sup>, Абаймов Н.А.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>1</sup>, Тупоногов В.Г.<sup>1</sup>, Рыжков А.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет,  
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

<sup>2</sup> ООО «ПЛИМ Урал»,  
ул. Metallургов 166, Екатеринбург, 620131, Россия

Биомасса является углеродно-нейтральным возобновляемым источником энергии и может служить сырьем для производства синтез-газа в поточных газификаторах. Особое внимание при разработке реакторных процессов требуется уделять форме частиц. Обычно используемые даже грубодисперсные материалы типа дробленого угля, относящиеся к группе D по классификации Гелдарта имеют достаточно сферичную форму частиц. В случае использования топливной биомассы, включая древесный опил, приходится работать с частицами неправильной формы (пластинчатой, игольчатой), для которых коэффициент гидравлического сопротивления существенно зависит не только от формы частиц, но и от ориентации относительно направления потока. Таким образом, разработка компьютерных моделей движения частиц биомассы неправильной формы в несущем потоке воздуха до сих пор представляет интерес для научного сообщества. В работе на основании литературных [1] и собственных экспериментальных данных протестированы и валидированы две CFD-DEM модели движения частиц неправильной формы применительно к кипящему и фонтанирующему слоям, а также к поточному режиму работы реактора. В первой модели используются уже известные законы силы сопротивления, подъемной силы и вращающего момента, а во второй упрощенной модели впервые был применен подход принудительной ориентации частиц в потоке согласно аэродинамике роя частиц, при задании вращающего момента. Для валидации моделирования кипящего слоя рассматривалась установка в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением и частицы из алюминия, а для фонтанирующего слоя и поточного режима – плоская призматическая установка с нижней частью в виде конуса с углом раскрытия 38° и верхней прямоугольной частью, где в качестве дисперсной среды используется опил.

Взаимодействие роя частиц с потоком газа моделируется комбинацией методов CFD и DEM (CFD-DEM моделирование), где метод CFD отвечает за моделирование потока газа, а метод DEM отвечает за отслеживание частиц и механику взаимодействия частиц с потоком и контактное взаимодействие твердых тел. Для обеих моделей сила сопротивления в зависимости от угла набегающего потока газа на частицу вычислялась на основании подмодели Hölzer A., Sommerfeld M. [2] и поправки на порозность в районе рассматриваемой частицы Di Felice R. [3]. В первой модели подъемная сила и вращательный момент от потока вычислялись на основании подмоделей Sanjeevi Sathish K.P. [4]. Во второй модели подъемная сила не учитывалась, а вращательный момент вычислялся из условия принудительной ориентации частиц длинной стороной вдоль линий тока при восходящем движении и

перпендикулярно вертикальной оси аппарата в случае выхода из струи и свободного падения. Ориентация частицы относительно набегающего потока в глобальной системе координат определялась на основе теоремы вращения Эйлера и матрицы поворота.

Модели основаны на двустороннем сопряжении CFD-решателя для описания сплошных сред в программе Ansys Fluent и DEM-решателя для моделирования поведения отдельных частиц биомассы неправильной формы в программе Rocky DEM. Численные исследования проводились с обеспечением достаточно низкого уровня максимальной невязки балансовых уравнений (0,0001) на сетках с качеством по ортогональности не ниже 0,1. Результаты CFD-DEM моделирования хорошо согласуются с экспериментальными и литературными данными, что подтверждает применимость моделей для изучения движения частиц биомассы неправильной формы в несущем потоке воздуха с различной объемной концентрацией частиц.

Предложенная на основании литературных данных и экспериментальных исследований упрощенная численная модель позволяет моделировать движение роя частиц биомассы при различной объемной концентрации и различной ориентации частиц относительно набегающего потока с адекватной точностью. При этом предлагаемая модель значительно более универсальная и простая в настройке, чем существующие, благодаря отсутствию необходимости ручного ввода множества эмпирических коэффициентов для различных типоразмеров частиц на этапе задания вращающего момента, вызванного потоком.

### Список литературы

1. Mema, I., Mahajan, V.V., Fitzgerald, B.W., Padding J.T. Effect of lift force and hydrodynamic torque on fluidisation of non-spherical particles // Chemical Engineering Science. 2019. V. 195. P. 642-656.
2. Hölzer A., Sommerfeld M. New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles // Powder Technology. 2008. V. 184, N 3. P. 361-365.
3. Di Felice R. The voidage function for fluid-particle interaction systems // International Journal of Multiphase Flow. 1994. V. 20, N 1. P. 153-159.
4. Sanjeevi Sathish K.P., Kuipers J.A.M., Padding J. T. Drag, lift and torque correlations for non-spherical particles from Stokes limit to high Reynolds numbers // International Journal of Multiphase Flow. 2018. V. 106. P. 325-337.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Программы развития УФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".*

# КВАЗИГОМОГЕННАЯ ФОРМА СИСТЕМЫ ЧЕТЫРЕХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ, ЕЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Злотник А.А.<sup>1,2</sup>, Ломоносов Т.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",  
Покровский бульвар, 11, Москва, 109028, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
Миусская пл., 4, Москва, 125047, Россия

Существует иерархия систем уравнений для описания динамики гетерогенных смесей. Данная работа связана с известной в литературе так называемой системой из четырех уравнений динамики гетерогенных смесей типа газ-жидкость, используемой в случае общей скорости и температуры компонент смеси [1]. Она включает уравнения баланса массы компонент и баланса импульса и полной энергии смеси

$$\begin{aligned} \partial_t(\alpha_k r_k) + \operatorname{div}(\alpha_k r_k \vec{u}) &= 0, \quad k = 1, 2, \\ \partial_t(\rho \vec{u}) + \operatorname{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \nabla p &= \rho \vec{f}, \\ \partial_t E + \operatorname{div}((E + p)\vec{u}) &= \operatorname{div}(-q^F) + \rho \vec{u} \cdot \vec{f} + Q. \end{aligned}$$

В ней участвуют объемная концентрация  $0 < \alpha_k < 1$  и плотность  $r_k > 0$  компонент, скорость  $\vec{u}$  и удельная внутренняя энергия смеси  $\varepsilon$ , а также полная масса  $\rho = \alpha_1 r_1 + \alpha_2 r_2$  и полная энергия  $E = 0.5 \rho |\vec{u}|^2 + \rho \varepsilon$  смеси. Также  $\vec{q}^F = -\kappa \nabla \theta$  – это поток тепла, где  $\theta > 0$  – абсолютная температура смеси. Для компонент применяются широко употребляемые уравнения состояния «сжатого» газа

$$\begin{aligned} p_k(r_k, \theta) &= (\gamma_k - 1) c_{V_k} r_k \theta - p_{*k}, \\ \varepsilon_k(r_k, \theta) &= c_{V_k} \theta + \frac{p_{*k}}{r_k} + \varepsilon_{0k}, \end{aligned}$$

где  $\gamma_k > 1$ ,  $c_{V_k} > 0$ ,  $p_{*k} \geq 0$ ,  $\varepsilon_{0k}$  – известные физические постоянные,  $k = 1, 2$ . Обычно значение  $p_{*k} = 0$  отвечает газу, а  $p_{*k} > 0$  – жидкости. При этом существенно, что давлением смеси служит общее давление компонент  $p = p_1 = p_2$ .

Данная система используется в квазигомогенной форме, в которой искомыми функциями являются альтернативные плотности компонент  $\rho_k = \alpha_k r_k$  вместе с  $\vec{u}$  и  $\varepsilon$ , а  $\alpha_k$ ,  $r_k$  и  $\theta$  исключены [1]. Это возможно благодаря тому, что  $p$  удовлетворяет квадратному уравнению  $p^2 - bp - c = 0$  с известными коэффициентами  $b = b(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$ ,  $c = c(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$ . Доказывается, что его положительное решение  $p = p_+(\rho_1, \rho_2, \varepsilon) > 0$  существует и единственно. Имеются также явные формулы для  $\theta = \theta(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$ . Такая форма имеет преимущества при построении численных методов.

Несколькими способами выводится новая компактная формула для квадрата скорости звука для этой системы уравнений

$$c_s^2 = \frac{\gamma(p_+ + p_{*1})(p_+ + p_{*2})}{\rho \sqrt{d}}, \quad \gamma = \frac{\gamma_1 c_{V1} \rho_1 + \gamma_2 c_{V2} \rho_2}{c_{V1} \rho_1 + c_{V2} \rho_2}$$

где  $d = b^2 + 4c$  – дискриминант квадратного уравнения для  $p$ . Выписывается уравнение баланса давле-

ния смеси, содержащее эту скорость звука. Доказывается полезное неравенство  $c_s^2 \leq c_{sW}^2$ , где  $c_{sW}$  – известная скорость звука смеси по Вуду.

Благодаря квазигомогенной форме указанной системы уравнений оказывается возможным выполнить ее специальную регуляризацию квазигазодинамического типа [2,3]. Она связана с использованием регуляризирующих скоростей, тензора вязкости и потока тепла с искусственными коэффициентами вязкости и теплопроводности с малым параметром. Для регуляризованной системы приводятся уравнения баланса массы, кинетической энергии и внутренней энергии смеси. Для упрощенной регуляризованной системы выводится также уравнение баланса энтропии смеси с неотрицательным производством энтропии.

Для регуляризованной системы уравнений в одномерном случае строится явная по времени и симметричная трехточечная по пространству разностная схема без применения лимитеров. Такая схема условно устойчива при условии типа Куранта именно благодаря использованию регуляризации. Выписываются разностные уравнения баланса массы, кинетической и внутренней энергий смеси.

Выполняется серия расчетов известных в литературе тестов и приводятся успешные результаты численных экспериментов.

Основные результаты данной работы представлены в статье [4].

## Список литературы

1. Le Martelot S., Saurel R., Nkonga B. Towards the direct numerical simulation of nucleate boiling flows // Int. J. Multiphase Flow. 2014. V. 66. P. 62-78.
2. Четверушкин Б.Н. Кинетические схемы и квазигазодинамическая система уравнений. М.: МАКС Пресс, 2004.
3. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. М.: Научный мир, 2007.
4. Zlotnik A., Lomonosov T. On a doubly reduced model for dynamics of heterogeneous mixtures of stiffened gases, its regularizations and their implementations // Chaos. 2023. Vol. 33. No. 11. Article 113128. 20 pp.

*Работа поддержана РНФ, проект 22-11-00126 (анализ модели и ее регуляризация) и Московским центром фундаментальной и прикладной математики по соглашению с Минобрнауки РФ, проект 075-15-2022-283 (разностный метод и расчеты).*

**О РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЯХ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ "СЖАТЫХ" ГАЗОВ НОУБЛА-АБЕЛЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИИ**

**Злотник А.А.<sup>1,2</sup>, Ломоносов Т.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",  
Покровский бульвар, 11, Москва, 109028, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
Миусская пл., 4, Москва, 125047, Россия

Работа связана с известной в литературе так называемой системой из четырех уравнений динамики гетерогенных смесей типа газ-жидкость [1]. Система рассматривается в квазигомогенной форме и состоит из уравнений баланса массы компонент и баланса импульса и полной энергии смеси

$$\begin{aligned} \partial_t \rho_k + \operatorname{div}(\rho_k \vec{u}) &= 0, k = 1, 2, \\ \partial_t(\rho \vec{u}) + \operatorname{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \nabla p &= \rho \vec{f}, \\ \partial_t(0.5\rho|\vec{u}|^2 + \rho\varepsilon) + \operatorname{div}((0.5\rho|\vec{u}|^2 + \rho\varepsilon + p)\vec{u}) &= \\ &= \operatorname{div}(-\vec{q}^F) + \rho \vec{u} \cdot \vec{f} + Q. \end{aligned}$$

Здесь  $\rho_k = \alpha_k r_k$ , а  $r_k > 0$  – плотность и  $0 < \alpha_k < 1$  – объемная доля  $k$ -й компоненты смеси,  $\vec{u}$  и  $\theta > 0$  – общие скорость и абсолютная температура смеси. Кроме того,  $\vec{q}^F = -\kappa \nabla \theta$  – поток тепла.

Берутся уравнения состояния "сжатого" газа Ноубла-Абеля [2]

$$\begin{aligned} p_k(r_k, \theta) &= \frac{(\gamma_k - 1)c_{V_k} r_k \theta}{1 - b_k r_k} - p_{*k}, \\ \varepsilon_k(r_k, \theta) &= c_{V_k} \theta + \frac{p_{*k}(1 - b_k r_k)}{r_k} + \varepsilon_{0k}, \end{aligned}$$

где  $0 < r_k < b_k^{-1}$ , а  $\gamma_k > 1, c_{V_k} > 0, b_k \geq 0, p_{*k} \geq 0, \varepsilon_{0k}$

– заданные физические постоянные,  $k = 1, 2$ . Давления компонент совпадают:  $p = p_1 = p_2$ .

Целью работы является расширение результатов [3] со случая уравнений состояния сжатого газа (где  $b_k = 0$ ) на уравнения сжатого газа Ноубла-Абеля.

Для  $p = p(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$  справедливо квадратное уравнение вида  $p^2 - \beta p - c = 0$  с известными коэффициентами  $\beta = \beta(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$ ,  $c = c(\rho_1, \rho_2, \varepsilon)$ . Обосновывается, что физическое решение  $p = p_+ > 0$  существует и единственно.

Обобщается новая компактная формула для скорости звука для этой системы уравнений. Выводится уравнение баланса давления смеси с использованием этой формулы. Прямым образом устанавливается, что эта скорость звука не превосходит известную скорость звука смеси по Вуду.

Затем обобщается регуляризация из [3] квазигазодинамического типа [4] указанной системы уравнений. Указываются некоторые ее свойства.

Обобщается также явная по времени и симметричная трехточечная по пространству разностная схема без использования лимитеров для регуляризованной системы уравнений в одномерном случае.

Разработан программный комплекс на языке C#, реализующий разностную схему. С его помощью рассчитывается набор известных в литературе тестов. В том числе моделируется начальная стадия течения с

кавитацией в трубе (тест 8.2.1 в [5]). В этом тесте берутся две фазы воды: 1% водяного пара и 99% жидкой воды, и для них применяются соответственно уравнения состояния с физическими постоянными  $(\gamma_1, p_{*1}, \varepsilon_{01}, c_{V1}, b_1) = (1.467, 0, 2077616, 955, 0)$  и  $(\gamma_2, p_{*2}, \varepsilon_{02}, c_{V2}, b_2) = (1.187, 7.028 \times 10^8, -1177788, 3610, 6.61 \times 10^{-4})$ .

Начальные данные имеют вид  $(\alpha_1, u, p, \theta) = (0.01, 2 \operatorname{sgn} x, 10^5, 353)$  при  $|x| \leq 0.5$ . На рис. 1 продемонстрированы результаты при  $t_{fin} = 0.003$ .

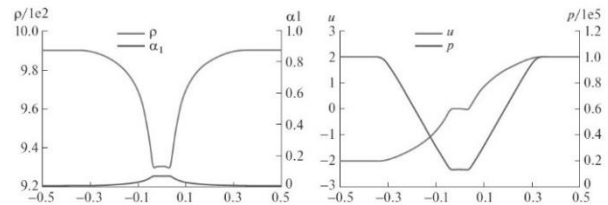


Рис. 1. Результаты расчета течения с кавитацией.

Основные результаты опубликованы в [6]. Дополнительно к [3,6] успешно начата реализация более сложной модели с учетом фазовых переходов испарение/конденсация.

**Список литературы**

1. Saurel R., Boivin P., Le Métayer O. A general formulation for cavitating, boiling and evaporating flows // Comput. Fluids. 2016. V. 128. P. 53–64.
2. Le Métayer O., Saurel R. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state // Phys. Fluids. 2016. V. 28. P. 046102.
3. Zlotnik A., Lomonosov T. On a doubly reduced model for dynamics of heterogeneous mixtures of stiffened gases, its regularizations and their implementations // Chaos. 2023. Vol. 33. No. 11. Article 113128.
4. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. М.: Научный мир, 2007.
5. Pelanti M. Arbitrary-rate relaxation techniques for the numerical modeling of compressible two-phase flows with heat and mass transfer // Int. J. Multiphase Flow. 2022. V. 153, article 104097.
6. Злотник А.А., Ломоносов Т.А. Регуляризованные уравнения динамики гетерогенных бинарных смесей "сжатых" газов Ноубла-Абеля и их применение // ДАН. 2023. Т. 514. № 1. С. 26–33.

*Работа поддержана РФФ, проект 22-11-00126 (анализ модели и ее регуляризация) и Московским центром фундаментальной и прикладной математики по соглашению с Минобрнауки РФ, проект 075-15-2022-283) (разностный метод и расчеты).*



**ПРОФИЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ЖИДКОГО ВОДОРОДА****Ильинская Д.Н.**

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, Москва, 105005, Россия

Профилируемый шнекоцентробежный насос входит в состав турбонасосного агрегата двигателя. Применение компьютерных технологий позволяет не только автоматизировать процесс разработки, но и улучшить качество конструируемых изделий, что позволит сократить сроки разработки и приведёт к снижению затрат на весь жизненный цикл изделия.

Из-за особенностей физико-химических свойств водорода моделирование рабочего процесса насоса жидкого водорода является сложной задачей. При этом сложная геометрия и нестационарность протекающих процессов также накладывают дополнительные трудности на создание CFD-модели.

Для уменьшения вероятности ошибок при постановке задачи рекомендуется увеличивать сложность постепенно. Поэтому решение задачи с переменной плотностью, зависящей от давления и температуры, рационально выполнять в несколько этапов. Сначала решить задачу с постоянной плотностью без учёта изменения температуры, затем решить аналогичную задачу с учётом изменения температуры, затем – с зависимостью плотности от давления и температуры. Поэтапное движение позволяет локализовать возможную область возникновения ошибки, и общее время решения задачи оказывается меньше.

В данной работе использовался CFD-пакет программы ANSYS CFX – пакета вычислительной гидродинамики. В результате был проведён расчёт шнекоцентробежного насоса с двумя вариантами рабочего центробежного колеса. Колёса отличались только профилированием лопаток, что имеет прямое отношение к качеству получаемого рабочего колеса. При этом также была произведена попытка решения задачи с использованием переменности теплофизических свойств водорода (конкретнее – плотности) при изменении давления и температуры.

Геометрическая форма проточной части насоса была получена в результате расчётов по методикам [1, 2]. Рабочее колесо имеет 8 лопаток, шнек 4 лопатки с переменным шагом, диффузор безлопаточный, а также установлена улитка для направления потока. Диаметр шнека составляет 56 мм, диаметр рабочего колеса 130 мм, диаметр диффузор 152 мм, габаритный размер насоса вместе с направляющим аппаратом составляет около 200 мм в диаметре.

На основе полученной геометрии была создана сеточная модель. Такая геометрия является сложной для моделирования, поэтому все расчёты велись для сегментов с заданием интерфейсов периодичности между стенками. Для более точного моделирования сетка на рабочих лопатках, втулочной поверхности (ведущего обвода) и внешнего обвода (ведомого) был смоделирован пограничный слой, состоящий из 5 слоёв сетки. Итоговая сетка содержит 4128798 элементов.

При анализе результатов наблюдалось вихреобразование в межлопастном канале, а также области с отрицательным полным давлением, измеренным в неподвижной системе координат. Это противоречащее законам физики поведение потока объясняется ошибками моделирования. Главной методологической ошибкой является отсутствие моделирования кавитации. В реальном физическом процессе давление жидкости конечно не может понизиться не только ниже нуля, но и меньше давления насыщенных паров при данной температуре. Как только давление снижается ниже, наступает разрыв сплошности течения – переход части жидкости в газовую фазу.

Причиной вихреобразования также могут быть как ошибки при CFD-моделировании, так и неидеальность профилирования рабочего колеса. При проведении расчётов такая ситуация нередка и для устранения всех ошибок, как правило, приходится повторять расчёт от 3-ёх до 7-ми раз.

Также в рамках работы было проведено моделирование с учётом переменных свойств жидкого водорода. В первом случае изменение плотности водорода в программу были заданы в виде полинома второй степени [3]. Во втором случае – в табулированном виде. Однако результаты моделирования оказались неудовлетворительными, предположительно, из-за заброса давления в отрицательную область может возникать принципиальная математическая ошибка – деление на 0, что не даёт довести моделирование до конца.

Для дальнейшего моделирования рабочего процесса водородного шнекоцентробежного насоса в ANSYS CFX перспективно применение метода задания переменной плотности жидкого водорода в виде функциональной зависимости или в табулированном виде на малом промежутке изменения температуры/давления. В рамках дальнейших исследований в данной области будут изучены проблемы моделирования процессов поведения потока жидкого водорода в том числе с включенной моделью кавитации. Однако стоит отметить, что предустановленный насос подкачки, а также шнек обеспечивают необходимый кавитационный запас.

**Список литературы**

1. Матвеев, В.Н. Проектный расчет шнекоцентробежного насоса: Учебное пособие / В.Н. Матвеев, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 64 с.
2. Пананотти С.С., Савельев А.И., Кузнецов А.В. Автоматизированный расчёт и проектирование высокооборотного шнекоцентробежного насоса: Руководство пользователя. – Калуга, 2008. – 70.
3. Численное моделирование потоков в водородных шнекоцентробежных насосах турбонасосных агрегатов ЖРД [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нап. исслед. ун-т); сост.: А.В. С ул и но в, Л.С. Шаблий, В.М. Зубано в. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,6 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

## ОСОБЕННОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

Кашкарова М.В.<sup>1,2</sup>, Скрипкин С.Г.<sup>1,2</sup>, Цой М.А.<sup>1</sup>, Кравцова А.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Кавитация - один из основных параметров, негативно влияющих на динамику движения жидкости при больших числах Рейнольдса [1-4]. Кавитационные процессы возникают как на направляющем аппарате и рабочих колесах гидротурбин, так и в небольших технологически предусмотренных для эксплуатации щелевых зазорах [5-6]. Зачастую эти зазоры имеют сложную конфигурацию и элементы округлой формы, как например, щелевой зазор между направляющим аппаратом и корпусом спиральной камеры снабжен телом округлой формы, являющимся частью крепежного штока. Особенностям кавитационного обтекания тел цилиндрической формы в щелевых каналах и посвящена данная работа.

Исследования проводились методами математического моделирования. Данные верифицировались результатами экспериментальных измерений. Изучалось движение кавитационного течения в щелевом канале длиной 145 мм, шириной 120 мм и высотой 1,2 мм. Соотношение сторон щелевого канала составляет 0,01, что является характерной величиной для щелевых зазоров в гидротехническом оборудовании. Исследования проведены для различного расхода подаваемой жидкости,  $Q$ , в диапазоне от  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Граничные условия: на входе задавалась скорость потока. На выходе ставилось условие свободного истечения. Соотношение воды и водяного пара на выходе составляло 0,98:0,02.

Направление  
потока

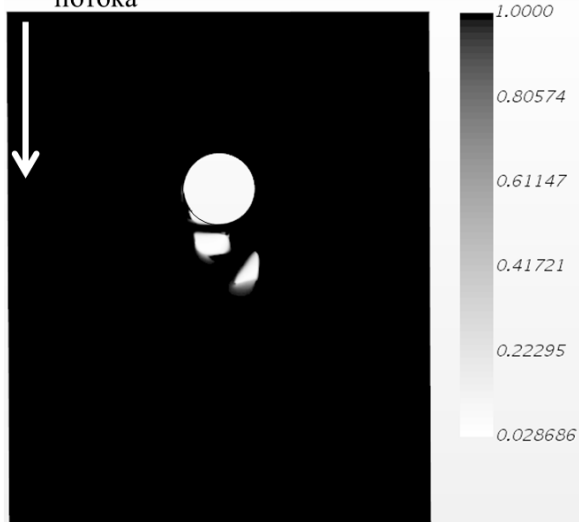


Рис. 1. Визуализация возникающей в потоке кавитационной полости после тела цилиндрической формы в щелевом канале. Представлена объемная доля жидкости в потоке при величине расхода жидкости на входе  $Q = 7,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

По результатам работ рассчитаны объемные доли жидкости и пара-газовых полостей в потоке. Определены особенности возникновения и развития кавитационного течения позади цилиндра в щелевых зазорах. Поля скоростей и давлений получены для различных значений расхода жидкости на входе в щелевой канал. В результате анализа полученных профилей было показано, что на поля скоростей и давлений влияет наличие кавитационной полости - в области каверны происходит понижение скорости. Еще одной особенностью является то, что в сечениях близких к выходу из канала, где, казалось бы, отсутствуют каверны и нет влияния тела обтекания, происходит искривление фронтов скорости и давления. Это происходит по причине образования волн давления от схлопнутых ранее кавитационных полостей. И такая тенденция наблюдается при всех значениях расхода.

### Список литературы

1. Dorfler P., Sick M., Coutu A. Flow-induced pulsation and vibration in hydroelectric machinery // Springer London. 2012. 244 с.
2. Pereira J.G., Vagnoni E., Favrel A., Nicolet C., Avellan F. Prediction of unstable full load conditions in a Francis turbine prototype // Mech. Syst. Signal Process. 2022. V. 169. 108666.
3. Han H., Xiang L., Xu K., Geng D., Ren Z., Wu G., Liu S., Zuo Z. Influence of Tip Clearance on Cavitation Characteristics of an Inducer of Turbopump: CFD Study Processes. 2023. V. 11 (1). 55.
4. Skripkin S., Zuo Z., Tsoy M., Kuibin P., Liu S. Oscillation of cavitating vortices in draft tubes of a simplified model turbine and a model pump-turbine 1 B // Energies. 2022. V. 15(8). 2965.
5. Tsoy M.A., Skripkin S.G., Naumov I.V., Kravtsova A.Y. High-speed visualization of cavities occurring behind a NACA0012 hydrofoil with low aspect ratio // Thermophysics and Aeromechanics, 2022, 29.
6. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kravtsova A.Y. Experimental Study of Cavitating Flow around a NACA 0012 Hydrofoil in a Slit Channel // Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 11182.

*Работа выполнена в рамках гос. задания.*

## ОСОБЕННОСТИ МАССООБМЕНА В ЗАМКНУТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ ПРИ АДАПТИВНОМ ВРАЩЕНИИ БОКОВОЙ СТЕНКИ

**Кашкарова М.В., Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р.**

Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия.

Биореакторы используются в химической, медицинской, биологической и др. отраслях для осуществления процессов перемешивания различных культуральных сред. Эффективность таких процессов регулируется изменением различных условий таких, например, как температуры, скорости мешалки, внешние вибрации и тп.

На технологические процессы могут быть наложены различные ограничения и определены лимитирующие факторы. Например, слишком высокие скорости мешалки в одних средах могут приводить к гибели микроорганизмов в перемешиваемом составе, а в других средах слишком низкие скорости приводят к образованию застойных зон, что также является недопустимым в рамках процесса. Таким образом, подбор условий для конкретного технологического процесса является ключевой задачей, для решения которой важно понимать степень влияния каждого граничного условия на динамику потока в биореакторе.

Изменение граничных условий влияет на картину течения в биореакторе. Исследования в рамках данной проблематики проводятся для различных конфигураций. В [1] исследованы картины течений при одновременном вращении крышки и дна цилиндрического контейнера. В [2] изучена топология потока при вращающемся дне и свободной поверхности. В работе [3] показано, что при различных граничных условиях пузырьвидный распад проходит все этапы "эволюции"; отличие в том, что при разных условиях переход от одного этапа к другому происходит при разных значениях числа  $Re$ . вблизи оси биореактора формируется восходящая закрученная струя, а, при определенных параметрах вихревого движения, в осевой области формируется пузырьвидный распад вихря [2, 4].

В данной работе исследованы особенности массообмена в модели биореактора - цилиндрическом контейнере с вращающейся крышкой, генерирующей вихревое движение. Особенностью рассматриваемой конфигурации является адаптивное вращение боковой стенки цилиндра. То есть контейнер расположен на свободновращающейся подставке, ось которой совпадает с осью вращающегося верхнего диска (крышки). Вращение крышки приводит в движение жидкость, которая, в свою очередь, приводит во вращение сам контейнер.

Предполагается, что вращение боковой стенки снизит затухание окружной компоненты скорости в осевом направлении от вращающейся крышки, что в свою очередь приведет к интенсификации массообмена в выделенном слое культуральной или модельной среды.

Моделирование динамики жидкости в цилиндрическом контейнере при адаптивном вращении было выполнено в CFD-пакете STAR CCM+. Расчетная область представляла собой цилиндр с соотношением

высоты к радиусу равным  $R$ . Полигональная сетка состояла из  $1.5 \cdot 10^6$  ячеек. Исследовался диапазон чисел Рейнольдса от 500 до 3000. В качестве рабочей жидкости выступала однофазная среда с заданными физическими свойствами воды. Течение описывалось стационарной системой уравнений Навье-Стокса. Отношение скорости движения крышки к скорости стенки/дна изменялось в диапазоне 5..20. На крышке задавалась угловая скорость. Значение скорости на боковых стенках задавалось в соответствии со скоростями движения контейнера, измеренными при экспериментальных исследованиях. Скорость дна была рассмотрена в двух постановках: дно вращается вместе со стенками и дно покоится.

В результате работы исследованы картины течения в цилиндрическом адаптивно движущемся контейнере. Построены и описаны поля скоростей и давления. Описаны особенности течения при адаптивном вращении стенок/дна и стенок по сравнению с классической постановкой с неподвижным контейнером и вращающейся крышкой.

### Список литературы

- Okulov V.L., Sørensen J.N., Voigt L.K. Vortex scenario and bubble generation in a cylindrical cavity with rotating top and bottom // *European J. of Mech.* 2005. V. 24, Is. 1. P. 137–148. ISSN 0997-7546. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2004.06.003>.
- Brøns M., Voigt L.K., Sørensen J.N. Topology of vortex breakdown bubbles in a cylinder with a rotating bottom and a free surface // *J. of Fluid Mech.* 2001. V. 428. P. 133–148. doi:10.1017/S0022112000002512.
- Naumov I.V., Kashkarova M.V., Mikkelsen R.F., Okulov V.L. The structure of the confined swirling flow under different phase boundary conditions at the fixed end of the cylinder // *Thermophysics and Aeromechanics.* - 2020. - Vol. 27, iss. 1. - P. 89-94.
- Naumov I.V., Gevorgiz R.G., Skripkin S.G., Tintulova M.V., Tsoi M.A., Sharifullin B.R. Experimental study of the topological flow transformations in an aerial vortex bioreactor with a floating washer // *Biotechnology Journal.* 2023. 18, 2200644. <https://doi.org/10.1002/biot.202200644>.

*Работа поддержана РФФ (грант № 24-19-00233).*

## О ТОЧНОСТИ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ СКВОЗНОГО СЧЕТА ПРИ РАСЧЕТЕ ЗАДАЧ КОШИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ РАЗРЫВНЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Ковыркина О.А., Остапенко В.В.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Система уравнений первого приближения теории мелкой воды для прямоугольного горизонтального русла при отсутствии донного трения имеет вид

$$\vec{u}_t + \vec{f}(\vec{u})_x = 0, \quad (1)$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} H \\ q \end{pmatrix}, \quad \vec{f}(\vec{u}) = \begin{pmatrix} q \\ q^2/H + gH^2/2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $H(x, t)$  и  $q(x, t)$  – глубина и расход жидкости,  $g = 9.81$  – ускорение свободного падения. Рассмотрим для системы уравнений (1), (2) две периодические задачи Коши SPC1 и SPC2 (Special Periodic Cauchy) со следующей начальной глубиной жидкости

$$H(x, 0) = H(x + iX, 0) = \sin \frac{\pi(2x-X)}{4X} + 3, \quad x \in (0, X],$$

где  $X = 9$ , – целое число. В задаче SPC1 жидкость в начальный момент времени неподвижна  $q(x, 0) = 0$ , а в задаче SPC2

$$q(x, 0) = q(x + iX, 0) = \frac{Q}{2} \left( \sqrt{2} \sin \frac{\pi(2x-X)}{4X} + 1 \right),$$

$$Q = D(H_1 - H_0), \quad D = \sqrt{\frac{gH_1(H_1 + H_0)}{2H_0}},$$

$$H_1 = H(iX, 0), \quad H_0 = H(iX + 0, 0).$$

При решении задачи SPC1 в результате распада неустойчивых сильных разрывов начальных данных формируется последовательность ударных волн и центрированных волн понижения (рис. 1), а при решении задачи SPC2 – только последовательность ударных волн (рис. 2).

В работе [1] задачи SPC1 и SPC2 рассчитывались по схемам CABARETM второго порядка [2], RBM (Rusanov-Burstein-Mirin) третьего порядка [3, 4] и WENO5 пятого порядка по пространству и третьего порядка по времени [5]. Показано, что при расчете задачи SPC1 максимальная потеря точности во всех трех схемах происходит в центрированных волнах понижения и в областях их влияния, которые совпадают с областями влияния ударных волн. Схемы RBM и WENO5 имеют в этих областях приблизительно первый порядок сходимости и достаточно близкие значения численных дисбалансов (ошибок), независимо от формального порядка их аппроксимации на гладких решениях.

В то же время при расчете задачи SPC2, точное решение которой не содержит центрированных волн понижения, схема RBM имеет существенно более высокую точность внутри областей влияния ударных волн по сравнению со схемами CABARETM и WENO5. Это означает, что для дальнейшего успешного развития теории и приложений комбинированных схем сквозного счета [6], прежде всего необходимо решить проблему сохранения их повышенной точности внутри

центрированных волн разрежения и в областях их влияния. Если эти центрированные волны возникают при решении задачи Коши с разрывными начальными данными, то для достижения повышенной точности комбинированной схемы расчет на некотором начальном временном интервале необходимо проводить на существенно более мелкой численной сетке.

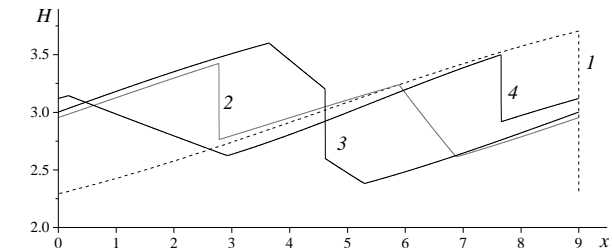


Рис. 1. Профиль глубины для задачи SPC1 на моменты времени  $t = 0$  (пунктирная линия 1),  $t = 0.5$  (линия 2),  $t = 0.85$  (линия 3) и  $t = 1.4$  (линия 4).

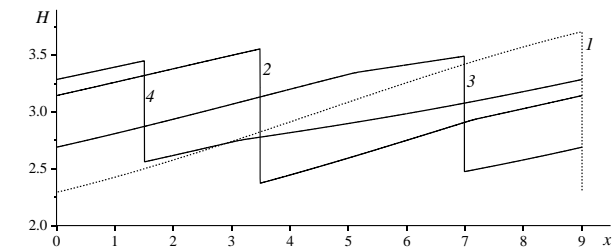


Рис. 2. Профиль глубины для задачи SPC2 на моменты времени  $t = 0$  (пунктирная линия 1),  $t = 0.5$  (линия 2),  $t = 1$  (линия 3) и  $t = 1.5$  (линия 4).

### Список литературы

1. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. On the accuracy of shock-capturing schemes when calculating Cauchy problems with periodic discontinuous initial data // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2024. V. 39, N 2. P. 97-112.
2. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О монотонности схемы КАБАРЕ, аппроксимирующей гиперболическую систему законов сохранения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2018. Т. 58, № 9. С. 1488-1504.
3. Русанов В.В. Разностные схемы третьего порядка точности для сквозного счёта разрывных решений // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180, № 6. С. 1303-1305.
4. Burstein S.Z., Mirin A.A. Third order difference methods for hyperbolic equations // J. Comput. Phys. 1970. V. 5, N 3. P. 547-571.
5. Jiang G.S., Shu C.W. Efficient implementation of weighted ENO schemes // J. Comput. Phys. 1996. V. 126. P. 202-228.
6. Брагин М.Д., Ковыркина О.А., Ладонкина М.Е., Остапенко В.В., Тишкин В.Ф., Хандеева Н.А. Комбинированные численные схемы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2022. Т. 62. №11. С. 1763-1803.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00060).

## ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЭРАЦИОННОГО РЕЖИМА В ГОРОДСКОМ КВАРТАЛЕ

Литвинцев К.Ю.<sup>1,2</sup>, Мешкова В.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
пр. Свободный 79, г. Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В данной работе рассматривается влияние солнечного и теплового излучения в условиях ясного и облачного неба на формирование аэрационного режима на примере изолированного городского квартала г. Красноярска. Исследуемый квартал, представляет собой жилой район с высотными одноподъездными зданиями, расположенный среди малоэтажных строений, который обтекается ветровым потоком в зимнее и летнее время.

Моделирование проводилось на основе микромасштабной модели городской атмосферы, основанной на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса для несжимаемых течений в неупругом приближении [1].

Для расчета переноса солнечного и теплового излучения решается стационарное уравнение переноса излучения (УПИ) с возможностью учета рассеяния на сферических частицах. Решение УПИ основано на модифицированном методе конечных объемов (МКО) [2, 3]. В рамках метеорологической модели поле излучения разделяется на коротковолновое (солнечное) излучение и длинноволновое (тепловое) излучение атмосферы и поверхности земли и зданий, для каждого из которых отдельно решается свое УПИ [3]. Тепловое излучение рассматривается в условиях прозрачной атмосферы и с учетом поглощения парами воды на основе модели взвешенной суммы серых газов (ВССГ) подхода, как в приближении серой среды, так и с решением УПИ для каждого из серых газов. Настройка параметров модели солнечного излучения в условиях ясного и среднеоблачного неба были согласованы (см. рис. 1) с данными справочника по климату [4].

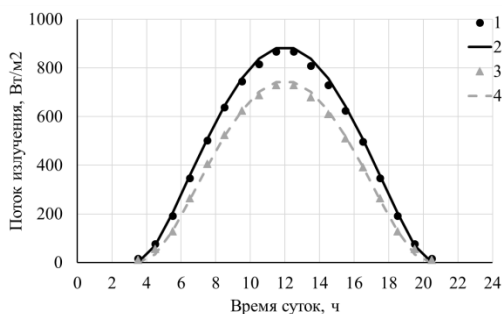


Рис. 1. Суточная динамика в июне потока падающего солнечного излучения (суммарного и прямого) на горизонтальную поверхность в ясный день в г. Красноярске: 1 — натурные наблюдения [4], суммарный; 2 — расчет, суммарный; 3 — натурные наблюдения [4], прямой; 4 — расчет, прямой.

Излучение в значительной степени влияет на процесс формирования аэрационного режима в городской среде, но оно в свою очередь зависит от метеоусловий и времени года. Например, в дневное время в условиях ясного неба солнечное излучение приводит к интенсификации конвективных течений в приземной области

по сравнению с ночным временем (см. рис. 2). В облачную погоду характер солнечного излучения изменяется за счет снижения суммарной мощности и из-за увеличения влияния рассеянного излучения. Тепловое излучение в меньшей степени определяет аэрационный режим, но также зависит от условий облачности и времени года.

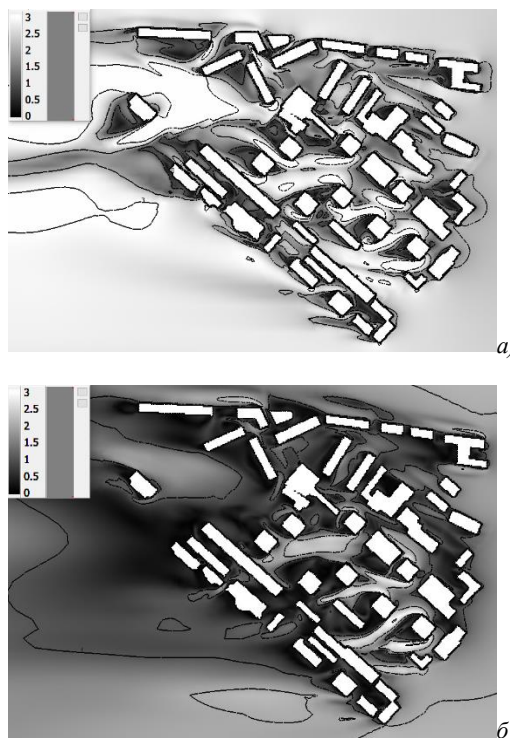


Рис. 2. Поле скорости на высоте 5 м от поверхности в июле, м/с: а) ночное время; б) полдень.

### Список литературы

1. Ogura Y., Charnay J.G. A numerical model of thermal convection in the atmosphere. // Proc. Int. Symp. on Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan, Meteorological Society of Japan, pp. 431–451, 1962.
2. Chai J.C., Patankar S.V. Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer // Advances in Numerical Heat Transfer. 2000. Vol. 2. P. 109–138.
3. Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Meshkova V. D., Filimonov S.A. Influence of radiation on the formation of wind and temperature regimes in urban environment // Thermophysics and Aeromechanics. 2023. Vol.30, № 4. P. 683–694.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 21. Красноярский край, Тувинская АССР. Книга 1. 1990. С. 623.

Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда (проект № 22-61-00098),  
<https://rscf.ru/project/22-61-00098/>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ДЛЯ ПОТОКА СКАЛЯРА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ

Лукьянов А.А., Яковенко С.Н., Токарев М.П.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В настоящее время модели осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) являются наиболее привлекательным методом в инженерных приложениях благодаря своей вычислительной эффективности [1]. Однако из-за низкой точности RANS подхода остается актуальной задача по усовершенствованию существующих моделей турбулентности, в том числе с помощью алгоритмов машинного обучения (ML) [2]. Для этого используются доступные наборы данных высокой точности для различных конфигураций потока, полученные из измерений или численного моделирования вихреразрешающими методами DNS и LES.

Одними из таких подходов машинного обучения (ML) являются эволюционный алгоритм программирования экспрессии генов (MGEF) на базе символической регрессии [3] и методы градиентного спуска для оптимизации весов нейросетевых архитектур для оценки поправок к базовым моделям. Например, относительно недавно была предложена новая эффективная универсально интерпретируемая нейросетевая модель (UIML) [4].

В современных моделях турбулентности аппроксимация турбулентного потока тепла может быть реализована следующим образом:

$$-\overline{u'_i c'} \approx \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} + D_{ij} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j},$$

$$D_{ij} = \sum_{n=1}^6 g^{(n)}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15}) T_{ij}^{(n)},$$

где  $g^{(n)}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15})$  – произвольные нелинейные функции от инвариантов тензора градиента скорости и  $T_{ij}^{(n)}$  – тензорный базис градиента скорости, полученный из безразмерных тензоров деформации  $s_{ij}$ , вращения  $r_{ij}$  и градиента скаляра [5]. Поправка с множителем  $D_{ij}$  к гипотезе градиентной турбулентной диффузии представляет собой параметрический член, который оптимизируется. При этом вопрос, какие из тензоров и инвариантов подходят для обучения методами ML остается открытым.

В данной работе проводится анализ моделей турбулентности, созданных с использованием методов MGEF и нейросетевой нелинейной аппроксимации на базе архитектуры UIML-s для широкого диапазона параметров течений. Рассматривается развитие турбулентное течение для трех чисел Рейнольдса  $Re = 4270, 6300, 9100$  при малых числах Прандтля  $Pr = 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$  в периферийном фрагменте канала с тремя продольными стержнями круглой формы, встречающихся в тепловыделяющих элементах, где в качестве теплоносителя используются жидкие металлы и смеси газов [6].

Методами оценки важности признаков путем перестановок и SHAP проведен анализ значимости входных признаков моделей турбулентного потока тепла для всего набора данных (см рис 1). Показана важность использования инвариантов  $\lambda_{15} = \nu_t/\nu$  и  $\lambda_{14} = Re_d$  для предсказания выходного решения.

Используя за основу эволюционный алгоритм MGEF, были построены явные алгебраические выражения для аппроксимации турбулентного потока тепла на основе высокоточных DNS данных. Одно из найденных выражений простого вида с минимальной погрешностью оценки турбулентного потока тепла сохранило единственный признак  $\lambda_{14}$ :

$$-\overline{u'_i c'} = (0.27 + 0.40\lambda_{14}) \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i}.$$

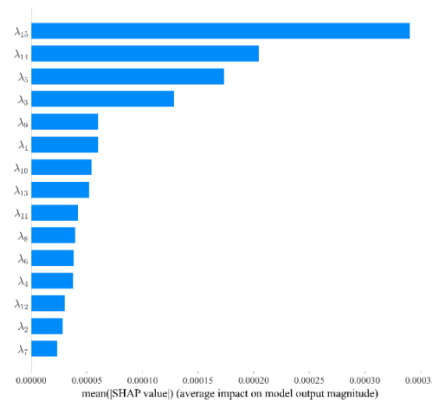


Рис. 1. Важность признаков с точки зрения средних значений SHAP для модели UIML-s по всем признакам для продольной компоненты турбулентного потока тепла.

### Список литературы

- Durbin P. Some recent developments in turbulence closure modeling // Annu. Rev. Fluid Mech. 2018. Vol. 50. P. 77-103.
- Duraiamy K., Iaccarino G., Xiao H. Turbulence modeling in the age of data // Annu. Rev. Fluid Mech. 2019. Vol. 51. P. 357-377.
- Weatheritt J., Sandberg R. D. A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship // J. Comput. Phys. 2016. Vol. 325. P. 22-37.
- Jiang C. et al. An interpretable framework of data-driven turbulence modeling using deep neural networks // Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 5.
- Zheng, Q. "Theory of Representations for Tensor Functions—A Unified Invariant Approach to Constitutive Equations." ASME. Appl. Mech. Rev. 1994; 47(11): 545–587.
- Ivashchenko V. A. et al. Direct numerical simulation of the peripheral and internal configurations of a model assembly of fuel elements // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2023. – Т. 17. – №. 2. – С. 320-325.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00587.*

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО СНАРЯДА

Лукьянов Ан.А.<sup>1,2</sup>, Алексеев М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Снарядный режим течения является одним из наиболее распространенных режимов течения в двухфазном потоке. Такой режим течения характеризуется пузырьками газа, заполняющими практически всё поперечное сечение канала, вокруг которых образуется тонкая жидкая пленка. Они имеют закругленную носовую часть и практически плоское доньшко. Такие пузыри в литературе часто называются пузырьками Тейлора [1]. Данное течение широко встречается в большинстве современных технологических и промышленных устройствах, в процессах связанных с сепарацией нефти и газа, в химических и ядерных реакторах.

В экспериментальных работах всплытие одиночного газового снаряда Тейлора в вертикальной трубе с жидкостью происходит с постоянной скоростью, которая не зависит от длины снаряда [2]:  $U=0,345\sqrt{gD}$ . В опускном потоке жидкости, скорость которого близка к скорости всплытия снаряда происходит режим зависания. С помощью зонда – трубки на оси симметрии был получен неподвижный снаряд Тейлора в трубе [3].

В данной работе проведено численное моделирование неподвижного газового снаряда. Геометрия расчётной области и граничные условия для численного моделирования соответствуют экспериментальной работе [3]. Рассматриваемая система состоит из круглого цилиндра длиной  $L = 250$  мм, диаметром  $D = 20$  мм. Внутри канала устанавливался цилиндрический зонд длиной  $l_1 = 65$  мм и диаметром  $d_1 = 1$  мм, который заканчивался усеченным конусом длиной  $l_2 = 5$  мм и диаметром  $d_2 = 2$  мм. В расчётах использовалась мультиблочная радиальная сетка со сгущением около стенки с общим числом расчетных элементов 4,2 млн.

Скорость потока жидкости менялась в зависимости от расчета от 0,15 м/с до 0,30 м/с. Уравнения Навье-Стокса решались для двух сжимаемых неизотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода VOF. Уравнения Навье-Стокса дополнялись уравнениями модели турбулентности  $k-\omega$  SST.

В соответствие с экспериментом [4] моделирование проводилось для снаряда длиной 60 мм.

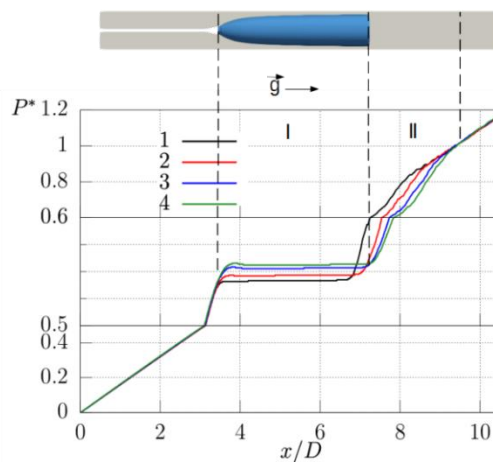


Рис. 1. Распределение безразмерного давления на стенке канала.

В работе исследовались гидростатические характеристики потока в канале со стационарным газовым снарядом (рис.1.). Величина давления была безразмерена на локальное значение давления, на протяжении которого скорость повышения давления заметно отклоняется от гидростатического значения жидкости. Эта область локального значения давления определяется областью влияния пузыря. Как выше, так и ниже по потоку от газового снаряда давление линейно изменялось. Давление в пленке обусловлено наличием газового снаряда, давление в котором мало отличается по длине. Течение в пленке обусловлено наличием перепада гидростатического давления, трением в жидкости и трением на межфазной границе.

