

**УРАЛЬСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР:
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**20-22 октября 2025 года,
г. Екатеринбург.**

Организатор:
Институт теплофизики
Уральского отделения РАН

Екатеринбург
2025

Уральский молодежный теплофизический семинар: Тезисы докладов (20-22 октября 2025 г. – Екатеринбург : ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 2025. – 48 с.

ISBN 978-5-9080770-3-3

Сборник содержит тезисы докладов Уральского молодежного теплофизического семинара по следующим направлениям: фазовые и критические явления, механика жидкостей и газов, численные методы в тепловых процессах, конвективный теплообмен, метастабильные состояния и флуктуационные явления, химические превращения в тепловых процессах, теплофизические свойства веществ.

Сборник тезисов может быть полезен студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

Тезисы печатаются в авторской редакции методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

© Институт теплофизики УрО РАН
Составление, 2025
© Авторы, 2025

ISBN 978-5-9080770-3-3



ОРГКОМИТЕТ

Председатель – Захаров М.С., к.ф.-м.н.
Зам. председателя – Бусов К.А., к.ф.-м.н.
Секретарь – Панасенко А.С.
Акашев А.А.
Галкин Д.А.
Томин А.С.
Хотиенкова М.Н.



НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель – Захаров М.С., к.ф.-м.н.
Зам. председателя – Виноградов А.В., д.ф.-м.н.
Секретарь – Бусов К.А., к.ф.-м.н.
Гасанов Б.М., д.ф.-м.н.
Майданик Ю.Ф., д.т.н.
Никитин Е.Д., д.ф.-м.н.
Старостин А.А., к.ф.-м.н.
Андбаева В.Н., к.ф.-м.н.
Волосников Д.В., к.ф.-м.н.
Котов А.Н., к.ф.-м.н.
Липнягов Е.В., к.ф.-м.н.
Поволоцкий И.И., к.т.н.

ДВУХФАЗНЫЕ ПАССИВНЫЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Ю. Ф. Майданик

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А
e-mail: madanik@itpuran.ru

К двухфазным теплопередающим устройствам (ДФТУ) относятся герметичные устройства, содержащие теплоноситель, которые работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу. Корпус ДФТУ, как правило, выполняется из нержавеющей стали, меди или алюминиевых сплавов, а в качестве теплоносителей могут быть использованы различные жидкости от криогенных до жидких металлов, которые химически совместимы с материалом корпуса. Основным достоинством этих устройств является сверхвысокая эффективная теплопроводность, которая на порядки превышает теплопроводность меди, которая занимает третье место по этому свойству после алмаза и серебра. Другим важным свойством этих устройств является то, что их высокая теплопередающая способность достигается без затрат энергии, кроме той, которую они сами передают. Это позволяет отнести их к разряду, так называемых, “пассивных” устройств. К числу важных эксплуатационных свойств ДФТУ относятся также длительный рабочий ресурс, исчисляемый годами, отсутствие необходимости в регламентном обслуживании и относительно простая технология производства [1, 2].

История этих устройств берет свое начало в 19-м веке, когда англичанин Джекоб Перкинс в 1836 году запатентовал устройство, получившее название “термосифон” (UK Patent №759). Первое практическое применение эти устройства, заправленные водой, получили в английской армии, где они использовались для выравнивания температуры в походных хлебопекарных печах. В настоящее время, эти устройства разрабатываются и применяются в самых различных вариантах, в частности, в металлургии и строительстве в зоне вечной мерзлоты.