Расчеты выполнены на кластере Информационно-вычислительного центра Новосибирского государственного университета.

### Список литературы

1. Nicklin D.J., Wilkes M.A., Davidson J.F. Two-phase flow in vertical tubes // Trans. Inst. Chem. Engng. 1962. Vol. 40, No. 1. P. 6168
2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – 1972.
3. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика, 2008, том 15, № 1, С. 93-98.
4. Лобанов П.Д., Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок//диссертация на соискание д.т.н., 2021.

Работа поддержана государственным контрактом  
Российской Федерации с Институтом Теплофизики  
СО РАН (121032200034-4).

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ШАГА ПО ВРЕМЕНИ В МЕТОДЕ КУРОПАТЕНКО  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЙЛЕРОВЫХ КООРДИНАТАХ**

**Мастюк Д.А.<sup>1,2</sup>, Беляев П. Е.<sup>1,2</sup>, Макеева И.Р.<sup>1,2</sup>, Куприянец Т.А.<sup>1</sup>, Пигасов Е.Е.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

ул. Васильева, 13, Снежинск, 456770, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (Научно исследовательский университет)

пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

При численном анализе проектных и запроектных аварий промышленных установок, применяемых как на АЭС, так и в водородной энергетике, одной из проблем является высокая степень разномасштабности протекающих процессов. Примерами таких процессов являются течи в гермообъемах, аварийные истечения из сосудов высокого давления, а также гильотинные разрывы трубопроводов, заполненных газовыми смесями. При моделировании аварий таких типов целесообразно применение локального измельчения сетки, например, в окрестности разрывов, чтобы повысить точность моделирования начальной стадии аварии, характеризующейся большими градиентами газодинамических величин, при этом область моделирования на несколько порядков превосходит размеры течи. Значительной также является длительность аварийного процесса и, следовательно, количество шагов по времени, необходимых для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики.

Одним из способов увеличения временного шага интегрирования систем уравнений является применение неявных численных методов. Однако это приводит к необходимости дополнительных исследований на сходимость для каждой конкретной задачи. Применение явных численных методов повышает точность моделирования, но, как правило, временной шаг интегрирования системы уравнений газовой динамики ограничен условием устойчивости решения, определяемым минимальным элементом сетки в области с наибольшей интенсивностью изменения газодинамических величин. При изменении размеров сеточных ячеек на несколько порядков для большинства ячеек шаг интегрирования является существенно заниженным, что приводит к увеличению продолжительности расчёта, а также к накоплению вычисленной погрешности, связанному со значительным возрастанием количества арифметических операций.

В данной работе предложен метод, позволяющий рассчитывать подобласти моделируемой системы с индивидуальным временным шагом, зависящим от интенсивности протекающего процесса и размера сеточного элемента, что позволяет уменьшить количество вычислений при моделировании сложных и разномасштабных газодинамических систем. Представленная модификация основана на методе Куропатенко для неортогональных эйлеровых сеток [1].

В начале расчёта для каждого сеточного элемента рассчитывается шаг по времени, удовлетворяющий условию устойчивости. Затем расчётная область разбивается на подобласти таким образом, что в одну подобласть попадают ячейки, для которых вычисленный временной шаг удовлетворяет условию

$$dt_{\min} \cdot 2^{k-1} < dt_i < dt_{\min} \cdot 2^k,$$

где  $k$  соответствует уровню подобласти относительно величины временного шага. При этом временной шаг в соседних (граничащих) подобластях не может отличаться более, чем в 2 раза. Выполнение интегральных законов сохранения массы, импульса и энергии всей расчётной системы обеспечивается специальным алгоритмом для расчета потоков через границы смежных областей.

Результаты моделирования показали работоспособность данного подхода, а также существенный рост скорости вычислений. В докладе представлены результаты работ по реализации данного алгоритма, а также проведённые численные расчёты с его использованием.

#### Список литературы

1. Беляев П.Е., Макеева И.Р., Пигасов Е.Е., Мастюк Д.А. Адаптация метода Куропатенко для расчета ударных волн в эйлеровых координатах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование» (Вестник ЮУрГУ ММП). – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 83–96.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ СТЕНОЗА КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ

Стародумов И.О.<sup>1</sup>, Махаева К.Е.<sup>1</sup>, Зубарев А.Ю.<sup>1</sup>, Бессонов И.С.<sup>3</sup>, Соколов С.Ю.<sup>1,2</sup>, Микушин П.В.<sup>4</sup>,  
Александров Д.В.<sup>1</sup>, Честухин В.В.<sup>5</sup>, Никишина М.А.<sup>1</sup>, Бляхман Ф.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина,  
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный медицинский университет,  
ул. Репина 3, Екатеринбург, 620028, Россия

<sup>3</sup> Тюменский кардиологический научный центр, Томского НИМЦ,  
ул. Мельникайте 11, Тюмень, 625026, Россия

<sup>4</sup> Московский физико-технический институт,  
ул. Керченская 1А, корп. 1, Москва, 117303, Россия

<sup>5</sup> Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского,  
Большая Сухаревская площадь 3, Москва, 129090, Россия

В большинстве случаев развитие атеросклеротического поражения коронарных артерий приводит к нарушению сократительной функции миокарда и сердца в целом. Атеросклероз сопровождается формированием бляшки, что приводит к нарушению нормального развитого кровотока и стенозу артерии.

Точность математического моделирования гемодинамических условий в сердце критически зависит от набора учитываемых параметров.

Во многих работах по гемодинамике при описании вязкостных свойств крови ее преимущественно рассматривают как однофазную ньютоновскую или неньютоновскую жидкость. Поэтому влиянием гематокрита (объемной доли эритроцитов в крови) на характеристики кровотока не уделяется должного внимания. Однако авторы [1] отмечают, что при движении по сосудам кровь представляется сложной реологической жидкостью, и ее реалистичное описание требует учета эритроцитов, рассматривая их как дискретные частицы.

Сложное поведение крови проявляется в так называемых реологических эффектах Фареуса [2] и Фареуса-Линдквиста [3], для которых присуще формирование бесклеточного слоя (cell-free layer, CFL) вблизи сосудистой стенки. Этот слой представляет собой плазму крови, вязкость которой может быть значительно меньше, чем вязкость в ядре потока. Наличие этого слоя вносит существенный вклад в особенности пристеночной гидродинамики, поскольку отражает динамическое положение эритроцитов в сосуде. Таким образом феномен CFL необходимо учитывать при моделировании гидродинамики кровотока.

Настоящее исследование посвящено оценке влияния CFL на гемодинамику в моделируемом двумерном сосуде в зоне стеноза. В предложенной модели Эйлера-Эйлера кровь рассматривалась как двухкомпонентная среда с локальным распределением гематокрита. Значимость полученных результатов мы продемонстрировали путем сравнительного анализа с теми же гемодинамическими состояниями, полученными с помощью однокомпонентной модели Карро.

Явление CFL было воспроизведено за счет явного учета локальных концентраций клеток крови и использования силы отталкивания эритроцитов от стенки сосуда:

$$F_w = n\rho_c C_w \frac{\pi d^3}{6} \max\left\{0, \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{D_w}\right)\right\} (\vec{V}_c - \vec{V}_d)^2 \vec{N}.$$

Анализ расчетов показал, что моделируемый бесклеточный слой неоднороден вдоль стенки сосуда и не стационарен по времени. В случае однокомпонентной модели Карро предполагается, что жидкость по сосуду распределена равномерно, поэтому в пристеночных зонах вязкость крови завышена и близка к вязкости основного потока, что ни приводит к формированию CFL.

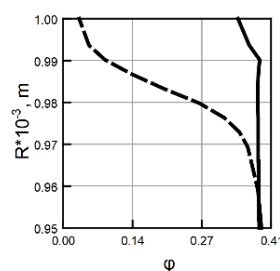


Рис. 1. Зависимость объемной доли эритроцитов  $\phi$  от расстояния до стенки сосуда  $R$ . Сплошная кривая - двухкомпонентная модель с  $CW=0$ ; штриховая кривая - двухкомпонентная модель с  $CW=0.9$ . Распределение соответствует пристеночной области после стеноза.

Таким образом однокомпонентная модель не воспроизводит феномен CFL и не может предсказать изменчивость этого слоя вблизи области стеноза: толщина CFL в настоящей работе варьируется от 10 до 30 мкм. Неустойчивость этого слоя приводит к значительному завышению ключевых гемодинамических характеристик потока: скорости, давления, эффективной вязкости, сдвигового напряжения стенки. Более того меняются глобальные гидродинамические эффекты, такие как вихреобразование за стенозом.

### Список литературы

1. Cokelet G.R. The rheology of human blood. PhD diss. / Massachusetts Institute of Technology, 1963. 200 с.
2. Fåhræus R.S. The suspension stability of the blood // *Physiol. Rev.* 1929. V. 9, N 2. P. 241–274.
3. Fåhræus R.S., Lindqvist J.T. The viscosity of the blood in narrow capillary // *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* 1931. V. 96, N 3. P. 562–568.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-71-10071).

## О ТОЧНОСТИ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ГЛАДКОСТИ АППРОКСИМИРУЕМЫХ ОБОБЩЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Ковыркина О.А., Остапенко В.В.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

На основе П-формы первого дифференциального приближения разностных схем [1] дано теоретическое обоснование того, что схемы сквозного счета могут иметь существенно различную точность в разных областях гладкости рассчитываемого обобщенного решения. Для гиперболической системы с инвариантами показано, что разные инварианты могут вычисляться с различной точностью в одной и той же области гладкости аппроксимируемого решения.

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены результаты расчетов по схемам RBM [2, 3], TVD [4] и WENO5 [5] следующей задачи Коши для системы уравнений мелкой воды:

$$H_t + q_x = 0, \quad q_t + (q^2/H + gH^2/2)_x = 0, \quad (1)$$

$$H(x, 0) = \begin{cases} 5, & x \leq 0, \\ \varphi(x), & x > 0, \end{cases} \quad q(x, 0) = 0, \quad (2)$$

$$\varphi(x) = 2 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(x + 2), \quad (3)$$

где  $H(x, t)$  и  $q(x, t)$  – глубина и расход жидкости,  $g = 9.81$  – ускорение свободного падения.

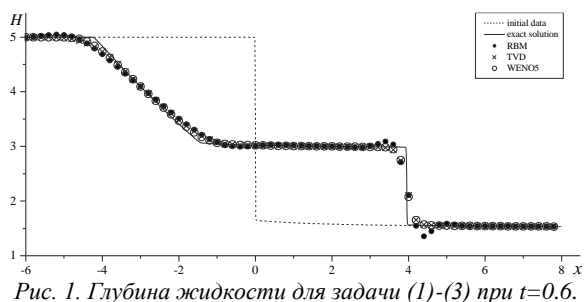


Рис. 1. Глубина жидкости для задачи (1)-(3) при  $t=0.6$ .

Для определения точности разностных схем (рис. 2) была применена методика, предложенная в [6]. При этом введены обозначения:  $r$  – порядок сходимости к векторному решению  $\vec{u} = (h, q)$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – порядки сходимости к инвариантам  $w_1$  и  $w_2$  системы (1). Из рис. 2 следует, что внутри центрированной волны понижения все три схемы имеют порядки сходимости  $r = \rho_1 = 1$  и  $\rho_2 \geq 2$ , а в области влияния центрированной волны (которая совпадает с областью влияния ударной волны) для схемы RBM  $r = \rho_1 = \rho_2 = 2$ . Правее ударной волны порядки сходимости для всех трех схем совпадают с их порядками аппроксимации на гладких решениях:  $r = \rho_1 = \rho_2 = 3$  для схем RBM и WENO5,  $r = \rho_1 = \rho_2 = 2$  для схемы TVD.

Данные численные результаты полностью согласуются с разработанной теорией сходимости разностных схем сквозного счета в различных областях гладкости рассчитываемого обобщенного решения.

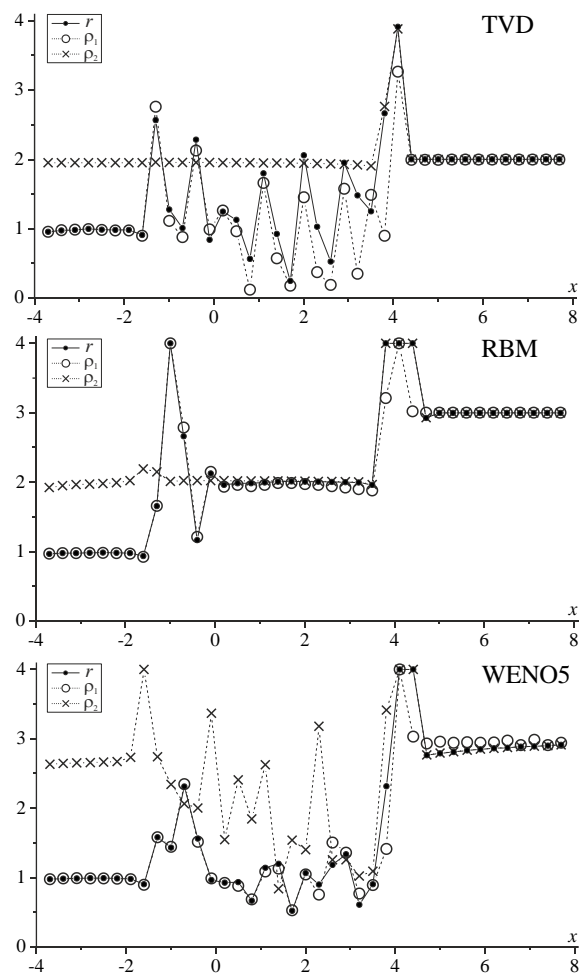


Рис. 2. Локальные порядки сходимости разностных схем.

### Список литературы

1. Шокин Ю.И., Яненко Н.Н. Метод дифференциального приближения (применение к газовой динамике). – Новосибирск: Наука. 1985. 365 с.
2. Русанов В.В. Разностные схемы третьего порядка точности для сквозного счёта разрывных решений // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180, № 6. С. 1303–1305.
3. Burstein S.Z., Mirin A.A. Third order difference methods for hyperbolic equations // J. Comput. Phys. 1970. V. 5, N 3. P. 547-571.
4. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys. 1983. V. 49. P. 357-393.
5. Jiang G.S., Shu C.W. Efficient implementation of weighted ENO schemes // J. Comput. Phys. 1996. V. 126. P. 202-228.
6. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О точности схемы типа MUSCL при расчете разрывных решений // Матем. моделир. 2021. Т. 33. № 1. С. 105-121.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-11-00060).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В УСЛОВИЯХ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Платонов Д.В.<sup>1,2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Шторк С.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

Закрученные потоки широко распространены в промышленных установках, поэтому их динамика представляет значительный интерес для исследований. Актуальной задачей является исследование структуры закрученного потока и движения в нем частиц для оптимизации различных химических процессов. Одним из удобных объектов для изучения таких течений является тангенциальная вихревая камера, в которой закрутка потока осуществляется с помощью сопел, направляемых под углом к оси камеры. В работе [1] было проведено численное моделирование однофазного турбулентного течения в гидродинамической вихревой тангенциальной камере. На основе однофазных расчетов было проведено моделирование процессов перемешивания и времени нахождения частиц в условиях закрученного течения тангенциальной камеры на основе подхода Лагранжа. В этих методах частица представляет собой точку с нулевыми геометрическими размерами и движение частиц разрешается непосредственно и описывается уравнениями движения твёрдого тела. Несущая жидкость моделируется сплошной средой, заполняющей пространство между частицами. Такой подход позволяет наглядно оценивать параметры траекторий и времени движения частиц.

Результаты расчетов движения частиц получены на основе расчетов течения в тангенциальной камере при трех различных параметрах закрутки. Расчеты движения частиц в условиях закрученного течения в тангенциальной камере показывают значительную разницу между движением безмассовых и тяжелых частиц. Траектории безмассовых частиц соответствуют течению несущей среды. Если пренебречь диффузией, это означает, что частички не проникают в рециркуляционные зоны и из-за их наличия уменьшается эффективный объем камеры, доступный для прохождения потока жидкости и уносимых ею безмассовых частиц. Проведенные расчеты показывают, что время пребывания безмассовых частиц заметно уменьшается для максимального числа закрутки. Это можно объяснить тем, что высокая закрутка приводит к увеличению объема рециркуляционных зон в тангенциальной камере. В результате это приводит к уменьшению среднего времени прохождения объема камеры частицами жидкости и безмассовыми твердыми частицами. В основном продвижение частиц происходит на периферии камеры, но безмассовые частички также оказываются и в других частях тангенциальной камеры, в том числе и в нижней её части вблизи глухого торца. Это происходит, по-видимому, из-за сложной системы рециркуляционных зон вихревой тангенциальной камере. Также большее время пребывания характерно для тех частиц, которые двигаются ближе к центру камеры.

Время пребывания тяжелых частиц в 1,5 – 2 раза превышает аналогичное время пребывания безмассовых частиц. Кроме того, большинство из тяжелых частиц вовсе не покидают тангенциальную камеру и, по-видимому, осаждаются. Доля частиц, покинувших тангенциальную камеру, составляет 60 – 90% в случае безмассовых частиц и только 0,1 – 4% для тяжелых. Траектории тяжелых частиц без учета гравитации оказываются ближе к стенке тангенциальной камеры. Несмотря на отсутствие гравитации, частицы в больших количествах проникают в пространство камеры ниже сопел. Интересный эффект возникает при учете гравитации: траектория большинства частиц ограничена по высоте (примерно одинаковой для всех чисел закрутки), причем частицы с большим временем пребывания концентрируются в этом горизонтальном слое.

Таким образом, для безмассовых частичек среднее время пребывания определяется эффективным объемом камеры, который, по-видимому, уменьшается с появлением и ростом рециркуляционных зон. В то же время, попадание безмассовых частичек внутрь рециркуляционных зон возможно благодаря диффузии, в том числе здесь требуется рассмотрение турбулентной диффузии и когерентных вихревых структур. Частички с конечным объемом и плотностью, отличающейся от плотности несущей среды подвержены влиянию различных сил: силы тяжести, выталкивающей силы, силы инерции и т.д. Это позволяет таким частичкам отклоняться от траекторий движения частиц жидкости и, потенциально, – проникать в рециркуляционные зоны, увеличивать время пребывания и менять свою концентрацию в различных участках реактора. Так, легкие частички – пузырьки воздуха – концентрируются в центрах возникающих вихрей. Тяжелые частички – наоборот – двигаются ближе к периферии. Сила тяжести заставляет тяжелые частички двигаться против потока, концентрируясь в горизонтальном слое. Таким образом, закрученное течение в тангенциальной камере сопряжено с возникновением большого количества сил и эффектов, действующих на различные частички в такой среде, что открывает широкие возможности для управления двухфазными потоками.

### Список литературы

1. A.V. Sentyabov, D.V. Platonov, S.I. Shtork, S.G. Skripkin, A.V. Minakov. "Numerical simulation of a double helix vortex structure in a tangential chamber"// International Journal of Heat and Fluid Flow 107 (2024) 109398.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

**Рыбакин Б.П.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> НИЦ "Курчатовский институт",

пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, 119991, Россия

В представленной работе приведены результаты численного моделирования формирования осесимметричных потоков (джетов), которые возникают около молодых звездных объектов. Как показывают наблюдения, звездообразование в основном происходит в молекулярных облаках (МО). В результате соударения МО между собой или соударения молекулярных облаков с ударными волнами формируются гравитационно-связанные области. В этих областях гравитация преобладает над внутренним давлением поэтому, если не будет внешних воздействий - начинается фаза аккреции, во время которой центральный объект продолжает набирать массу. Гравитационное сжатие таких объектов формирует протозвезды, в которых, при дальнейшем сжатии начинаются термоядерные реакции и образуются молодые звезды (YSO - Young Stellar Objects).

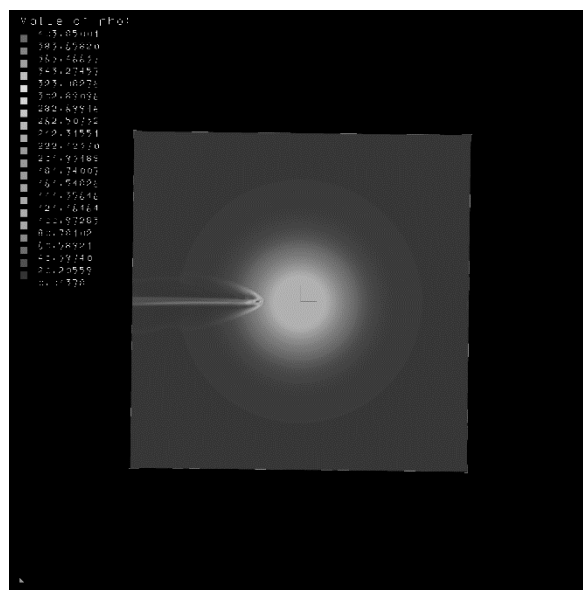
В результате таких динамических воздействий в молекулярных облаках возникает большая турбулентность, а формирующиеся плотные ядра получают угловой момент вращения. Поэтому образующаяся протозвезда и окружающий ее диск вращаются и обычно имеют почти осесимметричную форму. Этот этап часто сопровождается мощным выбросом биполярных потоков, состоящих из быстрых нерелятивистских джетов. Эти молекулярные потоки вещества обладают большой скоростью, от нескольких десятков, до нескольких сотен километров в секунду и играют значительную роль в звездообразовании. Недавние исследования [1] показали, что они могут быть основным фактором обратной связи, определяющим конечную массу звезды и общую эффективность звездообразования.

Решение трехмерных астрофизических задач на сетках, содержащих более одного миллиарда ячеек, требует много процессорного времени. Был построен параллельный алгоритм и программа [2], позволяющий использовать для расчетов современные многоядерные процессоры и новые графические процессоры. Авторское программное обеспечение использует технологии параллельного программирования Coarray Fortran (CAF) и OpenACC для графических процессоров.

Возникающее движение описывается системой уравнений идеальной магнитной гидродинамики, которая описывает движение сжимаемой проводящей жидкости под действием сил гравитации и магнитных полей [3]. В системе уравнений не учитываются диссипативные процессы, то есть принимается, что жидкость не обладает вязкостью.

Были проведены расчеты образования и выброса нерелятивистского джета из протозвезды, а также процесс взаимодействия джета с молекулярным облаком. Такие джеты уносят до ~ 10% массы протозвезды (рис.

1.) На этом рисунке приведены результаты численного моделирования распространения джета в межзвездной среде и его взаимодействия с молекулярным облаком, у которого плотность распределена по радиусу по заданному закону [3].



*Рис. 1. Моделирование взаимодействия нерелятивистского джета с молекулярным облаком.*

Расчеты показывают, что характер столкновения плотных молекулярных облаков между собой, играет важную роль в формировании структур вокруг оболочек протозвезды. Как показано в работе [4] звезда Барнард 68 служит прекрасным примером роста ядер в результате таких соударений.

Проведенное моделирование показывает, что после образования протозвезды в гравитационно нестабильном ядре, аккрецирующий газ приводит к образованию околозвездного диска, который является источником джетов. Такие джеты, в свою очередь оказывают значительное влияние на процессы звездообразования.

### Список литературы

1. M. Krumholz, C. Federrath. The Role of Magnetic Fields in Setting the Star Formation Rate and the Initial Mass Function / 2019, Frontiers in Astronomy and Space Sciences.
2. Rybakin B.P., Goryachev V.D. Simulation of Molecular Cloud Collision Dynamics Using Heterogeneous Systems. Journal of Applied and Industrial Mathematics, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 17, № 1, с. 168-175
3. B. P. Rybakin. Dynamic evolution and morphological analysis of supersonic turbulence arising during the collision of prolate and spherical clouds. Acta Astronautica, Pergamon Press Ltd, (2024), v. 215, с. 325-332
4. Eric Keto, Andreas Burkert. From Filaments to Oscillating Starless Cores. arXiv:1402.3558v1 [astro-ph.GA] 14 Feb 2014.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТАЯНИЯ МУТНОГО ЛЬДА

Саввинова Н.А.<sup>1</sup>, Слепцов С.Д.<sup>2</sup><sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова,  
ул. Белинского 58, Якутск, 677000, Россия<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Природный лед содержит включения в виде пузырьков с поглощающими излучение газами, такими как водяной пар, углекислый газ, метан и другие газы. Такой лед называют мутным льдом и он представляет собой двухфазную полупрозрачную среду. Многие из этих газов являются парниковыми, и при таянии могут высвободиться в окружающую среду, поэтому исследование теплового режима ледяного слоя в этой области является актуальными. В работах [1 - 2] влиянием поглощения излучения газом в пузырьках во льду пренебрегали, рассматривая полупрозрачную среду, в основном, как светорассеивающую. В [3] представлена математическая модель нагрева и таяния льда в высокогорном озере Нгоринго в Синьцзян-Тибетском плато (КНР). Данная модель показала хорошее согласие численных результатов с результатом полевых наблюдений и авторы [3] рекомендуют использовать модель для прогнозирования состояния рек, озер и морского льда. Однако в модели не учитывается объемное поглощение излучения различными включениями. Целью данной работы является численное исследование таяния льда с пузырьками с использованием моделирования поглощения излучения газом внутри пузырька с учетом широкого спектра оптических свойств льда и газа.

Постановка задачи аналогична [1] и соответствует условиям, созданным в [4]: в климатической камере с температурой  $T_{\infty}=273$  К, на непрозрачной вертикальной подложке из бакелита образован слой льда, который облучается искусственным источником излучения с температурой накала нити 3200 К. Лед представляет собой рассеивающий и поглощающий излучение полупрозрачный материал, содержащий в пузырьках, равномерно распределенных по объему с долей  $fV$  и со средним радиусом  $r_b$ , селективно поглощающий излучение газ. Для расчета радиационной части используется модифицированный метод средних потоков с учетом селективности поглощения излучения. Для учета поглощения газовой фазы использована аддитивная способность объемного коэффициента поглощения:  $\alpha_j = \alpha_{ice,j} + \alpha_{gas,j}$ , где  $j$  – номер спектральной полосы, использована трехполосная модель спектра поглощения. Учет анизотропного рассеяния проводится методом транспортного приближения [1, 3].

Решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается нагрев плоского слоя льда до достижения правой облучаемой границей температуры таяния. Далее начинается второй этап – таяние льда, в процессе которого температура правой границы постоянна, равна температуре плавления и на этой границе выполняется условие Стефана. Математическая модель задачи плавления льда представляет собой однофазную постановку задачи Стефана. Численно определяются температурные поля, тепловые

потоки, скорость таяния. Положение границы раздела фаз и рост температуры на необлучаемой стороне льда определяются из решения краевой задачи.

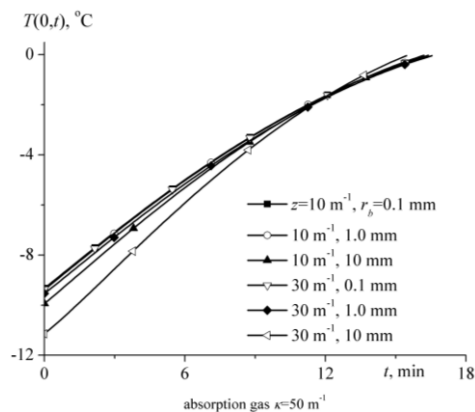


Рис. 1. Динамика роста температуры льда на необлучаемой поверхности в процессе таяния при разных значениях параметров анизотропного рассеяния и при  $\alpha_{gas,j}=50 \text{ м}^{-1}$ .

Получены численные значения температурных полей и поля плотности результирующего радиационного потока, скорости таяния льда и роста температуры необлучаемой поверхности льда при разных значениях коэффициента поглощения излучения газами внутри пузырьков и параметров анизотропного рассеяния излучения. Показано сильное влияние рассеяния излучения на рост температуры льда.

## Список литературы

1. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Моделирование таяния льда на вертикальной подложке // ТиА, 2022. Т. 29, №4. С. 665-670.
2. Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice sheets containing gas bubbles // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2020. Vol. 250. P. 106991.
3. Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice-covered lake and ice melting // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2023. Vol. 294. P. 108391.
4. Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung, 1979. Vol. 12. Iss. 2. P. 137-144.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В КОНУСНОМ ПЛАМЕНИ, НАПРАВЛЕННОМ НА ПЛОСКУЮ ОХЛАЖДАЕМУЮ ПРЕГРАДУ

Сластная Д.А.<sup>1</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Возникновение нестационарного горения является серьезной проблемой при проектировании и эксплуатации многих энергетических систем, таких как газовые турбины, авиационные и ракетные двигатели. Наличие возмущений в пламени приводит к снижению производительности, ограничению условий эксплуатации и повышенному выбросу загрязняющих веществ. Исследование условий перехода к нестационарному горению позволит оптимизировать процессы горения для обеспечения более эффективного и экологически чистого сгорания топлива. В работе представлено численное исследование возникновения возмущений во фронте ламинарного предварительно перемешанного пламени в форме конуса.

Нестационарное горение представляет собой сложную и многогранную проблему, которая требует углубленного анализа. Обзор научных работ [1] показывает, что решение задачи нестационарного горения все еще остается важной и актуальной задачей. Корректное экспериментальное исследование процесса формирования и развития неустойчивости во фронте пламени требует применения методов с высоким пространственным и временным разрешением, сопоставимым с масштабами дискретизации расчетной сетки численного моделирования, что требует не только дорогостоящего и высокоточного оборудования, но и трудоёмкой постановки, настройки и отладки эксперимента. И даже после проведения подобной работы и анализа полученных данных в результатах будут оставаться неточности, накладываемые непосредственными ограничениями экспериментальных методов. Целью данного проекта является численный анализ возникновения неустойчивости в ламинарном предварительно перемешанном пламени в форме конуса. Вычисления проводятся на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM, где для разрешения гидродинамики используется метод конечных объемов в сжимаемой постановке. Задача решается в осесимметричной нестационарной постановке с учетом сил плавучести. Химическая кинетика определяется с помощью расчетного пакета laminarSMOKE [2], позволяющего учитывать детальные механизмы реакций. Данные об элементарных реакциях задаются отдельным файлом в формате CHEMKIN. Используемый кинетический механизм включает 53 компонента смеси и 324 реакции (GRI-MECH 3.0). GRI-MECH 3.0 содержит детальное описание химических реакций, происходящих в процессе горения, включая процессы цепного разветвления. Ключевым аспектом кинетического механизма GRI-MECH 3.0 является учет коэффициентов переноса, которые определяют скорость реакции, распределения температуры, концентраций реагентов и продуктов в реакционной зоне.

В работе исследуется реагирующий поток, образованный осесимметричным сужающимся соплом с выходным диаметром  $D = 15$  мм (сопло с профилем Витошинского). На выходе из сопла предварительно перемешанная метановоздушная смесь с коэффициентом избытка топлива  $\varphi = 0.92$  имеет ударный профиль с числом Рейнольдса равным  $Re = 1000$ . Преградой является плоская поверхность, на которой поддерживается условие постоянной температуры 371 К. Исследуются конфигурации с различным расстоянием от поверхности до кромки сопла  $h/d = 1, 2, 3$ . Вычислительная область представляет собой сектор цилиндра с углом раствора  $5^\circ$  (предполагается осевая симметрия течения). Вычислительная сетка состоит из  $2 \times 10^5$  призматических ячеек, со сгущением на фронте пламени до 5 мкм. При этом, на толщину фронта пламени приходится порядка 15 узлов сетки. Рассчитанные поля скорости и температуры сравниваются с данными эксперимента, проведенного методом лазерно-индуцированной флуоресценции [3]. В результате валидации показано, что расчет хорошо воспроизводит структуру пламени, полученную в эксперименте, но наблюдаются небольшие отличия в максимальных значениях температуры (в расчете максимальная температура  $\sim 200$  К больше). Однако мгновенные поля скорости и температуры имеют нестационарный вид. В пламени наблюдаются возмущения, распространяющиеся вдоль фронта пламени. Причем период возмущений уменьшается при увеличении расстояния от кромки сопла до стенки. Механизм возникновения подобного рода возмущений изучается в ходе работы. В рамках исследования решение задач гидродинамики методом прямого численного моделирования и химической кинетики с использованием детального кинетического механизма дополнено решением задачи сопряженного теплообмена между стенками сопла и пламенем. Что позволяет более качественно проводить моделирование ламинарного предварительно перемешанного пламени в форме конуса, направленного на преграду, и кроме этого, повысить точность расчета.

### Список литературы

1. T. Lieuwen. Unsteady Combustor Physics. Cambridge University Press, 2012.
2. Cuoci A. et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method //Energy & fuels. – 2013. – Т. 27. – №. 12. – С. 7730-7753.
3. 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.

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

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОМАШИН

Тищенко В.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Бердюгин К.А., Смирнов А.О., Соколов Д.Г.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

Движение жидкой фазы в элементах проточных частей последних ступеней конденсационных паровых турбин имеет сложный характер ввиду влияния множества процессов. При этом наличие дискретных частиц в паровом потоке является одним из определяющих негативных воздействий на характеристики эффективности и надежности лопаточных аппаратов в цилиндрах низкого давления паротурбинных установок. Генерируемые в проточной части крупные капли вовлечены в процессы эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток, а субмикронная влага в первую очередь участвует в термодинамическом взаимодействии со сплошной средой. Для борьбы с этими явлениями в конструкции турбин реализуется ряд мер, например, организация удаления влаги из проточной части через сепарационные щели, расположенные на элементах корпуса ЦНД или полых сопловых лопатках. Эффективность работы подобных решений определяется множеством факторов, зависящих как от конструктивной реализации, так и от параметров влажно-парового потока. Несмотря на огромный накопленный опыт проектирования и эксплуатации конденсационных паровых турбин, вопросы, связанные с движением жидкой фазы, на данный момент остаются актуальными, т.к. изучение процессов, протекающих во влажно-паровых потоках в подобных условиях, представляет собой комплексную проблему [1]. Достаточно трудно обобщить и унифицировать имеющуюся информацию о движении полидисперсной дискретной среды в криволинейных межлопаточных каналах различной конфигурации в широком диапазоне режимных параметров работы аэродинамической системы.

В настоящей работе решение проблемы движения жидкой фазы в межлопаточных каналах паровых турбин решается за счет применения нейронных сетей. Основным преимуществом этого направления машинного обучения является способность обобщения большого объема многомерного набора независимых параметров и поиска сложных взаимосвязей между ними, которые определяют влияние на тот или иной параметр влажно-парового потока. Нейронная сеть применяется для определения характеристик частиц жидкой фазы в сопловой решетке паровой турбины заданной геометрии. Знание об этом позволит на этапе проектирования сконструировать наиболее эффективную систему сепарации влаги из проточной части, путем определения оптимального положения и режима работы сепарационной щели для межлопаточного канала конкретной геометрии.

Процесс подготовки моделей нейронной сети состоит из нескольких этапов: подготовка обучающего набора данных (набор входных и соответствующих им выходных данных, по котором нейронная сеть будет

определять весовые коэффициенты слоев), формирование архитектуры нейронной сети, обучение модели, проверка работоспособности разработанного подхода.

На этапе подготовки обучающего набора данных были выделены основные параметры, которые влияют на характер движения частицы жидкой фазы в межлопаточных каналах. Их можно разделить на геометрические (геометрия межлопаточного канала), режимные (давление полного торможения, влажность перед решеткой и статическое давление за ней) и параметры самих капель (диаметр, коэффициент скольжения капли перед решеткой, область входа капли в межлопаточный канал). Геометрия решетки, имеющая сложный криволинейный характер, однозначно представляется с использованием параметрического подхода в виде 15 параметров [2]. Имеющийся у авторов набор расчетно-экспериментальных данных лопаток различной геометрии, полученных на пародинамическом стенде КВП (контур влажного пара) с применением системы лазерной диагностики ПОЛИС, позволяет сформировать обучающий набор данных с требуемым объемом информации [3].

Разработанная и обученная модель нейронной сети на основе входных данных способна предсказать характеристики частиц жидкой фазы (вектор скорости и положение), покидающих межлопаточный канал или оседающих на его поверхностях. Результаты ее применения были верифицированы по экспериментальным данным, полученным посредством алгоритма Particle Tracking Velocimetry (PTV) системы лазерной диагностики потоков для более чем 10 геометрий турбинных сопловых лопаток [3].

Разработанный подход позволяет значительно быстрее прямого моделирования движения капель получить картину распределения частиц жидкой фазы в межлопаточных каналах турбинных решеток, выделив основные зоны возможные области организации сепарационных щелей, обеспечивающих эффективную эвакуацию влаги из проточной части.

### Список литературы

1. Features of liquid phase movement in the inter-blade channel of nozzle blade cascade / Gribin V., Gavrilov I., Tishchenko A., et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2018. V. 232, N. 5. P. 452–460.
2. Method for Parametrically Representing the Aerodynamic Profiles of Axial Turbine Machinery Blades / Gribin, V.G., Tishchenko, A.A., Alekseev, R.A. et al. A // Thermal Engineering. 2020. V. 67, N. 7. P. 422–429.
3. Experience with Application of Laser Diagnostics Systems in Experimental Studies of Wet Steam Flows in the Flow Path of Turbomachines: Basic Results of Studies and System Development Trends / Tishchenko, V.A., Tishchenko, A.A., Gribin, V.G. et al. // Thermal Engineering. 2024. V. 71, N. 5. P. 424–439.

*Работа поддержана РНФ (грант № 23-19-00445).*





**СЕКЦИЯ 6**  
**Методы и средства теплофизического**  
**и гидрогазодинамического эксперимента**





## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ФАЗОВОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ С ОБЪЕКТОМ ИЗМЕРЕНИЯ В ВИДЕ ЦИЛИНДРА

Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А., Зубанов К.С.

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Метод фазовой доплеровской анемометрии (PDA) представляет собой лазерный оптический метод для одновременного измерения скорости и размеров сферических частиц, позволяющий проводить измерения с высокой точностью и пространственным разрешением. Скорость определяется сдвигом частоты света, который рассеивается пролетающей частицей через интерференционный объем двух пересекающихся лазерных лучей. Для измерения размера частиц использует тот факт, что рассеянный свет который получен с двух разных направлений наблюдения, имеет разницу фаз, которая пропорциональна диаметру частицы. Метод может использоваться для различных приложений, например, для исследования капель в водных, топливных или лакокрасочных аэрозолях, для исследования пузырьков в жидкостях и других. В рамках данной курсовой работы решена задача нахождения размеров частиц, используя метод PDA.

Схема стенда представлена на рис.1. Из лазера мощностью 15 мВт с длиной волны 650 нм (1) исходит пучок света диаметром 2 мм. Проходит через светоделительный кубик (2), где разделяется на два луча, далее проходят через линзу (3), после которой сходятся в измерительном объеме (4). В измерительном объеме диаметр сфокусированных лучей составляет 50 мкм. В качестве частиц использованы натянутые лески различного диаметра в интервале 80-180 мкм. Рассеянный сигнал от проволоочки регистрировался двумя фотоэлектронными умножителями Hamamatsu (5,6), угол между которыми был равен 1 градус через многомодовое оптоволокно, установленный под 60 градусов. Сигнал с ФЭУ регистрировался и анализировался на цифровом осциллографе Rigol DS1054 (7).

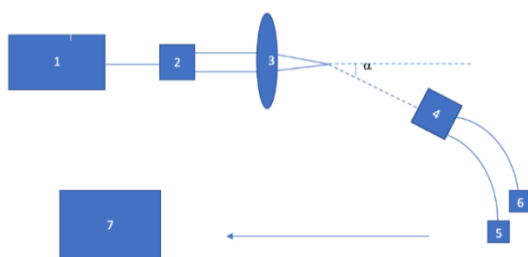


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

Измерение разницы фаз происходило по осциллограмме. Измерялся период желтого сигнала и сдвиг по времени одного канала относительно начала периода. Разность фаз вычислялась как отношение времени сдвига на втором канале к периоду. Ввиду того что сигнал был сильно зашумлен имело место высокая погрешность составляло порядка 15-20 %.

Результаты. Измерение фазы между соседними сигналами происходит между соответствующими цугами синусоиды. На рис. 2 приведен график зависимо-

сти разности фаз от диаметра частиц. Видно, что увеличение фазы приводит к обнулению фазы при переходе через период.

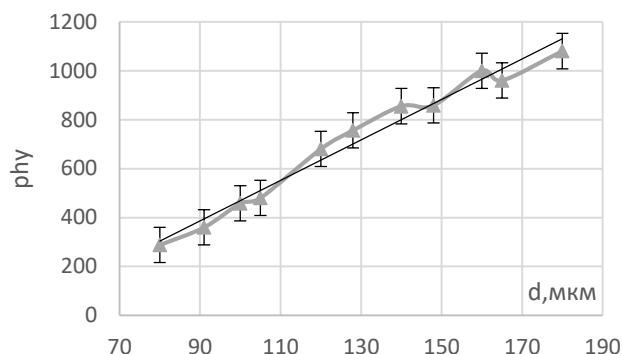


Рис. 2. Зависимость фазы от диаметра частиц при добавлении 360 градусов на период.

Увеличение фазы приводит к обнулению фазы при переходе через период. Наблюдается три периода. Если учесть переходы фазы через ноль при её монотонном росте, то получится результат представленный на рис. Зависимость практически линейная.

Заключение. Развита метод фазовой доплеровской анемометрии для измерения размеров частиц. В качестве частиц использованы лески в диапазоне 80-180 мкм. Показана работоспособность метода. Показано что фаза возрастает с размером практически линейно.

### Список литературы

1. Bauckhage, K.; Floegel, H. Simultaneous measurement of droplet size and velocity in nozzle sprays. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2-5 July 1984; pp. 18.1.1-18.1.6.
2. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии // Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2008. 106. С.
3. Bachalo, W.D.; Houser, M.J. Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions. Opt. Eng. 1984, 23, 583-590.
4. Albrecht, H.E.; Wenzel, M.; Borys, M. Influence of the Measurement Volume on the Phase Error in Phase Doppler Anemometry. Part 2: Analysis by extension of geometrical optics to the laser beam; Refractive mode operation. Part. Part. Syst. Charact. 1996, 13, 18-26.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

ПРОСКОК ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  И  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ 

Кабардин П.А., Лукашов В.В., Тупикин А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Фундаментальные исследования процессов горения обогащенного водородом топлива, таких как метан или аммиак являются в настоящее время одним из наиболее актуальных направлений поиска новых эффективных решений в энергетике. Необходимость в изучении таких горючих смесей в широком диапазоне условий обусловлена необходимостью развития физических и химических моделей, описывающих процессы при совместном сжигании аммиака и природного газа. Одной из фундаментальных характеристик предварительно перемешанных топливно-воздушных смесей является величина критического градиента при проскоке пламени в канал [1]. Для определения условий проскока была использована горелка Бунзена, представляющая собой кварцевую трубку длиной  $L=770$  мм с внутренним диаметром  $d=2R=13$  мм, достаточной для формирования на срезе течения Пуазейля, в которую подводилась заранее перемешанная смесь воздуха, аммиака (либо метана) и водорода. Контроль подачи воздуха осуществлялся с помощью цифрового расходомера. Расход и состав бинарной смеси газов горючих контролировался генератором поверочных газовых смесей УФПС-2. Для нахождения границы устойчивого горения пламени в топливной смеси фиксировалась отношение концентраций  $\text{H}_2$  к  $\text{NH}_3$  (или  $\text{CH}_4$ ) и для данного соотношения с шагом 0.1 менялся коэффициент избытка воздуха. После каждого опыта трубка охлаждалась до  $30^\circ\text{C}$ , тем самым в экспериментах всегда при проскоке пламени сохранялись идентичные по температуре условия течения в трубке. Для заданного состава смеси находимые гидродинамические параметры при проскоке (расходы газов, скорость течения). Контроль температуры осуществляли термопарой типа К, размещённой на кромке трубы.

Непосредственно съёмка интенсивности свечения радикалов в пламени проводилась цифровой электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-38 в одноимённой программе. Для выделения необходимого диапазона длин волн радикала  $\text{OH}^*$  был использован интерференционный фильтр LaVision VZ10-0474. Кадры для каждого режима в количестве 200 штук изначально состоят из 2 кадров от двух ЭОП УФ-камеры с разными коэффициентами усиления. При сборке их в один кадр были произведены коррекция по темному полю и коррекция неравномерности освещения. Затем эти кадры были просуммированы в один, обработка проводилась в программах IsoLine и ImageJ.

Для построения зависимости критического градиента скорости от коэффициента избытка топлива ( $\phi$ ) при проскоке использовано соотношение из [2]

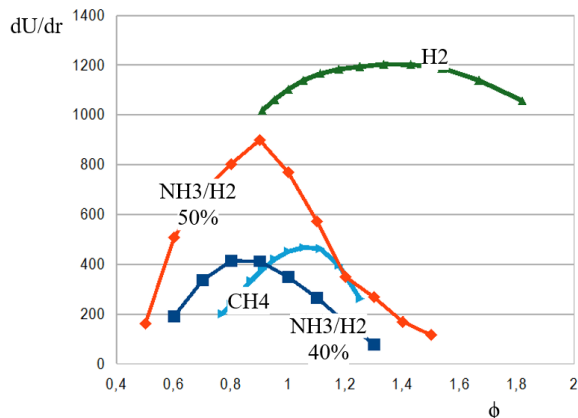


Рис. 1. Величина критического градиента скорости в зависимости от избытка топлива.

$$\text{grad}(u) = \left. \left( \frac{du}{dr} \right) \right|_{cr} = \frac{4V}{\pi R^3},$$

где  $V$  – объёмный расход смеси. На рис.1 представлены данные о проскоке пламени. Условия горения в области ниже соответствующей кривой определяют границы устойчивого горения пламени с содержанием водорода в аммиаке 50 и 40%.

Добавление водорода в аммиак и метан приводит к смещению максимума градиента в  $\phi < 1$ , что свидетельствует о возможности реализации эффективного сжигания бедных смесей. Организация горения при избытке окислителя позволяет снизить выброс  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ . Обнаружено, что горение бедных смесей может сопровождаться образованием так называемого полиэдрального (ячеистого) пламени [3], в котором интенсивность химического реагирования неравномерна во фронте пламени в азимутальном направлении.

## Список литературы

1. S.H. Sohrab, C.K. Law. Influence of Burner Rim Aerodynamics on Polyhedral Flames and Flame Stabilization// Comb.Flame. 1985. v. 62. P. 243–254.
2. В.К. Баев, П.К. Третьяков. Характерные времена горения топливовоздушных смесей. // ФГВ. 1986. Т.4, №3. С. 367-376.
3. S. Shi et al. Cellular structures of laminar lean premixed  $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{air}$  polyhedral flames // App.Energy and Comb. Sc. 2023. V.13. 100105.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

## ОЦЕНКА ПОЛЯ СКОРОСТИ В ЗАТОПЛЕННОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ МЕТОДАМИ 3D-PTV И ТОМО-PIV

Кирчанова Е.Е.<sup>1,2</sup>, Сорокин М.И.<sup>1,2</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Токарев М.П.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Существуют различные методы трехмерной визуализации полей скорости на основе изображений частиц-трассеров, полученных с разных ракурсов. Некоторые из наиболее распространенных методов:

1. Трехмерная анемометрия по трекам частиц (3D-PTV): Этот метод позволяет отслеживать местоположение и скорость каждой отдельной частицы для низких концентраций. Он основан на вероятностном определении одной и той же частицы на разных кадрах и последующем восстановлении ее трехмерных координат.

2. Томографический метод анемометрии по изображениям частиц PIV (Tomographic PIV): Этот метод восстанавливает объемные 3D изображения интенсивности частиц, что позволяет определять групповую скорость частиц в окне опроса.

Эти методы играют важную роль при изучении анизотропных турбулентных течений, таких как закрученные струи, и позволяют получать ценные данные о трехмерной структуре и характеристиках потоков.

В эксперименте были исследованы спиральные режимы течения в струях различной степени закрученности. Для создания закрученного струйного потока был использован замкнутый гидродинамический контур, который состоял из резервуара для воды, насоса, расходомера и испытательной секции. Расход воды контролировался с помощью обратной связи от расходомера к насосу. Для формирования закрученного струйного потока использовалось сужающее сопло, в котором устанавливались специальные лопастные завихрители, которые можно было менять (рис 1).

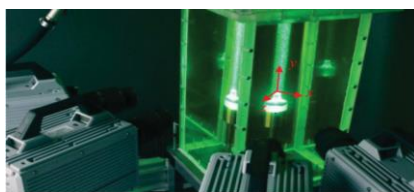


Рис. 1. Фото экспериментальной установки.

В эксперименте были использованы частицы полиамида размером 50 мкм, которые имели почти нейтральную плавучесть. Для измерения потока был взят объем размером  $40 \times 40 \times 40$  мм, который фиксировался четырьмя высокоскоростными КМОП-камерами (Photron FASTCAM SA5) с сенсором размером  $1024 \times 1024$ . Эти камеры были оснащены макрообъективами SIGMA AF 105 мм  $f/2.8$  EX DG. Оптическое увеличение в эксперименте составило 0,284 при диафрагме  $f/16$ , что обеспечивало большую глубину резкости (приблизительно 40 мм). Горизонтально выровненные камеры были направлены в центр измерительного объема под разными углами обзора:  $39^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $-18^\circ$  и  $-31^\circ$  относительно оси z.