Дальнейшее развитие ДФТУ получили во второй половине 20-го века, после того как американец Джордж Гровер в 1963 году запатентовал устройство, которое называется “тепловая труба” (US Patent № 3229759). Первые ТТ предназначались для атомных энергетических установок и заправлялись жидким натрием. Затем они получили широкое применение в системах терморегулирования космической техники и электроники, где в качестве теплоносителей используются низкотемпературные жидкости. В отличие от термосифонов в тепловых трубах используются капиллярно-пористые структуры, так называемые, фитили, которые создают капил-

лярное давление для прокачки теплоносителя и обеспечивают более широкие возможности для применения этих устройств. Производство ТТ в настоящее время оценивается миллионами штук в год. Недостатком этих устройств является сильная зависимость их теплопередающей способности от расстояния теплопереноса и от ориентации в гравитационном поле уже при длине более 200-300 мм. Для решения этой проблемы на физико-техническом факультете УПИ Ю.Ф. Герасимов и Ю.Ф. Майданик в 1972 году впервые разработали устройство (А.С. № 449213), которое впоследствии получило название “контурная тепловая труба” [3,4]. Эти устройства способны эффективно передавать тепло в любом направлении на расстояние нескольких метров. Они хорошо конфигурируются и адаптируются к самым различным условиям эксплуатации. В настоящее время КТТ нашли широкое применение в космической технике, а также в системах охлаждения электроники, компьютерной и лазерной техники [5,6].

На рис.1 представлены базисные конструктивные варианты ДФТУ, вариации, тепловые характеристики и примеры применения которых представлены в этом докладе.

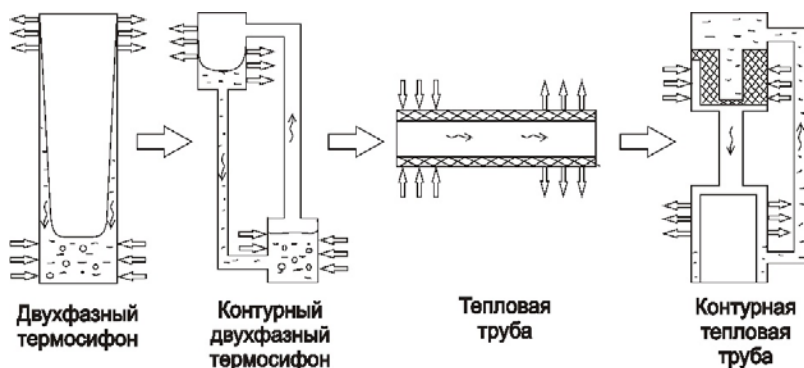


Рис.1 Базисные варианты конструкции двухфазных теплопередающих устройств

Список литературы

1. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы.– М.: Энергия 1979. 271с.
2. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. - NY.: Taylor and Frances 1995. 874 с.
3. Майданик Ю.Ф., Ферштатер Ю.Г., Пастухов В.Г. Контурные тепловые трубы: разработка, исследование, элементы инженерного расчета.- Свердловск : УрО РАН 1989. 52 с.
4. Maydanik Yu.F. Loop heat pipes // Applied Thermal Engineering. 2005. №25. С.635-657.
5. Майданик Ю.Ф., Чернышева М.А. Контурные тепловые трубы: разработка, исследование, применение // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 7. С.1655-1666.

УПРАВЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИКОЙ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФфуЗОРЕ

Л.В. Плотников

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19
e-mail: plotnikovlv@mail.ru

Известно, что конические диффузоры той или иной конструкции широко применяются в различных технических, технологических, химических, научных и других процессах [1]. Газодинамическое совершенство течения воздуха или жидкости в диффузоре во многом определяет эффективность процессов в машине, аппарате или каком-либо устройстве [1, 2]. Поэтому изучение газодинамики потоков в вертикальном коническом диффузоре (ВКД) и разработка методов управления структурой потоков в нем являются актуальными задачами для развития науки, техники и технологий.

Управление аэродинамикой потока воздуха в ВКД осуществлялось посредством изменения способа подачи воздуха и конструкции подводящих каналов. Базовая конфигурация заключалась в подаче воздуха в ВКД через основание (единичную трубу) с диаметрами 32 и 50 мм. Также выполнялось поперечное профилирование этого основания (подача через единичные трубы квадратного и треугольного профилей) с сохранением эквивалентного гидравлического диаметра как у базовой конфигурации. Модификация базовой конфигурации ВКД заключалась в установке пучка трубок в единичную подводящую трубу (дополнительно существовала возможность выдвигать и утапливать центральные трубки в пучке). Подача воздуха через 4 сопла рассматривалась, как возможный способ управления аэродинамикой потока в ВКД. Сопла устанавливались под углами 45, 60 и 70 градусов. Также исследовалась структура потока в ВКД при подаче воздуха через профилированные сопла (квадратное и треугольное поперечные сечения) с углом установки равным 45°.

Исследования структуры потока (полей скоростей) в ВКД осуществлялось на основе трех различных методов: метод тепловизуализирующей съемки, метод тепловой анемометрии и метод PIV (particle image velocimetry / измерение скорости изображения частиц). Метод тепловизуализирующей съемки заключается в размещении в потоке тепловизуализирующей сетки из полимерных нитей и основан на анализе полей дисперсии температуры, получаемых с помощью тепловизора [3, 4]. Метод тепловой анемометрии на базе термоанемометра постоянной температуры использовался для уточнения поля скоростей в различных частях ВКД [5]. Алгоритм исследования и применяемое оборудование для метода PIV описано в статье [6].

Отдельные ключевые результаты исследований состоят в следующем.

1. Особенности структуры потока в ВКД при традиционном подводе воздуха снизу через один канал:

- в диффузоре образуется ярко выраженное центральное течение воздуха вдоль вертикальной оси диффузора при использовании всех конфигураций канала;

- форма поперечного сечения подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в ВКД (круглый канал – застойные зоны в углах; квадратный канал – отсутствие застойных зон; треугольный канал – застойные зоны с более равномерным потоком);

- основные закономерности изменения структуры потока сохраняются при увеличении расхода воздуха через систему от 0,02 до 0,067 м³/с.

2. Особенности структуры потока в ВКД при сопловой подаче воздуха через четыре трубки, расположенные под углом 45 градусов:

- в диффузоре отсутствуют застойные зоны и центральное течение;

- использование квадратной и треугольной сопловых трубок приводит к более равномерному распределению потока по всему объему ВКД;

- увеличение расходных характеристик через систему способствует более равномерному распределению потока воздуха по всему объему ВКД (при этом основные закономерности в структуре течения сохраняются).

3. Разные углы наклона сопловых трубок значительно меняют структуру потока в ВКД. Соответственно, изменение угла установки сопел для подачи воздуха может рассматриваться как эффективный способ управления аэродинамикой в ВКД.

Список литературы

1. Japikse D., Baines N.C. Diffuser Design Technology. – Norwich, VT: Concepts ETI. 1998. 524 p.
2. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review // Experimental Thermal and Fluid Science. 1996. Vol. 13(4). P. 318-337.
3. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 4. P. 545-546.
4. Plotnikov L., Ryzhkov A. The Influence of Supply Channel Design on the Gas-Dynamic Structure of Air Flow in a Vertical Conical Diffuser // Applied Sciences. 2023. Vol. 13(22). Article number 12141.
5. Plotnikov L. A Thermal Anemometry Method for Studying the Unsteady Gas Dynamics of Pipe Flows: Development, Modernisation, and Application // Sensors. 2023. Vol. 23(24). Article number 9750.
6. Plotnikov L., Davydov D., Krasilnikov D., Shurupov V. Gas-dynamic features of stationary air flow admission into a cylinder through a poppet valve and cross profiled channels // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025. Vol. 98, No. 3. P. 655-661.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В Т-ОБРАЗНОЙ ЯЧЕЙКЕ

А.А. Бондаренко^{1,2*}, *И.В. Колесниченко*^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королева, 1

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
e-mail: bondarenko.a@icmm.ru

Большинство реальных физических течений жидкости и газа являются вихревыми и, в частности, закрученными: потоки в океане, атмосферные циклоны, конвективные потоки в мантии и ядре Земли, несущие ответственность за генерацию ее магнитного поля [1].