В процессе исследования были определены поля скоростей для двух соседних кадров с использованием методов Томо-PIV и 3D-PTV. Также было проведено сравнение полученных результатов с данными из статей [5, 6].

### Список литературы

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., Soria J. 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.

*Работа выполнена при финансировании ООО «Сигма-Про».*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНОГО ПЛАМЕНИ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ МЕТОДАМИ PLIF И PIV

Лавронов К.Д.<sup>1,2</sup>, Шарборин Д.К.<sup>1</sup>, Толстогузов Р.В.<sup>1</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Развитие методов стабилизации пламени в камерах сгорания является актуальной задачей. Одним из эффективных методов является наложение постоянного или переменного электрического поля. При этом, несмотря на очевидную эффективность данного метода для управления пламенем углеводородного топлива, остаются споры относительно роли различных механизмов в данном явлении. Так, указывается, что внешнее электрическое поле может вызывать ионный ветер между электродами, в некоторой степени увеличивать температуру газа перед фронтом пламени, напрямую воздействовать на заряд в ионизированном газе в окрестности фронта пламени.

Экспериментальное исследование влияния электрического поля на характеристики потока с горением, такие как распределение температуры и скорости, может быть выполнено с использованием панорамных оптических методов [1]. В данной работе был использован метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: planar laser-induced fluorescence, PLIF) для оценки поля температуры за фронтом пламени. Количественная оценка локальной температуры выполнена на основе значения отношения интенсивностей флуоресценции при возбуждении двух линий перехода. Метод PLIF был применен к молекулам гидроксильного радикала (OH) для линий возбуждения Q1(5) и Q1(14) перехода (1-0) электронной системы A $\Sigma^+$ -X $\Sigma^+$ . По данным предыдущих исследований [2], данная пара соответствует наибольшей чувствительности к температуре, а также обеспечивает хорошее совпадение со значениями, полученными другим методом [3]. Для измерения распределения скорости в потоке был использован метод анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry, PIV), который позволяет определить двухкомпонентное поле скорости, в освещаемой области, на основе смещения частиц-трассеров по паре изображений, полученных при двух вспышках лазера с известным интервалом по времени.

Экспериментальный стенд включал в себя осесимметричное профилированное сопло с внутренним диаметром  $d=15$  мм, с возможностью подачи предварительно перемешанной метано-воздушной смеси. Число Рейнольдса в потоке составляло  $Re=1000$ , коэффициент избытка топлива  $\varphi=0.92$ . Однородное поперечное электрическое поле было организовано с помощью двух параллельных плоских металлических пластин. Пластины были подключены к источнику постоянного напряжения с  $U=2.5$  кВ, что позволяло достичь напряженность электрического поля  $E=62.5$  кВ/м между ними. Для реализации метода Two-line OH PLIF использовалась система из импульсного лазера накачки Nd:YAG QuantaRay (532 нм) и перестраиваемого импульсного лазера на красителе (родамин

6G) Sirah Precision Scan. С помощью камеры LaVision Imager sCMOS, подключенной к усилителю LaVision IRO, оснащенной кварцевым объективом, была произведена регистрация сигнала флуоресценции линий (1-1) и (0-0) в диапазоне 300-320 нм. Для уменьшения влияния фонового излучения и неоднородности распределения энергии в лазерном ноже к полученным PLIF изображениям был применен набор алгоритмов обработки. Измерительная система метода PIV включала в себя ПЗС-камеру 16 Мрх Bobcat ImperX IGV-V4820, импульсный лазер Nd:YAG Beamtech Vlite 200 (532 нм). Камера, оснащенная объективом с узкополосным оптическим фильтром (532 нм  $\pm$  5 нм) для минимизации фонового сигнала и свечения пламени, располагалась нормально к плоскости лазерного ножа. Засев осуществлялся частицами диоксида титана (TiO $_2$ ) по системе байпас, поток регулировался массовыми расходомерами Bronkhorst El-Flow. Обработка PIV изображений производилась с использованием собственного программного обеспечения «ActualFlow».

В работе представлены оценки поля температуры, а также поля скорости для конусного пламени при наличии внешнего электрического поля и без него. По полученным данным можно сделать вывод, что внешнее электрическое поле оказывает существенное воздействие на поток, меняя распределение скорости в окрестности фронта пламени и продуктах сгорания. При этом, значительного изменения распределения температуры в продуктах горения не выявлено.



Рис. 1. Пример изображения конусного пламени при отсутствии электрического поля (а) и с электрическим полем напряженностью  $E=62.5$  кВ/м (б).

### Список литературы

- Altendorfner F. et al. Study of the influence of electric fields on flames using planar LIF and PIV techniques //Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – Т. 33. – №. 2. – С. 3195-3201.
- Lobasov A. S. et al. On the efficiency of using different excitation lines of (1-0) two-line OH fluorescence for planar thermometry //Thermophysics and Aeromechanics. – 2021. – Т. 28. – №. 5. – С. 751-755.
- Devillers R., Bruneaux G., Schulz C. Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines //Applied optics. – 2008. – Т. 47. – №. 31. – С. 5871-5885.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской государственной программы (код проекта 22-19-00803).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИММЕРСИОННЫХ СРЕД И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ МЕТОДОМ ВЫРАВНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Пантелеев С.А., Токарев М.П.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Методы оптической диагностики широко применяются для исследований гидродинамики и теплообмена [1, 2] моделей проточных частей энергетического оборудования за счет того, что они не возмущают поток. Использование методов ограничивается наличием сложных криволинейных поверхностей раздела сред с разными показателями преломления на пути зондирующего и детектируемого излучения, при пересечении которых возникают оптические искажения. Применение жидкостей с высоким показателем преломления близким к оптическим характеристикам материалов прозрачных стенок позволяет существенно снизить искажения [3].

Работа с известными высокопреломляющими жидкостями не всегда удобна и безопасна для исследователя. Некоторые из растворов либо токсичные, как например йодистый метилен, либо не являются оптически стабильными как растворы солей йодидов металлов или огнеопасны, а также многие обладают стойким специфическим запахом [4].

В данной работе исследуются варианты иммерсионных растворов на основе NaI и раствора эфирного масла аниса в минеральном масле для проведения оптической диагностики полей скорости во внутренних подканалах между моделями стержней тепловыделяющих сборок [3, 5].

Для применения иммерсионных растворов в качестве жидкой среды в гидродинамических контурах важно знать их гидродинамические свойства, такие как плотность и вязкость, а также зависимость показателя преломления и вязкости от температуры и концентрации [6].

Измерены показатели преломления акриловых трубок  $1,465 \pm 0,0002$  и различных материалов для SLA печати полупрозрачных моделей с использованием Аббе рефрактометра ИРФ-22. Показатели преломления для двух образцов чистого анисового масла разных производителей составили 1,482 и 1,495 для прозрачного и с желтым оттенком, а также 1,435 для 50% раствора NaI при температуре  $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Проведенные измерения на рис. 1 показывают возможность использования эфирного масла аниса с добавлением минерального масла в качестве рабочей жидкости для согласования показателей преломления с прозрачными моделями тепловыделяющих стержней, выполненных из акрила. Фотографии сравнения оптических искажений при наблюдении через пакет стержней в разных средах представлены на рис. 2. Достоинством данного раствора является его оптическая стабильность, в отличие от раствора йодистого натрия, который со временем на свету приобретает коричневый оттенок и теряет прозрачность.

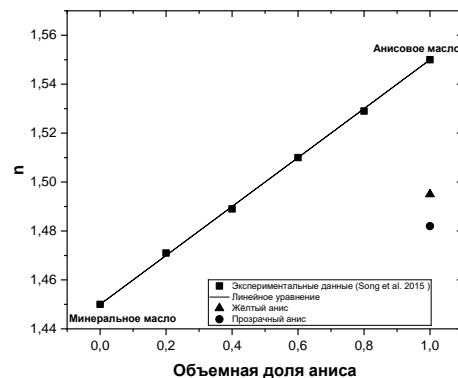


Рис. 1. Измерения показателя преломления масла аниса.

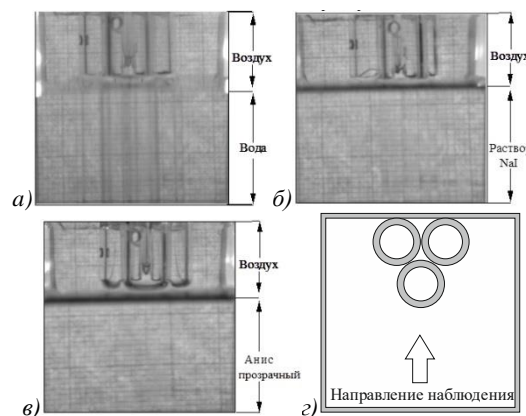


Рис. 2. Фотографии оптических искажений при наблюдении через акриловые стержни в: а) воде, б) 50% растворе NaI, в) прозрачном анисе, г) схема наблюдений вид сверху.

### Список литературы

1. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте / В.М. Бойко, А.М. Оришнич, А.А. Павлов, и др.; Под ред. В.М. Фомина. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
2. Лазерная рефрактография / О.А. Евтихиева, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
3. Song M. S., Choi H. Y., Seong J. H., Kim, E. S. Matching-index-of-refraction of transparent 3D printing models for flow visualization // Nuclear engineering and design. 2015. V. 284, P. 185-191.
4. Рефрактометрические методы химии / Б. В. Иоффе; Л.: Химия, 1983. 352 с.
5. Hassan, Y. A., Dominguez-Ontiveros, E. E. Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238(11), P. 3080-3085.
6. Анисимов К.Г., Анисимова Е.А., Волков В.И. Экспериментальное исследование показателя и характеристики переноса тяжелых жидкостей // Известия Алтайского государственного университета. 1997. №1, С. 58-59.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Попов Я.Е.<sup>1,2</sup>, Лебедев А.С.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

С развитием технологий и появлением новых материалов и конструкций возникает все больше потребностей в точной и надежной диагностике деформаций и состояния поверхностей. Это критически важно для контроля качества производства и обеспечения безопасности конструкций. Одним из перспективных направлений диагностики является использование оптических методов для анализа формы поверхностей. Оптические методы позволяют проводить измерения с высокой точностью без необходимости размещения оборудования непосредственно на исследуемом объекте, что позволяет проводить измерения даже в процессе эксплуатации объекта. Также оптические методы позволяют быстро и эффективно анализировать полученные данные, автоматизировать процесс сбора и обработки данных для получения трехмерных данных о деформациях поверхностей.

Данная работа посвящена реализации программно-аппаратного комплекса для динамического анализа деформаций плоских поверхностей твёрдых тел. Реализованный программно-аппаратный комплекс состоит из системы регистрации изображений исследуемого объекта и ПО для сбора, хранения и обработки данных. Система регистрации включает две скоростные камеры Evercam HR 2000, получающие кадры изображения с разрешением 2560x1920 пикселей с максимальной частотой съемки до 2000 кадров в секунду при полном размере кадра. В качестве источника освещения использованы импульсные светодиодные источники ПОЛИС LS (V2.1). Для синхронизации был использован синхронизирующий процессор ПОЛИС SP 10.0. Съёмка осуществляется в схеме фронтальной засветки (см. рис. 1). Осветители располагались между камерами. В целях повышения контрастности поверхности, на неё дополнительно были нанесены контрастные маркеры. Для определения пространственной калибровки камер была использована плоская мишень, снятая на разных глубинах внутри рабочего объёма. Для перемещения мишени была реализована платформа, обеспечивающая возможность параллельных перемещений мишени.

Процесс съёмки начинается с регистрации поверхности недеформированного объекта. Полученные снимки являются опорными изображениями, последующие деформации вычисляются относительно них. После производится регистрация серии изображений деформированного объекта. На основе снятых данных вычисляются поля смещений точек поверхности методом кросскорреляционного анализа (см. рис. 2). Также на основе стерео-зрения может быть восстановлено поле смещений поверхности объекта в направлении перпендикулярном плоскости съёмки. Далее, для

построения регулярных полей деформации производится численное дифференцирование полученных полей смещений.



Рис. 1. Конфигурация системы съёмки: камера (слева), осветитель (справа), объект измерения (по центру).

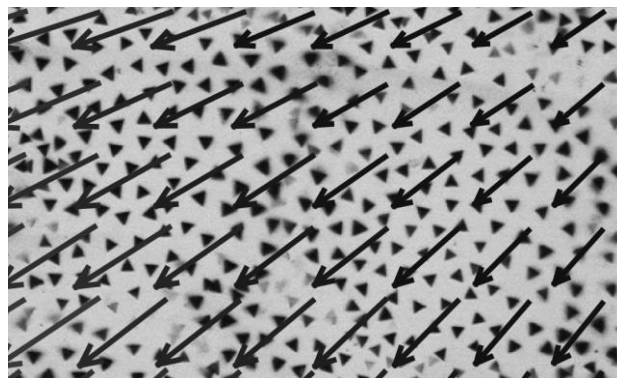


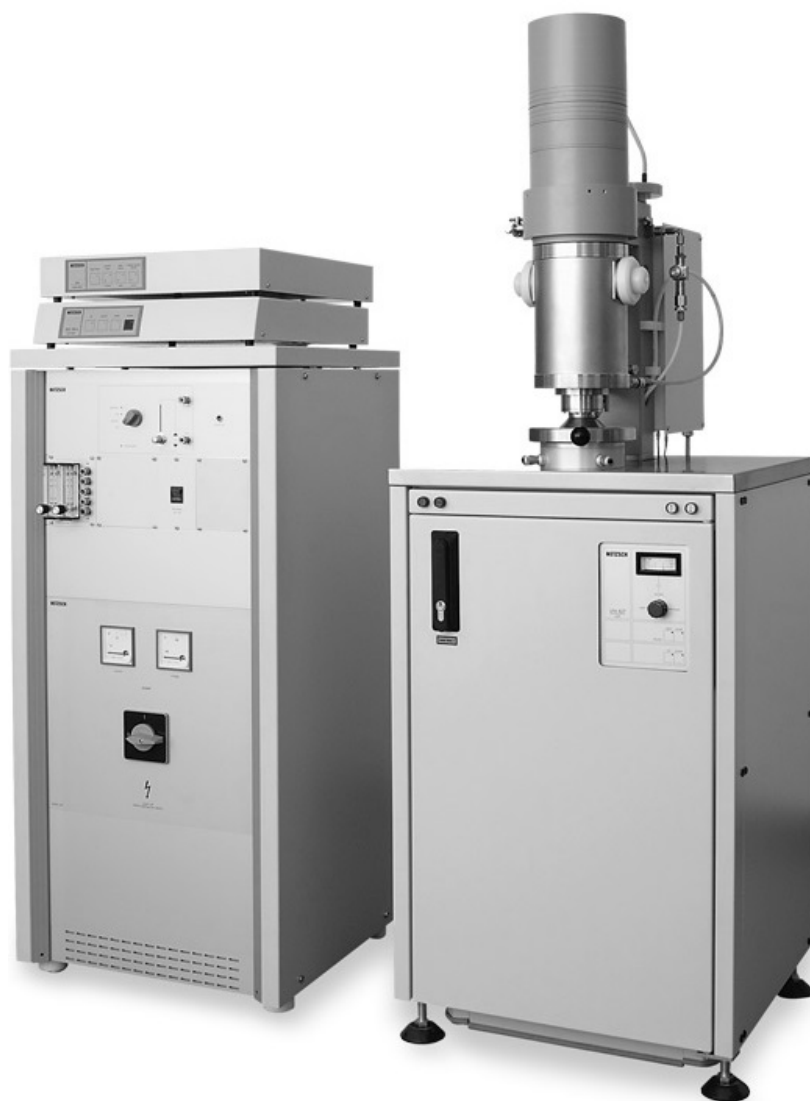
Рис. 2. Пример изображения с наложенным полем смещений.

Система была внедрена в испытательную лабораторию строительных конструкций МГСУ. Испытания системы проводились путём измерения поля смещений и деформаций для панели фасада, закреплённой на стенде для сейсмических исследований. Панель подвергалась колебаниям с частотами в диапазоне от 0.5 Гц до 100 Гц.

*Работа выполнена при финансировании  
ооо «Сигма-Про».*



СЕКЦИЯ 7  
Теплофизические свойства веществ  
и новые материалы





**ГАЗОВЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА****Богомолова А.И.<sup>1,2</sup>, Смовж Д.В.<sup>1,2</sup>, Баннов А.Г.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Графен - это двумерный материал, состоящий из моноатомного слоя углерода. Графен обладает уникальными свойствами, такими как высокая электропроводность, механическая прочность и большая удельная поверхность. Благодаря этим свойствам графен является превосходным материалом для создания чувствительных и высокоэффективных газовых датчиков. Графеновые газовые датчики обладают высокой чувствительностью, селективностью и быстрым временем реагирования на изменение концентрации газов в окружающей среде. Такие датчики имеют широкий спектр потенциальных применений в различных областях, включая медицину, промышленность, экологию и безопасность, например, для обнаружения токсичных и загрязняющих веществ. В этой работе мы представляем способ улучшения газочувствительности графена, основанный на модификации поверхности графена методом магнетронного распыления и методом электродугового синтеза. Благодаря своим уникальным электронным свойствам, функционализированные графеновые газовые датчики также обладают потенциалом для создания портативных и миниатюрных устройств, которые могут быть интегрированы в различные устройства микроэлектроники и электро-механические системы для мониторинга окружающей среды.

Целью настоящего исследования является изучение сенсорных свойств графена полученного методами ХОГФ и электродуговым распылением. В качестве подложек, на которые осуществлялся перенос, были использованы пластины кремния и полиэтилен-терефталат/этиленвинилацетат (ПЭТ/ЭВА). Газочувствительные свойства полученных датчиков исследовались на специализированной газовой установке [1]. В состав установки входят газопроводы для анализируемых газов: диоксида азота и газа-носителя синтетического воздуха. Проведены эксперименты на графеновых чипах в диапазоне концентраций 25 ppm, 50 ppm и 100 ppm для NO<sub>2</sub>. Для каждой концентрации сенсор экспонировали газом-аналитом в течение 10 мин с последующей 10-минутной продувкой газом-носителем для очистки сенсора и восстановления системы. Сенсорные свойства газовых датчиков исследовались при комнатной температуре (25±3 °C). Данные измерений были импортированы в Origin® 2018b (OriginLab Corporation) и обработаны далее для компенсации отклонения базовой линии.

Показано, что максимальной чувствительностью функционализированные оловом графеновые чипы обладают к содержанию в атмосфере диоксида азота, при этом отклик  $R/R_0$  составляет -5,2% при концентрации газа-аналита 25 ppm. В то же время за 10 минут датчик восстанавливается на 62% (см. рис. 1).

Таким образом, предложенный в работе способ позволяет создавать графеновые сенсоры, для повышения чувствительности и селективности которых можно использовать модификацию графеновой поверхности методом магнетронного распыления и методом электродугового синтеза.

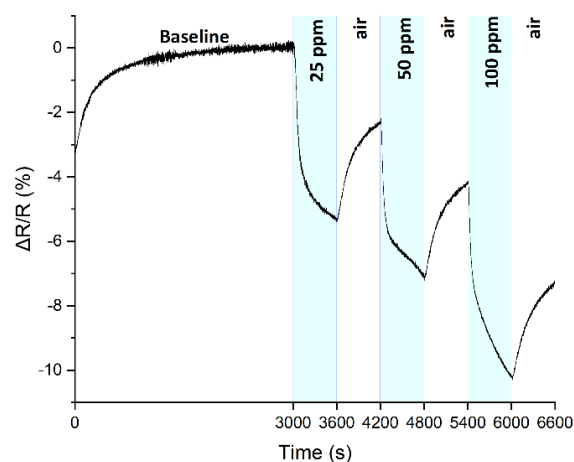


Рис. 1. Зависимость отклика функционализированного оловом датчика от времени.

**Список литературы**

1. Lapekin, N. I., Golovakhin, V. V., Kim, E. Y., Bannov, A. G. NO<sub>2</sub> Sensing Behavior of Compacted Chemically Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 9. – С. 1495.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 24-19-00357)  
<https://rscf.ru/project/24-19-00357/>.

**ПРОСТОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НИКЕЛЯ  
ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ**

**Боярских К.А.<sup>1,2</sup>, Хищенко К.В.<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
ул. Ижорская, 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
Институтский пер., 9, Долгопрудный, 141701, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет,  
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

Уравнение состояния содержит сведения о термодинамических свойствах системы, а также позволяет численно моделировать гидродинамические процессы, поскольку замыкает систему уравнений движения среды.

В настоящей работе построено уравнение состояния жидкой фазы никеля в широкой области изменения плотностей и температур. В основу положена простая (с небольшим количеством свободных параметров) модель термодинамики вещества. Рассчитаны характеристики фазового перехода жидкость–пар с критической точкой, результаты расчетов сопоставлены с имеющейся экспериментальной информацией. Достигнуто хорошее количественное согласие с данными по теплоте испарения, давлению насыщенных паров, разности энтропий фаз и температурной зависимости плотности жидкой фазы при изобарическом расширении.

По полученному уравнению состояния также рассчитаны ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки, которые сопоставлены с экспериментальными данными по ударной сжимаемости образцов никеля различной исходной плотности.

Полученные результаты могут быть использованы при моделировании гидродинамики течений в материале при высоких плотностях энергии.

**СОЗДАНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ОЛОВА  
МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ****Гареев Т.И.<sup>1,2</sup>, Нерушев О.А.<sup>1</sup>, Сахапов С.З.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

Важным и актуальным направлением современных исследований является синтез нанокomпозитов – материалов, сочетающих уникальные свойства нескольких наноматериалов. Такие структуры могут быть эффективно использованы, например, в электронике, оптоэлектронике, газовых и биосенсорных технологиях, катализе. Графен, двумерная модификация углерода, является перспективным материалом в различных применениях благодаря высокой электронной проводимости, теплопроводности, прочности, перестраиваемой зонной структуре. Особый интерес представляют композиты на основе графена. В частности, графеновую поверхность возможно функционализировать наночастицами оксида олова, активно используемыми в газовых сенсорах. Сочетание газочувствительности оксида олова со свойствами графена способно проявить синергический эффект и усилить сенсорные свойства. Среди существующих способов получения наночастиц перспективным является метод магнетронного распыления. Широкий набор параметров синтеза позволяет получать наночастицы с различной степенью покрытия поверхности графена и узкой функцией распределения по размеру. Процесс магнетронного напыления сопровождается высокоэнергичной бомбардировкой графеновой поверхности ионами и нейтралами, приводящей к изменению структуры и повышению дефектности двумерного углерода. Свойства графена, деградация структуры при напылении и морфология покрытия влияют на конечные свойства композита. В работе рассматривается влияние процесса магнетронного распыления на структурные свойства материала на основе графена и наночастиц оксида олова.

Процесс создания нанокomпозитов состоял из следующих этапов. Синтез графена проводился CVD методом на медной подложке при температуре 1070°C в смеси газов аргона (90 ст. см<sup>3</sup>/мин), водорода (20 ст. см<sup>3</sup>/мин), метана (0,2 ст. см<sup>3</sup>/мин) в течение 10 минут с предварительным отжигом меди в водороде (100 ст. см<sup>3</sup>/мин) в течение 30 минут при температуре 1070°C. Далее медь стравливалась в растворе персульфата аммония в течение 24 часов, и графеновые слои переносились на кремниевую подложку. Затем создавалась маска, закрывающая участок графена, для напыления медных контактов, необходимых для определения проводящих свойств композита, и наночастиц на графен. Процесс напыления медных контактов и наночастиц проводился в камере для магнетронного распыления. В основе этого процесса лежит создание газового разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях. Для зажигания газового разряда использовался высокоомощный импульсный источник тока, подключенный к выполненной из олова мишени-ка-

тоду. В качестве анода использовался кольцевой электрод вблизи мишени, разрядный промежуток составлял 1 мм. В скрещенных магнитном и электрическом полях атомы рабочего газа Ag ионизируются и ускоряются к мишени, выбивая атомы олова, которые летят к подложке и формируют покрытие на поверхности графена. Выбор давления рабочего газа, расстояния от мишени до подложки, мощности катода, а также времени синтеза определяет параметры потока частиц и итоговую структуру нанокomпозита. Для определения структурных свойств модифицированного графена, полученного в процессе магнетронного распыления с различными параметрами, использовался метод комбинационного рассеяния света. Методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа определялась структура покрытия и элементный состав.

В ходе работы были получены различные композиты с варьированием времени синтеза наночастиц в диапазоне 5–30 секунд. Давление рабочего газа составляло 1 Па, мощность – 50 Вт, частота импульсов – 1500 Гц, длительность импульса – 5 микросекунд, расстояние до подложки – 12 см. По результатам анализа КР спектров было определено, что графен имеет различную структуру до и после напыления наночастиц. Степень дефектности графена выросла на 60% и увеличивалась со временем синтеза, что можно связать с более длительной бомбардировкой графеновой поверхности. По снимкам SEM поверхности композитов был определен средний размер частиц. Для времени синтеза  $t = 5$  секунд размер частиц  $d$  составил 6,6 нм со стандартным отклонением  $\sigma = 0,74$  нм, для  $t = 10$  секунд  $d = 7,4$  нм  $\sigma = 0,74$  нм, для  $t = 30$  секунд  $d = 24$  нм,  $\sigma = 6,9$  нм. С увеличением времени синтеза размер частиц растёт. Рост происходит на поверхности, при времени синтеза 30 секунд частицы объединяются в более крупные образования, чем и вызвано увеличение  $\sigma$ . Проведенный рентгенофазовый анализ позволил определить наличие кристаллов диоксида олова. При  $t = 5$  и 10 секунд дифракционные картины схожи, имеется пик, соответствующий плоскости (110), соответствующая ему область когерентного рассеяния  $D = 3$  нм. При времени синтеза 30 секунд добавляется пик, соответствующий фазе оксида олова плоскости (101),  $D = 9$  нм. В результате проделанной работы были получены режимы синтеза наночастиц оксида олова на графене, а также выявлена зависимость свойств структуры композитов от времени синтеза наночастиц.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-10130) и соглашением Министерства  
науки и инновационной политики Новосибирской  
области (соглашение № р-62).*

## МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ГЕЛИЯ-4 В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Дутова О.С., Козловский Ю.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Точное знание транспортных свойств чистых газов и жидкостей, а также их смесей необходимо для оптимального проектирования различных элементов химических технологических установок, для определения функций межмолекулярной потенциальной энергии и для разработки точных теорий переноса в плотных жидкостях. Однако невозможно измерить эти свойства для всех промышленно важных жидкостей и их смесей во всех представляющих интерес термодинамических состояниях. Поэтому измерения должны быть дополнены теоретическими расчетами.

С помощью установленной ранее зависимости избыточной вязкости  $\Delta\eta$  от плотности внутренней энергии  $\Delta U/V$  [1] получено простое малопараметрическое уравнение для описания коэффициента вязкости в широкой области параметров состояния [2-3].

$$\eta = A\alpha \exp\left(\alpha \frac{x_0}{x_0 - x}\right) + B \left(\frac{T}{T_c}\right)^{0.25} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.5} \exp(-\beta x/x_0) + \eta_0$$

где первый член обусловлен переносом импульса за счет межмолекулярного взаимодействия ("полевой" механизм), второй - "смешанный" механизм, а третий дает вклад в перенос импульса при "столкновениях" частиц;  $x = \Delta U/V$ ;  $x_0 = H_0^0/V_0$ ,  $H_0^0$  - энтальпия испарения при абсолютном нуле температуры и давлении, равному нулю,  $V_0$  - гипотетический объем переохлажденной до абсолютного нуля жидкости;  $T_c$  - температура в критической точке. Это уравнение содержит 4 индивидуальных эмпирических коэффициента ( $A$ ,  $\alpha$ ,  $B$ ,  $\beta$ ), которые необходимо найти из экспериментальных или табличных данных по вязкости и 2, которые определяются из термодинамических свойств вещества.

При детальном анализе установлено, что наибольшие систематические отклонения рассчитанных значений вязкости от исходных табличных данных находятся в переходной области от разреженного до умеренно-плотного газа. Можно полагать, что в переходной области, в которой уже необходимо учитывать зависимость коэффициента вязкости от плотности, задействованы оба механизма переноса импульса – как перенос импульса путем столкновений, так перенос импульса за счет межмолекулярного взаимодействия ("полевой" механизм). Поскольку с возрастанием плотности внутренней энергии полевой механизм переноса импульса становится преобладающим, а смешанным механизмом переноса импульса можно пренебречь, то уравнение, описывающее вязкость по смешанному механизму, должно быть дополнено некоторой кроссоверной функцией, которая должна обеспечить переход от одного механизма передачи импульса при сдвиговом течении к другому.

Для оценки общего – столкновительного и полевого – вкладов в перенос импульса в коэффициент вязкости, воспользовались известным приемом и описали суммарный вклад в вязкость по этим механизмам как среднее квадратичное значение от обоих этих вкладов. Было учтено, что в области сравнительно малых плотностей вязкость практически не зависит от плотности, но зависит от температуры пропорционально  $\sqrt{T}$  (вклад в перенос импульса за счет упругих столкновений), а при малых плотностях внутренней энергии  $\Delta U/V$  можно ограничиться только линейным приближением в полевом механизме переноса импульса.

Уравнение описывает вязкость жидкого и газообразного гелия-4 при температурах от 3 К до 1100 К и давлениях до 20 МПа. Предложенное уравнение позволяет с удовлетворительной точностью осуществлять экстраполяцию коэффициента вязкости далеко за пределы опорного участка. Показано, что рассчитанные по уравнению значения вязкости гелия согласуются с наиболее надежными экспериментальными и табличными данными в пределах экспериментальных погрешностей.

### Список литературы

1. Каплун, А.Б. Единое уравнение для коэффициента вязкости жидкости и газа// ТВТ.1989. Т. 27, №5. С. 884–888.
2. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Дутова О.С. Единое малопараметрическое уравнение для расчета коэффициента вязкости аргона// Теплофизика и Аэромеханика. 2017. Т.24. №2. С. 209–219.
3. Дутова О. С., Безверхий П.П. Уравнение для коэффициента вязкости жидкости, газа и флюида инертных газов. Криптон// Теплофизика и Аэромеханика. 2022. Т.29. №6. С. 917–922.

## СИНТЕЗ ТОНКИХ ТИТАНОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Зайцев О.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Плётки нитрида титана применяются как защитный и декоративный слой для режущих поверхностей и бижутерии, а также для легирования контактов в интегральных микросхемах и в качестве коллектора заряда в сенсублизованных красителем солнечных элементах [2]. Наиболее распространённым способом синтеза тонких плёнок нитрида титана является нанесение с использованием магнетронного напыления. Классическая магнетронная установка имеет только 2 электрода, между которыми зажигается разряд. Модернизация стандартного метода — это триодное распыление. Оно заключается в добавлении дополнительного термоэлектрода — источника заряженных частиц. В данной работе, использована система подобная триодному распылению — разряд с малым анодом, который выступает дополнительным источником заряженных частиц и позволяет управлять ионным током к подложке, что существенно влияет на структуру и свойства получаемых покрытий [3].

Эксперименты проводились в вакуумной камере объёмом 100 литров, оснащённой магнетроном с кольцевым анодом, питаемом источником постоянного тока, подложкодержателем, дополнительным малым анодом вблизи подложки, на который подавалось положительное, относительно стенок камеры, напряжение. Вакуумная камера оснащена турбомолекулярной откачной системой и системой подачи газа на основе расходомеров-регуляторов. Получение плёнок происходило при распылении титановой мишени при давлении в 0,3 Па в атмосфере  $Ar+N_2$  в соотношении 8:2 соответственно. При использовании малого анода на него подавался ток 20 мА и напряжение 50 В. Проведены измерения ВАХ магнетронного разряда, для плёнок проведены исследования РФА, СЭМ, оптической прозрачности, резистометрии

Покрытия формируются в результате осаждения на мишени продуктов распыления поверхности катода магнетрона, работающего в режиме аномального тлеющего разряда. Распылённые частицы взаимодействуют с атмосферой камеры, в случае реактивного распыления, и, в дальнейшем, осаждаются на поверхности подложки. В данной конфигурации эксперимента помимо основного разряда магнетрона появляется дополнительный разряд между стенками и малым анодом, который выступает дополнительным источником заряженных частиц, и изменяет ионный ток к подложке.

В работе приведены результаты исследования влияния малого анода на свойства магнетронного разряда и получаемых плёнок TiN, такие как кристалличность, толщина, прозрачность, ширина запрещённой зоны и сопротивление. Экспериментально показано, что наличие дополнительного разряда на аноде приводит к уменьшению ширины запрещённой зоны. При увеличении тока на аноде от 0 до 20 мА ширина запре-

щённой зоны изменяется от 0,89 эВ до 0,89 эВ. По результатам РФА было установлено, что плётки являются поликристаллическими и состоят из осборнита TiN. Результаты резистометрии показали, что плётки являются проводящими. После отжига плёнок в атмосфере воздуха различия между плётками по ширине запрещённой зоны не обнаружено, полученное значение составляет 3,08 эВ. По результатам РФА установлено, что плётки состоят из рутила TiO<sub>2</sub>. По результатам СЭМ выявлена зернистая структура со столбчатыми формированиями. Результаты резистометрии показали, что плётки являются непроводящими. Плёнки, отожжённые в азоте, синтезированные с анодом и без также не показали различий в ширине запрещённой зоны, полученное значение составило 2,84 эВ. По результатам РФА установлено, что плётки являются поликристаллическими и состоят из рутила TiO<sub>2</sub>, снимки СЭМ показали наличие неоднородных островковых формирований. Различия между неотожжёнными плётками, синтезированными с анодом и без него связаны с различием в толщине и плотности плёнок. Полученные результаты показывают, что добавление в установку дополнительного малого анода позволяет изменять свойства плёнок, путём уменьшения значения ионного тока.

### Список литературы

1. B. Yoo, K.-J. Kim, Y. H. Kim, K. Kim, M. J. Ko, W. M. Kim, N.-G. Park. Titanium nitride thin film as a novel charge collector in TCO-less dye-sensitized solar cell // Journal of Materials Chemistry, 2011, 21, 3077–3084
2. J. E. Greene, J.E. Sundgren, L. Hultman, I. Petrov, D. B. Bergstrom. Development of preferred orientation in polycrystalline TiN layers grown by ultrahigh vacuum reactive magnetron sputtering // Applied Physics Letters 67 (20), 13 November 1995.
3. T. Huang, C. Mo, M. Cui, M. Li, P. Ji, H. Tan, X. Zhang, L. Zhuge, X. Wu. Ion behavior impact on ITO thin film fabrication via DC magnetron sputtering with external anode // Vacuum 221 (2024) 112848.
4. S. Z. Sakhapov. Parameters of magnetron sputtering gas discharge plasma with a small anode // Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012168 Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35, № 3. С. 1–2.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда (грант № 23-  
29-10130, <https://rscf.ru/project/23-29-10130>),  
и соглашения Министерства науки и  
инновационной политики Новосибирской области  
(соглашение № p-62).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЯХ В РАМКАХ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Ветровая энергия является одним из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии в мире. В России, с ее обширными территориями и благоприятными условиями для развития ветроэнергетики, потенциал этого вида энергии огромен. Наиболее перспективными с точки зрения постоянства ветра, являются прибрежные зоны арктических морей. Однако, одной из основных проблем, с которой сталкиваются ветрогенераторы, является обледенение лопастей в условиях высокой влажности и низких температур [1]. Обледенение не только снижает эффективность работы ветрогенераторов, но и может нести угрозу как для оборудования, так и для окружающих.

Для решения поставленных задач был собран климатический стенд, который помог провести физическое моделирование обледенения. Климатический стенд позволяет создать контролируемые условия, имитирующие различные климатические условия, включая температуру, влажность и скорость ветра, которые влияют на образование льда на поверхности лопастей ветрогенераторов. Проведение физического моделирования на климатическом стенде позволяет исследовать различные типы обледенения, такие как наледь, изморозь и иней.

Для использования гидрофобных покрытий в условиях борьбы с обледенением они должны отвечать нескольким параметрам. Поэтому выбор эластичных и термостойких супергидрофобных покрытий для защиты ветрогенераторов от обледенения является стратегически важным шагом в исследованиях по разработке эффективных методов защиты [2].

В этом исследовании сравнивались два типа поверхности листа лотоса с мельчайшей нанотравой (рис. 1, а) и более крупными микроструктурами в виде микростолбиков (рис. 1, б) с сопутствующими микробороздками, имитирующими впадины. Угол смачивания для нанотравы равен  $170^\circ$  с точностью  $2^\circ$ , а для микростолбиков  $157^\circ$  с точностью  $1^\circ$ , что коррелирует со свойствами наноструктур на металлических подложках [3] и соответствует смачивающим свойствам супергидрофобных покрытий.

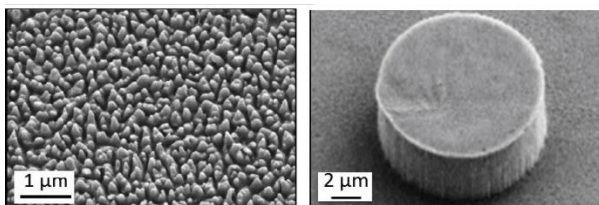


Рис. 1. Примеры моделирования а) нанотравы и б) микроростов столбиков.

Различие заключается в полимерном материале наноструктур и покрытия и литографическом способе нанесения его на пластиковую подложку.

Было проведена серия из 6 циклов заморозки/разморозки. В первых двух было исследовано влияние

только охлажденного цилиндра, с температурой поверхности минус  $6^\circ\text{C}$ . В первом эксперименте водные капли в поток не вносились, а обледенение обеспечивалось конденсацией на охлажденном цилиндре влаги, содержащейся в воздухе. На обоих образцах с наноструктурой образовывалась тонкая глазурная наледь, а на гладкой пленке более толстая наледь имела смешанную структуру льда.

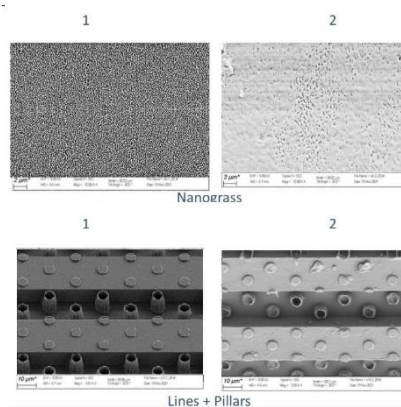


Рис. 2. Структура наноструктуры до (1) и после (2) эксперимента: верхний ряд фиксирует полное разрушение; нижний ряд – сохранение микробороздок с небольшими изменениями или разрушениями микростолбов.

В условиях обледенения на стенде исследованы износостойкие свойства полимерных нанопокрывтий. Обнаружено, что структуры с микробороздками могут быть устойчивы к циклам заморозки/разморозки и они обеспечивают лучшую защиту ото льда, чем гладкие полимерные покрытия.

### Список литературы

1. Telecka, A.; Murthy, S.; Schneider, L.; Pranov, H.; Taboryski, R. Superhydrophobic properties of nanotextured polypropylene foils fabricated by roll-to-roll extrusion coating. *Acs Macro Lett.* 2016, 5, 1034–1038.
2. Wei, K.; Yang, Y.; Zuo, H.; Zhong, D. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wind Energy* 2020, 23, 433–457.
3. Okulova, N.; Johansen, P.; Christensen, L.; Taboryski, R. Effect of Structure Hierarchy for Superhydrophobic Polymer Surfaces Studied by Droplet Evaporation. *Nanomaterials* 2018, 8, 831.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.



Козловский Ю.М., Станкус С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Металлический хром является единственным из переходных металлов антиферромагнетиком и, согласно справочным работам [1, 2], при комнатных температурах претерпевает магнитный фазовый переход. Известно, что фазовые переходы второго рода проявляются на температурных зависимостях теплового расширения в виде аномалий. Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное исследование теплового расширения хрома в широком интервале температур, включая переходную область.

Эксперименты с образцом хрома (99,9 вес. %) проведены на горизонтальном dilatометре DIL-402C (NETZSCH, Германия) [3]. Данные по удлинению получены в шести циклах нагрева-охлаждения с использованием держателей из плавленого кварца или спеченного корунда (в зависимости от температурного интервала), индуктивного датчика перемещения (LVDT) с разрешением до 0,125 нм, а также термопар типа E или S. Измерения выполнены в интервале температур 100–1700 К со скоростью нагрева-охлаждения печи 0,5 или 2 К/мин и 30-минутной изотермической выдержке при максимальной/минимальной температуре в инертной атмосфере гелия (99,995 об. %). Предварительные тарировочные опыты проведены с образцами плавленого кварца и спеченного корунда в условиях, идентичных условиям основных экспериментов.

Установка, методика проведения измерений и обработки полученных результатов апробированы в экспериментах с образцами алюминия, меди и платины. Сопоставление данных измерений с наиболее достоверными литературными [4, 5] показало, что отличие в значениях термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) не превышает 3%.

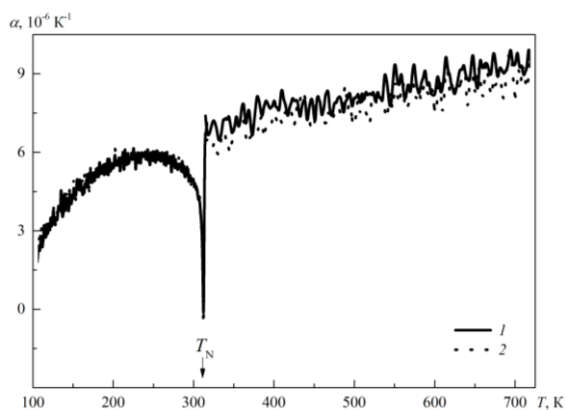


Рис. 1. ТКЛР хрома. 1, 2 – последовательные нагревы.

На рис. 1 представлены некоторые сглаженные методом Савицкого-Голея результаты. На температурной зависимости наблюдается аномальное изменение ТКЛР в области комнатных температур. Минимум, в точке Нееля, зафиксирован при температуре 312,7 К,

что согласуется с данными, представленными в литературе [2, 6, 7]. Стоит отметить, что аномалия проявляется и на кривой относительного удлинения (рис. 2).

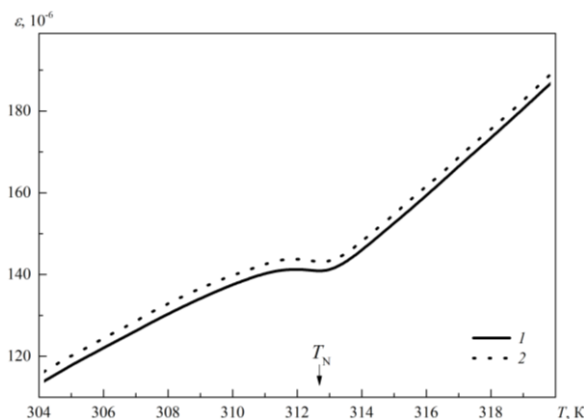


Рис. 2. Относительное удлинение хрома. 1, 2 – последовательные нагревы.

Первичные данные обработаны методом наименьших квадратов степенными полиномами. В аномальной области обработка проведена скейлинговыми зависимостями, что позволило рассчитать критические индексы теплового расширения хрома в окрестности точки Нееля.

По результатам проведенного исследования рассчитаны сглаженные температурные зависимости коэффициентов теплового расширения и относительного удлинения, а также плотности с использованием опорного значения при комнатной температуре, полученного методом гидростатического взвешивания [8]. Полученные результаты сведены в таблицу.

#### Список литературы

1. Бурдаков Д.Д., Бурдаков Ю.Д., Володин С.А., Жилкин Н.К. Общая металлургия. М.: Металлургия, 1971. 472 с.
2. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
3. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение самария в широком интервале температур // ТиА. 2019. Т. 26, № 4. С. 625–631.
4. Kroeger F.R., Swenson C.A. Absolute linear thermal expansion measurements on Copper and Aluminium from 5 to 320 K // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No. 3. P. 853–864.
5. Kirby R.K. Platinum – a thermal expansion reference material // Int. J. Thermophys. 1991. Vol. 12, No. 4. P. 679–685.
6. Fine M.E., Greiner E.S., Ellis W.C. Transitions in Chromium // JOM. 1951. Vol. 3, No. 1. P. 56–58.
7. White G.K., Roberts R.B., Fawcett E. Thermal expansion of Cr and CrV alloys. I: Experiment // J. Phys. F: Met. Phys. 1986. Vol. 16, No. 4. P. 449–459.
8. Станкус С.В. Плотность ванадия и хрома при высоких температурах // ТВТ. 1993. Т. 31, № 4. С. 565–568.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОФТОРЭФИРА

Кукшинов Н.В., Молчанов Т.И.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Проведено экспериментальное исследование фазового равновесия и теплофизических свойств диэлектрической жидкости различной степени загрязненности и смеси жидкостей различных составов после эксплуатации в системе двухфазного охлаждения высокопроизводительного вычислительного оборудования.

## Введение

В последнее время в связи с ростом производительности вычислительной техники актуальной стала задача её охлаждения. Погружное охлаждение с использованием для отвода теплоты фазового перехода первого рода является наиболее эффективным методом охлаждения высокопроизводительной электроники [1].

Известно, что в процессе эксплуатации оборудования жидкость вследствие взаимодействия с компонентами печатных плат подвергается загрязнению. Это приводит к изменению теплофизических свойств хладагента и, как следствие, изменению характеристик теплообмена. Задачей настоящей работы является оценка влияния состава смеси на основе гидрофторэфира на вязкость.

Методика проведения эксперимента по исследованию кинематической вязкости растворов

Вязкость теплоносителя влияет на процесс теплообмена и входит в определяющие критерии, в частности, в зависимости для отрывного диаметра пузыря [2].

Для определения вязкости жидкости используется капиллярный метод, заключающийся в оценке времени истечения жидкости через капилляр характерного размера при определенной температуре [3]. Необходимое оборудование – капиллярный вискозиметр для определения вязкости жидкостей с достаточным диапазоном значений и высокой точностью. В качестве такого вискозиметра был выбран ВПЖ-2 ГОСТ 10028-81.

В качестве испытуемых образцов были взяты:

- чистая диэлектрическая жидкость на основе гидрофторэфира C4F9OCH3
- жидкость C4F9OCH3, содержащая в себе хлорид цинка (ZnCl2) и прочие примеси антипиренов при массовой концентрации  $g = 10\%$ ;
- жидкость C4F9OCH3, с примесью нанопорошка гамма-оксида алюминия Al2O3 при  $g = 3,329\%$ ;
- Смесь C4F9OCH3 и C3F7OCH3 с разными свойствами и температурами насыщения в соотношении 4:1 по массе соответственно.

## Результаты исследования

Анализ результатов зависимости кинематической вязкости от температуры показал вклад примесей в изменение кинематической вязкости в сторону ее увеличения. Исследование свойств фазового равновесия смеси двух диэлектрических жидкостей в разных концентрациях позволяет получить теплоноситель с необ-

ходимой температурой кипения. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование азеотропности смесей и растворов с примесями, исследование других теплофизических свойств теплоносителей, а также на исследование их влияния на процессы кипения и конденсации.

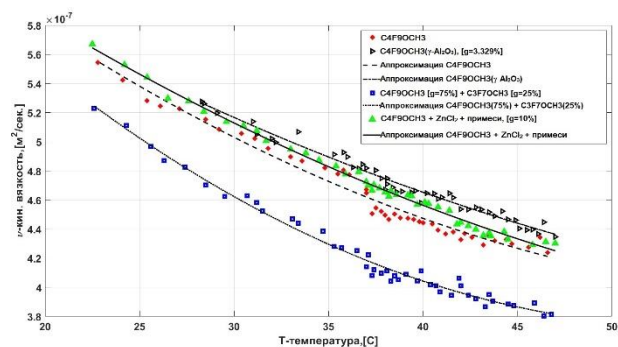


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости от температуры разных образцов диэлектрической жидкости и ее смесей (●-чистая, ▲-примесь Al2O3, ■ – смесь двух типов жидкости, ▲ - примесь ZnCl2).

## Список литературы

1. J.W. Elliott, M.T. Lebon, A.J. Robinson, Optimising integrated heat spreaders with distributed heat transfer coefficients: A case study for CPU cooling, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 38, 2022.
2. Kutateladze S. S., Gogonin I. I. Growth rate and detachment diameter of a vapor bubble in free convection boiling of a saturated liquid //High Temperature. – 1980. – Т. 17. – №. 4. – С. 667-671
3. X. Wang, X. Xu, S. Choi Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture //Journal of thermophysics and heat transfer. – 1999. – Т. 13. – No. 4. С. 474-480.

Магний как машиностроительный материал обладает рядом достоинств, одним из которых является его низкая плотность. Сплавы на основе магния являются одними из самых легких конструкционных и инженерных материалов. Добавка в эти сплавы лития делает их сверхлегкими и перспективными для использования в портативной электронике, автомобильной и аэрокосмической промышленности и т.д. Кроме этого, увеличение содержания лития приводит к росту пластичности этих сплавов. Наличие надежных экспериментальных данных о физических свойствах магний-литиевых сплавов в широком интервале температур необходимо для адекватного анализа перспектив их применения в качестве сверхлегких конструкционных материалов.

Методом лазерной вспышки и нестационарным методом плоского источника тепла выполнены измерения температуропроводности и теплопроводности магний-литиевых сплавов, богатых магнием [1] (с содержанием 5, 10 и 17 ат.% Li), в широком интервале температур твердого состояния. Гомогенизация сплавов Mg–Li была проведена в герметичных молибденовых ампулах. Операции по приготовлению сплавов и заполнению молибденовых ячеек проводились в перчаточном боксе с аргоном особой чистоты (99,999 об.%), оснащенный аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами.

Исследование температуропроводности и теплопроводности в интервале температур 293–680 К проведено на установке LFA-427 фирмы NETZSCH. Измерение температуропроводности образцов проводилось в стационарной атмосфере аргона особой чистоты (99,999 об.%). Измерения при заданной температуре осуществлялись в серии из двух–трех «выстрелов» лазера после термостатирования образца. Теплопроводность образцов рассчитывалась с использованием измеренных в настоящей работе значений их температуропроводности и полученных нами ранее результатов по удельной теплоемкости и плотности. Оцениваемая погрешность полученных данных по температуропроводности составила 2–3%, неопределенность результатов по теплопроводности не превышает 3–5%.

Измерение теплопроводности сплавов в области низких температур проведено на установке Hot Disk TPS 2500S. Образцы представляли собой цилиндры высотой 18 мм и диаметром 36 мм с отшлифованными плоскопараллельными основаниями. По центру между двумя образцами каждого сплава зажимался плоский датчик K5501 диаметром 12,8 мм. Измерения проводились в атмосфере аргона (99,999 об.%). Охлаждение образцов до 200 К проведено с помощью криостата LAUDA KRYOMAT RUL 80. Отдельно проведено по три эксперимента для каждого сплава при температуре кипения азота. Оцениваемая погреш-

ность полученных с помощью Hot Disk TPS 2500S экспериментальных данных по теплопроводности составляет около 5%.

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные в основном являются уникальными и могут быть рекомендованы в качестве справочных. На основании полученных ранее и в настоящей работе результатов построены температурные и концентрационные зависимости температуропроводности и теплопроводности магний-литиевых сплавов с содержанием до 30 ат.% Li. Показано, в частности, что переносные свойства сплавов Mg–Li в области (Mg)-фазы [1] крайне чувствительны к изменению состава. Так, даже небольшая добавка лития к магнию (5 ат.% или 1,48 вес.%) ведет к падению теплопроводности примерно в 2 раза в окрестности комнатной температуры (см. рис. 1).

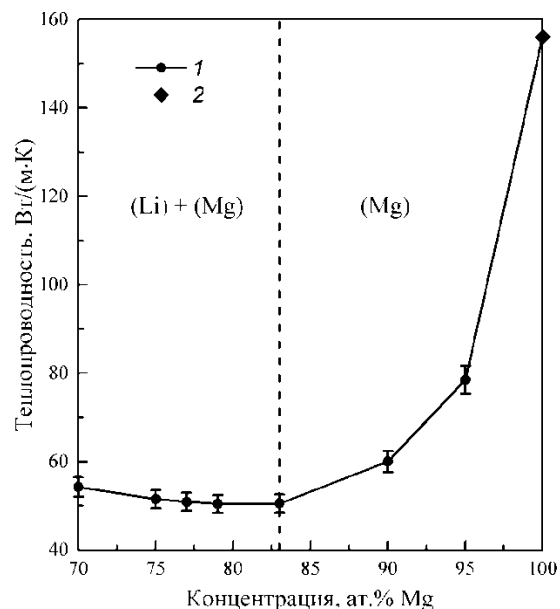


Рис. 1. Концентрационная зависимость теплопроводности сплавов магний-литий при комнатной температуре: 1 — наши данные, 2 — данные [2].

#### Список литературы

1. Nayeb-Hashemi A.A., Clark J.B., Pelton A.D. The Li–Mg (lithium-magnesium) system // Bull. alloy phase diagr. 1984. Vol. 5. No. 4. P. 365–374.
2. Ho C.Y., Powell R.W., Liley P.E. Thermal conductivity of the elements: a comprehensive review // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3. P. 1–796.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10025, <https://rscf.ru/project/20-79-10025/>.

## УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ПОЛНОСТЬЮ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДОМ ИТТРИЯ, В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300–1270 К

Самошкин Д.А., Станкус С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония (YSZ) обладает превосходными свойствами при высоких температурах, такими как высокая устойчивость к тепловому удару, низкая теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения, повышенная температура плавления, хорошая фазовая стабильность, отличная стойкость к окислению и химическая инертность в атмосфере горения [1–3]. Таким образом, YSZ является перспективным материалом, который широко используется в качестве высокотемпературной конструкционной керамики. Так, например,  $ZrO_2$ , частично стабилизированный  $Y_2O_3$ , наносится в качестве верхнего слоя термобарьерных покрытий, применяемых в газовых турбинах и дизельных двигателях для защиты основных металлических частей от высокотемпературного газового воздействия, повышения долговечности компонентов и КПД двигателя [1–4]. Керамика из полностью стабилизированного  $ZrO_2$  при повышенных температурах обладает кислородно-ионной проводимостью, что используется в датчиках определения кислорода в газовых средах и расплавах, а также при создании высокотемпературных твердооксидных топливных элементов для газовых электролизеров и электрохимических генераторов – автономных источников электрического тока [5].

Надежные и систематизированные данные по теплофизическим свойствам (в том числе по теплоемкости) керамик необходимы для конструирования на их основе новых материалов и их успешное внедрение в разных областях промышленности. Обзор имеющейся в литературе информации показал, что в основном исследуются свойства частично стабилизированного  $ZrO_2$ . Однако теплофизические свойства керамик из полностью стабилизированного  $ZrO_2$ , легированного высоким содержанием  $Y_2O_3$ , изучены недостаточно. Исходя из этого, целью данной работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия, в широком интервале температур.

Измерение удельной изобарной теплоемкости  $c_p$  осуществлялось на экспериментальной установке DSC 404 F1 методом дифференциальной сканирующей калориметрии [6]. Исследовался образец  $ZrO_2$ , стабилизированный 15 вес.%  $Y_2O_3$ . Эксперименты проводились в интервале температур 300–1270 К с использованием платиновых ячеек со скоростью нагрева 10 К/мин в проточной (20 мл/мин) атмосфере аргона особой чистоты (99,999 об.%). Масса исследуемого образца YSZ взвешивалась на электронных весах AND GH-252 с погрешностью не более 0,3 мг и равнялась 79,9 мг. В качестве калибровочного образца использовался сапфир массой 84,4 мг. Оцениваемая погрешность полученных данных по  $c_p$  составила 2–4%.

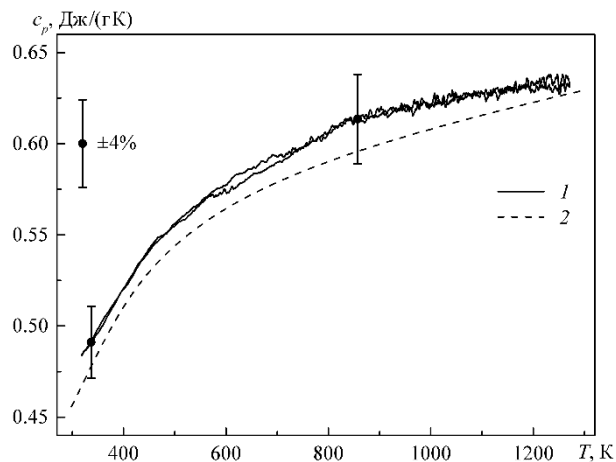


Рис. 1. Удельная теплоемкость YSZ: 1 – результаты измерений, 2 – расчет по правилу Неймана-Коппа.

Экспериментальные данные по  $c_p$  YSZ, а также результаты расчета по правилу Неймана-Коппа представлены на рис. 1. Расчет осуществлялся по значениям удельной теплоемкости  $ZrO_2$  и  $Y_2O_3$  от их массового содержания в исследуемой керамике. Видно, что результаты экспериментов очень хорошо согласуются между собой. Температурная зависимость  $c_p$  YSZ в рассматриваемом интервале температур твердого состояния изменяется монотонно, фазовых переходов не обнаружено. Также на рис. 1 видно, что результаты расчета по правилу Неймана-Коппа лежат ниже экспериментальных значений и согласуются с ними в пределах погрешности измерений.

### Список литературы

1. Xiwen S., Min X., Fen Z., Guixiao J., Xihong H., Shengli A. High-temperature thermal properties of yttria fully stabilized zirconia ceramics // *J. Rare Earth*. 2011. Vol. 29. No. 2. P. 155–159.
2. Hu L., Wang C.A., Hu Z., Lu S., Sun C., Huang Y. Porous yttria-stabilized zirconia ceramics with ultra-low thermal conductivity. Part II: temperature dependence of thermophysical properties // *J. Mater. Sci*. 2011. Vol. 46. P. 623–628.
3. Jang B.K., Matsubara H. Thermophysical properties of EB-PVD coatings and sintered ceramics of 4 mol%  $Y_2O_3$ -stabilized zirconia // *J. Alloy Compd*. 2006. Vol. 419. No. 1-2. P. 243–246.
4. Di Girolamo G., Blasi C., Pagnotta L., Schioppa M. Phase evolution and thermophysical properties of plasma sprayed thick zirconia coatings after annealing // *Ceram. Int*. 2010. Vol. 36. No. 8. P. 2273–2280. <https://www.chmz.net/product/keramika/>.
5. Samoshkin D.A., Stankus S.V., Agazhanov A.Sh. Heat capacity of corrosion-resistant refractory alloy ChS88U-VI in the temperature range of 300–1270 K // *J. Eng. Thermophys*. 2023. Vol. 32. No. 4. P. 692–696.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО–КРЕМНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ  
И ТЕМПЕРАТУРАХ**

**Середкин Н.Н., Хищенко К.В.**

Объединенный институт высоких температур РАН,  
ул. Ижорская, 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

В этой работе представлено уравнение состояния системы железо–кремний при высоких давлениях и температурах.

Для компонентов (железа, кремния) калорические и термические уравнения состояния были заданы в форме функций удельной внутренней энергии и давления от удельного объема и температуры. На основе полученных уравнений состояния для железа и кремния были проведены расчеты ударных адиабат образцов различной начальной плотности. Результаты этих расчетов хорошо согласуются с имеющимися ударно-волновыми данными.

Для смеси компонентов, находящихся в тепловом и механическом равновесии друг с другом, уравнение состояния строится на основе термодинамического потенциала энергии Гиббса. Для смеси эта энергия есть сумма энергий Гиббса компонентов с учетом их массовых долей при заданном давлении и заданной температуре.

Для проверки предложенной модели термодинамики системы железо–кремний произведен расчет ударных адиабат образцов смеси. Результаты этого расчета также хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными при высоких давлениях и температурах.

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР С ТРАНСФОРМАТОРНЫМ МАСЛОМ

Комаров А.Г.<sup>1</sup>, Савичев В.И.<sup>1</sup>, Смовж Д.В.<sup>2</sup>, Нуриахметов З.Н.<sup>3</sup>, Шупик П.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

г. Уфа, ул. Космонавтов 1, 450064, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет

ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Алюмосиликатные микросферы (ценосферы) - один из продуктов сгорания каменного угля в тепловых электростанциях. Содержание данного компонента может варьироваться для сжигания различных углей и может варьироваться в диапазоне от долей до нескольких процентов. Ценосферы имеют большое количество практических применений, главным образом в качестве наполнителей, благодаря высокой прочности и низкой плотности ( $0,3-0,6 \text{ г/см}^3$ ). Покрытие алюмосиликатных микросфер различными металлами открывает широкий спектр возможных применений, связанных с электромагнитной защитой и катализом. В научной литературе апробирован ряд подходов, основанных на методах растворной химии и физического напыления металлов (Fe, Ni, Cu и др.) на алюмосиликатные микросферы [1]. Актуальным в настоящее время является поиск новых дешевых способов покрытия микросфер и изучение электрофизических свойств получаемых материалов и композитов на их основе.

Настоящая работа посвящена апробации растворного и плазмохимического методов нанесения медных наночастиц и углеродных нанотрубок на алюмосиликатные микросферы. Получению и исследованию электропроводности композитов на основе модифицированных микросфер и трансформаторного масла, при различных давлениях. Нанесение раствором методом производилось с использованием в качестве растворителя воды, меди или УНТ диспергировались в растворе с добавлением ПАВ и без, затем добавлялись микросферы. Для физического напыления использовался газовый разряд с магнетроном и вибростолом для перемешивания микросфер. Исследование электропроводности проводилось в ячейке конденсаторного типа в диапазоне давлений до 100 атм.

Показано, что растворный способ позволяет получать однородное островковое металлическое покрытие на керамических микросферах, где характерный масштаб островков соответствует размеру используемых наночастиц. Варьируя растворитель можно получать различную текстуру покрытия. Запекание в инертной атмосфере и водороде приводит к усилению адгезии медных частиц к микросферам. При нанесении УНТ раствором методом формируются пористые агломераты из сцепленных пучков УНТ с микросферами. Напыление с использованием магнетрона позволяет формировать однородное медное покрытие толщиной от единиц до сотен нанометров.

Исследование электропроводности и диэлектрических свойств композитов на основе микросфер с трансформаторным маслом показало, что композиты на основе чистых микросфер являются диэлектриком

(вещественная часть диэлектрической проницаемости изменяется в диапазоне от 1,6 до 2,7, мнимая от 0,03 до 0,6). В образцах, полученных методом магнетронного напыления, экспериментально зафиксировано изменение проводимости композита при изменении давления. Изменение происходит резким скачком при давлении около 40 атм. Сопротивление изменяется на 7 порядков. В не проводящем состоянии диэлектрическая проницаемость практически не зависит от давления, (рис.1).

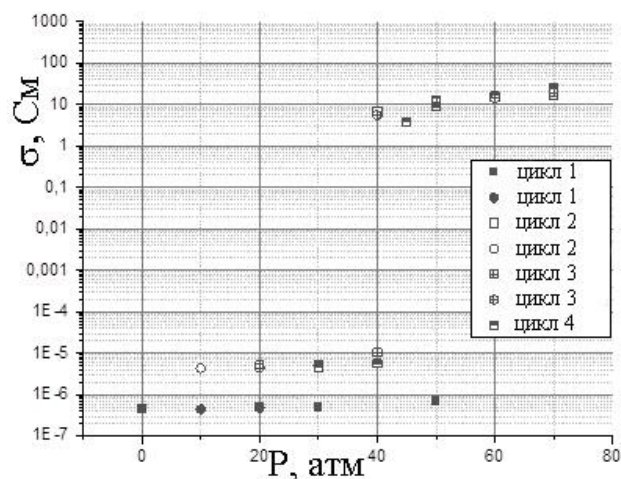


Рис. 1. Зависимость проводимости композита на основе микросфер с медным покрытием от давления.

Композиты на основе микросфер модифицированных УНТ показали монотонную зависимость проводимости от давления, уменьшающуюся с его ростом. Таким образом, в работе предложены подходы к созданию барочувствительных материалов на основе модифицированных микросфер, материалы могут быть интересны для применений в качестве сенсоров давления.

### Список литературы

1. Shende D. Z., Wasewar K. L., Wadtkar S. S. Target-Specific Applications of Fly Ash Cenosphere as Smart Material // Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications. – 2021. – С. 3349-3369.

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ КОМПОЗИТА ГРАФЕНА С ДИОКСИДОМ ТИТАНА****Сорокин Д.В.<sup>1,2</sup>, Гареев Т.И.<sup>1,2</sup>, Зайцев О.В.<sup>1,2</sup>, Смовж Д.В.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

На сегодняшний день применение графена в фотодетектирующих устройствах привлекает большое внимание, так как из-за отсутствия запрещенной зоны и линейного закона дисперсии свободных носителей заряда, графен обладает широким спектром регистрации фотонов и быстрым временем отклика. Однако, несмотря на эти преимущества, повышение эффективности поглощения света остается одной из ключевых проблем. Для увеличения поглощения света графеном используются различные способы применения плазмонных наноструктур, внедрение графена в микрорезонаторы и фотонные волноводы и т. д. Одной из доступных стратегий улучшения поглощения света является модификация поверхности графена светочувствительными элементами. Механизм увеличения фоточувствительности в этом случае основан на генерации электронно-дырочных пар фотонами в светочувствительном материале или в графене, которые в последующем диссоциируют на границах раздела, и один из типов заряда остаётся в графене, создавая фототок. До сих пор использовались различные типы фотоактивных соединений, такие как коллоидные квантовые точки, нанопластины и др. [1,2].

Возможными перспективными элементами, улучшающим светочувствительность графеновых структур, являются соединения на основе титана. До сих пор большинство исследований систем титан/графен проводились на основе порошковой композитной системы, состоящей из чешуек графена и коллоидных наночастиц титана [3]. Принцип работы этих систем основан на сильном взаимодействии между двумя компонентами, которые демонстрируют быструю передачу электронов от фотовозбужденных частиц оксида титана к нижележащим наночастицам графена, в котором время электронно-дырочной рекомбинации увеличивается. Тем не менее, формирование тонких пленок графена большой площади также очень важно для некоторых практических применений. Например, существующие технологии синтеза позволяют производить сплошные пленки графена высокого качества и в больших масштабах [4], для которого разработаны технологии нанесения на кремний, что обеспечивает монолитную оптоэлектронную интеграцию с процессами изготовления КМОП схем.

В данной работе, продемонстрировано, что модифицирование графеновой плоскости частицами диоксида титана методом магнетронного распыления может использоваться в качестве способа улучшения его фоточувствительности. Синтез графена проводился методом химического осаждения из газовой фазы на медной подложке-катализаторе и электро-дуговым распылением. После синтеза графен наносился на кремниевую подложку. Распыления наночастиц титана на магнетроне проводилось в импульсном ре-

жиме для снижения скорости осаждения и формирования островкового покрытия. Для средней массовой толщины при распылении титановой мишени 3, 7, 13 ангстрем чувствительность (отношение индуцированного фототока к падающей оптической мощности) составила 3, 8, 24 мА/Вт соответственно. В результате, это свойство может использоваться для создания устройств различной степени фоточувствительности.

**Список литературы**

1. Konstantatos G. et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain //Nature nanotechnology. 2012. V. 7, N 6 P. 363-368.
2. Wang Q. et al. High-performance phototransistor of epitaxial PbS nanoplate-graphene heterostructure with edge contact //Advanced Materials. 2016. V. 28, N 30. P. 6497-6503.
3. Qin H. et al. The effect of structure on the photoactivity of a graphene/TiO<sub>2</sub> composite //Materials Science and Engineering: B. 2014. V. 184, N P. 72-79.
4. Deng B., Liu Z., Peng H. Toward mass production of CVD graphene films //Advanced Materials. 2019. V. 31, N 9. P. 1800996.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда № 24-19-00357,  
<https://rscf.ru/project/24-19-00357/>.*

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ О ПЛОТНОСТИ SF<sub>6</sub> НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

Рыков С.В.<sup>2</sup>, Кудрявцева И.В.<sup>3</sup>, Устюжанин Е.Е.<sup>1</sup>, Очков В.Ф.<sup>1</sup>, Рыков В.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский университет «МЭИ»

ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, г. Москва, 111250, Россия

<sup>2</sup> Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения  
ул. Захарьевская, д. 22, г. Санкт-Петербург, 191123, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО

Кронверкский пр., 49, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

В данном докладе рассматриваются термодинамические комплексы, которые содержат свойства (плотность жидкости ( $\rho_l$ ), плотность газа ( $\rho_g$ )) на линии насыщения и представляют собой: параметр порядка ( $f_s$ ), средний диаметр ( $fd$ ), комплекс  $ur = fd/fs$  и др. Исследуется ряд уравнений, включая  $\rho_l(\tau)$  и  $\rho_g(\tau)$ , которые ориентированы на теплофизические (ТФ) расчеты в окрестности критической точки (КТ) SF<sub>6</sub>. Анализируются опытные данные о высоте мениска ( $h$ ) (Garrabos Y. и др., 2018 г.), расположенные вблизи КТ.

Одна из задач нашей работы, а именно задача А состоит в том, чтобы исследовать функцию  $h/R$  в заданном интервале температур, здесь  $h$  – некоторая высота, на которой размещен мениск в цилиндрической ячейки,  $R$  – радиус ячейки. Последняя используется в эксперименте (Garrabos Y., 2018 г.), расположена горизонтально и имеет размеры (диаметр  $d = (10.606 \pm 0.005)$  мм, эффективный объем  $V = 221.7$  мм<sup>3</sup>); внутри имеется двухфазный образец SF<sub>6</sub>. Упомянутый мениск разделяет газовую и жидкую фазы образца. В торцах цилиндра размещены: а) прозрачные окна, б) оптическая система, с помощью которой оператор делает фотоснимок. Это фото имеет высокое разрешение, благодаря которому можно, во-первых, хорошо рассмотреть мениск. Во-вторых, оператор измеряет значение  $h$  с помощью пикселей на данном фото в интервале ( $3 \cdot 10^{-6} < \tau = (T_c - T)/T_c < 0.03$ ). В этой работе представлена функция  $(h/R)(\tau)$  в виде

$$h/R = y = (\pi/4) (-ur + 0.002/fs) (1+x), \quad (1)$$

где  $x$  – поправка на балластный объем ячейки, 0.002 – параметр, обусловленный массой образца.

Включенные в (1) комплексы ( $fd = (\rho_l + \rho_g)/(2\rho_c) - 1$ ,  $fs = (\rho_l - \rho_g)/(2\rho_c - 1)$ ), существенно зависят от плотностей ( $\rho_l$ ,  $\rho_g$ ,  $\rho_c$ ). Цель нашего исследования заключается в том, чтобы получить, во-первых, оценку погрешности ( $\rho_l$ ,  $\rho_g$ ,  $T$ ) данных для SF<sub>6</sub> SF<sub>6</sub> в диапазоне ( $3 \cdot 10^{-6} < \tau < 10^{-2}$ ); в этом расчете намечено использовать функцию  $y(\tau)$  (1) и опытные ( $h$ ,  $T$ ) данные. Во-вторых, намечено изучить функции ( $fs(\tau)$ ,  $fd(\tau)$  и др.) и численно оценить некоторые термодинамические комплексы ( $ur$ ,  $Z$  и др.) в окрестности КТ SF<sub>6</sub>.

В соответствии с указанной целью авторами рассматривается ряд задач (А, В ...). В рамках задачи А привлекаем модели ( $fs(\tau)$ ,  $fd(\tau)$ ), которые представлены в ряде работ, и осуществляем теплофизический (ТФ) расчет 1, нацеленный на вычисление заданных характеристик, в том числе определяем ( $h$ ,  $\tau$ ) данные на основе (1). В ТФ расчете 1 применяем уравнения ( $fs(\tau)$ ,  $fd(\tau)$ ) [1], а также вычисляем плотности на бинодали ( $\rho_l = (f_d + f_s + 1)\rho_c$ ,  $\rho_g = (f_d - f_s + 1)\rho_c$ ) при ( $2 \cdot 10^{-8} < \tau < 0.3$ ).

Отметим, что в интервале ( $0 < \tau < 2 \cdot 10^{-4}$ ) отсутствуют прямые измерения плотности, в связи с чем называем этот интервал как область экстраполяции,  $\Delta\text{textit}$ .

Задача В посвящена поиску факторов, которые существенно влияют на функцию  $y(\tau)$  (1) в области,  $\Delta\text{textit}$ ; так, в рамках этой задачи оцениваем влияние погрешности, которая характеризует ( $\rho_l$ ,  $\rho_g$ ,  $T$ ) вблизи КТ.

В соответствии с задачей С (исследовать комплексы ( $ur$ ,  $Z$ )) в заданных граничных условиях выполняем ТФ расчет и некоторые шаги.

1. Записываем  $fs(\tau)$ ,  $fd(\tau)$  и относительную плотность применительно к интервалу  $\Delta\text{textit}$  в виде

$$f_s = B_{s0} \tau^\beta + \dots, f_d = B_{d0} \tau^{2\beta} + \dots, \Delta\rho_{lg} = (\rho_{lg} - \rho_c)/\rho_c = f_d \pm f_s. \quad (2)$$

2. Представляем комплекс  $Z_{lg}$  в форме

$$Z_{lg} = |\Delta\rho_{lg}/f_s| = 1 \pm ur = 1 \pm ur_{bas} + \dots, \quad (3)$$

где  $ur_{bas}$  симметричная функция.

3. Исследуем комплексы  $Z_{lg}$  exp в форме

$$Z_{g\text{exp}} = |\Delta\rho_{g\text{exp}}/f_s(\tau), Z_{l\text{exp}} = \Delta\rho_{l\text{exp}}/f_s(\tau). \quad (4)$$

Проводим ТФ расчет 2, который позволяет получить информацию (( $Z_g$ ,  $ur_{bas}$ ) данные, ( $Z_g$  exp,  $ur_{bas}$ ) данные, ( $Z_l$ ,  $ur_{bas}$ ) данные, ( $Z_l$  exp,  $ur_{bas}$ ) данные) в широком интервале температур. На основе анализа указанных результатов предложена формула, аппроксимирующая ( $Z_{lg}$  exp,  $ur_{bas}$ ) точки в виде

$$Z_l = 1 + ur_{bas} + x_1 ur_{bas}^3, Z_g = 1 - ur_{bas} - x_1 ur_{bas}^3, \quad (5)$$

где  $ur_{bas} = x_2 \tau^\beta$ .

В рамках ТФ расчета 2 найдены значения регулируемых коэффициентов ( $x_1$ ,  $x_2$ ), а также установлено удовлетворительное согласование расчетных данных, отвечающих модели (5), и опытных ( $Z_{lg}$  exp,  $ur_{bas}$ ) данных в интервале ( $2 \cdot 10^{-4} < \tau < 0.1$ ). Жидкостная и газовая ветви бинодали являются симметричными между собой и переходят в линейную форму ( $Z_{lg} = 1 \pm ur_{bas}$ ) при ( $0 < \tau < 10^{-2}$ ).

### Список литературы

1. Устюжанин Е.Е. и соавт. Некоторые термодинамические свойства SF<sub>6</sub> на бинодали в окрестности критической точки // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 591-608.



Расплавленная смесь фторидов лития, натрия и калия эвтектического состава (FLiNaK) рассматривается как теплоноситель в ряде проектов т.н. «жидкосольевых» ядерных реакторов [1]. Эвтектическая смесь содержит 46,5 мол. % LiF, 11,5 мол. % NaF, 42,0 мол. % KF и плавится при температуре 727 К [1]. Данные по калорическим свойствам теплоносителя крайне важны для теплового расчета реакторных установок. На настоящий момент имеется ряд работ, посвященных измерениям энтальпии и теплоемкости расплава FLiNaK (наиболее полный обзор этих работ приведен в [2]), однако результаты различных авторов плохо согласуются между собой. Например, расхождения в значениях теплоемкости при температурах выше 1000 К достигают почти 25 %, а температурные зависимости теплоемкости различаются по знаку производной. Отдельно стоит отметить, что большинство литературных данных по калорическим свойствам FLiNaK были получены методами сканирующей калориметрии, либо представляют из себя результаты теоретических расчетов, что вызывает вопросы об их надежности для жидкого состояния и области фазового перехода. В связи с вышеизложенным, основной целью настоящей работы было уточнение имеющихся в литературе данных по энтальпии и теплоемкости FLiNaK в твердом и жидком состояниях.

Измерения энтальпии FLiNaK производились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой [3]. Неопределенность получаемых данных по энтальпии на данной установке не превышает 0,3%. Исходными компонентами для приготовления образцов служили фторид лития квалификации ОСЧ («особо чистый», чистота 99,9 масс. %), фторид натрия квалификации ЧДА («чистый для анализа», чистота не менее 99 масс. %) и дигидрат фторида калия (KF·2H<sub>2</sub>O, также ЧДА). Для удаления влаги и летучих примесей исходные компоненты сушили под вакуумом при температурах 600–650 К. Приготовление образца для исследования происходило в перчаточном боксе в атмосфере высокочистого аргона (99,992 об. %), оснащенном аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами. В качестве измерительной ячейки использовалась ампула из сплава НП2, устойчивого к воздействию расплавленных фторидов щелочных металлов, как минимум, до температур ~1100 К [4]. После заполнения ампулы солями измерительная ячейка герметизировалась электродуговой сваркой. Фактическое содержание фторидов лития, натрия и калия в образце составило 46,48 ± 0,02 мол. %, 11,50 ± 0,02 мол. % и 42,02 ± 0,02 мол. %, соответственно.

Перед началом основной серии экспериментов ампула с образцом выдерживалась в печи калориметра при температуре 1025 К в течение 2 часов для достижения гомогенного состояния образца. После этого, методом термического анализа была определена температура эвтектической реакции (см. рис. 1), которая

с высокой точностью совпала с имеющимися в литературе данными [1]. Это, а также наличие всего одного выраженного теплового эффекта, подтверждает достижение гомогенного состояния образца.

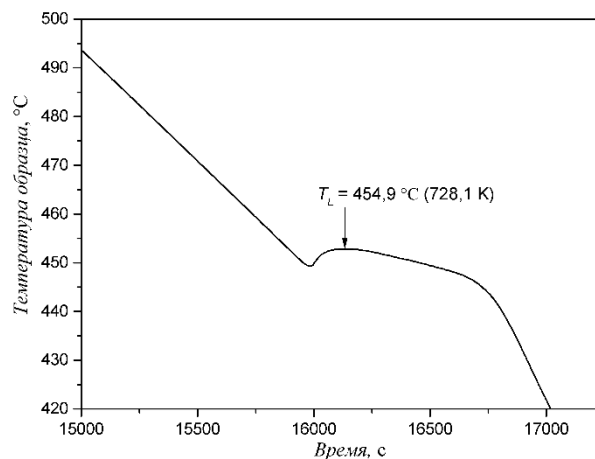


Рис. 1. Термограмма кристаллизации соли FLiNaK.

Было проведено 15 измерений энтальпии образца FLiNaK в интервале температур 430–975 К, включающем твердое и жидкое состояния. После получения сглаженных температурных зависимостей был рассчитан скачок энтальпии при плавлении, а также определены теплоемкости твердой и жидкой фазы. По результатам измерений были разработаны таблицы справочных данных и рекомендуемые температурные зависимости изученных свойств. Проведено сопоставление полученных нами данных с результатами других работ.

#### Список литературы

1. O. Beneš and R.J.M. Konings. Thermodynamic properties and phase diagrams of fluoride salts for nuclear applications // J. Fluorine Chem. 2009. Vol. 130, No. 1, P. 22–29.
2. Romatoski R.R., Hu L.W. Fluoride salt coolant properties for nuclear reactor applications: a review // Ann. Nucl. Energy. 2017. Vol. 109. P. 635–647.
3. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 150–156.
4. Суренков А.И., Игнатьев В.В., Трунькин И.Н., Пресняков М.Ю., Углов В.С. Исследование коррозионной стойкости никель-молибденовых сплавов в эвтектике LiF–NaF–KF // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 3. С. 142–147.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800219-2.

## ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВА LiKPb2 В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Концентрационные зависимости теплофизических и электрофизических свойств расплавов бинарных систем Li–Pb и K–Pb демонстрируют ярко выраженные экстремумы [1–3]. В частности, теплоемкость, кинематическая вязкость и удельное электрическое сопротивление достигают максимума, а избыточная энтропия смешения – минимума, при атомных концентрациях свинца  $X_{Pb} \approx 20$  и 50 ат.% для жидких сплавов Li–Pb и K–Pb, соответственно. Так, например, электросопротивление жидких сплавов Li80Pb20 и K50Pb50 примерно в 20 и 40 раз превосходит сопротивление чистых расплавов лития и калия, соответственно. Согласно современным представлениям [1–3], эти особенности связаны с тенденцией к образованию интерметаллических комплексов в жидких сплавах систем, компоненты которых сильно различаются по электроотрицательности. Из-за этой разницы внешний электрон с атома щелочного металла (ЩМ) частично смещается к более электроотрицательному атому свинца. Если соотношение компонентов таково, что количества смещенных электронов достаточно для полного заполнения внешней оболочки электроотрицательного элемента, то химическая связь и структура расплава становится солеподобной, а из атомов ЩМ и Pb формируются ассоциированные комплексы. В итоге, часть валентных электронов ЩМ локализуется в этих комплексах и не участвует в электрической проводимости [1]. Предполагается, что в расплавах Li–Pb преобладают «октетные» ионные комплексы вида  $Li_4^+Pb^{4-}$ , а в жидких сплавах K–Pb образуются полианионные тетраэдрические кластеры  $[Pb]_4^-$  с общим зарядом – 4, вокруг которых кулоновскими силами удерживаются четыре катиона  $K^+$ . Если для бинарных расплавов Li–Pb и K–Pb имеется обширная экспериментальная информация по многим теплофизическим свойствам, в том числе по термическим [2, 3], то для тройной жидкой системы Li–K–Pb практически отсутствуют какие-либо сведения. Система Li–K–Pb примечательна тем, что в ней могут образовываться как октетные комплексы, так и полианионные структуры. При этом известно, что литий и калий практически нерастворимы друг в друге как в твердом, так и в жидком состояниях (вплоть до 1200 К) [4].

В настоящей работе проведено экспериментальные исследования плотности ( $\rho$ ) и объемного коэффициента термического расширения ( $\beta$ ) сплава LiKPb2 в интервале от температуры ликвидуса ( $T_L = 784$  К) до 1000 К. Измерения термических свойств расплава LiKPb2 осуществлялись бесконтактным методом просвечивания образца узким пучком гамма-излучения [2–4] с использованием герметичной измерительной ампулы, заполненной инертным газом. Процедуры по приготовлению сплава, заполнение ампулы металлами и ее герметизация вместе с образцом проводились в инертной атмосфере (Ar с чистотой 99,999 об.%) перчаточного бокса, оснащенного электронными весами и аппаратом электродуговой

сварки. На рис. 1 приведены полученные результаты по  $\rho$  и  $\beta$ . Как видно, температурные зависимости исследуемых свойств оказались слабо нелинейными. Контроль гомогенности образца и отсутствия газовых включений (пузырьков) на стенках ампулы проводился путем его сканирования, то есть, измерением ослабления гамма-излучения в расплаве на различных высотах. Сканирование расплава после продолжительной изотермической выдержки при 1000 К показало, что коэффициент ослабления пучка по высоте образцов максимально менялся не более, чем на 0,2%. Таким образом, исследуемый расплав был достаточно однородным по составу и плотности. С учетом практически полной несмешиваемости чистых расплавов Li и K [4], можно предположить, что сильное химическое взаимодействие между Pb и ЩМ вероятно подавляет тенденцию к расслоению в расплаве LiKPb2.

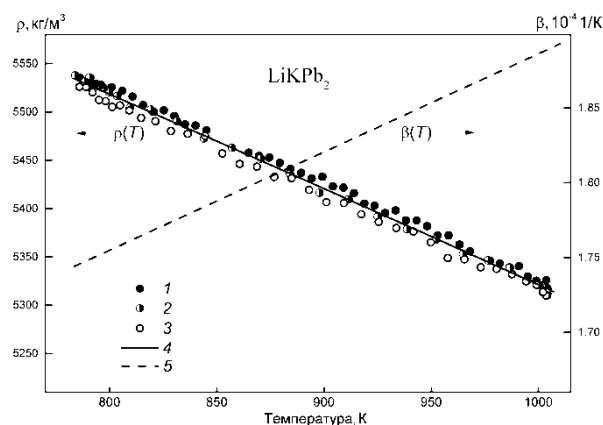


Рис. 1. Плотность ( $\rho$ ) и тепловое расширение ( $\beta$ ) расплава LiKPb2: 1, 2, 3 – данные 1-го, 2-го и 3-го измерений  $\rho$ , 4 – аппроксимация  $\rho(T)$ , 5 – аппроксимация  $\beta(T)$ .

## Список литературы

1. Van der Lugt W. Polyaniions in liquid ionic alloys: a decade of research // J. Phys. Condens. Mat. 1996. Vol. 8, No. 34. P. 6115–6138.
2. Khairulin R.A., Abdullaev R.N., Stankus S.V., Agazhanov A.S., Savchenko I.V. Volumetric properties of lithium–lead melts // Int. J. Thermophys. 2017. Vol. 38, No. 2. Article No. 23. 10 p.
3. Хайрулин Р.А., Станкус С.В., Абдуллаев Р.Н. Термические свойства жидких сплавов системы K–Pb // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 359–364.
4. Хайрулин Р.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Растворимость калия, рубидия и цезия в жидком литии при высоких температурах // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 1. С. 157–161.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10095, <https://rscf.ru/project/23-79-10095/>.

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГРАФИТА И АЛМАЗА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ****Хищенко К.В.**Объединенный институт высоких температур РАН,  
ул. Ижорская, 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

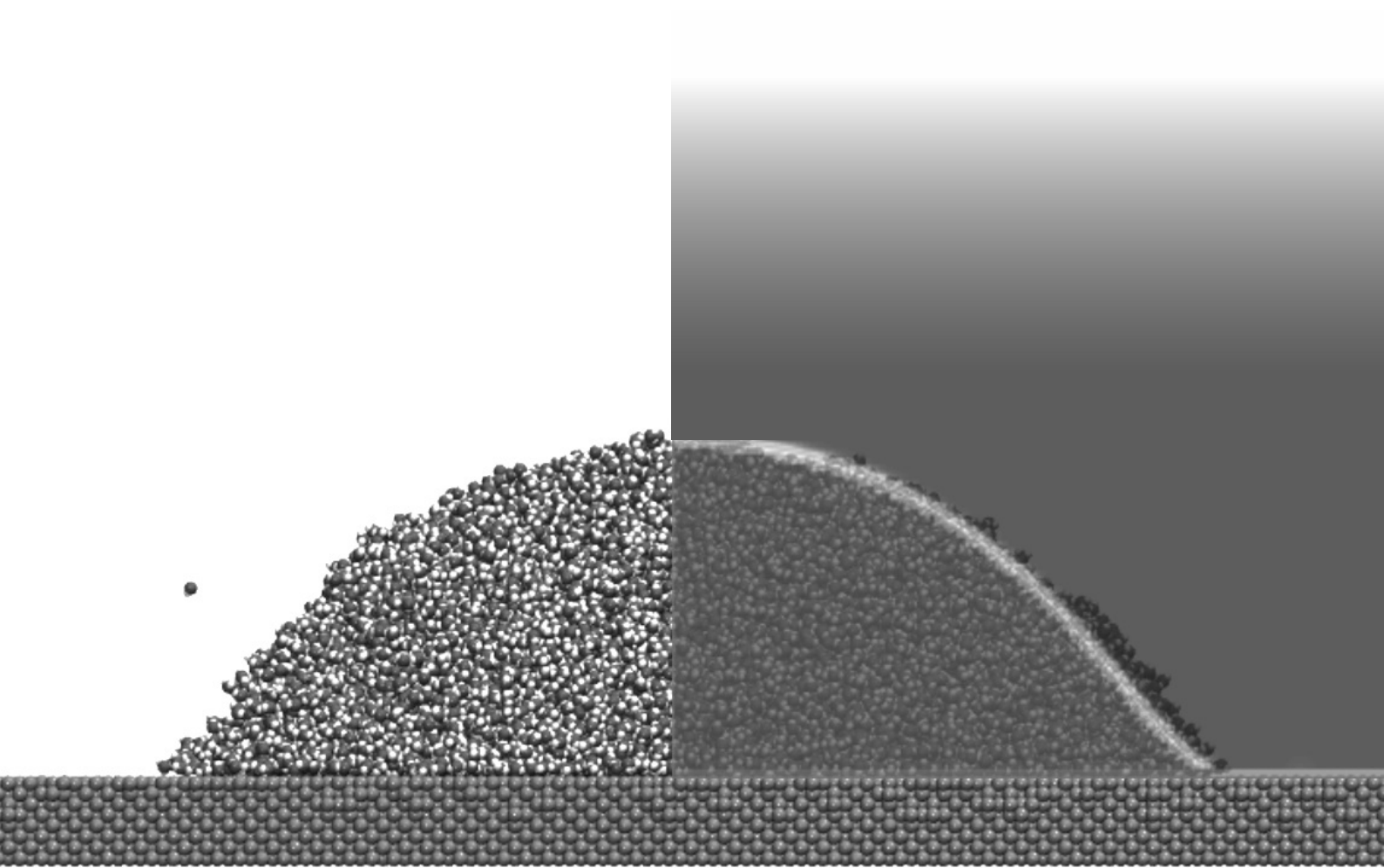
Материалы на основе различных твердых фаз углерода представляют интерес для практического использования благодаря своим уникальным свойствам. В настоящей работе рассматриваются термодинамические свойства графита и алмаза в широком диапазоне давлений и температур. Описание термодинамики этих материалов необходимо для численного моделирования гидродинамических процессов в веществе при интенсивных импульсных воздействиях. Причем учет фазовых превращений позволяет улучшить согласие результатов расчетов с имеющейся экспериментальной информацией в тех случаях, когда наблюдаются качественные эффекты этих превращений.

Предложена модель уравнения состояния вещества с учетом плавления, испарения и сублимации. Построены уравнения состояния графита и алмаза при высоких давлениях и температурах. Представлены результаты расчетов термодинамических характеристик этих твердых, а также жидкой и газовой фаз углерода в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными. В частности, получено хорошее согласие с данными ударно-волновых экспериментов с образцами графита и алмаза различной начальной плотности.

Разработанные уравнения состояния фаз углерода могут быть использованы в гидродинамическом моделировании различных процессов при высоких давлениях и температурах.



СЕКЦИЯ 8  
Тепломассообмен и гидродинамика  
на микро- и наномасштабах





## МОДЕЛЬ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ CVD ГРАФЕНА

Бойко Е.В., Смозж Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Термоакустическое излучение может возникать в результате высокочастотных тепловых колебаний при прохождении через покрытие CVD (химическое осаждение из газовой фазы) графена переменного электрического тока. Существующие термоакустические модели основываются на предположении, что поверхность графена нагревается однородно за счет его высокой теплопроводности в  $5000 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  [1]. Однако в работе [2] было показано, что в поликристаллическом покрытии CVD графена в результате джоулевого нагрева температура распределяется неравномерно — периферия кристалла графена имеет более высокую температуру по сравнению с его центром и подобный перепад температур может достигать десятков градусов.

Целью данной работы является изучение влияния неравномерного распределения температуры на создаваемое звуковое давление у поверхности графена.

Процесс изготовления полимер-графеновых композитов подробно описан в работе [3]. За основу теоретической модели термоакустики взята модель Дашевского [4]. Апробация модели представлена на рисунке 1.

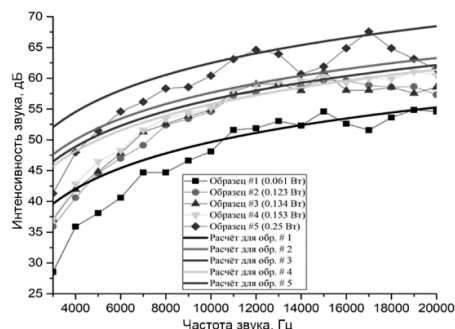


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные значения интенсивности звука для 5 образцов с различной вкладываемой мощностью.

Экспериментальные данные были получены с использованием набора термоакустических преобразователей. Образцы имели одинаковую площадь поверхности ( $1.5 \text{ см} \times 1.5 \text{ см}$ ), при этом имелся разброс в электрическом сопротивлении ( $1 - 4 \text{ кОм}$ ). Модель показала хорошее согласование с опытными данными в диапазоне частот от  $7 \text{ кГц}$  до  $20 \text{ кГц}$ . В качестве опорной точки была взята частота в  $12 \text{ кГц}$ , при которой был проведен расчет звукового давления вблизи поверхности поликристаллического покрытия графена. При моделировании учитывалось неравномерность выделения тепла в пределах отдельно взятых кристаллов графена. Полученные расчетные данные представлены на рисунке 2. Вследствие неоднородности электрического сопротивления графенового слоя, джоулево тепло выделяется неравномерно: основная часть выделяется на границах кристаллов графена, в то время как наименьшее количество — в центре.

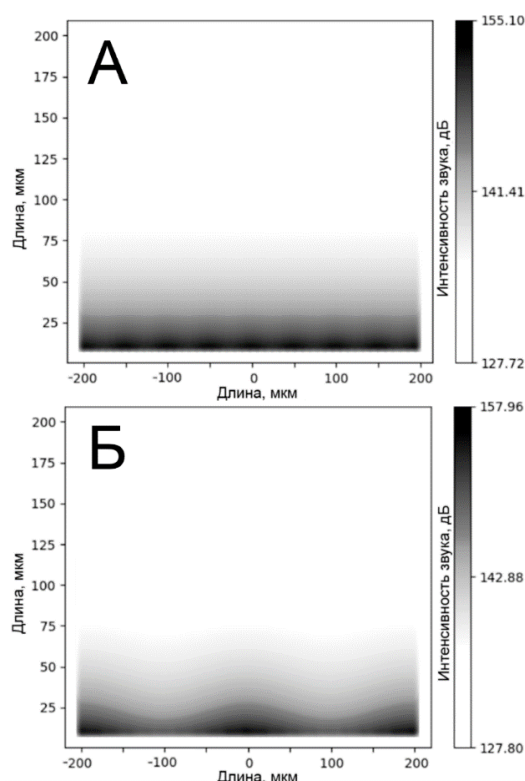


Рис. 2. Распределение интенсивности звука у поверхности графена в зависимости от размера кристаллитов: А) — протяжённость кристалла  $50 \text{ мкм}$ , Б) — протяжённость кристалла —  $200 \text{ мкм}$ .

Так как давление, создаваемое термоакустическим излучением, прямо пропорционально выделяемой мощности, акустическое поле вблизи поверхности тоже является неоднородным. Однако такая неоднородность заметна лишь на масштабах порядка размера кристаллов графена и на больших расстояниях разница в интенсивности звукового излучения между покрытиями с различными размерами кристаллитов пренебрежимо мала.

Таким образом, при обычных условиях генерации термоакустического излучения, неравномерность прогрева и размер кристаллитов CVD графена не имеет решающего значения при генерации звука, однако размер кристаллитов графена определяет электрическую проводимость графена, что в свою очередь влияет на вольтамперные характеристики термоакустического излучателя.

## Список литературы

1. A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. N. Lau, Nano Lett. 8, 902 (2008).
2. D. V. Smovzh, D. V. Smovzh, I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, E. V. Boyko, P. E. Matochkin, and A. A. Pilnik, Nanotechnology 31, 335704 (2020).
3. I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, and D. V. Smovzh, Mater. Chem. Phys. 219, 67 (2018).
4. M. Daschewski, R. Boehm, J. Prager, M. Kreutzbruck, and A. Harter, J. Appl. Phys. 114, 114903 (2013).

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО СМЕСИТЕЛЯ МАРАНГОНИ В Т-ОБРАЗНОМ ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Мошева Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Академика Королева 1, Пермь, 614013, Россия

Микрожидкостные устройства широко используются в микробиологии, тонком органическом синтезе, фармацевтике, биомедицине и т. д. Во многих случаях требуется быстрое перемешивание протекающих растворов, более эффективное, чем диффузионное смешение [1]. Микросмесители, работающие на механизмах естественной конвекции, позволяют использовать энергию своей системы. Такие устройства можно условно определить как гравитационно-зависимые, которые используют для перемешивания силу тяжести или другие инерционные поля [2]. Как альтернатива, можно развивать класс устройств, работающих независимо от внешних полей, например, на основе вариаций поверхностного натяжения [3].

В данной работе впервые представлена конструкция смесителя, который работает на основе концентрационно-капиллярного эффекта Марангони и не зависит от поля тяжести. Для этого в Т-микроканале на некотором расстоянии от точки входа был имплантирован воздушный пузырек, который частично перекрывал просвет выходного канала. Если поток раствора несет поверхностно-активную примесь, то вблизи пузыря может возбуждаться импульсная конвекция Марангони. Нелинейные режимы работы такого микросмесителя в канале были исследованы экспериментально и численно.

Эксперименты проводились в горизонтальном микроканале прямоугольного сечения длиной 7.0 см, высотой 0.2 см и толщиной 0.02 см (рис. 1(а)). Оба входных плеча схемы подсоединялись к двухканальному инфузионному насосу (SpLab02), с помощью которого осуществлялась подача исследуемых жидкостей с одинаковым расходом.

В выходном канале на некотором расстоянии от входа был смонтирован дополнительный подводный канал, через который осуществлялась независимая подача воздуха. Боковые стенки микроканала были изготовлены из стекла, что позволяло использовать интерферометрию Физо для визуализации (рис. 1а). С помощью насоса канал заполнялся устойчиво стратифицированной системой смешивающихся жидкостей. Через нижний вход подавалась более плотная вода, через верхний – менее плотный водный раствор изопропилового спирта известной массовой концентрации  $C$ , %. Затем формировалась межфазная граница жидкость-газ. Далее включалась прокачка жидкостей с заданным расходом. Исследуемый диапазон расходов составлял 0.001–0.02 мл/мин. Значения концентрации спирта изменялись в диапазоне 5–15. Во всех экспериментах межфазная поверхность не деформировалась. В экспериментах варьировалась также позиция пузыря и его размер. Рисунок 1 показывает результаты для трех разных размеров воздушного пузыря  $s = h/d$ .

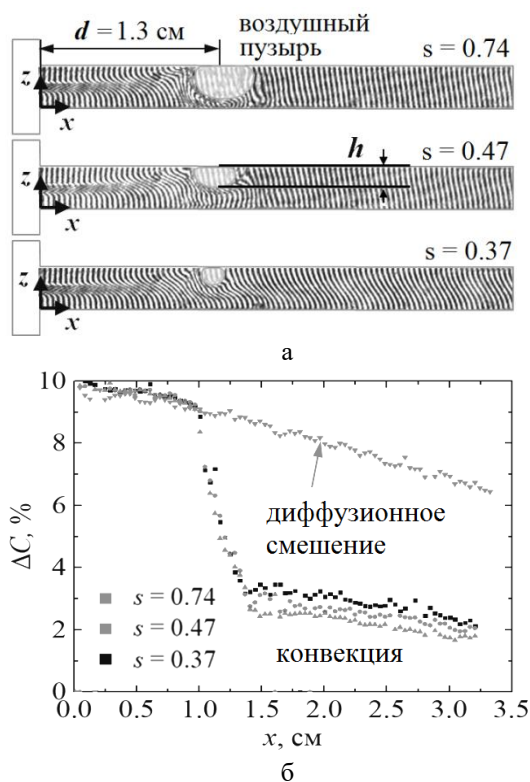


Рис. 1. (а) Интерферограммы Физо трёх Т-образных микроканалов проточного типа со встроенным смесителем Марангони в виде воздушного пузырька разного размера; (б) Показатель эффективности смешения, выраженный через вертикальную разность концентраций спирта  $\Delta C$ , как функция расстояния от точки входа в микроканал.

Рисунок 1(б) демонстрирует эффективность работы микросмесителя по сравнению с диффузией. Перемешивание усиливается благодаря возникновению концентрационно-капиллярной конвекции. В работе также представлены результаты прямого численного моделирования нелинейных режимов работы предложенного устройства, приведено сравнение с экспериментальными данными.

### Список литературы

1. Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Мошева Е.А. и др. Хемоконвективное перемешивание реагирующих растворов в Y-образном проточном микроканале // *ТИА*. 2022. Т.29, №6. С.1005–1012.
2. Bratsun D.A., Siraev R.R., Pismen L.M. et al. Mixing enhancement by gravity-dependent convection in a Y-shaped continuous-flow microreactor // *Microgravity Sci. Technol.* 2022. V.34. 90.
3. Bratsun D., Kostarev K., Mizev A. et al. Adaptive Micromixer Based on the Solutocapillary Marangoni Effect in a Continuous-Flow Microreactor // *Micromachines*. 2018. V.9, No.11. 600.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).



Как известно, центрифугирование оказывает на жидкость пространственно-неоднородное воздействие за счет сил инерции – центробежной и кориолисовой [1]. Интерес к атмосферным явлениям стимулировал рассмотрение задач, в которых ось вращения и градиент плотности либо коллинеарны (приполярная область), либо ортогональны, но сила инерции действует поперек слоя (экваториальная область). В последние годы, однако, появился еще один класс приложений, связанных с разработкой микрореакторов с центрифугированием. Переменное инерционное поле является удобным механизмом управления тепло- и массопереносом в жидкой среде. Часто такие устройства имеют геометрию Хеле-Шоу [2,3], чтобы регистрировать тепловые или концентрационные поля оптическими методами [4]. В стандартном уравнении движения в пределе 2D течений эффект Кориолиса автоматически обращается в ноль, что не согласуется с экспериментальными наблюдениями [3]. Таким образом, насущной задачей теории является корректный вывод уравнений тепло и массопереноса при центрифугировании ячейки Хеле-Шоу.

Рассмотрим задачу о конвекции в полости, имеющей форму диска радиуса  $R$ , толщины  $h$  и совершающей равномерное вращение с угловой скоростью  $\Omega = \Omega \gamma$ , где  $\gamma$  — единичный вектор в направлении оси  $z$  (рис. 1). Если в кювете протекают процессы химической (реакции) или биологической (например, фотосинтез) природы, то в ней возникают вариации плотности из-за действия температурных или концентрационных полей. Если полость сильно сжата вдоль оси  $z$ , то градиент плотности будет направлен вдоль плоскости диска, а вариациями поперек можно пренебречь. Мы показываем, что корректный асимптотический переход в рамках одновременного применения приближений Буссинеска и Хеле-Шоу приводит к следующему модельному уравнению движения для завихренности  $\Phi(r, \varphi)$  и функции тока  $\Psi(r, \varphi)$ :

$$\frac{1}{Sc} \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{6}{5r} \frac{\partial(\Phi, \Psi)}{\partial(r, \varphi)} \right] = \nabla^2 \Phi - 12\Phi + \frac{R_c}{r} \frac{\partial(\Psi, C)}{\partial(r, \varphi)} - R_\omega \frac{\partial C}{\partial \varphi} \quad (1)$$

где  $C$  — тепловое или концентрационное поле,  $Sc$  — число Шмидта. Два числа Рэлея в (1) определены как

$$R_c = 2\beta C_0 \Omega h^2 / \nu, \quad R_\omega = \beta C_0 \Omega^2 h^4 / \nu D_C,$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $D_C$  — коэффициент диффузии,  $C_0$  — характерное значение поля. Интересной особенностью (1) является возникновение слагаемого плавучести, генерируемой силой Кориолиса. Эффект является нелинейным и определяется градиентами плотности среды.

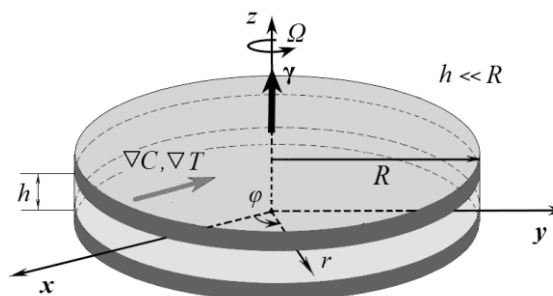


Рис. 1. Био- или хемореактор в виде ячейки Хеле-Шоу с неоднородным распределением плотности вдоль слоя, находящейся под действие равномерного центрифугирования.

Рассмотрена задача об устойчивости среды при внутреннем производстве переносимой компоненты, которой может быть как концентрация (химическая реакция), так и температура (тепловыделение). В ходе исследования получено основное стационарное состояние системы, отвечающее механическому равновесию жидкости. Линеаризация определяющих уравнений вблизи основного состояния приводит к задаче устойчивости, позволяющей определить универсальные свойства инкрементов возмущений. Так, в случае  $R\Omega \neq 0$  в спектре присутствуют колебательные возмущения, что отвечает нестационарному характеру течения выше порога устойчивости. Ветвление решений вблизи первой бифуркации исследовано методом многих временных масштабов. Решение амплитудных уравнений вблизи критического значения  $R\Omega$  демонстрирует переход системы к предельному циклу. Данные результаты находятся в хорошем согласии с численным расчетом полной нелинейной задачи. В частности, при определенных значениях управляющих параметров наблюдается периодическая смена режимов конвекции. Наряду с этим при умеренных значениях  $R\Omega$  влияние силы Кориолиса проявляется в азимутальном сносе течения. Увеличение данного параметра приводит к затуханию возмущений и стабилизации системы.

#### Список литературы

1. Rouhi A., Lohse D., Marusic I., Sun C., Chung D. Coriolis effect on centrifugal buoyancy-driven convection in a thin cylindrical shell // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 910. A32.
2. Schwartz L.W. Instability and fingering in a rotating Hele-Shaw cell or porous medium // Phys. Fluids. 1989. Vol. 1. P. 167–169.
3. Utochkin V.Y., Siraev R.R., Bratsun D.A. Pattern Formation in Miscible Rotating Hele-Shaw Flows Induced by a Neutralization Reaction // Microgravity Sci. Technol. 2021. Vol. 33. Art. 67.
4. Mizev A., Mosheva E., Bratsun D. Extended classification of the buoyancy-driven flows induced by a neutralization reaction in miscible fluids. Part 1. Experimental study // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 916. A22.

Работа поддержана Минобрнауки России  
(проект № FSNM-2023-0003).

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПОТОКИ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

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

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

В последние годы микрогидродинамика стала одной из важнейших областей науки в связи с бурным развитием микроканальных устройств и технологий. Экстремально высокое отношение площади поверхности к объему позволяет использовать микроканальные течения для снятия высоких тепловых потоков, проведения высокоэффективных реакций, а также создания лабораторий на чипе и органов на чипе. Течения жидкость-жидкость применяются в междисциплинарных областях на стыке химии, биологии, медицины, материаловедения и других дисциплин.

Большинство предлагаемых подходов, связанных с применением потоков несмешивающихся жидкостей, основываются на использовании так называемых сегментированных режимов течения: капельного, снарядного и подобных. Для стабилизации межфазной границы, на практике, часто используют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые расширяют диапазоны скоростей, при которых возможна сегментация потока [1]. Однако изменение граничных условий на межфазной поверхности существенно зависит от концентрации и типа ПАВ, что вызывает большое многообразие явлений, которые тяжело поддаются численному моделированию. Таким образом, важной проблемой является получение экспериментальных данных и эмпирических зависимостей в микроканальных потоках несмешивающихся жидкостей при наличии ПАВ.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния геометрии микроканала и концентрации ПАВ на течение несмешивающихся жидкостей.

Для измерений и визуализации использовался инвертированный эпифлуоресцентный микроскоп Axio Observer (Carl Zeiss) с набором объективов с увеличением от X5 до X63. Двухфазный поток жидкость-жидкость создавался с помощью двухшприцевого насоса KDS Gemini 88. В исследованиях использовались микроканалы прямоугольного сечения с Т-образным входом, изготовленные из ПММА (полиметилметакрилат) микрофрезерованием с последующей склейкой пластин. Характерные размеры микроканалов варьировались от 100 мкм до 600 мкм. В качестве рабочих жидкостей использовались силиконовые масла различной вязкости и дистиллированная вода с добавлением ПАВ TWEEN 20. Массовая концентрация ПАВ составляла 0,005%, 0,01%, 0,1% и 1%. Поток освещался галогенной лампой и регистрировался на высокоскоростную цифровую камеру PCO 1200hs с частотой съемки до 500 Гц. Анализ изображений позволил измерить скорость и длину снарядов дисперсной фазы, дисперсный состав получаемых эмульсий. Поверхностное натяжение воды с воздухом и межфазное

натяжение в системе двух жидкостей измерялось на установке KRUSS DSA-100 методом висючей капли.

По результатам визуализации было выявлено четыре различных режима течения, которые могут реализовываться в зависимости от управляющих параметров (расходов рабочих жидкостей): стабильный сегментированный или снарядный режим, снарядный режим с отрывом микрокапель, переходной и кольцевой режимы. Показано, что наличие ПАВ делает снарядный режим менее стабильным, как с точки зрения увеличения области снарядного режима с отрывом микрокапель, так и за счёт смещения границы переходного режима.

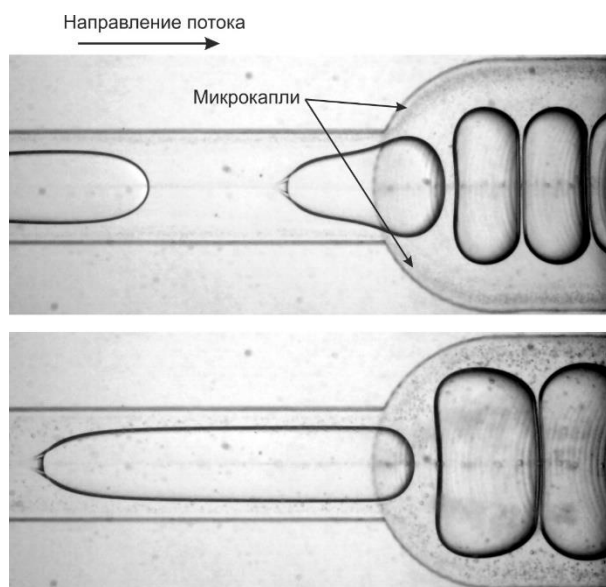


Рис. 1. Фокусировка микрокапель различного размера вблизи боковых стенок за счёт расширения канала.

Измерены длины и скорости снарядов. Показано, что наличие ПАВ приводит к увеличению средней длины, при этом не влияет на скорость снарядов в канале. Однако при добавлении ПАВ возникают существенные деформации межфазной границы. Был обнаружен эффект фокусировки потока (рис. 1), который может быть использован для разделения микрокапель и больших снарядов дисперсной фазы.

### Список литературы

1. Baret J.C., Kleinschmidt F., El Harrak A., and Griffiths A.D., Kinetic aspects of emulsion stabilization by surfactants: A microfluidic analysis // *Langmuir*. 2009. V. 25, N 11. P. 6088–6093.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-79-01332).

## ДИНАМИКА СТОЛКНОВЕНИЙ КЛАСТЕРОВ АРГОНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Коробейщиков Н.Г., Стищенко П.В., Николаев И.В.

Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

Пучки кластерных ионов, сформированные из сверхзвуковых газовых струй (в англоязычной литературе *gas cluster ion beam*, GCIB), обладают рядом принципиальных отличий от традиционных мономерных ионных пучков. Во-первых, это коллективность процессов взаимодействия, протекающих при столкновении кластера с твердой поверхностью. Во-вторых, это возможность формировать интенсивный направленный поток с малой кинетической энергией, приходящейся на один атом в кластере [1]. Среди реализованных направлений практического использования газоструйных ионно-кластерных пучков можно отметить прецизионную полировку поверхности различных материалов при нормальном падении на мишень, малоинвазивное распыление для послойного анализа и самоорганизующееся наноструктурирование – при наклонных углах падения [2].

Численное МД-моделирование является мощным инструментом исследования динамики столкновений газовых кластеров с поверхностью материалов. Из-за очень больших вычислительных затрат, расчеты как правило проводят для столкновений отдельных кластеров с поверхностью [3-5].

В данной работе приведены результаты МД-моделирования столкновений кластеров аргона со средним размером  $N=923$  атома/кластер и кинетической энергией  $E=10$  кэВ с поверхностью монокристаллических Si и Ge с ориентацией [100] при различных углах падения на мишень (от  $0^\circ$  до  $75^\circ$  от нормали). При моделировании использовался программный пакет LAMMPS. Как известно, Si и Ge сегодня являются самыми популярными полупроводниковыми материалами, они обладают одинаковым строением кристаллической решетки, но сильно различающимися атомными массами (атом Ge в 2,5 раза тяжелее атома Si).

Исследована динамика столкновения кластеров аргона с поверхностью Si и Ge. Основной этап столкновения заканчивается в течение 1 пикосек. Определены коэффициенты распыления  $Y$ . Показано, что в одинаковых условиях коэффициенты распыления поверхности Ge в несколько раз превышают коэффициенты распыления Si. Этот результат хорошо согласуется с литературными данными по распылению данных материалов низкоэнергетичным атомарным пучком аргона. Исследованы закономерности энергообмена, определяющие перераспределение исходной кинетической энергии кластера между мишенью, кинетической энергией распыленных атомов мишени и рассеянных атомов кластера.

Определены объем и глубина ударного кратера, объем и глубина аморфизованного слоя, формируемых на поверхности Si и Ge при различных углах падения кластера. Обнаружено, что после столкновения кластера при одинаковых условиях на поверхности Ge формируется ударный кратер большего объема и глубины (см. рис. 1). Объем и глубина аморфизованного

слоя на Ge также значительно больше, чем на Si. Указанные различия вероятно объясняются различием механических свойств материалов, приводящих к тому, что у Si переданная мишени кинетическая энергия кластеров более эффективно рассеивается в объеме мишени, в то время как в Ge данная энергия затрачивается преимущественно на перемещение приповерхностных атомов.

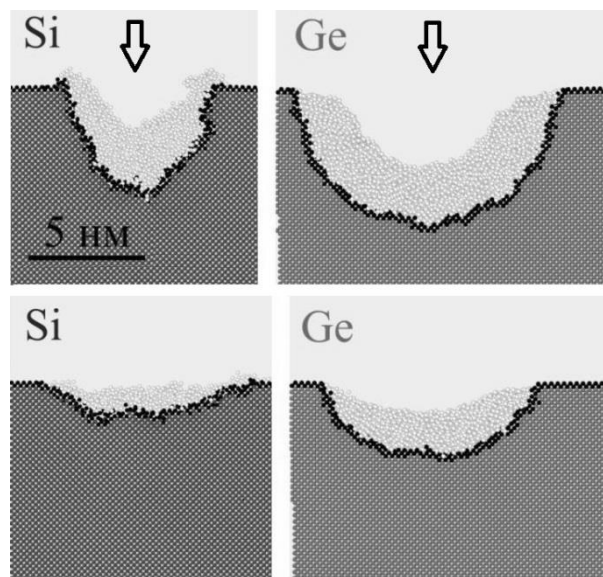


Рис. 1. Профили ударных кратеров на поверхности Si и Ge после удара кластера  $Ar_{1000}$  с кинетической энергией 10 кэВ при нормальном падении (вверху) и падении под углом  $60^\circ$  (внизу).

### Список литературы

1. Yamada I. *Materials Processing by Cluster Ion beams: History, Technology and Applications*. London: CRS Press, 2015. 260 p.
2. Иешкин А.Е., Толстогузов А.Б., Коробейщиков Н.Г., Пеленович В.О., Черныш В.С. Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // УФН. 2022. Т.192. С. 563-582.
3. Samela J., Nordlund K. Classical molecular dynamics simulations of hypervelocity nanoparticle impacts on amorphous silica // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 81. 054108.
4. Sirotkin V. Molecular dynamic simulation of rutile surface bombardment by argon cluster ions // *Vacuum*. 2021. V. 189. 110255.
5. Nikolaev I.V., Stishenko P.V., Yakovlev V.V., Korobeishchikov N.G. Effect of gas cluster species on crater formation for fused silica // *J. Non-Cryst. Solids*. 2023. Vol. 619. 122590.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-79-10061).

## ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ Ag И SDS НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

**Мелешкин А.В., Марасанов Н.В., Князьков В.А.**  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Газогидраты — это твердые кристаллические соединения, состоящие из молекул газа, заключенных в полость, образованную молекулами воды, связанными водородными связями. Процесс гидратообразования происходит при определенных термодинамических условиях, необходимы низкая температура и высокое давление в системе. Гидраты могут образовывать различные структуры в зависимости от размера и химических свойств молекул газа. Маленькие молекулы газа, такие как  $\text{CO}_2$  или  $\text{CH}_4$ , образуют структуру I (s1), крупные молекулы, такие как  $\text{C}_3\text{H}_8$ , могут образовывать структуру II (s2). Смесь больших и малых молекул газа образует структуру H(sH).

Газогидраты обладают множеством полезных свойств: способны концентрировать большие объемы газа (до 170 объемов в одном объеме газогидрата); каждый конкретный газ имеет оригинальные условия термобарической устойчивости; они могут существовать при положительных температурах; разлагаются на воду и газ при незначительном повышении температуры и сбросе давления. Все это уже довольно давно привлекает специалистов к изучению газовых гидратов с целью использования их в промышленности. Уже есть пилотные проекты по транспортировке природного газа в таблетках покрытого льдом газогидрата. В то же время они могут быть полезны для задач опреснения и очистки воды, хранения газа, холодильного хранения и т. д. Технологии, основанные на процессе гидратообразования, могут быть полезны и для решения экологических аспектов, связанных с антропогенными выбросами углекислого газа в атмосферу. Дымовой газ состоит из 15-20%  $\text{CO}_2$ , 5%  $\text{O}_2$ , остальное — азот, выделяющийся в процессе полного сгорания. Улавливание перед сжиганием относится к улавливанию  $\text{CO}_2$  из синтез-газа, который представляет собой частично сгоревшее топливо, содержащее примерно 40%  $\text{CO}_2$  и 60%  $\text{H}_2$ . Из-за высокого содержания углекислого газа в синтез-газе этот метод может быть более эффективным, однако его можно использовать только на парогазовой электростанции с комплексной газификацией. Было разработано множество процессов для удаления или выделения конкретного газообразного компонента из потока многокомпонентного газа. К таким процессам относятся абсорбция, адсорбция, мембранное разделение, но все эти процессы энергоемки. Поэтому сохраняется интерес к разработке менее энергоемких процессов. Одним из новых методов отделения  $\text{CO}_2$  от дымовых газов или синтез-газа (смесей  $\text{CO}_2\text{-H}_2$ ) является образование газовых гидратов.

Хотя гидратообразование обладает многими полезными свойствами, технологии промышленного применения этого процесса пока не существует из-за его сложности. В настоящее время проводятся исследования физико-химических свойств и термодинамических условий образования гидратов с добавлением

различных промоторов. Кроме того, специалисты изучают синтез газовых гидратов в различных условиях и их диссоциацию при горении, а также оценивают тепловые и конвективные процессы.

В представляемом докладе определено влияние концентраций SDS и Ag на процесс образования газового гидрата. Массовая концентрация наночастиц Ag была 0, 0,0005% и 0,001%. Несмотря на небольшую концентрацию нанопорошка серебра видно положительное влияние добавки на конверсию воды в гидрат углекислого газа для всех исследуемых случаев несмотря на то, что в опубликованных статьях говорится об отсутствии влияния нанопорошка большей концентрации на процесс гидратообразования. Требуются дополнительные экспериментальные исследования. Наилучший результат был достигнут при концентрации Ag 0,0005% и SDS 0,1%, при котором конверсия коллоидного раствора в воду составила 36,02%.

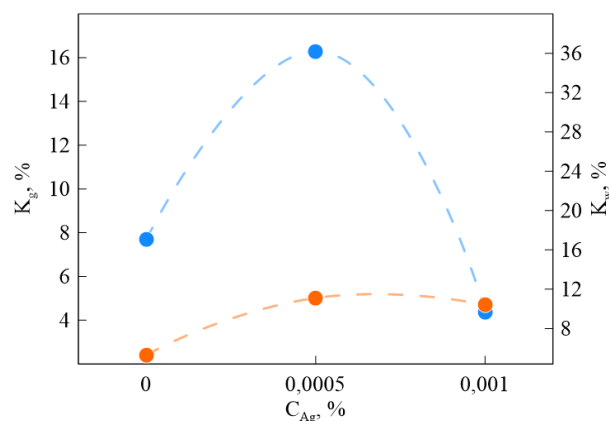


Рис. 1. Конверсия воды и газа относительно начального количества газа в гидратное состояние при различных концентрациях Ag (оранжевые точки 0% SDS, синие точки 0,3% SDS).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00428) <https://rscf.ru/project/22-19-00428/>.*

**ИСПАРЕНИЕ МАЛЫХ ОБЪЕМОВ ПОЛЯРНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА LIS ПОВЕРХНОСТЯХ****Феоктистов Д.В., Лага Е.Ю., Лавриненко С.В., Клепиков Д.М.**Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634021, Россия

LIS (liquid-infused surfaces) – поверхности с развитой текстурой приповерхностного слоя, покрытого вязкой жидкостью толщиной, достаточной для формирования гладкой поверхности. Впервые результаты исследований по поверхностным свойствам LIS были опубликованы [1] в 2011 году. По масштабу и конфигурации текстуры приповерхностного слоя LIS условно можно разделить на три класса 1-мерные, 2-мерные и 3-мерные. Значение толщины слоя вязкой жидкости на 1-мерных и 2-мерных LIS поверхностях, как правило, сопоставимо с размером шероховатости, образованной выступами и впадинами. В 1-мерных LIS текстура и толщина слоя вязкой жидкости не превышает десятка нанометров. В 2-мерных LIS текстура приповерхностного слоя развитая, многомодальная, характерный размер микроуровня. Трехмерные LIS изготавливаются из материалов, характеризующихся пористостью. Соответственно, приповерхностный слой 3-мерных LIS также характеризуется пористостью. На 1-мерных LIS истощение лубриканта, следовательно, деградация приповерхностных свойств, в разы превосходит аналогичную характеристику на 2-х и 3-мерных LIS. В отличие от 3-мерных LIS в качестве основы для изготовления 2-мерных LIS могут быть использованы металлы. Суть превосходства LIS по сравнению с референсными образцами, непритантными жидкостями, обусловлена преимущественно их гидрофобными / супергидрофобными свойствами. Комбинация объемных свойств металлов и уникальных приповерхностных свойств 2-мерных LIS условно обеспечивает широкий потенциал возможного применения этого класса поверхностей при решении проблем, связанных с обледенением, загрязнением, бактериальной стойкостью и др. приложениями в которых используются поверхности с гидрофобными/супергидрофобными свойствами. Работ, направленных на использование LIS для решения актуальных проблем в области теплофизики и теплотехники при реализации процессов фазовых превращений теплоносителей, относительно мало по сравнению с работами, направленными на решение проблем обледенения, коррозии, загрязнения, биообрастания, бактериальной стойкости и др. Отсутствуют широко известные результаты исследований процессов испарения капель теплоносителей на LIS. При проведении таких исследований в качестве референсных образцов помимо поверхностей с текстурой, сформированной традиционными, широко применяемыми на практике методами обработки абразивными материалами (полировкой) необходимо использовать поверхности с текстурой и свойствами смачивания до нанесения лубриканта. При разработке LIS, как правило, в качестве лубриканта выбираются вещества, отталкивающие воду, в большинстве случаев масла или жидкости, в поверхностном натяжении которых преобладает дисперсионная составляющая над полярной, т.е. выбираются дисперсионные жидкости. Лубрикант может

быть нанесен на основу 2-мерных LIS, характеризующихся до пропитки как супергидрофильными, так и супергидрофобными свойствами. Текстура (шероховатость) и свойства смачиваемости влияют на характеристики испарения капель, взаимодействующих с поверхностью. Влияние этих характеристик поверхностей на процессы испарения капель неоднозначно и сильно зависит от условий нагрева поверхностей, их температуры и температуры кипения теплоносителя.

Если же в качестве теплоносителя использовать воду, то при испарении её капель на LIS в условиях их нагрева при температурах выше температуры насыщения воды могут реализовываться процессы, не характерные кривой испарения. Мы имеем ввиду процессы вторичного распыления капель (secondary atomization), известные также под термином диспергирование. Процесс диспергирования капель жидкостей хорошо изучен в области исследования горения и зажигания многокомпонентных капель топлив.

В работе будут представлены результаты экспериментальных исследований процесса испарения и диспергирования капель воды, помещенных на поверхности LIS, а также на поверхностях, прошедших процедуры полировки абразивными материалами и модификации лазерным излучением. В работе будет представлен механизм процесса микровзрывного диспергирования капель полярных теплоносителей при их дозировании на LIS поверхность, пропитанную дисперсионным теплоносителем. Также будут апробированы экспериментальные данные по структуре и динамике микровзрывного диспергирования капель теплоносителей (времени задержки до реализации микровзрывного диспергирования, площади орошения поверхности за счет микровзрывного диспергирования, характерные размеры и число вторичных капель, формирующихся за счет микровзрывного диспергирования), характеристикам эволюции первичных и вторичных капель, по предельным температурам и удельным тепловым потокам, отведенным от поверхностей.

**Список литературы**

1. T. S. Wong, S. H. Kang, S. K. Tang, E. J. Smythe, B. D. Hatton, A. Grinthal and J. Aizenberg, Nature, 2011, 477, 443–447.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00417)  
<https://rscf.ru/project/23-29-00417/>*

## ПОТОКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ ОТКРЫТОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Гордеева А.И., Нурмухаметов Д.И., Чеснокова М.А., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,

ул. Букирева 15, Пермь, 614068, Россия

Предметом исследования является воздушный пузырь газа, который выступает в роли рабочего тела чувствительной части открытого волоконно-оптического датчика интерферометра Фабри-Перо. Пузырь формируется внутри каплеобразной полости, расположенной на торце волокна SMF, в результате погружения её в жидкие среды. Границы раздела газ-стекло и газ-жидкость действуют как два зеркала интерферометра Фабри-Перо. В работах [1, 2] подробно описана методика создания микрополостей, которые образуются в результате сваривания волокна с периодически разрушенной сердцевинной с одноименным волокном. В работе [2] показано, что резонатор может использоваться в качестве единого базового элемента для различных волоконно-оптических датчиков, в том числе в датчиках детектирования акустических сигналов, распространяющихся в жидких средах. Излучение, передаваемое по волокну, позволяет регистрировать изменение длины интерферометра с погрешностью, не превышающей 1 нм и с высокой точностью отслеживать сигнал в режиме реального времени. Это позволяет регистрировать волны давления, распространяющиеся в среде, а также измерять температуру, вязкость и другие физико-химические свойства исследуемых жидкостей.

В настоящее время микрорезонаторы широко используются в различных областях науки и техники. Исследования, проведенные с водой и водными растворами, представлены во многих работах. Утверждается, что датчики также могут быть использованы для исследования органических сред, нефтепродуктов и т.д. Однако в литературе не удалось найти прямых экспериментальных исследований. Наличие подвижной границы раздела в датчике с открытым резонатором повышает его чувствительность, одновременно увеличивая вклад капиллярных сил, которые могут оказывать существенное влияние на системы микромасштаба. Под действием внешних электромагнитных и температурных полей, а также под влиянием испарения, конденсации, диффузии и различного коэффициента смачивания стекла исследуемыми жидкостями, размер и положение пузырька воздуха внутри полости могут меняться со временем. Эти эффекты влияют на результаты измерения и должны учитываться при проведении экспериментов и проектировании датчиков. В работе экспериментально исследованы гидродинамические процессы, протекающие в волоконно-оптическом датчике в процессе детектирования им акустических волн, распространяющихся в воде и изопропанолу. Температура жидкостей в эксперименте варьировалась от  $10 \pm 0,5^\circ\text{C}$  до  $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Эксперименты проводились в ячейке Хеле-Шоу под контролем видеокамеры. В работе использовался источник лазерного излучения с широким спектром:  $\lambda=1525-1570$  при  $\Delta=0,16$  нм, мощностью до 7 дБм, сигнал от которого, проходя через исследуемое волокно,

детектировался с помощью циркулятора оптическим анализатором спектра EXFO. Второй узкополосный лазерный диод  $\lambda=1550$  нм мощностью до 10 дБм применялся в экспериментах по детектированию акустического сигнала. Третий диод с  $\lambda=980$  нм мощностью до 23 дБм использовался для определения влияния лазерного излучения на размер и форму газового включения. Эксперименты показали, что изопропанол, обладающий меньшим поверхностным натяжением и вязкостью по сравнению с водой, наиболее интенсивно затекает в полость при погружении торца волокна в жидкость. Заполнение полости уменьшает размер газового включения и, как следствие, ведет к ухудшению качества интерферометра Фабри-Перо, а значит может привести к ошибочным измерениям характеристик исследуемой среды. Ещё более интенсивно затекание происходит при работе с охлажденной жидкостью и с ростом мощности лазерного излучения, пропускаемого через волокно. Эксперименты показали, что увеличение мощности излучения приводит к нагреву газа, в результате чего пузырь увеличивается и покидает внутренний объем полости. Для определения температурного поля внутри полости и в окружающей жидкости в работе были проведены эксперименты с использованием интерферометра Физо. Показано, что лазерный луч с длиной волны  $\lambda=1550$  нм и мощностью 10 дБм способен нагревать область вблизи резонатора на расстояние порядка 1 мм до температуры  $\Delta T \sim 5^\circ\text{C}$ . Обнаружено, что через 5-10 минут система приходит к тепловому равновесию, и объем пузырька перестает меняться со временем. При этом конечный объем пузырька превышает расчетный объем более чем на порядок.

Использование трассеров в эксперименте показало формирование термокапиллярной конвекции Марангони, интенсивно перемешивающей жидкость вблизи межфазной границы. Наличие течения вблизи пузырька позволяет ускорить процесс адсорбции как молекул поверхностно активных, так и твердых инертных частиц на границе раздела, которая в данном случае выполняет роль коллектора. Этот эффект часто используется в микрофлюидике для тонкой очистки системы, для перемешивания и перекачивания жидкости в каналах.

### Список литературы

1. Д.И. Нурмухаметов, и др. Формирование открытой полости на торце оптического волокна, как элемент чувствительной части универсального датчика Фабри-Перо // Фотон-экспресс. 2023. Т. 5, № 189. С. 15–17.
2. O. Morozov, et. al. Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry-Perot Interferometer with an Open Cavity // Photonics. 2024. V. 11, N 1. P. 22(1–16).

*Работа поддержана Минобр РФ  
(грант № FSNF-2024-0001).*

## ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ, КАК МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТОННЫМ ОБМЕНОМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Гордеева А.И., Корнилицын А.Р.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614068, Россия

На сегодняшний день широко востребовано производство волноводов, используемых при изготовлении интегрально-оптических фазовых модуляторов. Монокристаллы семейства ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) являются одними из самых распространенных материалов для создания таких структурных элементов, благодаря уникальному сочетанию акустооптических, электрооптических, нелинейно-оптических, фотоупругих и фотоэлектрических свойств [1]. Оптические волноводы являются структурой для ограниченного распространения оптической волны при выполнении условий полного внутреннего отражения на границе двух диэлектриков. Выделяют планарные и канальные волноводы. Планарные волноводы обеспечивают двухмерное ограничение оптического излучения, канальные – трехмерное, и поэтому являются наиболее востребованными при создании высокоэффективных нелинейно-оптических устройств. Обширный набор методов создания волноводов в ниобате лития позволяет контролировать параметры получаемых волноводов. Волноводы, созданные методом протонного обмена, обладают малыми потерями, высокой степенью оптической локализации и применимы для лазерного излучения с длиной волны, лежащей в полосе пропускания телекоммуникационных систем. Научная значимость и актуальность работы заключается в получении результатов, позволяющих расширить понимание механизмов, играющих большую роль в реакции протонного обмена, и предложить дополнительные возможности по её контролю и интенсификации.

В работе экспериментально изучается взаимодействие подложки, выполненной из кристалла ниобата лития, с расплавом бензойной кислоты в процессе протонного обмена, в ходе которого происходит замещение атомов лития и, как следствие, изменение показателя преломления кристалла. Обычно процесс осуществляют в муфельной печи при фиксированной температуре в течение нескольких часов. При этом в бензойной кислоте образуется тонкий ионный пограничный слой, который замедляет ход протонирования. Предполагается, что наличие термогравитационной или термоэлектрической конвекции внутри реактора позволит создать омывающий поток, который будет препятствовать накоплению бензоата лития вблизи поверхности кристалла, а значит поможет увеличить область распространения рекомбинирующих ионов.

В работе эксперименты проводились в циркониевом реакторе при температуре  $180^\circ\text{C}$ . Для создания конвективного вихря в расплаве объем кислоты прогревался не равномерно. Нижняя чаша реактора контактировала с нагревательным элементом меньшего диаметра, который в ходе эксперимента нагревался до  $300^\circ\text{C}$ . Контроль температуры и оценка интенсивности термогравитационной конвекции в кислотной

среде осуществлялись с помощью линейки термопар, заведенных в исследуемый объем через верхнюю чашу реактора. Исследования показали, что при неоднородном нагреве в реакторе беспороговым образом возбуждается термогравитационный вихрь, интенсивность которого зависит от положения исследуемого объекта относительно нагревательного элемента. Эталонные образцы планарных волноводов были изготовлены в муфельной печи под контролем температуры. Тестовые образцы изготавливались при наличии термогравитационного течения различной интенсивности.

Исследование фазового состава протонообменных слоев проведено методом рентгеноструктурного анализа, оптические характеристики волноводов исследованы методом модовой спектроскопии. Рентгеноструктурный анализ – один из дифракционных методов исследования структуры вещества. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трёхмерной кристаллической решётке. Рентгенографические исследования образцов ниобата лития проведены на рентгеновском двухкристальном дифрактометре ДРОН-УМ1. Рентгеноструктурный анализ и модовая спектроскопия, используемые для диагностики полученных образцов показали, что в зависимости от разности температур росла глубина протонированного слоя, что указывает на прямое влияние термогравитационной конвекции на интенсивность процесса. В дальнейшем это позволит сократить время технологического цикла при производстве волноводов.

### Список литературы

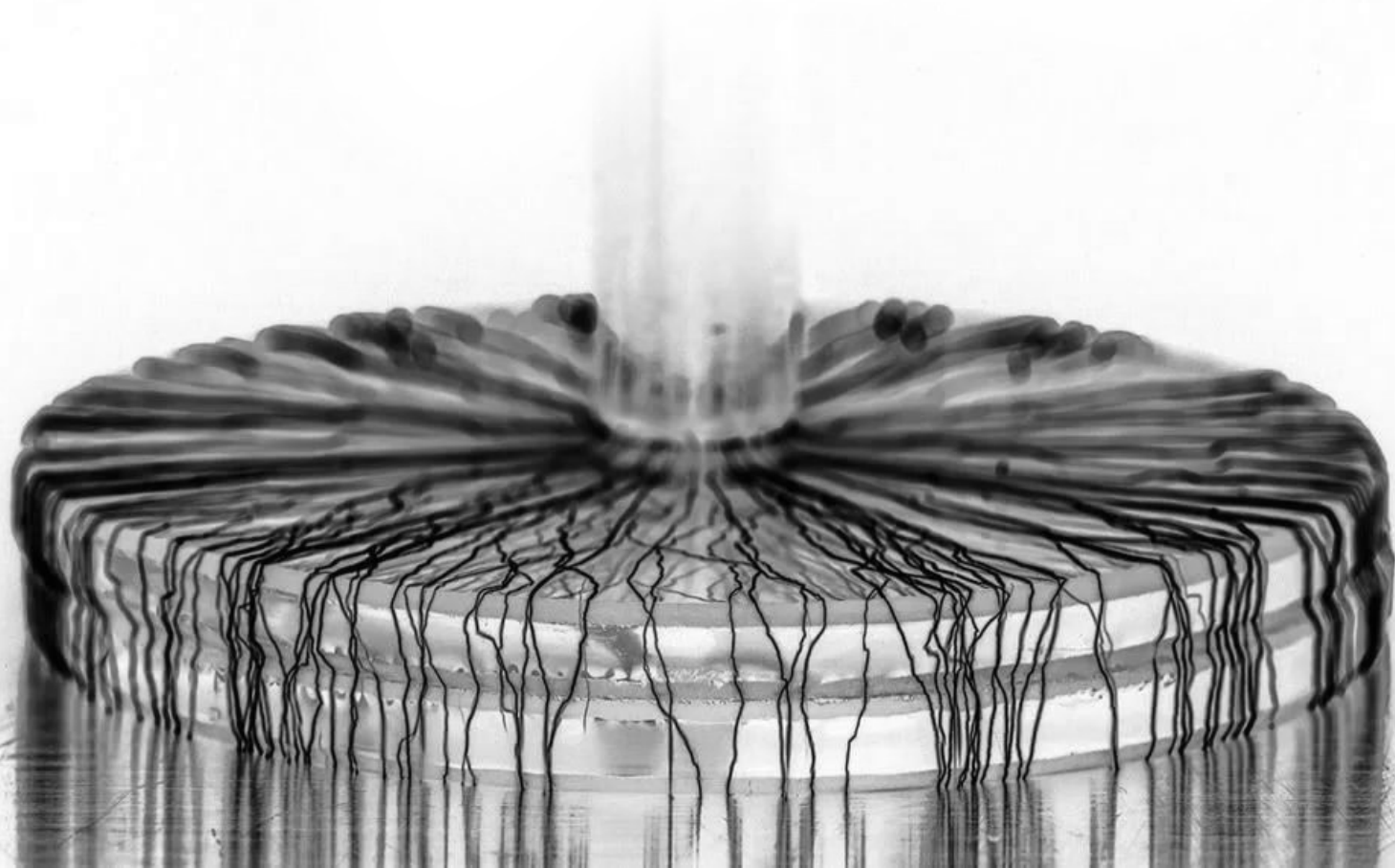
1. Lithium Niobate: Defects, Photorefraction and Ferroelectric Switching / Volk, T., Wöhlecke, M. Springer Series in Materials Science, 2008. 247 P.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 24-29-20277).*





СЕКЦИЯ 9  
Электрофизические явления  
в жидких и газообразных средах





## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКОАЛЕСЦЕНЦИИ НЕЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ СО СЛОЕМ ВОДЫ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Елагин И.А., Ягодин Г.С., Чирков В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

При добыче сырой нефти из нефтяных скважин используют методы, в результате которых образуется мелкодисперсная водяная эмульсия обратного типа [1], которую необходимо разделить на две фазы для дальнейшей обработки нефти. Так как плотности воды и нефти сравнительно близки и ввиду высокой вязкости нефти, отделение капель воды микронного размера под действием сил тяжести занимает продолжительное время, что сказывается на итоговой стоимости очищенных нефтепродуктов.

Одним из наиболее эффективных методов очистки нефти от воды является электрокоалесценция. Этот метод основан на механизме объединения капель воды под действием сильных электрических полей, в результате чего увеличивается средний размер капель и уменьшается время их осаждения под действием силы тяжести. Большинство соответствующих устройств — электродегидраторов — выводят каплю из объема масла путем ее объединения со слоем воды. При приближении капли воды к границе раздела «масло – слой воды» может произойти как полное объединение капли со слоем (коалесценция), так и частичное (частичная коалесценция), а также режим растяжения вдоль межэлектродного промежутка.

В электродегидраторах может использоваться как постоянное, так и импульсное или переменное напряжение. В литературе принято разделять случаи применения различных форм напряжения ввиду их влияния на скорость очистки водонефтяной эмульсии, а также на вероятность появления негативных эффектов таких как: образование цепочек из капель и растяжение капли в перемычку с замыканием межэлектродного промежутка. На практике используются только синусоидальные и импульсные поля, так как считается, что они лучше предотвращают появление цепочек из капель.

На данный момент в литературе почти нет информации о том, как результаты, полученные при моделировании взаимодействия незаряженной капли со слоем в постоянном электрическом поле, соотносятся со случаем переменного поля. В частности, непонятно, есть ли принципиальные особенности и существенное влияние прикладываемой частоты на пороговые значения напряженности электрического поля, при которых происходит переход к частичной коалесценции и растяжению капли. Также непонятно, как влияет фаза напряжения в момент касания капли и слоя на исход коалесценции.

Для описания движения межфазной границы в данной работе применяется произвольный Лагранжево-Эйлеров метод (который также называется методом подвижной сетки). Преимущество этого метода по сравнению с часто используемыми методами с диффузным интерфейсом (в частности, методами фазового поля и функции уровня) состоит в том, что он из-

бавлен от эффекта ложного убегания заряда с поверхности интерфейса, приводящего к некорректным результатам (как, например, в [3]). Математическая модель основана на уравнениях Навье-Стокса (1–2) для изотермической несжимаемой жидкости и уравнении Пуассона (3):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{v} + \rho g \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = 0 \quad (3)$$

В качестве дисперсионной среды было взято оливковое масло, а в качестве дисперсионной фазы и слоя — вода. Рассматривались капли радиусом 0.5–2.5 мм. Расчеты при различных напряжениях на высоковольтном электроде показали, что результаты для переменного и постоянного поля сопоставимы, когда используется одно и то же действующее значение напряжения, то есть амплитуда переменного напряжения должна быть равна:  $A = \sqrt{2} U_{DC}$ .

В результате моделирования, порог перехода к частичной коалесценции не изменился в пределах шага по напряженности (100 В/см) в независимости от фазы включения поля. Отличия результатов для переменного и постоянного поля находятся только в области частичной коалесценции.

Было выявлено, что наибольшее влияние на объем отделяющейся капли оказывают частота и фаза касания (при частотах близких к собственной), в то время как другие параметры, как, например, степень деформации капли в момент касания, влияют слабо. Различия значений фазы касания приводит к отклонению от результатов для той же системы с постоянным полем в виде появления разброса объема отделяющихся капель. Причем этот разброс тем меньше, чем ближе мы подходим к порогу частичной коалесценции, поэтому отличий в пороговых напряженностях обнаружено не было.

При увеличении частоты поля выше собственной разброс значений отделяющегося объема уменьшался и в пределе стремился к значениям, полученным при постоянном поле. Этот эффект связан с усреднением действия кулоновской силы за время коалесценции.

### Список литературы

1. Thompson D.G., Taylor A.S., Graham D.E. Emulsification and demulsification related to crude oil production // *Colloids and Surfaces*. 1985. V. 15, P. 175–189.
2. Eow J. S., Ghadiri M., Sharif A. O. & Williams T. J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding // *Chemical Engineering Journal*. 2001. V. 84, P. 173–192.
3. Li B., Wang Z., Vivacqua V., Ghadiri M., Wang J., Zhang W., Wang D., Liu H., Sun Z., & Wang Z. Drop-interface electrocoalescence mode transition under a direct current electric field // *Chemical Engineering Science*. 2020. V. 213. 115360.

*Работа поддержана РНФ (грант № 22-79-10078).*

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА СТРИМЕРОВ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Карпов Д.И.<sup>1,2</sup>, Савенко Р.А.<sup>1,2</sup>, Ридель А.В.<sup>1</sup>, Коробейников С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Разработан параллельный алгоритм для моделирования на сетках большого размера инициирования и развития ветвящихся проводящих структур (стримеров) в жидком диэлектрике для расчета развития разряда. Алгоритм реализован в виде компьютерного кода для графических ускорителей (GPU). Рост разрядной структуры в жидкости моделировался как стохастический процесс присоединения новых проводящих участков (элементов структуры) к уже существующей проводящей структуре согласно вероятностному критерию. Выбор элементов осуществлялся с использованием флуктуационного критерия роста [1]. На каждом шаге по времени образуется, как правило, несколько новых элементов, что приводит к ветвлению структуры и продвижению ее вглубь диэлектрика главным образом в направлении наибольшей напряженности поля.

Для описания разрядной структуры на сетке вводится статус узла – число, характеризующее принадлежность узла к жидкому диэлектрику, пузырьку, электродам, проводящей структуре или поверхностям, с которых может инициироваться структура. Индекс узла, принадлежащего структуре, указывает, с каким узлом сетки данный узел связан элементом структуры. Для распараллеливания процедуры роста сетка делится на блоки размером  $4 \times 4 \times 4$  узла. Каждый блок обрабатывается независимо в отдельном потоке. Узлы блока проверяются на принадлежность к диэлектрику. Далее, для каждого узла диэлектрика в данном блоке проверяется наличие рядом узла, принадлежащего проводящей структуре. При наличии такого узла проверяется выполнение флуктуационного критерия. Для этого реализован соответствующий вероятностный алгоритм, исполняемый на GPU. При положительном исходе узел присоединяется к структуре (меняется статус узла, образуется новый проводящий элемент). Для ускорения алгоритма каждому блоку присваивался один из статусов – (1) в блоке все узлы принадлежат диэлектрику и в соседних с ним блоках нет узлов проводящей структуры, (2) все узлы блока принадлежат диэлектрику и хотя бы в одном из соседних блоков есть узлы разрядной структуры или точки инициирования, (3) в блоке есть узлы проводящей структуры или точки инициирования. Блоки первого типа исключаются из обработки при выполнении параллельного алгоритма роста.

Токи в структуре приводят к переносу зарядов из пузырька на кончики проводящей структуры. После этого происходит перерасчет электрического поля с новым распределением свободных зарядов в промежутке и увеличивается локальная напряженность поля на кончиках структуры. Далее следует новый шаг по времени с образованием новых элементов.

Разработанная модель применяется для описания развития стримеров с поверхности газового пузырька в жидкий диэлектрик (диэлектрическая проницаемость 2.2) после частичного разряда (ЧР) в пузырьке. Это явление было описано в работах [2,3].

Совместно со стохастическим алгоритмом роста стримеров реализован расчет электрического поля на трехмерной сетке для системы жидкий диэлектрик – газовый пузырек (диэлектрическая проницаемость 1). Узлы области, имитирующей пузырек, считались проводящими. Вычислялось распределение электрического поля в межэлектродном промежутке с учетом перетекания зарядов внутри пузырька на стенки пузырька. Расчет выполняется до тех пор, пока поле в пузырьке не уменьшится до 0.01% от средней напряженности поля в промежутке. Таким образом, моделировался ЧР в пузырьке.

Частичный разряд в пузырьке, согласно экспериментам, происходит за время 30-50 нс. Время инициирования стримера с поверхности пузырька – порядка нескольких микросекунд. С точки зрения инициирования разрядной структуры частичный разряд происходит почти мгновенно и инициирование каналов разрядной структуры в жидкости происходит в условиях установившихся распределений электрического заряда и поля на поверхности пузырька. В текущей реализации считалось, что рост разрядной структуры начинается в точке максимального поля – в узле на одном из полюсов пузырька. Этот узел на границе становится точкой инициирования стримера, из которой, согласно флуктуационному критерию, формируется проводящая разрядная структура. При моделировании считалось, что проводимость элементов структуры одинакова и примерно на порядок меньше проводимости пузырька.

Расчет полей, перенос зарядов в пузырьке и проводящих структурах разряда также реализованы в виде параллельных алгоритмов для графических ускорителей.

### Список литературы

1. Куперштох А. Л. Флуктуационная модель пробоя жидких диэлектриков. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, №. 10. С. 647–649.
2. Korobeynikov S.M., Ovsiannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu. A., Yassinskiy V.B. // J. Electrostat. 2020. V. 103. Art. 103412. 10 p.
3. Korobeynikov, S.M., Ridel, A.V., Ovsiannikov, A.G. et al. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields. // Electr. Eng. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02359-y>.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10198).*

## О ВЫВОДЕ ЭНЕРГИИ ИЗ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ С ПРИЭЛЕКТРОДНЫМИ ПРОВОДЯЩИМИ СЛОЯМИ

Коробейников С.М.

Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Наиболее мощные импульсные емкостные накопители энергии содержат в качестве накопителя энергии воду. Деионизованная вода является наиболее подходящей диэлектрической жидкостью для различных мощных импульсных систем. Это достигается за счет наиболее высокой диэлектрической проницаемости, высокой импульсной электрической прочности, низкого разложения в разрядах, взрыво-и пожаробезопасности.

Импульсная электрическая прочность, как известно, первую очередь определяется процессами инициирования разряда. Ясно, что, воздействием на эту стадию можно управлять электрической прочностью. Это было экспериментально показано в [1,2]. При экранировании электродов проводящими слоями в приэлектродных областях.

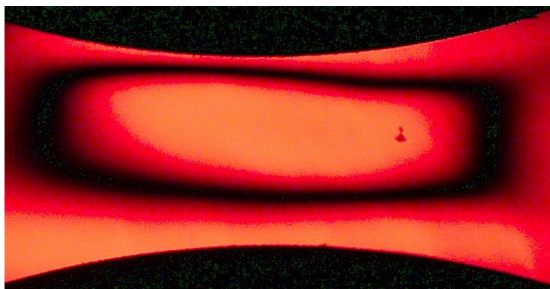


Рис. 1. Керровская картина показывающая ослабление поля у электродов (примерно в два раза) по сравнению с напряженностью в центре промежутка. Здесь справа от центра видно зарождение стримера в объеме [3].

На рис.1 приведена керрограмма, показывающая перераспределение поля в промежутке при создании полупроводящих слоев у электродов. При этом, в процессе заряда накопителя в приэлектродной области образуется гомозаряд, ослабляющий поле у электрода и усиливающий поле в средней части. Эта технология позволяет повысить импульсную электрическую прочность и запасаемую энергию.

Однако как будет отводиться энергия от устройства, остается неясным. Проблема в том, что объемные заряды, возникающие на электродах при зарядке накопителя, не могут быть быстро удалены. В результате часть энергии не может быть быстро удалена. Кроме того, перераспределение поля может вызвать нежелательное локальное усиление поля на электродах. Целью данной работы является моделирование процессов при выводе энергии.

Рассмотрим простую одномерную модель, позволяющую быстро получить качественно правильные ответы. Считаем емкостной накопитель энергии просто емкостью, но состоящей из трех частей. Поскольку заряд из электродов при зарядке накопителя выходит в приэлектродный объем, разместим его на расстоянии  $\Delta$ . Ясно, что прилегающую к электроду часть размером  $\Delta$  можно приближенно считать незагруженной емкостью с межэлектродным зазором  $\Delta$ , а

внутреннюю часть – заряженной емкостью с межэлектродным зазором  $d - \Delta$ . Электрическая схема разряда на нагрузку, которую считаем сопротивлением  $R$ , приведена на рис.2.

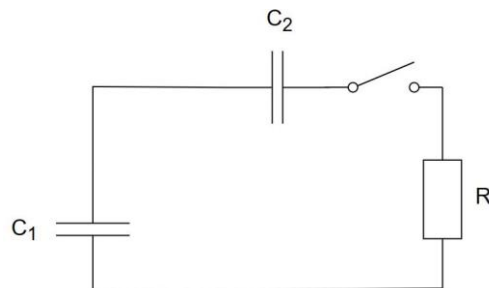


Рис. 2. Электрическая схема разряда.  $C_1$  – емкость средней части конденсатора,  $C_2$  емкость двух приэлектродных областей.

Емкость  $C_1$  заряжена до полного напряжения  $U_0$ , ее разряд через сопротивление  $R$  заряжает емкость  $C_2$ . Можно показать, что энергия  $W$ , которая выделяется на сопротивлении, зависит от времени и параметров схемы как

$$W = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_0^2 \exp\left(-\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R t\right) \quad (1)$$

Если учесть, что  $C_1 \gg C_2$  (приэлектродные слои тонкие), то почти вся энергия выделится на нагрузке за время, примерно равное  $3RC_1$ . Тем самым доказано, что поставленную задачу можно решить в рамках этой простой модели. Однако приэлектродная напряженность в этой упрощенной модели значительно увеличивается в течение времени вывода энергии, достигая значения примерно  $U_0/d$ .

Ясно, что ее можно уменьшить путем еще большего увеличения электропроводности у электродов. Однако для определения достаточных значений электропроводности необходимо более сложное моделирование, например с помощью пакета Comsol Multiphysics.

### Список литературы

1. Vorob'ev V V, Kapitonov V A, Kruglyakov E P and Tsidulko Yu A 1980 Breakdown of water in a system with 'diffusion' electrodes Soviet Physics Technical Physics 25(5) 598–602.
2. Korobeynikov S.M., Yanshin E.V., Ovchinnikov I.T., Yanshin K.V., Sarin S.G., Kopylov V.M., Klepikov A.V. Physical processes limiting the pulse energy release in liquid dielectrics. Conf. Record of International Conference on Pulse Power. Albuquerque, 10-14 July 1995. 2 p.
3. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Posukh V.G. Nonelectrode and postbreakdown ionization processes in water // IEEE Trans. on Plasma Science. 2014. V. 42, N 4. P. 965–968.
4. [3]. Korobeynikov S. M, Melekhov A. V. Fields and streamers in water with near electrode conductive layers: 2017: 19 International conference on dielectric liquids (ICDL) : [proc.], United Kingdom, Manchester, 25 June – 29 June 2017. – IEEE, 2017. – 4 p.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКОАЛЕСЦЕНЦИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ КАПЕЛЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАПРЯЖЕНИИ С МАЛЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ

Костин П.А., Чирков В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

Электрокоалесценция — процесс объединения капель, диспергированных в диэлектрической среде, под действием внешнего электрического поля. Повышение напряжённости электрического поля ускоряет процесс сближения капель, но в то же время приводит к разрыву крупных капель, ввиду чего требуется проводить поиск оптимальных параметров. Электрокоалесценция широко применяется в нефтяной отрасли для очистки нефти от мелких капелек воды, неизбежно присутствующих в ней, непосредственно после добычи [1].

Традиционно нефтяные электростатические дегидраторы используют переменное напряжение промышленной частоты. Однако в литературе появляются экспериментальные свидетельства того, что импульсное напряжение может повысить эффективность очистки [2]. На настоящий момент отсутствует понимание причин повышения эффективности, и остаётся непонятным, как именно определять параметры сигнала напряжения, приводящие к наиболее эффективному режиму работы.

Для анализа электрокоалесценции активно применяется численное моделирование. Ранее, с помощью верифицированной численной модели, основанной на описании двухфазной среды с помощью произвольного метода Лагранжа – Эйлера (Arbitrary Lagrangian–Eulerian Method, ALEM) было проведено моделирование коалесценции двух одинаковых незаряженных капель при импульсном напряжении различной частоты с фиксированным коэффициентом заполнения  $1/2$  [3]. Обнаружено незначительное повышение (5 %) пороговой напряжённости поля, при которой возникает разрыв капель, на частотах, близких к собственной частоте колебаний капели. Предполагаемая причина повышения порога связывается с наличием промежутка времени выключения напряжения, во время которого объединённая капля успевает релаксировать до состояния, сложнее поддающегося разрыву при последующем включении.

Если предложенное объяснение верно, то использование импульсов с меньшим коэффициентом заполнения должно привести к усилению эффекта. Целью данной работы является проверка данной гипотезы, то есть проведение моделирования процесса коалесценции пары незаряженных капель с целью поиска пороговой напряжённости поля для импульсного напряжения с коэффициентами заполнения меньше  $1/2$  с частотой вблизи собственной частоты капели.

Моделирование проводится в Comsol Multiphysics. Рассчитываются уравнение закона Гаусса для электрического поля и уравнения Навье – Стокса для двухфазной несжимаемой изотермической среды. Для описания двухфазной жидкости применяется ALEM. На интерфейсе между фазами нормальная компонента тензора напряжений терпит разрыв за счёт давления Лапласа и электростатического давления.

Расчёт проводится в два этапа: сближение капель до критического расстояния ( $0.01$  радиуса капли) и попытка объединения капель. Перед вторым этапом между деформированными каплями вручную достраивается перемычка.

Рассматривались свойства жидкости, соответствующие капле воды в оливковом масле. Начальный радиус капель  $1$  мм. Для основного расчёта был выбран коэффициент заполнения  $\beta = 1/32$ . Для сравнения используются результаты для постоянного и импульсного напряжения с  $\beta = 1/2$ .

Получены следующие результаты. Пороговая напряжённость поля для случая постоянного поля составляет  $2.5$  кВ/см, для импульсного поля с  $\beta = 1/2$  частоты  $50$  Гц действующее значение — около  $2.6...2.7$  кВ/см (может меняться в зависимости от фазы сигнала в момент касания). Для импульсного поля с  $\beta = 1/32$  частоты  $50$  Гц действующее значение оказалось выше,  $3.0$  кВ/см, что на  $20$  % больше величины для постоянного поля. Дальнейшее увеличение напряжённости не проводилось из-за аномального поведения ближних краёв капели, которое можно интерпретировать как распыление мелких капель.

Наблюдаемое распыление вызвано высокой скоростью вытягивания края капели. По своей структуре и причинам данное явление схоже с неустойчивостью Рихтмайера – Мешкова, являющейся вариантом неустойчивости Рэлея – Тейлора.

Результаты расчётов показали, что уменьшение коэффициента заполнения действительно приводит к росту пороговой напряжённости поля, но появляется побочный эффект: распыление со сближающихся краёв капель, что можно рассматривать как негативный исход процесса коалесценции.

### Список литературы

1. Eow J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology // Chemical Engineering Journal. 2002. Vol. 85, № 2–3. P. 357–368.
2. Mousavi S.H., Ghadiri M., Buckley M. Electro-coalescence of water drops in oils under pulsatile electric fields // Chemical Engineering Science. 2014. Vol. 120. P. 130–142.
3. Чирков В.А. et al. Similarities and Differences in Electrocoalescence Processes of Conducting Uncharged Droplets at the DC and Pulsed Voltage // Proceedings of 5th International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications and on Dielectric Materials (ISNPEADAM 2023). 2023.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10078).*

**О КОНТАКТНЫХ УГЛАХ СМАЧИВАНИЯ В МЕТОДЕ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА И ИХ ИЗМЕРЕНИИ**

**Куперштох А.Л., Медведев Д.А.**

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Для капель и пленок на твердой поверхности важную роль играет величина смачиваемости и, соответственно, значения контактных углов. Эти величины зависят как от свойств жидкости, так и от свойств поверхности.

Для моделирования смачиваемости в методе решеточных уравнений Больцмана (LBM) общепринятыми являются подходы, в которых вводятся силы взаимодействия между узлом жидкости или пара, примыкающим к твердой поверхности, и ближайшими узлами твердой поверхности. Эти подходы можно разделить на две группы.

В моделях первой группы (рис. 1) для узлов твердой поверхности вводится либо эффективная плотность вещества [1] либо используются значения псевдопотенциала  $U$ , соответствующие этой эффективной плотности [2], по той же формуле, что при взаимодействии между узлами флюид-флюид

$$\vec{F}(\vec{x}) = B\Phi(\vec{x}) \sum_{j=1}^k w(\vec{e}_j) \Phi_{solid}(\vec{x} + \vec{e}_j) \cdot \vec{e}_j.$$

Здесь функция  $\Phi(\vec{x})$  выражается через уравнение состояния флюида  $\Phi(x) = \sqrt{-U} = \sqrt{\rho\theta - P(\rho, T)}$ .

В моделях второй группы [3] силы взаимодействия разделяются на две части: силы, которые обеспечивают нейтральное смачивание, как в предыдущей модели при  $B = 1$ , и дополнительные силы взаимодействия с узлами твердой поверхности.

Недостатком указанных методов является то, что при изменении смачиваемости изменяется плотность жидкости в тонком слое, прилегающем к поверхности, что препятствует корректным расчетам тепловых потоков.

В работах [4,5] была предложена идея нового класса методов для возможности изменения значений контактных углов. По сравнению с нейтральным смачиванием при  $B = 1$  дополнительно вводятся только тангенциальные составляющие сил, действующих на соседние с подложкой узлы флюида (рис. 2):

$$F_x(\vec{x}) = \beta\Phi(\vec{x}) \sum_{j=1}^5 \Phi_{solid}(\vec{x} + \vec{e}_j) \cdot e_{jx}.$$

Множитель  $\beta = 0$  соответствует нейтральному смачиванию,  $\beta < 0$  соответствует гидрофильным поверхностям, а  $\beta > 0$  – гидрофобным.

В процессе расчетов капель, лежащих на горизонтальной поверхности, необходимо измерять величину контактного угла при разных значениях параметра  $\beta$ . В простейшем случае при отсутствии поля тяжести (поверхность капли сферическая) контактный угол определяется по формуле  $\theta = 2\arctg(H/G)$ , где  $H$  – высота капли, а  $G$  – радиус пятна смачивания. В случае несферической поверхности капли необходимы более сложные формулы. Например, по трем точкам вблизи твердой поверхности можно вычислить координаты  $x_0$  и  $z_0$  центра вписанной окружности и ее радиус (рис. 3), а затем и угол смачивания по формуле

$$\text{tg}\theta = (G - x_0)/|z_0|.$$

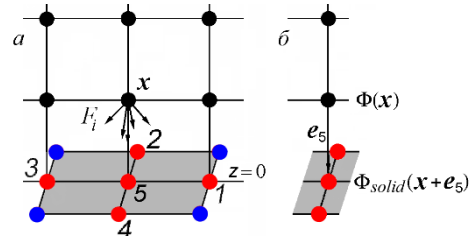


Рис. 1. Силы взаимодействия флюида с твердой поверхностью.

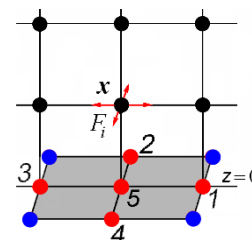


Рис. 2. Дополнительные касательные силы.

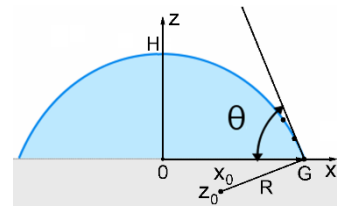


Рис. 3. Радиус вписанной окружности и контактный угол.

Известный тангенциальный метод использует разности координат  $\Delta x$  и  $\Delta z$  двух крайних точек и поправку на радиус вписанной окружности  $R$

$$\theta = \arctg(\Delta z / \Delta x) + \Delta l / (2R).$$

Здесь  $\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$  – длина хорды.

Построены зависимости контактного угла от параметра адгезии  $\beta$ .

**Список литературы**

1. Martys N.S., Chen H.D. Simulation of multicomponent fluids in complex three-dimensional geometries by the lattice Boltzmann method // Phys. Rev. E. 1996. V. 53, N 1. P. 743–750.
2. Benzi R., Biferale L., Sbragaglia M., Succi S., Toschi F. Mesoscopic modeling of a two-phase flow in the presence of boundaries: The contact angle // Phys. Rev. E. 2006. V. 74, N 1. P. 021509.
3. Li Q., Luo K.H., Kang Q.J., Chen Q. Contact angles in the pseudo-potential lattice Boltzmann modeling of wetting // Phys. Rev. E. 2014. V. 90, N 5. P. 053301.
4. Куперштох А.Л., Медведев Д.А., Альянов А.В. Моделирование охлаждения подложки при испарении чистого пара с поверхности тонкой плёнки и капель жидкости // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26, № 3. С. 73–85.
5. Medvedev D.A., Kupershtokh A.L., Alyanov A.V. Heat flux from the surface in the process of the rupture of a thin liquid film by an electric field // Phys. Fluids. 2023. V. 35, N 10. P. 102006.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДОМ ГРАНИЦЫ ПУЗЫРЬКА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ СТРИМЕРОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ****Ридель А.В., Коробейников С.М., Бычков А.Л.**Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

В работах [1, 2] нами было обнаружено и исследовано явление появления разрядных структур в диэлектрической жидкости (трансформаторном масле) с поверхности пузырька после частичного разряда (ЧР) в пузырьке. Особенно интересно, что явление наблюдалось в чрезвычайно слабых электрических полях напряженностью от 13 до 50 кВ/см. В работе [3] было показано, что наиболее вероятным механизмом инициирования стримеров является развитие неустойчивости заряженной границы «пузырек-жидкий диэлектрик» во внешнем электрическом поле.

В настоящей работе получены прямые экспериментальные доказательства этого механизма инициирования стримеров.

Использовалась экспериментальная установка, описанная в [2]. Ячейка заполнялась трансформаторным маслом марки ГК. Масло предварительно фильтровалось, обезгаживалось и сушилось. Пузырьки гелия диаметром 1.8 мм всплывали между вертикально ориентированными параллельными плоскими электродами. На электроды подавалось переменное напряжение частотой 50 Гц.

Для оптической регистрации процессов в межэлектродном промежутке использовалась камера Chronos 1.4 HD с частотой 30 000 кадров в секунду. Синхронно для регистрации характеристик ЧР велась запись электрического сигнала с помощью осциллографа Rigol MSO5104 и оптического сигнала с помощью ФЭУ-97. Длительность импульса тока ЧР была 50-70 нс.

При амплитуде напряжения 51 кВ (расстояние между электродами 10 мм) сразу после ЧР в пузырьке зафиксировано развитие неоднородности границы пузырька на обоих полюсах пузырька.

Деформации распределялись достаточно регулярно по площади полюсов пузырька. На следующих кадрах амплитуда деформаций нарастала. Далее на обоих полюсах наблюдалось вытягивание вглубь жидкости многочисленных тонких газовых каналов. Диаметры каналов оцениваются в 25-40 мкм и расстоянием между ними ~ 50 мкм. Формирование первичных выступов на поверхности пузырька размером ~ 50 – 130 мкм требует времени менее 100 мкс, что позволяет оценить минимальную скорость движения границы в несколько метров в секунду. Развитие некоторых каналов продолжалось в форме ветвящихся структур и сопровождалось импульсами тока. В дальнейшем наблюдался разрыв пузырька на два дочерних пузырька и частичное разрушение пузырька в местах инициирования стримеров.

Зарегистрированные кадры позволяют предположить, что механизмом инициирования стримеров в указанных условиях действительно является развитие электрогидродинамической неустойчивости заряженной границы пузырька во внешнем поле.

**Список литературы**

1. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G., Rideli A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu. A., Yassinskiy V.B. // J. Electrostat. 2020. V. 103. Art. 103412. 10 p.
2. Korobeynikov, S.M., Rideli, A.V., Ovsyannikov, A.G. et al. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields. // Electr. Eng. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02359-y>.
3. Karpov D. I., Rideli A. V., Savenko R. A., Korobeynikov S. M. Initiation of a streamer in a liquid from the surface of a bubble in which a partial discharge occurred // Eurasian Journal of mathematical and computer applications. 2023 Vol. 11, iss. 3. P. 63-75.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10198).*



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ПУЗЫРЬКЕ ГЕЛИЯ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Савенко Р.А.<sup>1,2</sup>, Карпов Д.И.<sup>1,2</sup>, Ридель А.В.<sup>1</sup>, Коробейников С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

<sup>2</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Для изоляции в приборах с высоким напряжением часто используются жидкие диэлектрики, например, на электрических станциях. Было замечено, что в ряде случаев происходит выход из строя оборудования при значениях напряжения меньше, чем напряжение пробоя. Это связано с пробоем изоляции, причиной которого является развитие стримеров. В работе [1] показано, что после частичного разряда (ЧР) с границы пузырька может образоваться стример в жидком диэлектрике из-за накопления на границе свободного заряда, который усиливает поле вблизи поверхности пузырька.

В данной работе выполнены расчёты начальной стадии развития разряда в пузырьке газа в жидком диэлектрике с целью оценки заряда на поверхности пузырька после ЧР и величины напряжённости электрического поля на поверхности пузырька.

### Постановка задачи

Куб с ребром 3 мм заполнен жидким диэлектриком (трансформаторное масло), к одной паре противоположных граней приложено напряжение, создающее электрическое поле в промежутке средней напряжённости 39 кВ/см. В центре куба расположен сферический пузырёк, заполненный гелием, диаметром 1,86 мм. В пузырьке находится затравка электронов и положительных ионов (суммарный заряд 0). Под действием электрического поля электроны движутся против поля, ионизируя газ в пузырьке. При достижении границы пузырька заряды оседают на границе «пузырёк-жидкость».

Вычисление концентраций электронов и ионов на каждом шаге происходит по трёхмерной явной схеме в диффузионно-дрейфовом приближении. Зависимости коэффициентов переноса от локального электрического поля взяты из [2–4]. Распределение поля считается после каждого шага по времени из теоремы Гаусса в дифференциальной форме для заданной системы зарядов методом итераций. Расчёты выполнялись на сетке размерами 258×258×258, шаг сетки 12 мкм.

### Результаты

Согласно расчётам, характерное время достижения границы пузырька электронами 0,3–0,5 нс. При превышении концентрации электронов над концентрацией ионов на величину  $1017 \text{ м}^{-3}$  в узле сетки начиналось экранирование внешнего поля. Область слабого экранирования представляет собой цилиндр, примерно постоянного поперечного сечения с радиусом 0,42 мм, вытягивающийся вдоль поля до границы пузырька. Экранирование поля приводило к падению значений напряжённости до 2 кВ/см вблизи оснований цилиндра и до 10 кВ/см в центре цилиндра, при этом концентрация плазмы в слабо экранированном промежутке составляла 1–3  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . После достижения

электронами границы пузырька на его вершине наблюдалось увеличение напряжённости поля до 80 кВ/см, скорость движения волны ионизации составляла 500–1000 км/с. Также вычислено и представлено распределение поверхностной плотности электронов (нс) в центральном сечении поверхности пузырька (рис. 1).

В работе смоделирован выход электронной волны на стенку пузырька, выполнены оценки параметров плазмы в зоне ионизации, значений плотности заряда на границе пузырька и напряжённости электрического поля в трансформаторном масле на границе пузырька-диэлектрик.

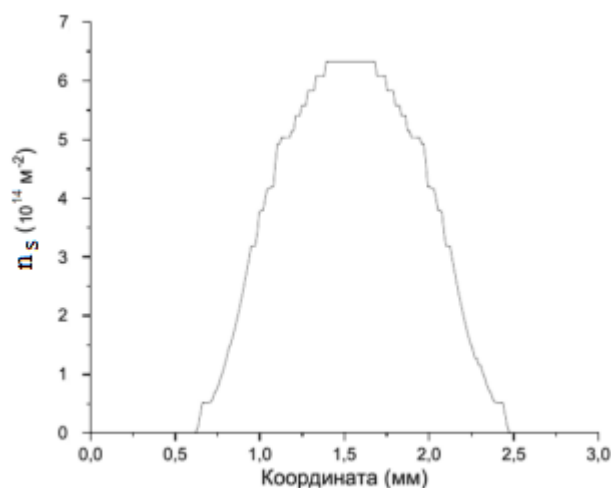


Рис. 1. Поверхностная плотность электронов на границе пузырька.

### Список литературы

1. Korobeynikov, S.M., Ridel, A.V., Ovsyannikov, A.G. et al. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields. *Electr Eng* (2024). <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02359-y>.
2. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 363 с.
3. Davies D.K., Jones F.L., Morgan C.G. Primary ionization coefficient of helium. *Proc. Phys. Soc.* 1962, vol. 80. P. 898-908
4. Ran J., Luo H., Yue Y., Wang X. Measurement of the first Townsend's ionization coefficients in helium, air, and nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2014, vol.83. P. 074503.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10198).

## КОМПЛЕКСНАЯ СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ, В СЛУЧАЕ РАЗЛИЧИЯ ПОДВИЖНОСТЕЙ ИОНОВ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

Сайфуллин Д.Д., Чирков В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Среди множества электрогидродинамических (ЭГД) задач особое место занимает двухфазная электрогидродинамика, к которой относятся процессы электродеформации отдельных капель, электрокоалесценция и декоалесценция капель (дисперсной фазы), взвешенных в дисперсионной среде, движение заряженных капель в масле и электрораспыление. Как правило, дисперсная фаза представляет собой электропроводящую жидкость, а внешняя дисперсионная среда является диэлектрической. Именно в таком случае на подобную двухфазную жидкость можно эффективно воздействовать сильными электрическими полями, что, в частности, лежит в основе работы электродегидраторов, предназначенных для разделения двухфазных жидкостей (эмульсий) на составляющие, например, для очистки нефти от воды.

Несмотря на сравнительно долгую историю изучения электрокоалесценции на данный момент в большинстве случаев внешняя дисперсионная среда считается идеальным диэлектриком. Однако по последним данным наличие ненулевой проводимости этой среды (масла) приводит к возникновению ряда неожиданных эффектов, в частности, к возникновению стационарных электрогидродинамических течений вокруг одиночной капли, взвешенной в масле [1], и даже к зарядке изначально нейтральных капель [2]. Последний эффект возможен, если подвижности противоположно заряженных ионов, обуславливающих электрическую проводимость масла, различаются.

Цель настоящей работы — изучение того, как процессы диссоциации и рекомбинации в дисперсионной среде при отличающихся подвижностях ионов влияют на динамику капель в процессе электрокоалесценции.

Результаты исследования получены путём численного моделирования в COMSOL Multiphysics с применением произвольного Лагранжево–Эйлера метода для описания двухфазной жидкости.

В рамках данных тезисов рассмотрены капли с радиусом  $R=1$  мм и случай, в котором подвижность положительных ионов в  $k=5$  раз превышает подвижность отрицательных ионов. В таком случае больше положительных ионов достигает поверхности капли, и на ней накапливается положительный суммарный заряд порядка 10 пКл. Из-за этого под действием кулоновской силы одиночная ("изолированная") капля, то есть капля, вокруг которой нет других, начинает движение в направлении, противоположном направлению внешнего поля (см. рис. 1). Скорость движения капли в зависимости от проводимости масла может достигать до 2-3 радиусов капли в секунду.

Поскольку вся жидкость в сумме является электро-нейтральной, то за каплей остаётся след в виде заряженной области, в которой преобладает отрицательный заряд (см. рис. 1).

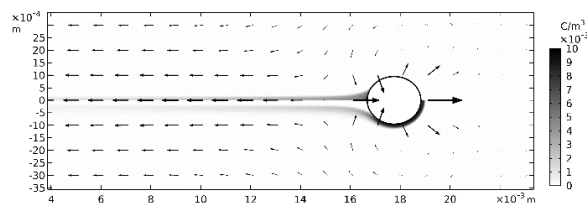


Рис. 1. Пример распределения объёмного заряда (сверху – положительный, снизу – отрицательный) и скорости в масле (вектора) при движении одиночной капли.

Действующая в этом следе объёмная кулоновская сила создаёт ЭГД-течение, направленное в сторону, противоположную движению капли. Длина этого следа и, соответственно, области действия объёмной силы, уменьшается при увеличении проводимости масла. Максимальная скорость масла в хвосте может достигать до половины скорости капли.

ЭГД-течение оказывается определяющим в случае, когда рассматривается взаимодействие двух капель. В этом случае капли также поступательно двигаются в одном направлении — одна капля выступает в роли "убегающей", а другая в роли "догоняющей". При этом сила сопротивления, вызванная ЭГД-течением в хвосте "убегающей" капли и действующая на "догоняющую" каплю, может превышать силы диполь-дипольного взаимодействия, в результате чего расстояние между каплями начинает увеличиваться.

В результате исследования можно заключить, что различие подвижностей ионов дисперсионной среды приводит к принципиальному изменению структуры ЭГД-течений: возникает как поступательное движение заряжающихся проводящих капель, так и появляется противоположно направленное течение в масле в шлейфе каждой капли. В частности, это ЭГД-течение в масле препятствует столкновению капель под действием диполь-дипольного притяжения.

### Список литературы

1. Chirkov V., Dobrovolskii I., Vasilkov S. The interaction between two electrohydrodynamics phenomena when an electric field affects a two-phase immiscible liquid // Phys. Fluids 2021 Volume 33, 043310, ISSN 1070-6631.
2. Dobrovolskii I.A., Vasilkov S.A., Chirkov V.A. Electrohydrodynamics of conducting droplets suspended in a low-conducting liquid: The effect of the difference in mobilities of positive and negative ions // Journal of Electrostatics 2023 Volume 124, 103828, ISSN 0304-3886.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10078).

**СЕКЦИЯ 10**  
**Теплообмен и гидродинамика**  
**в технологических процессах**  
**и защита окружающей среды**





## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В СКВАЖИНЕ ПО ДОБЫЧЕ ГИДРОГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ИЗ РАЗНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН, пр. Имама Шамиля 39а, Махачкала, 367030, Россия

В гидрогеотермальных системах пластового типа, к которым относится Восточно-Предкавказский артезианский бассейн (ВПАБ), встречаются термальные воды разного энергетического потенциала – от низкотемпературных (20-30 °С) пресных, залегающих на небольших глубинах, до высокотемпературных (100 °С и более) минерализованных в горизонтах глубокого залегания [1,2].

Совмещение добычи пресной низкотемпературной воды и высокотемпературной термальной воды одной скважиной-теплообменником будет способствовать повышению эффективности освоения геотермального месторождения (см. рис. 1).

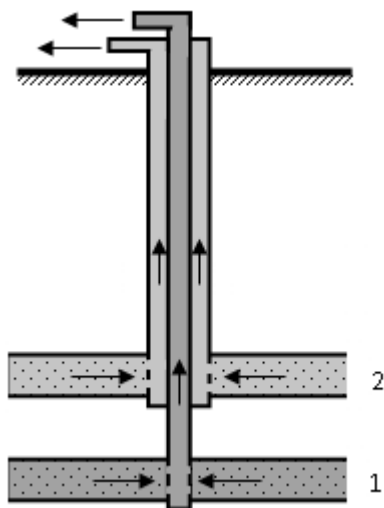


Рис. 1. Скважина для добычи геотермального флюида из разных горизонтов. 1,2 - водоносные горизонты.

Важным фактором такой технологии является передача тепла от, как правило, высокоминерализованных, агрессивных термальных вод пресным “холодным” водам. Такая возможность передачи тепла пресным водам непосредственно в скважине избавляет от необходимости строительства теплообменников на поверхности, увеличивает эффективность передачи тепла ввиду значительной протяженности совмещенной части скважины, снижает теплопотери, вероятность контакта с кислородной средой, сокращает капитальные затраты (стоимость совмещенной скважины намного меньше суммарной стоимости двух автономных скважин).

Предложена конструкция скважины-теплообменника для добычи гидрогеотермальных ресурсов из разных глубин и разработан ряд схем их освоения на основе технологии геотермальной циркуляционной системы (ГЦС).

Одной из высокоэффективных форм использования комплексной разработки низкотемпературных пресных и термальных вод является тепло- и горячее водоснабжение агропромышленных комплексов. На

базе такой добычи могут быть созданы теплоснабжение жилищно-коммунальных и производственных помещений, горячее и питьевое водоснабжение, построены утепленные животноводческие и птицефермы. Формы и масштабы использования геотермального тепла в системе агропромышленного комплекса представляются неограниченными. Известны высокие экономические показатели теплоснабжения теплично-парниковых хозяйств за счет геотермального тепла, при котором себестоимость единицы продукции значительно ниже, чем в случае использования электроэнергии или углеводородных топлив.

Изучен тепломассоперенос в скважине-теплообменнике и предложены формулы для определения дебитов из нижнего и верхнего горизонтов.

Использование такой технологии весьма перспективно в нефтедобыче при освоении месторождений с высоковязкой и парафинистой нефтью. Разработка таких месторождений без применения тепловых методов приводит к недопустимо низкой нефтеотдаче, осложнению эксплуатации скважин возможным выпадением и отложением парафина в насосно-компрессорных трубах, выкидных линиях, шлейфах и другом нефтепромысловом оборудовании. Между тем многие нефтяные месторождения подстилаются высокотемпературными термоводоносными пластами. Добыча нефти с использованием скважин-теплообменников приведет к ее путевому прогреву по мере подъема в скважине, что значительно снизит вязкость нефти, увеличит продуктивность скважины и предотвратит выпадение парафина.

### Список литературы

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
2. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алишаев М.Г., Рамазанов А.Ш., Рамазанов М.М. Освоение геотермальной энергии. М.: Физматлит, 2022. 320 с.

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ФОРСУНКИ****Васильев А.Ю., Майорова А.И., Свириденков А.А.**ФАУ "Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова",  
ул. Авиамоторная 2, Москва, 111116, Россия

Система распыливания топлива в камере сгорания авиационного двигателя – наиболее важный элемент конструкции, влияющий на работоспособность камеры и двигателя в целом.

Центробежные форсунки могут хорошо работать на режимах запуска и малого газа, при условии достаточно большого перепада давлений топлива. Однако современные двигатели требуют уменьшения этого перепада до 2,5 МПа на максимальном режиме. Таким образом, на режимах запуска перепад давления составляет около 0,05 МПа и топливный факел, как правило, не раскрывается.

Сгладить недостатки обычной центробежной форсунки позволяет устройство с перепуском топлива. Топливо подается с большим расходом, а регулировка доли топлива, поступающей в камеру сгорания, осуществляется открытием перепуска. Постоянное высокое давление подачи обеспечивает большую крутку и приемлемое распыливание топлива. Недостатками являются: изменение угла распыла с изменением расхода топлива.

В настоящее время, в низкоэмиссионных камерах сгорания все чаще применяются пневматические форсунки. Недостатками пневматических форсунок являются: мелкость распыливания топлива на низких режимах, не позволяющая обеспечить уверенные земной и высотный запуск, а также трудности расчета и проектирования таких устройств.

Исходя из всего выше сказанного ясно, что необходимо разработать такой тип распыливающих устройств, который позволил бы объединить достоинства перечисленных схем распыливания и нивелировать их недостатки. Поэтому проведена разработка форсунок низконапорной комбинированной центробежно-пневматической схемы, причем такие форсунки имеют линию перепуска топлива из центробежного канала непосредственно в пневматический. То есть, в устройстве перепускаемое топливо не выводится из камеры сгорания.

Эффективность комбинированных форсунок, в основном, зависит от правильного сочетания характеристик потоков топлива и воздуха внутри форсунки.

В работах [1-2] приведены зависимости эмиссии вредных веществ от мелкости распыливания капель топлива. Показано, что полнота сгорания и выбросы вредных веществ зависят не только от организации процесса горения, но и от мелкости распыливания топлива форсунками. Опыт показывает, что для современных камер сгорания, оптимальными можно считать капли диаметром порядка 20 - 30 мкм, при этом угол распыливания топливовоздушного факела должен быть порядка 90°.

Процесс создания комбинированных систем распыливания целесообразно начинать с изучения роли гидродинамики в процессах распыливания топлива.

Ниже приведена фотография расчетного поля течения топлива и факела распыливания.

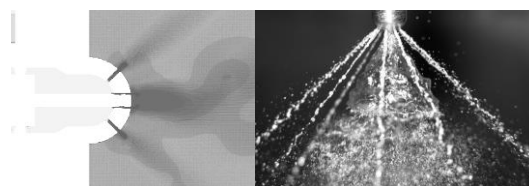


Рис. 1. Сравнение расчетного поля скоростей с экспериментом

В обеспечение создания форсунки были выполнены следующие расчетные и экспериментальные работы:

- сформулированы целевые характеристики разработки: средний заутеровский диаметр капель 20 - 30 мкм, угол топливовоздушного факела - 90°;
- проведена апробация методики расчета центробежной форсунки с перепуском топлива на комбинированной форсунке для различных типов жидкостей. Отличие расчетных значений расхода от экспериментальных находится в пределах 2 - 7 %;
- на основании проведенных 3D расчетов сделан вывод, что течение в форсунке с перепускными отверстиями автомодельно. Топливные струи из отверстий перепуска формируют стабильный угол топливовоздушного факела порядка 90°;
- с применением оптических методов измерений размеров капель показано, что мелкость распыливания топлива этой форсункой с внешним завихрителем составляет от 20 до 30 мкм на режимах запуска.

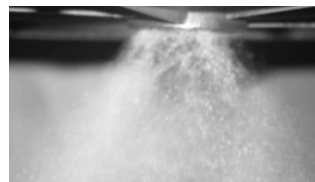


Рис. 2. Фотография топливовоздушного потока.

Результаты испытаний подтвердили закономерности, полученные из полуэмпирических и 3D расчетов, о структуре течения. Разработанная схема форсунки позволяет обеспечить приемлемые, для перспективных камер сгорания, характеристики топливовоздушного факела при использовании низконапорной подачи топлива. По результатам модельных испытаний подтверждена работоспособность центробежно-пневматической форсунки в условиях камеры сгорания ГТД нового поколения.

**Список литературы**

1. Sjorgren A. Soot Formation by Combustion of an Atomized Liquid Fuel // International Fourteenth Symposium on Combustion – 1973 – Pittsburgh – pp. 919 – 927.
2. Кутыш Д. И. Оптимизация геометрических и газодинамических параметров устройства двухступенчатого смешения топлива и воздуха малоэмиссионной камеры сгорания конвертированного авиационного двигателя // Дис. к.т.н. М. 2004.

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СМОЛ В СОСТАВЕ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА

Гайдабрус М.А.<sup>1</sup>, Табакаев Р.Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
ул. Володарского 6, Тюмень, 625003, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
ул. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

Современные подходы к вопросам оптимизации производственных процессов все чаще учитывают сложившуюся экологическую ситуацию в мире, задаваясь вопросами снижения антропогенного влияния на окружающую среду. Так вовлечение перспективных методов переработки биомассы помогает комплексно решить несколько экологических проблем: снижение выбросов парниковых газов, уменьшение объема отходов, повышение доли возобновляемых источников энергии в мировом топливно-энергетическом балансе и т.д.

Одним из таких методов является пиролиз, представляющий собой процесс термической деструкции без доступа кислорода. При пиролизе образуются твердые, жидкие и газообразные продукты. Полученные газы представляют собой энергетически ценную смесь, включающую в себя метан, углекислый газ, водород, оксиды углерода, а также другие легких углеводородов. Состав пиролизного газа может варьироваться в зависимости от исходного сырья и условий процесса пиролиза, представляя интерес для использования в химической промышленности или в качестве топлива в газо-поршневых или газотурбинных двигателях. Однако перед использованием газ должен быть очищен от различных примесей, в том числе от паров смолопродуктов.

Для очистки газа на сегодняшний день применяют механические фильтры, термический крекинг или используют плазменные методы, а также используют катализаторы.

Последний из перечисленных способов представляет особый интерес, так как имеет ряд преимуществ: катализатор способствует увеличению выхода определенных продуктов, повышая при этом их калорийность и экологичность. Кроме того, катализатор позволяет сместить процесс в область более низких температур.

Катализаторы, используемые для снижения смолы в процессе пиролиза, принято разделять на три основные группы: доломитовые, никелевые и катализаторы на основе металлов.

Представители каждой группы показали свою эффективность, однако каждый из них имеет ряд ограничений.

В данной работе проведено исследование эффективности применения никелевого катализатора (14 % Ni на основе  $\gamma$ -алюминия) и катализатора глубокого окисления (КГО) (2,3 % CuO, 4,8 % MgO, 22,9 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, носитель из гамма-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) при медленном низкотемпературном пиролизе. В качестве сырья выбраны отходы жизнедеятельности крупнорогатого скота (ОЖКС) как доступный материал, требующий переработки.

Для проведения экспериментальной части изготовлен лабораторный стенд, представляющий собой реторту с крышкой и отводящей трубкой, охлаждающую колбу. Сырье помещали внутрь реторты, после чего нагревали со скоростью 10 °С в минуту до температуры 520 °С. Жидкие и газообразные продукты отводили по соединительной трубке и попадали в охлаждающую колбу. Вода и смолопродукты конденсировались в колбе, а газообразные продукты уходили в атмосферу. После полного охлаждения продукты взвешивали и составляли материальный баланс. Исследование влияния катализатора проводили аналогично, размещая катализатор ровным слоем поверх биомассы внутри реторты. Результаты представлены на рисунке 1.

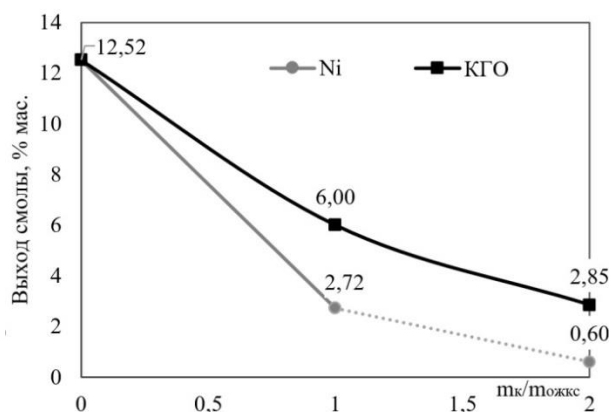


Рис. 1. Зависимость выхода смолопродуктов от соотношения массы катализатора к массе сырья.

Следует отметить, что использование катализатора глубокого окисления, позволило снизить количество смолы в составе продуктов пиролиза в 2 раза при соотношении 1:1 (катализатор к биомассе, соответственно), и в 4 раза при соотношении 2:1. Применение никелевого катализатора позволило достичь снижения в 4,6 раза при соотношении 1:1, и сократить практически до нуля при соотношении 2:1.

Такая разница может быть объяснена тем, что никель представляет собой более активный металл, нежели медь, магний и хром, входящие в состав КГО. Кроме того, никелевый катализатор обладает высокой селективностью к целевым продуктам, что оказывает позитивное влияние на снижение образования нежелательных побочных продуктов. Добавление катализатора позволяет снизить количество смол практически до нуля, что делает пиролизный газ пригодным для использования в энергетическом оборудовании.

Работа поддержана РФФ  
(грант №22-19-00410).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ РОТОРОВ В ДИРИЖАБЛЯХ

Дектерев А.А.<sup>1</sup>, Ким И.С.<sup>1</sup>, Зверков И.Д.<sup>2</sup>, Дектерев Д.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. Карла Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

В последние годы вновь повысился интерес к дирижаблям, как альтернативным воздухоплавающим аппаратам. Появление новых материалов и систем автоматического управления полетом, повышение уровня достоверности метеорологических прогнозов позволяют надеяться, что современные дирижабельные системы смогут найти свою нишу при освоении воздушного пространства. Как за рубежом (США, Европа, Китай), так и в России разрабатываются дирижабли для решения транспортных задач, мониторинга окружающей среды, систем организации связи, спасательных операций и элитного туризма. В последние годы появились опытные аппараты больших размеров - Airlander 10, Pathfinder 1 (США), Zeppelin NT (Германия), AS700 (Китай). Российский дирижабль рассчитанный на 10 пассажиров AU-30 установил несколько мировых рекордов.

Одной из основных проблем при эксплуатации дирижаблей является сильная зависимость от ветровых порывов, что особенно актуально в приземной зоне в процессе погрузочно-разгрузочных работ.

В мире были сделаны попытки решить эту проблему с использованием циклоидальных роторов, как основных пропульсивных движителей [1-3], но эти работы не привели к значительным успехам.

В ИТ СО РАН предложена и запатентована конструкция дирижабля с циклическими движителями, расположенными не поперек, как в предыдущих исследованиях, а вдоль оси дирижабля (рис.1), что позволяет эффективно создавать поперечную тягу.



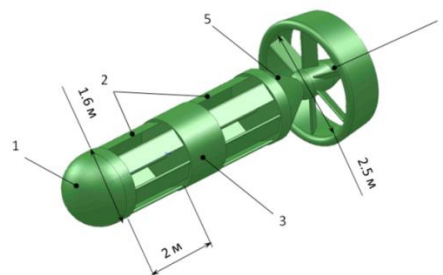
1-мягкая оболочка с датчиками давления на поверхности. 2- грузовая кабина. 3- балки крепления обшивки и силовых установок. 4- четырёхвекторная пропульсивная установка. 5- шестивекторная пропульсивная установка

Рис.1 Дирижабль с циклическими движителями.

Силовая установка состоит из 4 постов (рис.1), расположенных чуть ниже продольной оси дирижабля. Конкретное положение необходимо оптимизировать исходя из соотношения динамических и аэродинамических сил, при осуществлении манёвров стабилизации, учитывая полную и частичную загрузку дирижабля.

На задних постах устанавливаются шестивекторные пропульсивные установки (рис. 2), которые состоят из двух циклических движителей 2 расположенных друг за другом и позволяющих независимо менять вектор тяги, и воздушного винта 4. На передних

постах устанавливаются четырёхвекторные пропульсивные установки в задачи которых входит только поперечные манёвры дирижабля.



1-носовой обтекатель. 2- циклический движитель. 3- блок гибридной силовой установки 100 и 100 квт. 4-реверсивный воздушный винт. 5-хвостовой обтекатель.

Рис. 2 Шестивекторная пропульсивная силовая установка.

4 поста могут также создать вертикальную тягу, что даёт возможность не загружаться балластом во время кратковременной погрузки-разгрузки.

Специалистами ИТ СО РАН совместно с коллегами из МГТУ им. Баумана проведены тестовые испытания дирижабля с циклическими движителями (рис.3), подтвердившие высокие показатели маневрирования: разворот на месте, боковое скольжение, движение вперед/назад, парирование ветровой нагрузки, оперативное изменение высоты полета без использования балластировки.



Рис.3 Тестовые испытания дирижабля с циклическими движителями в г. Киржач, апрель 2024 г.

## Список литературы

1. Roy P. Gibbens, "Improvements in Airship Control Using Vertical Axis Propellers," AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, 17 – 19 November 2003:
2. Trancossi, M., Dumas, A., Xisto, C., Pascoa, J. et al., "Roto-Cycloid Propelled Airship Dimensioning and Energetic Equilibrium," SAE Technical Paper 2014-01-2107, 2014, doi:10.4271/2014-01-2107.
3. Hirohito Nozaki, Yuya Sekiguchi, Kazuo Matsuuchi Research and Development on Cycloidal Propellers for Airships. 18th AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference 4 - 7 May 2009, Seattle, Washington.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.



## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ЦИКЛИЧЕСКИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>, Финников К.А.<sup>2</sup>, Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,

пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

При создании новых летательных аппаратов принципиально важной задачей является подтверждение заявленных полетных характеристик. Наиболее ценными данными на промежуточных исследованиях являются параметры, полученные при испытаниях в аэродинамических трубах.

В ходе создания и испытаний летательного аппарата с циклическими движителями в аэротрубе (рис.1) решалась задача нахождения режима работы роторов, обеспечивающих горизонтальный полет с постоянной скоростью, т.е. режима, в котором суммарные вектора аэродинамической силы и ее момента, действующих на аппарат, равны нулю. Ввиду того, что положение летательного аппарата в аэротрубе фиксировано, такой режим не может быть достигнут средствами системы управления, реагирующей на изменение скорости, координаты и ориентации аппарата.

Осложняется задача тем, что в изучаемой компоновке летательного аппарата передние и задние роторы вращаются в разные стороны. С одной стороны, это приводит к более эффективным режимам взлета, посадки и висения, за счет взаимокompенсации опрокидывающих моментов, с другой - приводит к принципиально разному взаимодействию передних и задних роторов с набегающим потоком.

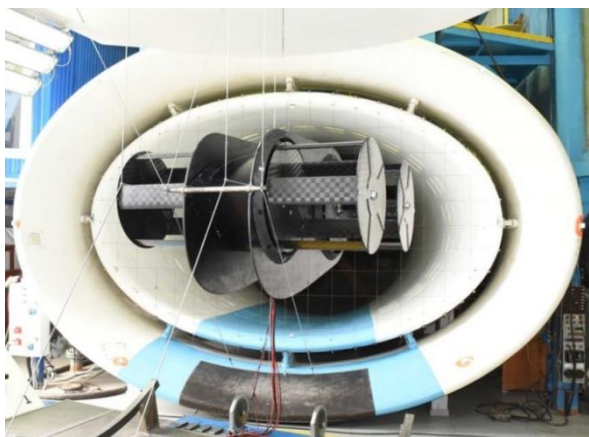


Рис.1. Модель летательного аппарата с циклическими движителями в аэродинамической трубе.

Для решения задачи применен метод последовательных приближений, реализуемых в следующем порядке:

1. С использованием аналитической модели находится режим работы передних и задних роторов: их углы атаки и фазовые углы (скорость вращения считается заданной).

2. С найденными параметрами роторов проводятся испытания циклолета в аэротрубе и находятся вектора силы и момента, действующих на него. При этом, кроме найденного режима, проводятся испытания ещё 16 режимов, построенных путём последовательного

изменения углов атаки и фазовых углов передних и задних роторов на  $\pm\Delta$ , таким образом, что вокруг искомого режима формируется так называемое облако точек в виде куба. Искомый оптимальный режим заведомо находится внутри куба.

3. С использованием измеренных векторов силы и момента проводится коррекция аналитической модели летательного аппарата, и весь процесс повторяется, начиная с шага 1, при этом значение  $\pm\Delta$  для формирования куба уменьшается.

В ходе испытаний требовалось провести от 3 до 4 повторений описанного цикла для достижения искомого баланса сил и моментов с допустимой погрешностью.

Аналитическая модель циклолета основывалась на аналитических зависимостях сил и моментов, действующих на каждый из роторов  $F, T(e, \phi, V/(\omega R))$ , где  $e$  – угол атаки,  $\phi$  – фазовый угол,  $V$  – скорость набегающего потока,  $\omega R$  – окружная скорость ротора. Эти аналитические зависимости были построены на основе измерений сил и моментов, действующих на ротор в условиях набегающего потока в аэротрубе. В аналитические зависимости вносились корректирующие факторы – масштабирующий множитель и дополнительный угол поворота вектора силы – определенные путем сопоставления исходной аналитической модели с результатами трехмерного численного моделирования аппарата. Необходимость в корректирующих факторах связана с взаимовлиянием течений, создаваемых набегающим потоком, роторами и фюзеляжем. Кроме того, из результатов моделирования определялись силы и моменты, действующие на фюзеляж аппарата. Коррекция аналитической модели в п. 3 вышеописанного метода последовательных приближений состояла в добавлении дополнительных слагаемых в суммарную силу и момент, таких, что расчетные значения последних равнялись измеренным в прошедшем этапе испытаний.

Использование описанной методики позволило в ходе испытаний в аэродинамической трубе Т-203 СибНИА продемонстрировать возможность полета аппарата с циклическими движителями со взлетной массой более 40 кг. Диаметр роторов составляет 600 мм при длине лопастей 500 мм. Получены параметры для стабильного горизонтального полета аппарата при скоростях 5, 10 и 20 м/с.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С РАБОЧИМ ТЕЛОМ R-747

Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>, Ануфриенко А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Для теплоснабжения малых городов и населенных пунктов, расположенных на берегу незамерзающих рек и озер, а также водозаборных сооружений, в качестве теплоисточников могут применяться высокопроизводительные парокompрессионные тепловые насосы (ПКТН). В зимний период времени температура воды снижается до предельно низких температур, что требует разработки специальных решений по их эффективному применению. Так, например, вблизи г. Дивногорска Красноярского края вода не замерзает на протяжении всего года (рис.1).

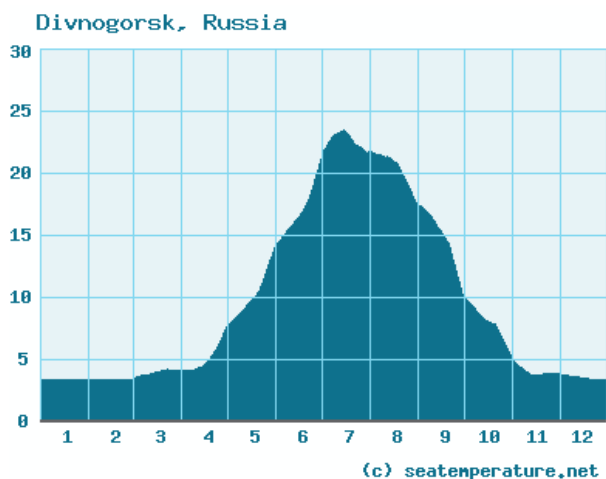


Рис. 1. Годовой график изменения средней температуры воды в реке Енисей вблизи г. Дивногорска.

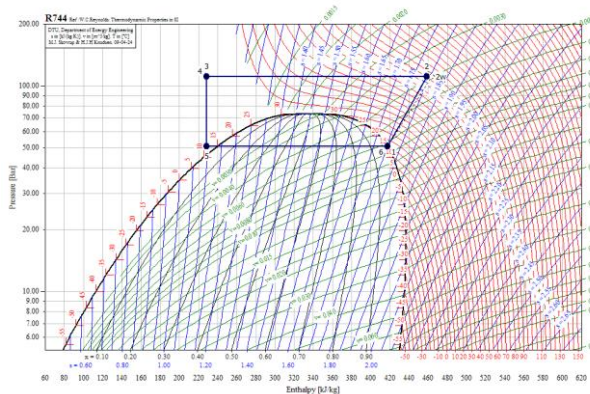


Рис. 2. Рабочий газожидкостный цикл ПКТН с рабочим телом R-744 в координатах «давление-энтальпия».

В качестве рабочего тела рассмотрен озонобезопасный и мало влияющий на глобальное потепление климата углекислый газ (R-744), рабочий цикл которого представлен на рис. 2. Результаты расчетов представлены в табл.1.

Таблица 1. Расчетные параметры теплонасосной установки на R-744.

Параметр	Температура речной воды на входе в испаритель ПКТН, °С			
	2,0	7,2	12,4	16,5
Теплопроизводительность, МВт	19,28	21,18	23,20	24,77
Коэффициент преобразования	4,28	4,11	3,95	3,79
Расход речной воды, м³/ч	6370	6370	6370	6370
Температура на выходе из компрессора, °С	92,7	98,3	103,3	106,8
Температура перед дросселированием, °С	10,8	15,6	25,0	30,0

В качестве неизменных величин в расчетах приняты значения степени сжатия пара в компрессоре  $\pi_k = 2,73$ ; коэффициента подачи  $\lambda = 0,9$ ; электромеханического КПД электромотора  $\eta_{эм} = 0,98$ , теоретического расхода  $V_T = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$  и внутреннего эффективного КПД винтового компрессора  $\eta_{эв} = 0,7$ .

Высокие показатели температур компримированного пара на выходе из компрессора, а также коэффициентов преобразования позволяют эффективно осуществлять круглогодичное отопление жилых домов.

На основе анализа эффективности рабочего цикла ПКТН на R-744 сделан вывод о целесообразности применения высокопроизводительных теплонасосных установок этого типа для экологически чистого теплоснабжения малых городов и населенных пунктов на основе тепла воды незамерзающих водоемов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИОМАССЫ С ВЫСОКИМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ В КАЧЕСТВЕ МИКРОВОЛНОВЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ПРИ СВЧ-ПИРОЛИЗЕ УГЛЯ

Калинич И.К., Табакаев Р.Б., Мостовщиков А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

Согласно последним прогнозам, уголь в течение длительного периода еще будет занимать существенную часть в топливно-энергетическом балансе. Среди причин, способствующих сохранению доли угля в производстве энергии в России, можно выделить наличие его огромных запасов, а также государственную поддержку. Тем не менее, даже в программе развития угольной промышленности среди основных системных проблем энергетического использования угля выделяется негативное воздействие на окружающую среду. Реализуемые сегодня меры по снижению количества вредных выбросов от сжигания органических топлив не дают существенного эффекта. Сложившаяся ситуация приводит к тому, что в последние годы интерес вызывает технология совместного сжигания биомассы и угля, способствуя частичной декарбонизации производства тепла и электроэнергии и замедлению развития парникового эффекта.

Вовлечение биомассы в производство энергии позволяет снизить углеродный след, поскольку при росте биомассы из атмосферы поглощается такое же количество углекислого газа, которое выделяется при ее сжигании. Также одним из способов уменьшения удельного загрязнения окружающей среды является предварительная термическая переработка энергоресурсов с получением жидких и газообразных топлив. СВЧ-пиролиз представляет из себя одну из наиболее перспективных технологий получения энергетически ценных продуктов из органического сырья [1].

СВЧ-излучение способно проникать вглубь диэлектрических материалов, приводя к равномерному разогреву всего топлива. Данная особенность исключает необходимость предварительного разогрева печи, снижает тепловые потери в процессе переработки. Также отмечалось полное отсутствие или снижение выбросов углекислого газа в процессе СВЧ-пиролиза. Тем не менее, данная технология имеет ограничение, связанное со способностью материалов взаимодействовать с СВЧ-излучением и преобразовывать энергию электромагнитного поля в тепловую. При низкой величине энергии, рассеиваемой в диэлектрике в виде тепла, топливо в СВЧ-поле либо будет достигать температуры пиролиза довольно продолжительное время, либо не будет достигать такой температуры вовсе. В связи с этим для ряда материалов эффективность СВЧ-пиролиза будет ниже в сравнении с другими способами осуществления термического разложения органических топлив.

Одним из возможных способов повышения эффективности преобразования энергии СВЧ-поля в тепловую является введение добавок (микроволновых поглотителей) в перерабатываемое сырье, повышающих его восприимчивость к электромагнитному полю. В качестве таких добавок ранее рассматривались металлические поглотители, например, порошки оксидов

железа и меди, нанопорошок железа. Такие микроволновые поглотители повышают долю энергии СВЧ-излучения, поглощаемую топливом, за счет добавления рассеивания энергии в проводниках при воздействии на них магнитной составляющей поля [2]. Так, время нахождения каменного угля в СВЧ-поле до начала процесса пиролиза при внесении поглотителя (10 % от общей массы образца) сокращалось: для нанопорошка железа на 94 %, для микропорошков FeO на 93 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на 80 %, Cu<sub>2</sub>O на 82 % и CuO на 87 %. Для ряда поглотителей наблюдалось увеличение доли H<sub>2</sub> и CO в составе пиролизного газа. Однако при таком подходе основным недостатком является невозможность отделения таких катализаторов от конечного твердого продукта с целью повторного использования.

В данной работе предлагается использовать в качестве микроволнового поглотителя биомассу, обладающую высоким, относительно каменного угля, значением рассеиваемой в виде тепла энергии СВЧ-поля, например, отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота. Получение биомассы существенно проще в сравнении с получением порошков металлов, а включение биомассы в цикл производства тепла и электроэнергии позволяет снизить углеродный след. Использование био-угольной композиции с содержанием биомассы в количестве 10 % от общей массы образца позволило достичь снижения времени инициации процесса пиролиза на 51 %. При этом отсутствует существенное отличие в составе пиролизных газов для образцов каменного угля и био-угольной композиции (см. рис. 1).

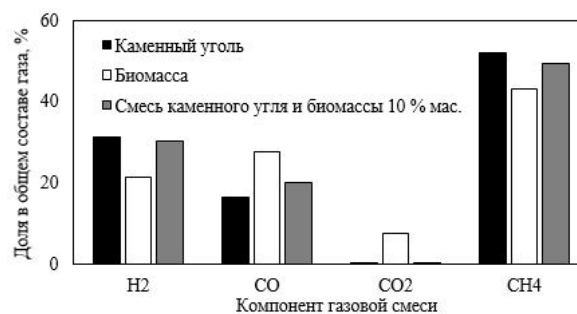


Рис. 1. Экспериментально полученный состав пиролизного газа

### Список литературы

1. Табакаев Р. Б. и др. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №. 12. – С. 190-199.
2. Mushtaq F., Mat R., Ani F. N. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Т. 39. – С. 555-574.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00410).

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ И ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ****Кудряров В.Н., Кашкаров Е.Б., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Лидер А.М.**

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет

пр. Ленина 30, Томск, 634021, Россия

Разработка методов очистки и хранения водорода в металлгидридных системах является одним из приоритетных направлений развития водородной энергетики. Использование металлгидридных систем хранения водорода превосходит по энергетической эффективности системы на основе сжатого и жидкого водорода за счет отсутствия необходимости в использовании высоких давлений (до 70 МПа) и низких температур (до 20 К) и возможности работы за счет низкопотенциальной тепловой энергии (менее 100 °С). Хранение водорода в связанном состоянии при низких давлениях (менее 3 МПа) многократно повышает безопасность систем аккумулирования водорода, что позволяет снизить эксплуатационные расходы и требования к подготовке и квалификации обслуживающего персонала. За счет селективного поглощения водорода металлгидриды позволяют обеспечивать потребителей газом высокой чистоты, кроме того, металлгидриды позволяют осуществлять безмашинную компрессию водорода.

Абсорбция водорода металлами является экзотермическим процессом, вызывающим повышение температуры твердого вещества. С более высокими температурами связаны большие значения равновесного давления. В результате движущий потенциал снижается, задерживая время начала и снижая скорость реакции преобразования металла в его гидрид. Кроме того, эффективность работы металлгидридной системы может снижаться из-за кризиса теплопереноса. Следовательно, необходима эффективная система подвода и отвода тепла, чтобы обеспечить возможность использования всего реагента в металлгидридном аккумуляторе. При проектировании металлгидридного баллона наиболее важно рассмотреть теплопередачу от теплообменника к металлгидриду, а также возможные колебания температуры при циклах зарядки/разрядки баллона.

Порошок гидридов интерметаллических соединений (LaNi<sub>5</sub>, TiFe) характеризуется недостаточной передачей тепла от одной частицы порошка к другой, что может приводить к неравномерному и неполному выходу водорода при разрядке баллона. В таком случае необходимо увеличивать объем соприкосновения порошка гидрида с теплообменником, однако при этом будет уменьшаться количество материала, сорбирующего водород, что негативно скажется на емкости баллона. Для решения этих проблем необходимо проанализировать широкий спектр вопросов теплопередачи, связанных с процессом проектирования, чтобы выбрать наиболее подходящую конфигурацию теплообменника. В этой связи, актуальным является разработка и оптимизация теплообменных элементов металлгидридных систем хранения водорода с использованием методов цифрового моделирования.

В литературе встречаются различные подходы к моделированию процессов сорбции и десорбции водорода, основанные на относительно простых математических моделях, таких как одномерное нестационарное уравнение диффузии или уравнениями тепло- и массопереноса, а также на более сложных, где учитывается изменение удельного объема металлгидридного слоя. Так как расчет работы металлгидридных баллонов является сложной научно-математической проблемой из-за необходимости учета химических превращений в пористой среде, используется упрощенная математическая модель, позволяющая предусмотреть эксплуатационные характеристики баллона без решения сложных задач теплообмена.

Для решения задач теплопроводности были проанализированы современные платформы, основанные на численных методах решения дифференциальных уравнений с частными производными – методе конечных элементов в частности. В качестве основного инструмента в данной работе был выбран пакет программ Comsol Multiphysics, состоящий из обширного семейства удобных, многоцелевых расчетных кодов, имеющих много общего и призванных удовлетворять потребности пользователя в решении обширного круга инженерных задач, в том числе задач теплопроводности.

В настоящей работе с помощью методов цифрового моделирования в пакете программ Comsol Multiphysics было исследовано несколько геометрий металлгидридных систем очистки и хранения водорода на основе интерметаллических соединений LaNi<sub>5</sub> и TiFe. Была определена оптимальная конфигурация металлгидридных систем, а также вычислена скорость заполнения водородом металлгидридных баллонов в зависимости от типа и размера. Приводятся результаты расчетов полей температуры. Оптимизация геометрии системы проводилась с целью получения минимального времени разрядки/зарядки баллона, а также максимального удельного количества тепла, подводимого/отводимого к засыпке металлгидрида. В качестве параметров оптимизации были исследованы такие параметры, как толщина теплообменной трубки, расстояние между трубками (шаг), а также расположение трубок в металлгидридном баллоне.

На основании проведенного комплексного изучения методами цифрового моделирования свойств выполнена оптимизация металлгидридных систем очистки и хранения водорода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2024-0001.*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Борисов Б.В., Нагорнова Т.А., Салихов Ф.Ю.,

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

Использование современных и экономичных систем поддержания регламентных температур в промышленных помещениях, таких как газовые инфракрасные излучатели (ГИИ), сопровождается рядом проблем [1]. Например, работа светлых типов ГИИ, использующих открытое горение газа, может привести к выбросам продуктов сгорания (главным образом  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в окружающую среду [1]. Дополнительные источники загрязнения воздуха в производственных помещениях часто требуют установки системы принудительного воздухообмена. При установлении регламентных условий в локальной рабочей зоне большого производственного помещения следует руководствоваться соответствующими нормами и правилами. Важным фактором является не только температура, влажность и скорость воздушного потока, но и уровень загрязнения воздуха [2]. Поддержание допустимой концентрации углекислого газа в локальной рабочей зоне является важной задачей.

Теоретический анализ процессов теплопереноса проводился путем численного моделирования. Задача в рассматриваемых условиях решена в плоской постановке (см. рис. 1).

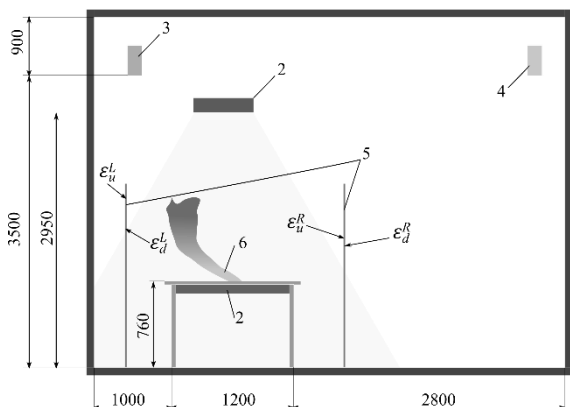


Рис. 1. Область решения: 1 – горизонтальная панель, имитирующая оборудование, 2 – газовый инфракрасный излучатель, 3, 4 – области притока и оттока воздуха системы воздухообмена, соответственно, 5 – временные локальные ограждения, 6 – источник антропогенного газа.

Математическое моделирование процессов конвективно-кондуктивного переноса теплоты и массы в области решения задачи проведено с использованием расчетных модулей пакета COMSOL Multiphysics: «The Heat Transfer in Fluids Interface», «The Turbulent Flow, k-ε Interface», модуля «Transport of Concentrated Species». Параметры радиационного теплового потока при моделировании работы ГИИ, вычислялись модулем «Surface-to-Surface Radiation» в рамках зональной модели по средним угловым коэффициентам [3].

Основные параметры помещения и ГИИ принимались аналогичными использованным в предыдущих исследованиях авторов, например, [1] и соответствовали реальным объектам.

Как показывает анализ результатов численного моделирования квазистационарная гидродинамическая картина течения устанавливается примерно к 40-60 минутам от начала работы системы нагрева и во многом определяется параметрами работы систем создания регламентных тепловых условий и воздухообмена.

По результатам математического моделирования выявлено, что за 35 минут работы ГИИ и дополнительного источника  $\text{CO}_2$ , поступающего в локальную рабочую зону, значения концентраций достигают значений 1000-2000 ppm, что соответствует III-IV классу чистоты воздуха (см. рис. 2).

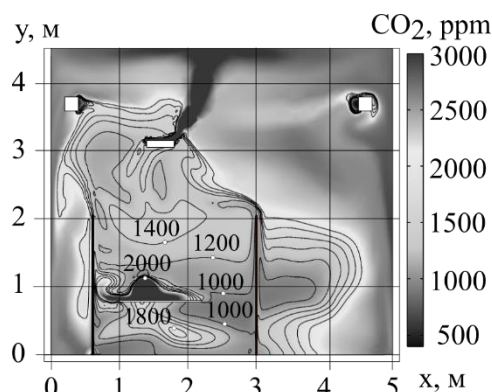


Рис. 2. Поле концентрации  $\text{CO}_2$ , сформированное к 35 минуте работы ГИИ, при наличии дополнительного источника генерации  $\text{CO}_2$ , расположенного по центру макета оборудования при отсутствии вынужденного воздухообмена.

Установлено, что в локальной рабочей зоне производственного помещения в условиях наличия дополнительной генерации  $\text{CO}_2$  производственными процессами необходимо использовать систему регулируемого воздухообмена.

### Список литературы

1. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Salikhov F.Y. Concentration of  $\text{CO}_2$  in the local working area during the joint operation of a gas infrared heater and an air-exchange system // Energies. 2024. 17(1). 155. <https://doi.org/10.3390/en17010155>.
2. ГОСТ Р ЕН 13779-2007. Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования.
3. Russell, J. Comsol Multiphysics / J. Russell, R. Cohn. – Scotland, United Kingdom: Lennex Corp, 2012. 79 p.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 20-19-00226).

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЯЧЕЙКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634040, Россия

Проблема энергетической безопасности для многих развитых государств мирового сообщества остаётся актуальной в настоящее время, несмотря на достаточно интенсивное производство и запуск нетрадиционных возобновляемых источников энергии – ветрогенераторов и солнечных электростанций [1]. Такие источники энергии при всей их перспективности пока не могут использоваться в реальной промышленности и на транспорте [2]. Основная причина – отсутствие эффективных (мощных, надёжных и безопасных) систем хранения электрической энергии (СХЭ). Наиболее перспективными до настоящего времени не только как обязательные системы для нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ), но также и для традиционной энергетики, в качестве накопителей энергии, принято считать [3] электрохимические.

Алгоритм расчета теплового эффекта основной окислительно-восстановительной реакции для произвольной температуры учитывает термодинамические свойства веществ, участвующих в реакциях, и заключается в следующем [3]:

1. составление таблицы из справочных данных (коэффициентов выражения для  $C_p(T)$  и стандартных энтальпий (теплового эффекта) исходных веществ и продуктов, входящих в реакцию);

2. запись термохимического уравнения теплового эффекта реакции при  $T=298\text{ K}$ ;

3. расчета изменения коэффициентов в выражении теплоёмкости в ходе реакции;

4. вычисление теплового эффекта реакции при заданной температуре ( $T_2$ ).

Для анализа теплового режима работы аккумуляторной СХЭ – определения характерных температур основных элементов базового элемента батареи принята математическая модель теплопереноса с учетом Джоулева тепловыделения и тепловыделения в результате химических и электрохимических реакций.

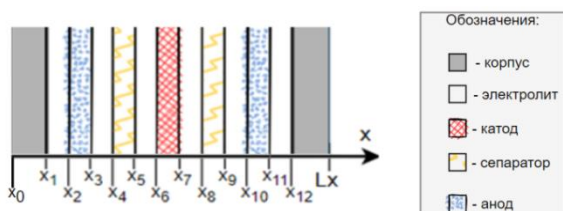


Рис. 1. Область решения задачи моделирования температурных полей в аккумуляторной ячейке.

Численный анализ проведён в типичном диапазоне изменения значений влияющих на теплоотвод факторов  $T_{\text{surround}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\alpha=(5-10)\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Такие значения параметров теплообмена характерны для режима эксплуатации в условиях воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции электрохимических систем хранения электрической энергии. При этом в анализе характерных температур применялись типичные значения для скорости разряда батарей (C-rate): C/20;

C/10; C/5. Так, например, для батареи ёмкостью  $C=10\text{ А}\cdot\text{ч}$  скорость разряда составит:  $0,5\text{ А}\cdot\text{ч}$  при времени разряда 20ч (C-rate – C/20);  $1\text{ А}\cdot\text{ч}$  при времени разряда 10ч (C-rate – C/10);  $2\text{ А}\cdot\text{ч}$  при времени разряда 5ч (C-rate – C/5).

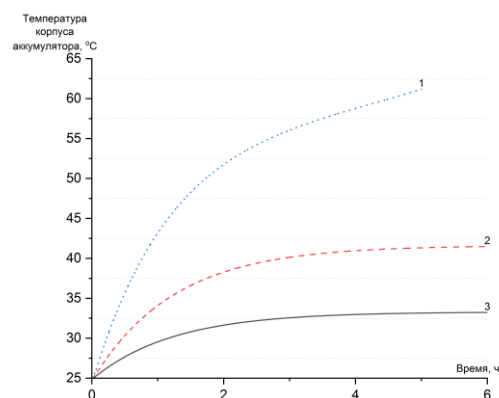


Рис. 2. Зависимости температуры внешней поверхности корпуса аккумуляторной ячейки системы хранения электроэнергии от времени при её работе в режиме разряда при  $T_{\text{surround}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\alpha=5\text{ Вт}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}^{-1}$  (кривая 1 – C/5; кривая 2 – C/10; кривая 3 – C/20) с учетом тепловыделение экзотермических электродных реакций и “Джоулева” нагрева.

Результаты выполненных теоретических исследований показывают возможность анализа условий возгорания (достижения высоких температур) и характеристик процесса “теплового разгона” аккумуляторных батарей с учётом основных физических и химических процессов протекающих в системе «анод-электродлит-катод-корпус батареи». Также результаты математического моделирования физических и химических процессов во “внутрибатарейном” пространстве обосновывают возможность регулирования тепловых режимов базовых ячеек электрохимических систем хранения электрической энергии путём интенсификации процессов теплоотвода с внешних поверхностей корпусов таких ячеек.

### Список литературы

- G.V. Kuznetsov, E.V. Kravchenko. Evaluation of the limiting conditions for operation of a large electrochemical energy storage system. Journal of Energy Storage, Volume 65, 2023, 107384, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107384>.
- G.V. Kuznetsov, E.V. Kravchenko Estimation of the representative temperatures of a typical electrochemical battery cell when cooling under natural convection conditions. Journal of Energy Storage, Volume 73, Part C, 2023, 109168, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109168>.
- G.V. Kuznetsov, E.V. Kravchenko Influence of the air gap between two cells of the storage battery on the thermal conditions of its operation: Numerical analysis and reliability assessment. // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2023 <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117688>.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОТОЧНЫХ АППАРАТОВ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ДЛЯ СРЕД С ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

Лаптев А.Г.<sup>1</sup>, Фарахов М.И.<sup>2</sup>, Ахмитшин А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет,  
ул. Красносельская 51, Казань, 420066, Россия

<sup>2</sup> ООО «Инженерно-Внедренческий Центр «Инжехим»,  
ул. Эсперанто 62, Казань, 420107, Россия

Рассматриваются пластинчатые теплообменники, а также типа «труба в трубе», где происходит нагрев сред с повышенной вязкостью (мазут, масла и др.) через разделяющую стенку греющим водяным паром или горячей водой. В канале, где движется вязкая среда расположены поверхностные (выступы, накатки и др.) или объемные (мелкие нерегулярные элементы) интенсификаторы теплообмена. Поверхностные интенсификаторы обеспечивают переход от ламинарного режима движения к турбулентному при числах Рейнольдса  $Re > 500-1000$ , а объемные при  $Re > 50$ . За счет турбулизации вязкой среды происходит значительное повышение коэффициентов теплоотдачи (в 5–20 раз).

Для расчета эффективности теплообмена в аппаратах с интенсификаторами разработана математическая модель расчета теплового коэффициента полезного действия. Математическая модель основана на гидродинамической структуре потока, где теплоносители условно делятся на ряд последовательных ячеек полного перемешивания: холодного и горячего потоков  $m_x$  и  $m_g$ . Число ячеек зависит от значения числа Пекле (критерий Боденштейна), который характеризует обратное перемешивание теплоносителя. В результате решения уравнений ячейочной модели в явном виде получены выражения для расчета тепловой эффективности процесса в каналах с интенсификаторами, где основными параметрами является тепловое число единиц переноса и число ячеек полного перемешивания. Тепловые эффективности нагрева холодного ( $x$ ) теплоносителя горячим ( $g$ ) записывается в виде:

$$\eta_x = \frac{T_{xk} - T_{xn}}{T_{gn} - T_{xn}}, \quad \eta_g = \frac{T_{gn} - T_{gk}}{T_{gn} - T_{xn}}. \quad (1)$$

Решение ячейочной математической модели при противотоке теплоносителей для холодной (нагреваемой) среды имеет вид:

$$\text{при } n_x > m_g, \quad \eta_x = 1 - \left(1 + \frac{N_x m_g}{n_x}\right)^{-\frac{n_x}{m_g}}. \quad (2)$$

$$\text{при } m_g > n_x, \quad \eta_x = 1 - \left(1 + \frac{N_x n_x}{m_g}\right)^{-\frac{m_g}{n_x}}, \quad (3)$$

Для горячего теплоносителя

$$\text{при } n_x > m_g, \quad \eta_g = 1 - \left(1 + \frac{N_g m_g}{n_x}\right)^{-\frac{n_x}{m_g}}. \quad (4)$$

$$\text{при } m_g > n_x, \quad \eta_g = 1 - \left(1 + \frac{N_g n_x}{m_g}\right)^{-\frac{m_g}{n_x}}. \quad (5)$$

где  $N_g = KF/L_g C_{pg}$ ,  $N_x = KF/L_x C_{px}$  – числа единиц переноса для горячего и холодного теплоносителей.

Для проверки представленных выражений использовали экспериментальные данные [1], полученные в теплообменнике «труба в трубе», где во внутренней трубе размещена хаотичная металлическая насадка «Инжехим-2012» с номинальным размером одного элемента 6 мм и удельной поверхностью  $av = 580 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Внутренняя труба имеет диаметр 25 мм, а наружная 57 мм, длина насадочной упаковки во внутренней трубе 1 метр. Исследован теплообмен от горячей воды к индустриальному маслу. Получены графические зависимости тепловой эффективности нагрева индустриального масла в теплообменнике с объемными интенсификаторами. Установлено влияние обратного перемешивания нагреваемого масла на эффективность теплообмена. На рис. 1. даны зависимости тепловой эффективности нагрева масла в разработанном теплообменнике от числа Рейнольдса. Из графических зависимостей наглядно видно влияние обратного перемешивания (кривые 2а и 3а) на эффективность процесса по сравнению с моделью идеального вытеснения (кривые 2б и 3б). Кривая 1 – тепловая эффективность теплообменника без интенсификаторов, т.е. при ламинарном режиме течения масла.

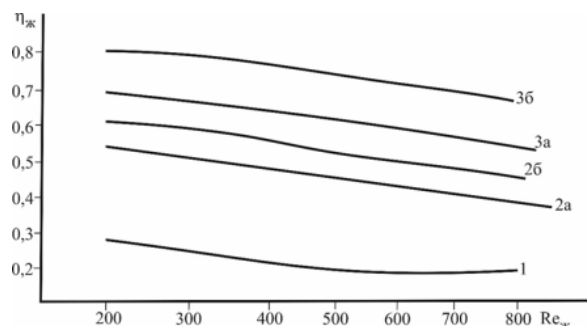


Рис. 1. Зависимость тепловой эффективности нагрева индустриального масла  $T_{жн} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  водяным паром  $T_{пар} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  от числа Рейнольдса: 1 – гладкий канал; 2 – поверхностные интенсификаторы; 3 – объемные интенсификаторы; а – расчет с учетом обратного перемешивания теплоносителей; б – расчет по модели идеального вытеснения.

Разработанная математическая модель может применяться при проектировании или модернизации теплообменных аппаратов.

### Список литературы

1. Laptev, A. G. Thermal hydraulic effectiveness of heat exchangers with volumetric enhancers for high-viscosity liquid media / A. G. Laptev, T. M. Farakhov, E. A. Lapteva // Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Vol. 30. – № 2. – P. 293-299.

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИНГИБИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Рощин Е.А.<sup>1</sup>, Кравченко М.Н.<sup>1,2</sup>, Кочеткова В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,  
пр. Ленинский 65, Москва, 119991, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, 119991, Россия

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к использованию наноматериалов в нефтегазовой отрасли для регулирования процессов как на этапе первичного вскрытия (бурения скважин), так и на других этапах разработки месторождений. Особое место в научных исследованиях занимают проблемы добычи углеводородов из газогидратных залежей, например методом снижения давления [1]. В данной работе обсуждаются особенности вскрытия пластов Мессояхского месторождения, где разработка газовых/нефтяных залежей на различных участках осложнена наличием вышележающих газогидратных слоев, что может приводить к диссоциации природных гидратов с выходом свободного метана в буровую колонну. Образование техногенных газогидратов может происходить непосредственно в буровой колонне, приводить к прихвату и разрушению бурового инструмента.

Традиционно борьба с гидратообразованием основана на использовании тепловых методов и ингибиторов, однако при бурении не всегда возможно воспользоваться этими подходами в связи с глубинным залеганием продуктивных горизонтов. Добавление наночастиц в состав буровых растворов позволяет корректировать тепловые и реологические свойства, регулировать гидродинамику процесса, в том числе, усиливать смазывающую способность бурового раствора [2].

Целью данной работы является изучение применимости в процессах бурения фазовых переходных материалов (ФПМ) в капсулированном виде, способных аккумулировать или выделять тепловую энергию в зависимости от того, достигнута ли температура фазового перехода. Авторами ведутся научные изыскания как в плане подбора ФПМ в качестве ядра, так и метода создания "проницаемой" оболочки, способной противостоять механическому разрушению и доставлять тепловой "источник" непосредственно в критически опасную зону, что позволит предотвратить образование техногенных гидратов и, тем самым, избежать аварийных ситуаций при бурении или транспортировке продукции по стволу скважины. Авторы разработали нанокапсулированный ФПМ на основе биополимера PLA. Технологический режим бурения в условиях Мессояхского месторождения отвечает диапазону температуры в циркуляционной системе 16 - 18 °С (Рис.1), поэтому в качестве вещества ядра, заполняющего нано/микро капсулы подходят, например, олеиновая кислота, имеющая теплоту плавления около 16 °С или гексадекан с температурой плавления 18,2 °С, изначально охлажденные до температуры порядка 14 °С, что позволяет замедлить процесс

энерговыведения при плавлении вещества ядра непосредственно до момента доставки в зону гидратообразования.

Для расчета требуемых условий применения нанокапсулированных ФПМ, была создана математическая модель и вычислительный алгоритм, позволяющий рассчитывать процесс движения многофазных жидкостей в циркуляционной установке с учетом образования/диссоциации газогидратов при изменении термобарического состояния системы, в том числе, за счет выделения тепла при плавлении капсулированного ядра ФПМ.

Авторами проведен прогнозный расчет процесса бурения газогидратной залежи Мессояхского месторождения в интервале глубин вскрытия 730 - 770 м (рис. 1) при использовании стандартного бурового раствора и раствора, содержащего капсулированные ФПМ. Рассмотрены несколько вариантов организации процесса тепловыделения, в том числе и с предварительным охлаждением капсул с ядром ФПМ.

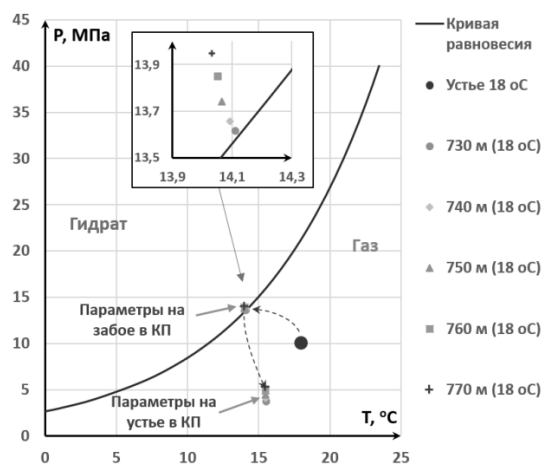


Рис. 1. Термобарические параметры в циркуляционной системе.

### Список литературы

1. Кравченко М. Н., Чидякина О.О. Гидродинамические аспекты поиска подходов к разработке газогидратных месторождений / Упругость и неупругость: материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 января 2021 года. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом (типография), 2021. – С. 491-498.
2. Исследование влияния добавки наночастиц на свойства буровых растворов / А. В. Минаков, Е. И. Михиенкова, В. А. Жигарев [и др.] // Коллоидный журнал. – 2018. – Т. 80, № 4. – С. 435-444.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-77-10081).



Современная климатическая повестка связана со снижением роста температуры на планете и требует сокращения антропогенного выброса углекислоты в атмосферу. Одним из основных источников выброса углекислоты в атмосферу является энергетика на органическом топливе. Её доля в мировом энергобалансе велика и, даже в условия снижения, продолжает оставаться доминирующей. Поэтому задачи развития энергетики на органическом топливе рассматривают через призму сокращения выбросов углекислоты в атмосферу, в том числе и в России.

Одним из перспективных вариантов развития энергетики считается сжигание органического топлива в кислороде с переходом на новое рабочее тело – диоксид углерода. В этом случае не требуется применение систем улавливания CO<sub>2</sub> из продуктов сгорания, а его избыток может выводиться из цикла под рабочим давлением. Такое техническое решение успешно реализовано в г. Ла-Порте, Техас, США [1]. Практическая реализация CO<sub>2</sub>-цикла усилила интерес к подобным установкам. Широко известны исследования университета Граца (Graz University, Austria), компании 8 Rivers Capital (USA), National Energy Technology Laboratory (Pittsburg, USA). Компания Net Power (Texas, USA) реализовала энергетическую установку мощностью 50 МВт [2]. Одновременно изучением CO<sub>2</sub>-циклов занимаются в ОИВТ РАН, МЭИ, НГТУ. Вместе с тем единообразный подход в исследованиях отсутствует, что затрудняет сравнение различных вариантов CO<sub>2</sub>-циклов как между собой, так и с другими известными технологиями производства электроэнергии.

Целью исследования является комплексное рассмотрение энергоустановок на базе различных конфигураций кислородно-топливных энергетических циклов с использованием диоксида углерода в качестве рабочего тела с определением взаимосвязанных термодинамических, энергетических и технико-экономических характеристик для выявления оптимальной конфигурации углекислотной установки по критерию эффективности производства эл/эн с нулевыми выбросами и сравнения с традиционными тепловыми электростанциями.

В статье рассмотрено четыре варианта установок на основе базовых конфигураций CO<sub>2</sub>-циклов [3, 4], отличающихся способом повышения давления и наличием/отсутствием конденсации рабочего тела

В работе анализируются КПД выработки и отпуска электроэнергии, удельные расходы топлива, затраты электроэнергии на собственные нужды установок, эмиссия углекислого газа, удельные капиталовложения. Для этого используется методический подход, в основе которого лежат балансовые уравнения и уравнения затрат электроэнергии в оборудовании собственных нужд. Уравнения затрат электроэнергии

опираются на физические параметры рабочих сред и удельные показатели. Такой подход позволяет с единых позиций вести анализ разных технических решений при реализации CO<sub>2</sub>-циклов. Более того он позволяет вести сравнение установок на основе CO<sub>2</sub>-циклов с иными технологиями производства электроэнергии на основе сжигания органического топлива.

К сравнению помимо различных вариантов цикла на углекислом газе приняты технологии на основе циклов Ренкина, при его реализации в виде технологии сверхкритических и суперсверхкритических параметров; Брайтона в виде газотурбинной установки; Брайтона-Ренкина в виде парогазовой установки. Сравнение осуществляется с учетом полного улавливания CO<sub>2</sub> в установках на основе энергетических циклов на углекислом газе и возможности оснащения традиционных энергоблоков системами захвата 90% CO<sub>2</sub> из дымовых газов. Эффективность традиционных технологий принимается на уровне наилучших мировых образцов.

Определено, что КПД выработки электроэнергии энергоблоками на основе CO<sub>2</sub> циклов превосходит традиционные электростанции. Рассчитано, что собственные нужды CO<sub>2</sub>-энергоблоков составляют около 30-35%, из-за чего КПД отпуска электроэнергии находится на уровне 40-41,5%, что делает их предпочтительнее ПСУ и ГТУ с CCS, но заметно уступает передовым ПГУ с CCS. При этом затраты энергии на улавливание и отвод углекислого газа в CO<sub>2</sub> циклах не превышают 1,5%, тогда как в традиционных технологиях затраты на CCS составляют 12-20%. УРУТ наиболее эффективных CO<sub>2</sub>-технологий лежит в пределах 290-310 г у.т./кВтч против ~230 г у.т./кВтч у ПГУ. Удельные капиталовложения в CO<sub>2</sub>-технологии составляют 939-1439 \$/кВт в зависимости от вида технологической схемы, начальных параметров и единичной мощности установок.

### Список литературы

1. La Porte Test Facility. NET Power. - <https://netpower.com/la-porte-test-facility> Дата обращения 05.03.2023. - Чтение с экрана.
2. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. <https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Datal-pager.pdf>. - Чтение с экрана.
3. Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration / P. A. Shchinnikov, O. V. Borush, A. A. Frantseva, I. S. Sadkin // E3S Web of Conferences : Proceedings of the International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research 2021", Irkutsk, 25–28 мая 2021 года.
4. Vol. 289. – Irkutsk: EDP Sciences, 2021. – P. 02001. – DOI 10.1051/e3sconf/202128902001
5. Алексеенко С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO<sub>2</sub>-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. 2023. - Т. 30, № 1. - С. 89-98.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00035).*

## ВЛИЯНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АММИАЧНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Сеськин И.Н.<sup>2</sup>, Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Тепловые насосы во всем мире рассматриваются в качестве основной технологии энергосбережения.

Высокотемпературные тепловые насосы (ВТН), позволяющие осуществлять нагрев теплоносителей до температур более 80°C, определены в качестве приоритетного направления развития этой техники [1]. В качестве источников низкотемпературного тепла (НИТ) для экологически чистого теплоснабжения предлагается использовать воду природных водоемов и рек с предельно низкими температурами (ТНИТ ≤ 3...5°C) в зимний период времени.

Для увеличения энергетической эффективности рабочих циклов аммиачных ВТН предложено использовать процессы внешнего регенеративного теплообмена (рис. 1, в, г, д, е). В отличие от традиционного внутрициклового регенеративного теплообмена (рис. 1, а, б), здесь неэффективно или частично используемые тепловые потоки рабочего цикла способствуют повышению ТНИТ на входе в испаритель по сравнению с базовым циклом (рис. 1, а).

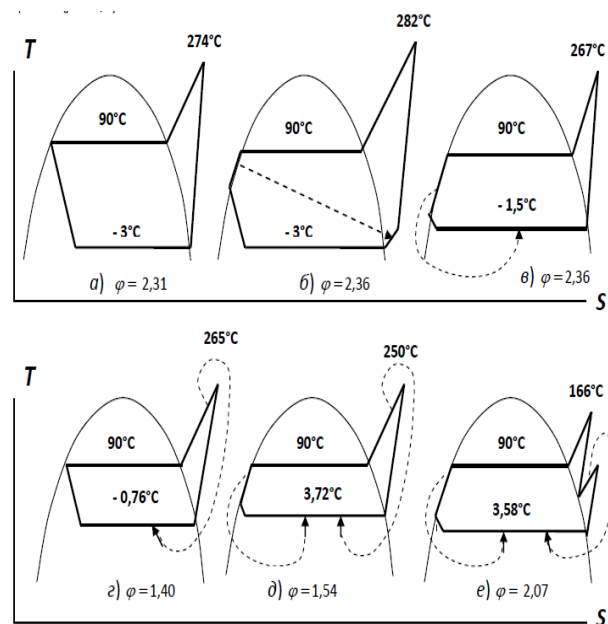


Рис. 1. Термодинамические циклы в координатах «температура-энтропия».

При неизменном объемном расходе воды через испаритель ВТН это позволяет повысить ее входную температуру. Таким образом, становится принципиально возможным сам факт использования для работы ВТН воды рек и озер с температурой, близкой к температуре замерзания (ТНИТ ~0,0°C). Ранее такой вариант работы тепловых насосов никогда не рассматривался в качестве рабочего по причине неизбежного внутреннего обледенения испарителя.

При использовании внешнего регенеративного теплообмена возрастает удельная холодопроизводительность цикла, снижается температура конечного нагрева пара в процессе компримирования, а также расход аммиака (R-717) в рабочем контуре ВТН.

Однако, при внешней регенерации (рис. 1, в, г, д, е) значения коэффициентов преобразования  $\varphi$  для циклов с внешней регенерацией могут существенно снижаться по сравнению с вариантами обычной работы (рис. 1, а, б). Переход к двухступенчатому компримированию (рис. 1, е) с промежуточным охлаждением позволяет нивелировать этот недостаток. В результате снижаются затраты энергии на компримирование с одновременным уменьшением температуры пара на выходе из двухступенчатого компрессора.

Таким образом, использование внешней регенерации открывает новые возможности для применения высокопроизводительных пароконденсационных ВТН для промышленного теплоснабжения на базе тепла возобновляемого тепла теплоисточников с предельно низкими температурами.

### Список литературы

1. Елистратов С.Л. Высокотемпературные тепловые насосы // Сборник статей «Десять прорывных идей в энергетике на ближайшие десять лет» Глобальной энергетической ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики. - М. - 2021- Т.2.- С. 85-99.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЁТНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ПРИ ГОРЕНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Штым К.А.<sup>1</sup>, Кулагина Т.А.<sup>2</sup>, Соловьёва Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет,  
п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Россия

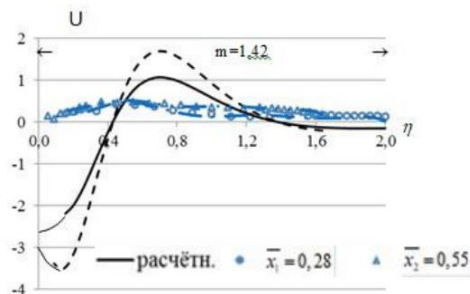
<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

Методика аэродинамического расчёта применяется для проектирования новых устройств. По результатам исследований, проведенных в одном из двух циклонно-вихревых предтопок (ЦВП) котла КВГМ-100-150 ст.№5 Владивостокской ТЭЦ-1, выполнен сравнительный анализ экспериментальных и расчётных аэродинамических параметров закрученного потока в безразмерном виде. Сравниваются аэродинамические параметры при сжигании ("горячий" поток) и без сжигания ("холодный" поток) природного газа в ЦВПах, рассчитанные по методике ЛПИ-ДВПИ [1].

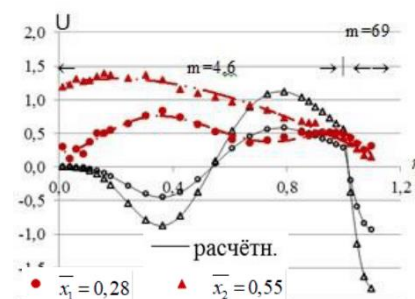
Методика оправдала себя при обобщении полей скорости и давлений в циклонно-вихревых камерах различного назначения при плотности потока  $\rho = \text{const}$ . Согласно методике, параметры потока представляются в безразмерном виде, где за масштабные величины принимается максимальная тангенциальная скорость потока  $W_{\phi \text{ max}}$  в сечении и радиус  $R_{\phi \text{ max}}$ , на котором она максимальна. Для сравнения, в тезисах, приводятся результаты изменения осевой  $U$  составляющей вектора полной скорости (см. рис. 1) по радиусу ЦВП "холодного" потока (см. рис. 1, а), "горячего" потока при основном режиме работы ЦВП котла (см. рис. 1, б) и "горячего" поток при растопочном режиме (см. рис. 1, в).

В формуле расчёта  $U$  [1] используется формпараметр  $m$ . Экспериментально определяемый формпараметр  $m$  зависит от условий генерации закрученного потока, геометрических характеристик, режима работы и других факторов. Величина формпараметра  $m$  по экспериментальным данным для "холодного" потока составила  $m=1,42$ , для "горячего" в основном режиме работы в квазипотенциальной области  $m=69$  и в квазитвёрдой области  $m=4,6$ , а для "горячего" при растопочном режиме работы в квазипотенциальной области  $m=3,1$ , в квазитвёрдой области  $m=4,4$ .

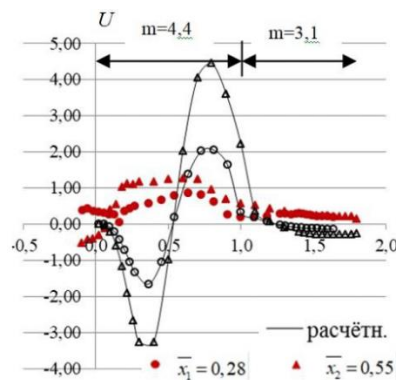
Как видно из графиков (см. рис.1), сравнительный анализ экспериментальных и расчётных данных осевой скорости потока в безразмерном виде, с учётом экспериментально рассчитанного формпараметра  $m$ , показал полное не соответствие и в первом ( $\bar{x}_1=0,28$ ) и во втором ( $\bar{x}_2=0,55$ ) сечении ЦВП. Несоответствие расчётных и экспериментальных значений осевой скорости потока объясняется двумя причинами: 1 тем, что в методике, не учтено влияние комбинированного ввода воздуха в ЦВП, т.е. осевого и тангенциального ввода. При расчёте  $U$  [1] экспериментальное значение формпараметра  $m$  не учитывает все нюансы генерации закрученного потока; 2 распределение осевой скорости  $U$  дано в расчётной формуле в [1] с учётом константы интегрирования  $C(\eta)=0$ .



а) режим без горения



б) основной режим с горением



в) растопочный режим

Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчётных значений безразмерной осевой скорости  $U$  по сечениям  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  ЦВП.

Таким образом, целесообразно внести корректировки в методику аэродинамического расчёта, используя принятые масштабные величины  $W_{\phi \text{ max}}$  и радиус  $R_{\phi \text{ max}}$ , которые позволяют учитывать при проектировании циклонно-вихревых камер процесс горения топлива, существенно влияющий на осевую составляющую вектора полной скорости.

### Список литературы

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками // Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та. – 2012.

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА ТОПЛИВА НА ПРОЦЕСС ЕГО ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Табакаев Р.Б.<sup>1,2</sup>, Калинин И.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
ул. Володарского 6, Тюмень, 625003, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
ул. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

Одной из наиболее важных мировых проблем в настоящее время является замедление темпов развития парникового эффекта и снижение количества вредных выбросов в атмосферу. Согласно экспертной оценке [1], наибольшее негативное влияние на изменение климата нашей планеты оказывает энергетическая отрасль, базирующаяся на использовании ископаемых видов топлива (уголь, газ и нефть). В связи с этим мировое сообщество стремится заместить ископаемые ресурсы углерод-нейтральными и экологичными возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Однако, по многочисленным прогнозам [2, 3], ископаемые топлива наряду с ВИЭ еще долгое время будут занимать существенную часть в мировом топливно-энергетическом балансе.

Таким образом, необходимо искать пути повышения экологичности энергетического использования ископаемых топлив, в особенности угля. В настоящее время дополнительно к уже ставшим традиционными решениям (применение внутритопочных устройств и строительство очистных сооружений) рассматривается направление предварительной обработки топлива посредством температуры (пиролиз, газификация и т.п.). Данный подход позволяет повысить теплотехнические характеристики топлива и его насыпную плотность, снизить долю балласта, благодаря чему происходит существенное уменьшение удельных экологических и экономических издержек в процессе его транспортировки и энергетического использования.

Одним из перспективных направлений рассматривают СВЧ-пиролиз органических топлив, как способ объемной высокоскоростной переработки, позволяющий получить высококалорийный газовый продукт с высокой долей водорода. В процессе СВЧ-пиролиза наблюдается взаимодействие электрической компоненты электромагнитного поля с компонентами вещества, обладающих высокой мнимой частью диэлектрической проницаемости (вода, минеральные примеси), и органической частью топлива. Как известно, в процессе метаморфических преобразований топлива происходят изменения в его органической и минеральной составляющих, что приводит к трансформации теплотехнических, теплофизических и электрофизических характеристик. К настоящему времени широко изучено поведение некоторых видов топлива при СВЧ-воздействии, изучена влияние добавление микроволновых поглотителей на основе железа и его оксидов, рассмотрена возможность со-пиролиза нескольких видов топлив, однако систематизация данных по влиянию степени метаморфизма топлива на процесс его термической переработки под воздействием СВЧ-излучения не приведена, что и рассмотрено в качестве цели настоящей работы.

В качестве объектов исследования рассмотрено несколько видов растительной биомассы (сосновые опилки, солома, скорлупа кедровых орехов), отходы животноводства, торф, бурый и каменный угли. Исследования проведены на экспериментальном стенде СВЧ-переработки, подробно описанном в [4].

В ходе проведения экспериментов установлено, что независимо от степени метаморфизма при СВЧ-воздействии поглощение энергии топливом протекает нелинейно (рис. 1), резко возрастающая в момент выхода пиролизной смолы и пирогенетической воды. В процессе переработки наблюдаются искровые разряды, способствующие возникновению и протеканию плазмо-химического механизма реакций, что приводит к росту содержания водорода (18-29 % об.) и снижению образования углекислого газа (менее 9 % об.) в пиролизном газе.

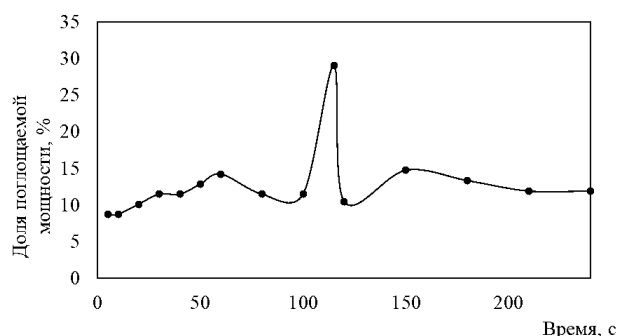


Рис. 1. Доля поглощения мощности образцом (на примере отхода животноводства) в процессе СВЧ-пиролиза

Отмечено, что с ростом степени метаморфизма доля выхода твердого углеродистого остатка увеличивается, а жидких продуктов, наоборот - снижается. Время инициации процесса не зависит от степени метаморфизма топлива и обусловлено его электрофизическими характеристиками.

### Список литературы

1. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution, International Energy Agency, Paris, 2016.
2. Sun Y., Zhu L., Xu Z., Xiao L., Zhang J., Zhang J. Characteristic analysis and forecast of electricity supply and demand in APEC // Global Energy Interconnection. 2019. V. 2, N 5. P. 413–422.
3. Wang B., Wang Q., Wei Y.-M., Li Z.-P. Role of renewable energy in China's energy security and climate change mitigation: An index decomposition analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 90. P. 187–194.
4. Табакаев Р.Б., Димитрий И.Д., Калинин И.К., Астафьев А.В., Гиль А.В., Ибраева К.Т., Чумерин П.Ю. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 190–199.

Работа выполнена при поддержке  
РНФ (№ 22-19-00410).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБОБЩЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ ПОТОКОВ В РЕШЕТКАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Тищенко В.А., Тищенко А.А., Грибин В.Г., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Бердюгин К.А., Смирнов А.О., Соколов Д.Г.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

Влажно-паровая среда, движущаяся в последних ступенях конденсационных паровых турбин, вовлечена во множество механических и термодинамических процессов, которые влияют на характеристики надежности и эффективности турбомашин [1, 2]. Актуальность изучения проявления этих эффектов остается высокой на протяжении всего времени проектирования и эксплуатации подобного рода турбин. Основной проблемой исследования газодинамики двухфазных сред в элементах проточных частей является сложность проведения исследований, которая заключается как в подготовке самого эксперимента (обеспечение стендовой базы необходимыми системами подготовки, подвода и отвода влажно-парового рабочего тела), так и в реализации измерений необходимых параметров – дискретная среда в подобного рода потоках представляет собой полидисперсную систему, размеры, скорости и направления движения которой варьируются в широком диапазоне значений. Одним из наиболее эффективных подходов, способным обеспечить большой объем информации о характеристиках частиц жидкой фазы, движущихся в межлопаточных каналах последних ступеней турбин, является применение систем лазерной диагностики потоков [3], реализующих методы Particle Tracking Velocimetry (PTV) и Particle Image Velocimetry (PIV). Они, помимо количественных данных о влаге, предоставляют также визуальные картины, описывающие структуру капельных потоков в исследуемых областях. В настоящей работе представлено обобщение результатов применения этих подходов во влажно-паровых потоках на различных объектах исследования, представляющих собой сопловые решетки ступеней паровых турбин.

Экспериментальные исследования проводились на стенде КВП (контур влажного пара). Эта установка, расположенная на кафедре паровых и газовых турбин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», представляет собой замкнутый контур по рабочему телу (пару), которое поступает из отбора паровой турбины ТЭЦ МЭИ. Стенд позволяет производить исследование потоков перегретого, насыщенного и влажного пара в широком диапазоне чисел Маха в каналах различной геометрии, в том числе, турбинных решетках. В качестве штатной системы измерения на стенде используется система лазерной диагностики «ПОЛИС».

В результате обобщения визуальных картин структуры капельных потоков определены основные области концентрации частиц жидкой фазы как внутри межлопаточных каналов, так и за ними, рассмотрен процесс схода водяной пленки с поверхности лопатки с последующим формированием крупной эрозивно-опасной влаги.

Исследование количественных характеристик капель, полученных с помощью методов PIV и PTV позволило выделить группы частиц жидкой фазы, движущихся в межлопаточных каналах и ответственных за формирование водяной пленки на его поверхностях, классифицировать основные потоки влаги, участвующие в формировании капельной структуры за турбинной решеткой [4, 5]. Применение PTV метода вблизи поверхностей межлопаточных каналов позволило проанализировать механизм взаимодействия частиц жидкой фазы со стенками – определить характеристики вторичных капель, образующихся после соударения (скорости, направления) и выделить зону их последующего движения в межлопаточном канале. Комплексный анализ выявил взаимное влияние геометрии решетки и параметров течения на процессы оседания влаги, что позволило сформулировать предложения по оптимизации формы решеток с целью повышения их сепарационной возможности.

Определено влияние основных режимных параметров потока (начальная влажность, начальное давление, число Маха за решеткой) на среднеинтегральные характеристики влажной среды, формирующейся за исследуемой решеткой.

На основе опыта, наработанного за долгие годы применения систем лазерной диагностики для исследования влажно-паровых потоков, сформулированы основные проблемы их применения в подобного рода условиях и предложены подходы, повышающие качество их использования. Одним из методов повышения качества получаемых данных является применение нейронных сетей при обработке фотографий засвеченных каплей. Предложена базовая концепция применения этих подходов для систем лазерной диагностики потоков в условиях влажного пара.

### Список литературы

1. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987. 328 с.
2. Влияние влажности на экономичность паровых турбин / Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.А. Тищенко и др. // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 96–107.
3. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7, № 3. С. 79–85.
4. Experimental studies of polydispersed wet steam flows in a turbine blade cascade / G. Filippov, V. Gribin, A. Tishchenko et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. Vol. 228, № 2. P. 168–177.
5. Experimental Study of the Features of the Motion of Liquid-Phase Particles in the Interblade Channel of the Nozzle Array of a Steam Turbine / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, V.A. Tishchenko et al. // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51, № 1. P. 82–88.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-19-00445).*

## Авторский указатель

- Абаймов Н.А., 92  
Абдуллаев Р.Н., 129, 136  
Абдуллин Р.Ф., 59  
Агажанов А.Ш., 129, 136  
Александров Д.В., 103  
Алексеев М.В., 33, 101  
Алхасов А.Б., 163  
Алхасова Д.А., 163  
Анисимов В.Д., 21  
Антонов Д.В., 8, 62  
Ануфриенко А.В., 168  
Арефьев К.Ю., 83  
Арушанян Р.Р., 73  
Архипов В.А., 35, 63  
Архипов В.Е., 49  
Ахмитшин А.А., 173  
Базилевский А.В., 34  
Байкин А.Н., 59  
Баннов А.Г., 121  
Басалаев С.А., 35  
Белослудов В.Р., 41  
Белослудцев В.В., 49  
Беляев П. Е., 102  
Беляева А.В., 36  
Бердюгин К.А., 109, 179  
Бессонов И.С., 103  
Бильский А.В., 144  
Бляхман Ф.А., 103  
Богомолова А.И., 121  
Божко Ю.Ю., 41  
Бойко Е.В., 141  
Борисов Б.В., 171  
Боярских К.А., 122  
Брацун Д.А., 142, 143  
Будник С.А., 7  
Булат П.В., 23, 85  
Бушуева А.В., 37  
Бычков А.Л., 158  
Ваганов Р.А., 38  
Ванькова О.С., 28  
Васильев А.Ю., 164  
Васильев М.М., 69  
Вдовин М.И., 10  
Веретенников С.В., 13, 15, 81  
Ветров А.Л., 20  
Витовский О.В., 18, 19  
Вокин Л.О., 23  
Волков К.Н., 23, 85  
Волков С.М., 39  
Воробьев М.А., 39, 40  
Высокоморная О.В., 62  
Гаврилов И.Ю., 109, 179  
Газан С.Х., 76  
Гайдабрус М.А., 165  
Гареев Т.И., 123, 133  
Гатапова Е.Я., 14  
Гец К.В., 41  
Глуздов Д.С., 14  
Голдобин Д.С., 22, 26  
Головин С.В., 59  
Гордеева А.И., 148, 149  
Гордиенко М.Р., 126  
Гореликова А.Е., 39  
Горячев В.Д., 89  
Грибин В.Г., 109, 179  
Груздь С.А., 42  
Гурьянов А.И., 13, 81, 82, 84  
Гурьянова М.М., 84  
Гуськов О.В., 83, 86  
Давыдов М.Н., 70, 71  
Двойнишников С.В., 113  
Дектерев А.А., 20, 90, 166, 167  
Дектерев Ар.А., 90, 167  
Дектерев Д.А., 90, 166, 167  
Демиденко Н.В., 28  
Денисенко В.В., 91  
Деревянников И.А., 43  
Диева Н.Н., 50  
Дмитрачков Д.К., 59  
Дмитриева А.А., 51  
Дулин В.М., 108, 115, 116, 118  
Дутова О.С., 124  
Евдокименко И.А., 57  
Евдокимов О.А., 13, 15, 81, 84  
Елагин И.А., 153  
Елистратов С.Л., 5, 168, 176  
Ермакова О.С., 10  
Ерманюк Е.В., 70  
Ершов М.И., 92  
Жданов Р.К., 41  
Жигарев В.А., 38, 44  
Зайцев Д.В., 49  
Зайцев О. В., 133  
Зайцев О.В., 125  
Зайцева О.Н., 21  
Зверков И.Д., 166  
Зимасова А.Р., 45  
Злотник А.А., 93, 94  
Золоторёв Н.Н., 35  
Зорькина А.И., 72  
Зотова А.Н., 10  
Зубанов К.С., 113  
Зубарев А.Ю., 103  
Иванов Н.С., 77  
Ильинская Д.Н., 95  
Ильченко М.А., 86  
Исаенков С.В., 65  
Исламова А.Г., 46  
Кабардин И.К., 113, 126  
Кабардин П.А., 114  
Кабов О.А., 43, 49, 72  
Какаулин С.В., 126  
Калинин С.А., 59  
Калинич И.К., 169, 178  
Карпов Д.И., 154, 159  
Карпунин И.Э., 47  
Кашинский О.Н., 40  
Кашкаров Е.Б., 170  
Кашкарова М.В., 96, 97  
Керимбекова С.А., 8  
Ким И.С., 166  
Кирчанова Е.Е., 115  
Клепиков Д.М., 147  
Клименко Л.С., 54  
Князьков В.А., 146  
Ковалев А.В., 144  
Ковыркина О.А., 98, 104  
Козлов В.Г., 45, 61  
Козлов Н.В., 45  
Козловский Ю.М., 124, 127  
Колесников Б.П., 73  
Колесова А.А., 15  
Комаров А. Г., 132  
Комова О.В., 82  
Копейкин Р.Р., 59  
Корнилицын А.Р., 148, 149  
Коробейников С.М., 154, 155, 158, 159  
Коробейщиков Н.Г., 145  
Косач А.В., 50  
Костин П.А., 156  
Косяков В.А., 48  
Кочеткова В.А., 174  
Кочкин Д.Ю., 43, 49  
Кравцова А.Ю., 96  
Кравченко Е.В., 172  
Кравченко М.Н., 50, 174  
Кудияров В.Н., 170  
Кудрявцева И.В., 134  
Кузма-Кичта Ю.А., 77  
Кузнецов Г.В., 171, 172  
Куйбин П.А., 16  
Кукшинов Н.В., 51, 83, 128  
Кулагина Т.А., 177  
Куперштох А.Л., 157  
Куприянец Т.А., 102  
Курдюмов А.С., 40  
Курдюмов Н.Е., 170  
Кушнарев Д.А., 24  
Лавриненко С.В., 147  
Лавронов К.Д., 116  
Лага Е.Ю., 147  
Лаптев А.Г., 173  
Лебеда Л.С., 18, 19  
Лебедев А.С., 118  
Левин А.А., 74  
Лежнин С.И., 33  
Лидер А.М., 170  
Литвинцев К.Ю., 20, 99  
Лобанов П.Д., 52, 57  
Локтионов В.Д., 17  
Ломоносов Т.А., 93, 94  
Лукашов В.В., 114  
Лукьянов А.А., 100  
Лукьянов Ан.А., 101  
Майорова А.И., 164  
Макаров М.С., 18, 19  
Макеева И.Р., 102  
Максимов В.И., 171  
Малиновская Е.А., 53

- Мамышев Д.Л., 83  
 Марасанов Н.В., 55, 146  
 Маркович Д.М., 65  
 Марчук И.В., 43  
 Марышев Б.С., 36, 54, 64  
 Мастюк Д.А., 102  
 Махаева К.Е., 103  
 Медведев Д.А., 157  
 Меледин В.Г., 113  
 Мелешкин А.В., 55, 146  
 Метелешко Л.И., 51  
 Мешкова В.Д., 20, 99  
 Мизев А.И., 142  
 Микушин П.В., 103  
 Мильман О.О., 6  
 Минаков А.В., 38, 44, 105  
 Миськив Н.Б., 69  
 Молчанов Т.И., 128  
 Морской Д.Н., 51  
 Москвин М. К., 74  
 Мостовщиков А.В., 169  
 Мошева Е.А., 142  
 Мулладжанов Р.И., 108  
 Мурадов Э.Б., 75  
 Мухтаров Э.С., 17  
 Нагорнова Т.А., 171  
 Найпак К.А., 76  
 Наумкин В.С., 18, 19  
 Наумов И.В., 97  
 Неверов А.Л., 44  
 Ненарокомов А.В., 7  
 Нерушев О.А., 123  
 Никитин А.Д., 92  
 Никишина М.А., 103  
 Николаев И.В., 145  
 Новоселов К.В., 56  
 Носкова К.Р., 84  
 Нуриахметов З.Н., 132  
 Нуриев А.Н., 21  
 Нурмухаметов Д.И., 148  
 Остапенко В.В., 98, 104  
 Очков В.Ф., 134  
 Павлов В.А., 113  
 Пантелеев С.А., 117  
 Пермьякова Э.В., 22  
 Перфильева К.Г., 35  
 Пигасов Е.Е., 102  
 Платонов Д.В., 105  
 Полежаев Д.А., 37  
 Пономарёв Р.С., 148  
 Попов В.В., 109, 179  
 Попов Я.Е., 118  
 Прибатурин Н.А., 57  
 Прохоров А.Н., 86  
 Пряжников М.И., 38, 44  
 Рахманов В.В., 113  
 Ренев М.Е., 23, 85  
 Ридель А.В., 154, 158, 159  
 Родионов А.А., 69  
 Рожков А.Н., 34, 58  
 Романдин В.И., 35  
 Роньшин Ф.В., 72  
 Рощин Е.А., 174  
 Руденко А.О., 58  
 Рыбакин Б.П., 106  
 Рыжков А.Ф., 92  
 Рыков В.А., 134  
 Рыков С.В., 134  
 Саввинова Н.А., 107  
 Савенко Р.А., 154, 159  
 Савичев В.И., 132  
 Сагидуллин А.К., 55  
 Садеги Х., 76  
 Садкин И.С., 175  
 Сайфуллин Д.Д., 160  
 Салихов Ф.Ю., 171  
 Салтыков И.Р., 42  
 Самошкин Д.А., 129, 130  
 Сафаров А.С., 74  
 Сафиева Р.З., 50  
 Сахапов С.З., 123  
 Свириденков А.А., 164  
 Сейфельмлюкова Г.А., 77, 78  
 Сентябов А.В., 90, 105  
 Сергеев Д.А., 10  
 Серебряков Д.И., 86  
 Середкин Н.Н., 131  
 Сеськин И.Н., 176  
 Сибин А.Н., 59  
 Сиваков Н.С., 60  
 Сираев Р.Р., 142  
 Скрипкин С.Г., 96  
 Сладная Д.А., 108  
 Слепцов С.Д., 107  
 Смирнов А.О., 109, 179  
 Смовж Д.В., 121, 132, 133, 141  
 Соколов Д.Г., 109, 179  
 Соколов С.Ю., 103  
 Соколова Е.А., 76  
 Соловьёва Т.А., 177  
 Сомванши П.М., 75  
 Сорокин Д.В., 133  
 Сорокин М.И., 24, 115  
 Станкус С.В., 127, 129, 130, 135  
 Старинская Е.М., 69  
 Старинский С.В., 69  
 Стародумов И.О., 103  
 Стищенко П.В., 145  
 Стрижак П.А., 8, 46, 62  
 Субботин С.В., 61  
 Суртаев А.С., 9  
 Суходаев П.О., 44  
 Табакаев Р.Б., 165, 169, 178  
 Титов Д.М., 7  
 Тищенко А.А., 109, 179  
 Тищенко В.А., 109, 179  
 Ткаченко П.П., 46  
 Токарев М.П., 24, 25, 100, 115, 117  
 Толстогузов Р.В., 116  
 Троицкая Ю.И., 10  
 Тряпина В.А., 13  
 Тупикин А.В., 114  
 Тупоногов В.Г., 92  
 Тюлькина И.В., 26  
 Усанина А.С., 35, 63  
 Устюжанин Е.Е., 134  
 Уточкин В.Ю., 143  
 Фарахов М.И., 173  
 Феоктистов Д.В., 147  
 Филатов И.А., 74  
 Филимонов С.А., 20  
 Филиппский К.А., 57  
 Финников К.А., 167  
 Фортова С.В., 91  
 Фурсенко Р.В., 48  
 Хабин М.Р., 64  
 Хайрулин А.Р., 135, 136  
 Хайрулин Р.А., 136  
 Хан П.В., 74  
 Хищенко К.В., 122, 131, 137  
 Хребтов М.Ю., 108, 115  
 Цой М.А., 96  
 Чеверда В.В., 75  
 Черданцев А.В., 65  
 Чернов А.А., 70, 71  
 Чеснокова М.А., 148  
 Честухин В.В., 103  
 Чирков В.А., 153, 156, 160  
 Чугунков Д.В., 77, 78  
 Чуркин Р.А., 63  
 Шараборин Д.К., 116  
 Шарифуллин Б.Р., 97  
 Шестаков М.В., 25  
 Ширяева М.А., 61  
 Шмыров А.В., 142  
 Шторк С.И., 105  
 Штым К.А., 177  
 Шупик П.А., 132  
 Щинников П.А., 175  
 Эльман Р.Р., 170  
 Яворский Н.И., 27  
 Ягодин Г.С., 153  
 Ягодницына А.А., 144  
 Яковенко С.Н., 28, 29, 100  
 Якуш С.Е., 60

# Содержание

<b>ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ.....</b>	<b>3</b>
<b>Елистратов С.Л.</b> Высокотемпературные тепловые насосы: рабочие циклы, конструкции, области применения.....	5
<b>Мильман О.О.</b> Энергоблоки ORC на базе низкокипящих теплоносителей: схемы, конструкции, проблемы и перспективы .....	6
<b>Ненарокомов А.В., Будник С.А., Титов Д.М.</b> Оптимальное планирование теплофизических экспериментов при использовании методологии обратных задач теплообмена .....	7
<b>Антонов Д.В., Керимбекова С.А., Стрижак П.А.</b> Влияние примесей в каплях воды на тепломассообменные процессы .....	8
<b>Суртаев А.С.</b> Биомиметика в энергетике: как природа вдохновляет учёных на технологические инновации .....	9
<b>Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Зотова А.Н., Вдовин М.И.</b> Морские брызги при экстремально высоких скоростях ветра: механизмы генерации, вклад во взаимодействие атмосферы и океана и роль в динамике морского урагана .....	10
<b>СЕКЦИЯ 1. ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ОДНОФАЗНЫХ СРЕДАХ.....</b>	<b>11</b>
<b>Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Тряпина В.А.</b> Исследование структуры противоточного течения в трубе Ранка-Хилша .....	13
<b>Глуздов Д.С., Гатапова Е.Я.</b> Уменьшение сопротивления в микроканале с пузырьковой структурой.....	14
<b>Колесова А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А.</b> Особенности формирования газовой завесы за отверстием цилиндрической и сложной геометрической формы.....	15
<b>Куйбин П.А.</b> Исследование динамики винтового вихря на основе локально-индукционного приближения .....	16
<b>Локтионов В.Д., Мухтаров Э.С.</b> Анализ влияния температурных условий на границах слоя металлического расплава, подогреваемого снизу, на осреднённую температуру слоя в условиях смешанной естественной конвекции расплава при высоких числах Рэлея .....	17
<b>Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.</b> Исследование распределения температур нагреваемых труб при течении газа в стержневой сборке с разделительными решетками при неоднородном тепловыделении .....	18
<b>Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.</b> О влиянии формы сверхзвукового диффузора на газодинамическое энергоразделение в одиночной трубе Леонтьева с центральным телом.....	19
<b>Мешкова В.Д., Филимонов С.А., Дектерев А.А., Ветров А.Л., Литвинцев К.Ю.</b> Анализ влияния детализации геометрии 3d-модели городской застройки на точность моделирования задач пешеходного ветрового комфорта .....	20
<b>Нуриев А.Н., Анисимов В.Д., Зайцева О.Н.</b> Пропульсивное движение колеблющегося цилиндрического тела в вязкой несжимаемой жидкости .....	21
<b>Пермякова Э.В., Голдобин Д.С.</b> Стохастическое параметрическое возбуждение конвекции Рэлея-Бенара.....	22
<b>Булат П.В., Вокин Л.О., Волков К.Н., Ренев М.Е.</b> Противоточный рекуператор для малогабаритных газотурбинных двигателей из керамики .....	23
<b>Сорокин М.И., Кушнарв Д.А., Токарев М.П.</b> Исследование динамики крупных вихрей в ближней области свободной плоской струи при периодическом вдуве на кромке сопла .....	24
<b>Шестаков М.В., Токарев М.П.</b> Исследование структуры изотермического течения в зазоре модели периферийной ячейки тепловыделяющей сборки .....	25
<b>Тюлькина И.В., Голдобин Д.С.</b> Синхронизация термоконцентрационных течений в смежных ячейках пористой среды .....	26
<b>Яворский Н.И.</b> Потеря существования и рождение точных решений в новом классе конических МГД течений для магнитного числа Прандтля, соответствующего рабочим температурам теплоносителя в атомных реакторах .....	27
<b>Яковенко С.Н., Ванькова О.С., Демиденко Н.В.</b> Активные способы управления струйными течениями.....	28
<b>Яковенко С.Н.</b> Управление теплопереносом в импактной струе с решеткой на входе.....	29
<b>СЕКЦИЯ 2. ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАСОБМЕН В МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>31</b>
<b>Алексеев М.В., Лежнин С.И.</b> Моделирование нестационарного процесса истечения газа в заполненную жидкостью закрытую область с трубчатой решеткой.....	33
<b>Базилевский А.В., Рожков А.Н.</b> Эффект поверхностного натяжения на всплеск жидкости .....	34



<b>Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С., Романдин В.И.</b> Метод экспериментального исследования динамики осаждения и испарения бидисперсного кластера капель.....	35
<b>Беляева А. В., Марышев Б. С.</b> Влияние пульсаций расхода на транспорт примеси в наклонной пористой колонне .....	36
<b>Бушуева А.В., Полежаев Д.А.</b> Эффективная диффузия растворенного в осциллирующей жидкости вещества в двумерной пористой среде .....	37
<b>Ваганов Р.А., Жигарев В.А., Минаков А.В., Пряжников М.И.</b> Стабилизация суспензий наночастиц в растворах с высокой минерализацией .....	38
<b>Гореликова А.Е., Волков С.М., Воробьев М.А.</b> Исследование движения газовых пузырей в наклонной трубе при малых концентрациях поверхностно активных веществ в жидкости .....	39
<b>Курдюмов А.С., Воробьев М.А., Кашинский О.Н.</b> Влияние диаметра канала на характеристики спутного опускающего пузырькового течения при малых расходах фаз .....	40
<b>Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р.</b> Теоретическое исследование процесса усиления растворения метана и кинетики образования гидрата в двухфазной системе «газ-жидкость» в присутствии низкой концентрации метанола.....	41
<b>Груздь С.А., Салтыков И.Р.</b> Математическая модель реакционного смачивания алюминиевой пластины.....	42
<b>Деревянников И.А., Кочкин Д.Ю., Марчук И.В., Кабов О.А.</b> Левитация микрокапель над испаряющимся слоем воды.....	43
<b>Жигарев В.А., Минаков А.В., Неверов А.Л., Пряжников М.И., Суходаев П.О.</b> Исследование рецептур жидкостей ГРП с добавками углеродных нанотрубок .....	44
<b>Козлов В.Г., Зимасова А.Р., Козлов Н.В.</b> Устойчивость границы раздела двух жидкостей в неравномерно вращающемся горизонтальном цилиндре .....	45
<b>Исламова А.Г., Ткаченко П.П., Стрижак П.А.</b> Влияние концентрации и размера частиц в коллоидных каплях на характеристики их соударений.....	46
<b>Карпунин И.Э.</b> Экспериментальное изучение осредненных течений и вибрационной динамики фазового включения в канале с периодически меняющимся вдоль оси профилем.....	47
<b>Косяков В.А., Фурсенко Р.В.</b> Численное исследование тепловых характеристик затопленной струи, образующейся при схлопывании парового пузырька на торце волновода .....	48
<b>Кочкин Д.Ю., Зайцев Д.В., Белослудцев В.В., Архипов В.Е., Кабов О.А.</b> Кипение жидкости в канале с графеновым покрытием.....	49
<b>Диева Н.Н., Кравченко М.Н., Сафиева Р.З., Косач А.В.</b> Проблемы аномального снижения проницаемости при разработке высоковязких нефтей .....	50
<b>Кукшинов Н.В., Дмитриева А.А., Метелешко Л.И., Морской Д.Н.</b> Экспериментальное исследование образования поверхности раздела фаз при кипении воды на цилиндрических поверхностях различного диаметра .....	51
<b>Лобанов П.Д.</b> Особенности движения и теплообмена групп пузырьков и малых пузырей Тейлора в нисходящем потоке жидкости. ....	52
<b>Малиновская Е.А.</b> О сходстве явлений ветрового выноса пылевых частиц и процессов переноса в зернистом слое .....	53
<b>Марышев Б.С., Клименко Л.С.</b> Концентрационная конвекция смеси в наклонном слое пористой среды с учетом закупорки .....	54
<b>Мелешкин А.В., Сагидуллин А.К., Марасанов Н.В.</b> Газогидратный способ опреснения и очистки воды .....	55
<b>Новоселов К.В.</b> Моделирование многофазного несмешивающегося течения в пористой среде методом решеточного уравнения Больцмана .....	56
<b>Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Евдокименко И.А., Филиппский К.А.</b> Экспериментальное исследование двухфазного течения пузырьковой структуры при обтекании цилиндра .....	57
<b>Руденко А.О., Рожков А.Н.</b> Движение упругой капли через отверстие в тонкой пластине .....	58
<b>Сибин А.Н., Абдуллин Р.Ф., Байкин А.Н., Калинин С.А., Копейкин Р.Р., Дмитрачков Д.К., Головин С.В.</b> Использование адаптивных сеток для моделирования распространения трещины авто-ГРП.....	59
<b>Сиваков Н.С., Якуш С.Е.</b> Численный расчет парового взрыва одиночной капли расплава олова .....	60
<b>Субботин С.В., Ширяева М.А., Козлов В.Г.</b> Экспериментальное исследование осцилляционной динамики капельного включения в цилиндрическом канале.....	61
<b>Антонов Д.В., Высокоморная О.В., Стрижак П.А.</b> Сравнение характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с варьированием волатильного компонента .....	62
<b>Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.</b> Влияние поверхностно-активного вещества на динамику движения кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости .....	63

<b>Хабин М.Р., Марышев Б.С.</b> Влияние модуляции внешнего потока при фильтрации конечного объема смеси через прямоугольную область пористой среды с учетом эффектов закупорки .....	64
<b>Черданцев А.В., Исаенков С.В., Маркович Д.М.</b> Управление крупными волнами на стекающих и обдуваемых газом пленках жидкости вдали от входа в канал .....	65
<b>СЕКЦИЯ 3. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ.....</b>	<b>67</b>
<b>Васильев М.М., Родионов А.А., Миськив Н.Б., Старинская Е.М., Старинский С.В.</b> Влияние микроструктуры перегретой супергидрофильной поверхности на динамику вскипания падающей капли воды .....	69
<b>Чернов А.А., Давыдов М.Н., Ерманиук Е.В.</b> Динамика роста газового пузырька в магматическом расплаве при его декомпрессии: эффект бародиффузии .....	70
<b>Чернов А.А., Давыдов М.Н.</b> Кинетика нуклеации и роста газовых пузырьков в магматическом расплаве при его декомпрессии с конечной скоростью .....	71
<b>Зорькина А.И., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.</b> Исследование роста одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации .....	72
<b>Арушанян Р.Р., Колесников Б.П.</b> Моделирование поведения эффективной проводимости в области размыва фазового перехода второго рода перколяционного типа .....	73
<b>Левин А.А., Хан П.В., Сафаров А.С., Филатов И.А., Москвин М. К.</b> Характеристики вскипания потока недогретой воды на модифицированной лазером металлической поверхности .....	74
<b>Муратов Э.Б., Чеверда В.В., Сомванши П.М.</b> Исследование теплообмена при слиянии капель жидкости на нагреваемой тонкой фольге .....	75
<b>Соколова Е.А., Садеги Х., Газан С.Х., Найпак К.А.</b> Оценка эффективности гибридной энергетической системы, включающей ВВЭР-1000 и высокотемпературный паровой электролиз для производства водорода .....	76
<b>Чугунков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Сейфельмлюкова Г.А.</b> Способ интенсификации теплообмена в конденсационном оборудовании тэс и АЭС .....	77
<b>Чугунков Д.В., Сейфельмлюкова Г.А.</b> Интенсификации теплообмена при конденсации воздействием звуковых волн .....	78
<b>СЕКЦИЯ 4. ГИДРОГАЗОДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД, ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>79</b>
<b>Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В.</b> Газодинамика и горение в массивах противоточных закрученных течений .....	81
<b>Комова О.В., Гурьянов А.И.</b> Экспериментальное исследование горения синтетического многокомпонентного водородсодержащего топлива в противоточном горелочном устройстве .....	82
<b>Арефьев К.Ю., Гуськов О.В., Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л.</b> Сравнение характеристик выгорания водорода при разных способах подачи в модельном канале при высоких скоростях потока .....	83
<b>Носкова К.Р., Гурьянов А.И., Евдокимов О.А., Гурьянова М.М.</b> Исследование газодинамики камеры сгорания энергетического ГТД в условиях входной несимметричности течения методом цифровой трассерной визуализации .....	84
<b>Булат П.В., Волков К.Н., Ренев М.Е.</b> Численный анализ теплового поджига СВЧ-плазмой пропан-воздушной топливной смеси в трубе .....	85
<b>Прохоров А.Н., Гуськов О.В., Ильченко М.А., Серебряков Д.И.</b> Расчётные исследования генерации и влияния акустико-вихревых колебаний в инжекторе на интенсификацию горения водорода при спутной подаче .....	86
<b>СЕКЦИЯ 5. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ТЕПЛОФИЗИКЕ И ФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКЕ .....</b>	<b>87</b>
<b>Горячев В.Д.</b> Анализ вихревых структур в задачах вычислительной гидрогазодинамики .....	89
<b>Дектерев Ар.А., Сентябов А.В., Дектерев А.А., Дектерев Д.А.</b> Влияние геометрических особенностей модели циклоидального ротора на точность расчета тягово-энергетических характеристик .....	90
<b>Денисенко В.В., Фортова С.В.</b> Численное исследование течения полимерного раствора в двумерной ячейке с периодическими граничными условиями .....	91
<b>Ершов М.И., Абаимов Н.А., Никитин А.Д., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф.</b> CFD-DEM моделирование гидродинамики газодисперсного потока с частицами биомассы неправильной формы .....	92
<b>Злотник А.А., Ломоносов Т.А.</b> Квазигомогенная форма системы четырех уравнений динамики гетерогенных смесей газов и жидкостей, ее регуляризация и реализация .....	93

<b>Злотник А.А., Ломоносов Т.А.</b> О регуляризованных уравнениях динамики гетерогенных бинарных смесей "сжатых" газов Ноубла-Абеля и их применении .....	94
<b>Ильинская Д.Н.</b> Профилирование и математическое моделирование шнекоцентробежного насоса жидкого водорода .....	95
<b>Кашкарова М.В., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Кравцова А.Ю.</b> Особенности кавитационного обтекания тела цилиндрической формы в щелевых каналах .....	96
<b>Кашкарова М.В., Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р.</b> Особенности массообмена в замкнутом цилиндрическом контейнере при адаптивном вращении Боковой стенки .....	97
<b>Ковыркина О.А., Остапенко В.В.</b> О точности разностных схем сквозного счета при расчете задач коши с периодическими разрывными начальными данными .....	98
<b>Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д.</b> Влияние солнечного и теплового излучения на формирование аэрационного режима в городском квартале .....	99
<b>Лукьянов А.А., Яковенко С.Н., Токарев М.П.</b> Исследование численных моделей турбулентности, полученных с помощью методов машинного обучения, для потока скаляра в тепловыделяющих сборках.....	100
<b>Лукьянов Ан.А., Алексеев М.В.</b> Численное исследование гидростатических характеристик течения для стационарного газового снаряда.....	101
<b>Мастюк Д.А., Беляев П. Е., Максеева И.Р., Куприянец Т.А., Пигасов Е.Е.</b> Применение неоднородного шага по времени в методе Куропатенко при моделировании газодинамических процессов в эйлеровых координатах.....	102
<b>Стародумов И.О., Махаева К.Е., Зубарев А.Ю., Бессонов И.С., Соколов С.Ю., Микушин П.В., Александров Д.В., Честухин В.В., Никишина М.А., Бляхман Ф.А.</b> Моделирование гемодинамических течений в области стеноза коронарных артерий .....	103
<b>Ковыркина О.А., Остапенко В.В.</b> О точности разностных схем в различных областях гладкости аппроксимируемых обобщенных решений .....	104
<b>Платонов Д.В., Сентябов А.В., Минаков А.В., Шторк С.И.</b> Численное моделирование движения дисперсной фазы в условиях закрученного течения в тангенциальной вихревой камере .....	105
<b>Рыбакин Б.П.</b> Гидродинамика джетов, образующихся в молодых звездных объектах и их взаимодействие с молекулярными облаками.....	106
<b>Саввинова Н.А., Слепцов С.Д.</b> Математическое моделирование таяния мутного льда .....	107
<b>Сластная Д.А., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И., Дулин В.М.</b> Численное исследование возникновения неустойчивости в конусном пламени, направленном на плоскую охлаждаемую преграду.....	108
<b>Тищенко В.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Бердюгин К.А., Смирнов А.О., Соколов Д.Г.</b> Применение нейронных сетей для анализа поведения частиц жидкой фазы в элементах проточных частей турбомашин.....	109
<b>СЕКЦИЯ 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО И ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....</b>	<b>111</b>
<b>Кабардин И.К., Меледин В. Г., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А., Зубанов К.С.</b> Развитие метода фазовой доплеровской анемометрии с объектом измерения в виде цилиндра.....	113
<b>Кабардин П.А., Лукашов В.В., Тупикин А.В.</b> Проскок пламени при горении смесей $\text{CH}_4/\text{H}_2$ и $\text{NH}_3/\text{H}_2$ .....	114
<b>Кирчанова Е.Е., Сорокин М.И., Хребтов М.Ю., Токарев М.П., Дулин В.М.</b> Оценка поля скорости в затопленной закрученной струе методами 3D-PTV и ТОМО-PIV .....	115
<b>Лавронов К.Д., Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.</b> Экспериментальное исследование конусного пламени во внешнем электрическом поле методами PLIF и PIV .....	116
<b>Пантелеев С.А., Токарев М.П.</b> Исследование иммерсионных сред и материалов для оптической диагностики в криволинейных каналах методом выравнивания показателя преломления .....	117
<b>Попов Я.Е., Лебедев А.С., Дулин В.М.</b> Разработка программно-аппаратного комплекса для динамического анализа поля деформаций твёрдых тел .....	118
<b>СЕКЦИЯ 7. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>119</b>
<b>Богомолова А.И., Смовж Д.В., Баннов А.Г.</b> Газовый датчик на основе графена .....	121
<b>Боярских К.А., Хищенко К.В.</b> Простое уравнение состояния жидкой фазы никеля при высоких плотностях энергии .....	122

<b>Гареев Т.И., Нерушев О.А., Сахапов С.З.</b> Создание нанокompозитов на основе графена и наночастиц оксида олова методом магнетронного распыления .....	123
<b>Дутова О.С., Козловский Ю.М.</b> Малопараметрическое уравнение для расчета коэффициента вязкости гелия-4 в широком диапазоне параметров состояния .....	124
<b>Зайцев О.В.</b> Синтез тонких титаносодержащих плёнок методом магнетронного распыления на постоянном токе.....	125
<b>Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р.</b> Исследование процессов образования льда на гидрофобных покрытиях в рамках противообледенительной защиты ветрогенераторов .....	126
<b>Козловский Ю.М., Станкус С.В.</b> Особенности теплового расширения хрома в широком интервале температур .....	127
<b>Кукшинов Н.В., Молчанов Т.И.</b> Исследование вязкости смесей на основе гидрофторэфира .....	128
<b>Абдуллаев Р.Н., Самошкин Д.А., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.</b> Переносные свойства магний-литиевых сплавов с малым содержанием лития.....	129
<b>Самошкин Д.А., Станкус С.В.</b> Удельная теплоемкость диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия, в интервале температур 300–1270 К .....	130
<b>Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</b> Уравнение состояния системы железо–кремний при высоких давлениях и температурах .....	131
<b>Комаров А. Г., Савичев В.И., Смовж Д.В., Нуриахметов З.Н., Шупик П.А.</b> Электропроводность композитов на основе модифицированных алюмосиликатных микросфер с трансформаторным маслом.....	132
<b>Сорокин Д.В., Гареев Т.И., Зайцев О. В., Смовж Д. В.</b> Фотопроводимость композита графена с диоксидом титана.....	133
<b>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А.</b> Анализ экспериментальной информации и расчетных данных о плотности $\rho_{\text{сб}}$ на линии насыщения в окрестности критической точки .....	134
<b>Хайрулин А.Р., Станкус С.В.</b> Энтальпия и теплоемкость FLiNaK в твердом и жидком состояниях .....	135
<b>Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А.</b> Плотность и тепловое расширение сплава LiK <sub>2</sub> Pb <sub>2</sub> в жидком состоянии .....	136
<b>Хищенко К.В.</b> Термодинамические свойства и фазовые превращения графита и алмаза при высоких давлениях и температурах .....	137
<b>СЕКЦИЯ 8. ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА НА МИКРО- И НАНОМАСШТАБАХ.....</b>	<b>139</b>
<b>Бойко Е.В., Смовж Д.В.</b> Модель термоакустического излучения CVD графена .....	141
<b>Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Мошева Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И.</b> Режимы работы импульсного смесителя марангони в Т-образном проточном микроканале .....	142
<b>Уточкин В.Ю., Брацун Д.А.</b> Тепло и массоперенос в реакторе хеле-шоу с центрифугированием.....	143
<b>Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В.</b> Влияние концентрации поверхностно активных веществ на потоки несмешивающихся жидкостей в микроканалах различной геометрии .....	144
<b>Коробейщиков Н.Г., Стищенко П.В., Николаев И.В.</b> Динамика столкновений кластеров аргона с поверхностью полупроводниковых материалов.....	145
<b>Мелешкин А.В., Марасанов Н.В., Князьков В.А.</b> Влияние наночастиц Ag и SDS на процесс образования гидрата углекислого газа .....	146
<b>Феокистов Д.В., Лага Е.Ю., Лавриненко С.В., Клепиков Д.М.</b> Испарение малых объемов полярных теплоносителей на LIS поверхностях .....	147
<b>Гордеева А.И., Нурмухаметов Д.И., Чеснокова М.А., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С.</b> Потоки жидкости и газа в чувствительной части открытого волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Фабри-Перо .....	148
<b>Гордеева А.И., Корнилицын А.Р.</b> Термогравитационная конвекция, как механизм управления протонным обменом при изготовлении планарных волноводов на кристаллах ниобата лития .....	149
<b>СЕКЦИЯ 9. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕДАХ.....</b>	<b>151</b>
<b>Елагин И.А., Ягодин Г.С., Чирков В.А.</b> Особенности электрокоалесценции незаряженной капли со слоем воды в переменном электрическом поле .....	153
<b>Карпов Д.И., Савенко Р.А., Ридель А.В., Коробейников С.М.</b> Параллельный алгоритм для моделирования роста стримеров в жидких диэлектриках .....	154
<b>Коробейников С. М.</b> О выводе энергии из емкостного накопителя с приэлектродными проводящими слоями.....	155

<b>Костин П.А., Чирков В.А.</b> Особенности электрокоалесценции электропроводящих капель при импульсном напряжении с малым коэффициентом заполнения .....	156
<b>Куперштох А.Л., Медведев Д.А.</b> О контактных углах смачивания в методе решеточных уравнений Больцмана и их измерении .....	157
<b>Ридель А.В., Коробейников С.М., Бычков А.Л.</b> Экспериментальное наблюдение развития неустойчивости заряженной частичным разрядом границы пузырька с последующим иницированием стримеров в трансформаторном масле .....	158
<b>Савенко Р.А., Карпов Д.И., Ридель А.В., Коробейников С.М.</b> Моделирование газового разряда в пузырьке гелия в жидком диэлектрике .....	159
<b>Сайфуллин Д.Д., Чирков В.А.</b> Комплексная структура электрогидродинамических течений, возникающих в двухфазной жидкости, в случае различия подвижностей ионов слабопроводящей дисперсионной среды .....	160
<b>СЕКЦИЯ 10. ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ .....</b>	<b>161</b>
<b>Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.</b> Тепломассоперенос в скважине по добыче гидрогеотермальных ресурсов из разных горизонтов .....	163
<b>Васильев А.Ю., Майорова А.И., Свириденков А.А.</b> Опыт разработки комбинированной форсунки .....	164
<b>Гайдабрус М.А., Табакаев Р.Б.</b> Сравнение эффективности применения катализаторов для снижения концентрации смол в составе пиролизного газа .....	165
<b>Дектерев А.А., Ким И.С., Зверков И.Д., Дектерев Д.А.</b> Использование циклоидальных роторов в дирижаблях .....	166
<b>Дектерев Д.А., Финников К.А., Дектерев Ар.А., Дектерев А.А.</b> Методика проведения испытаний летательного аппарата с циклическими движителями в аэродинамической трубе .....	167
<b>Елистратов С.Л., Ануфриенко А.В.</b> Оценка эффективности теплоснабжения на основе теплонасосной установки с рабочим телом R-747 .....	168
<b>Калинич И.К., Табакаев Р.Б., Мостовщиков А.В.</b> Исследование биомассы с высокими диэлектрическими потерями в качестве микроволновых поглотителей при СВЧ-пиролизе угля .....	169
<b>Кудияров В.Н., Кашкаров Е.Б., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Лидер А.М.</b> Изучение теплофизических свойств металлгидридных систем очистки и хранения водорода на основе интерметаллических соединений .....	170
<b>Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Борисов Б.В., Нагорнова Т.А., Салихов Ф.Ю.</b> Математическое моделирование переноса диоксида углерода в локальной рабочей зоне при работе системы лучистого отопления .....	171
<b>Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.</b> Тепловой режим ячейки электрохимической системы хранения энергии в условиях интенсивного электрохимического и химического реагирования .....	172
<b>Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Ахмитшин А.А.</b> Определение тепловой эффективности противоточных аппаратов с интенсификаторами для сред с повышенной вязкостью .....	173
<b>Роцин Е.А., Кравченко М.Н., Кочеткова В.А.</b> Применение наноматериалов для ингибирования процесса гидротообразования при освоении месторождений углеводородов .....	174
<b>Садкин И.С., Щинников П.А.</b> Комплексный анализ энергоустановок с уголекислотным рабочим телом .....	175
<b>Сеськин И.Н., Елистратов С.Л.</b> Влияние регенерации на эффективность работы аммиачного высокотемпературного теплового насоса .....	176
<b>Штым К.А., Кулагина Т.А., Соловьёва Т.А.</b> Сравнительный анализ экспериментальных и расчётных аэродинамических параметров закрученного потока при горении природного газа .....	177
<b>Табакаев Р.Б., Калинич И.К.</b> Влияние степени метаморфизма топлива на процесс его термической переработки под воздействием свч-излучения .....	178
<b>Тищенко В.А., Тищенко А.А., Грибин В.Г., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Бердюгин К.А., Смирнов А.О., Соколов Д.Г.</b> Результаты обобщения исследований влажно-паровых потоков в решетках паровых турбин с применением систем лазерной диагностики .....	179
<b>АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>180</b>

Ответственный за выпуск  
к.ф.-м.н. Макаров М.С.

Вёрстка  
к.ф.-м.н. Кашкарова М.В.

Обложка  
Убиенных А.Д.

Подписано в печать 29.08.2024. Печать офсетная.  
Бумага офсетная. Формат 64×90 1/8. Усл. печ. л. 11,8.  
Тираж 160 экз. Заказ №

---

Отпечатано в типографии  
ООО «Дигит Про»  
г. Новосибирск, ул. Журина 78 оф 208





*Ждём вас  
встречи  
с Вами!*