Важную роль подобные течения играют и в технологических процессах. В металлургической промышленности используются магнитогидродинамические (МГД) насосы и перемешиватели. В таких устройствах интенсивные течения электропроводной среды создаются под действием бегущих и/или вращающихся магнитных полей. Неисследованными остаются вопросы о локальном перемешивании частей ячейки и изучение распространения области закрученного потока, так как во многих ситуациях на производстве существуют ограничения на области размещения устройств вокруг тиглей с расплавом.

Движение жидкого металла под действием вращающихся магнитных полей широко исследовано в цилиндрических ячейках в ламинарных, переходных и турбулентных режимах течений. Проявление турбулентности выражается появлениями пульсаций и неустойчивостей в пограничном слое. Одна из таких неустойчивостей – вихри Тейлора-Гертлера – представляет собой вихревые валики, ориентированных вдоль потока, и возникающая вблизи вогнутых стенок [2]. В ограниченных по высоте цилиндрах из-за аксиального градиента центробежной силы возникает эффект меридионального (полоидального) вторичного течения, называемого экмановской подкачкой [3]. У горизонтальных стенок образуются пограничные слои Бодевадта-Экмана. На начальной стадии формирования течения, когда скорость в системе растет, возникают инерционные волны. Исследования показали, что как в осесимметричной [4], так и в трехмерной [5] постановках волновые осцилляции, вызванные данным эффектом, являются первичными по сравнению с вихрями Тейлора-Гертлера, которые спирально переносятся полоидальным течением к горизонтальным стенкам цилиндров [6].

Менее исследованными являются противоположно направленные вращающиеся течения. При взаимодействии таких потоков на границе раздела возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца [7]. Исследование течений в цилиндрических ячейках перемешивателей в режимах с развитой турбулентностью проводилось в [8]. Однако анализа процесса формирования неустойчивостей и их частотных характеристик не проводилось, чему и будет посвящена данная работа.

Рассмотрим ячейку, состоящую из двух соосных цилиндров, заполненных эвтектическим сплавом GaSnZn. Радиус верхней части в два раза больше радиуса нижней. Вокруг верхней и нижней частей ячейки расположены индукторы вращающегося магнитного поля, создающие азимутальную электромагнитную силу. В рассматриваемой задаче взаимодействием магнитного поля и потока электропроводной жидкости можно пренебречь. Изотермическое течение жидкого металла описывается уравнением Навье-Стокса и условием несжимаемости. Управляющими параметрами задачи являются аналоги магнитного числа Тейлора для нижней и верхней частей ячейки. Решение задачи проводится методом конечных объемов в пакете OpenFOAM-10. Используется решатель pimpleFoam. Решение осуществляется на блочно-структурированной сетке со сгущением в областях твердых стенок.

Исследована стадия формирования неустойчивостей. Построены нейтральные кривые появления неустойчивостей типа Кельвина-Гельмгольца и Тейлора-Гертлера в пространстве чисел Тейлора. При помощи вейвлет-анализа получены зависимости частот вихрей Тейлора-Гертлера от силовых параметров.

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124012300246-9.

Список литературы

1. Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Динамо: на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту. // Усп. физ. наук. 2014. Т. 184, No 3. С. 313-335
2. Saric W. S. Görtler vortices // Annu. Rev. Fluid Mech. 1994. Vol. 26. P. 379-409.
3. Davidson P., Kinnear D., Lingwood R., Short D., He X. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces. // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 1999. Vol. 18. No. 4. pp. 693-711.
4. Grants I. Gerbeth G. Stability of axially symmetric flow driven by a rotating magnetic field in a cylindrical cavity. // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 431. pp 407-426.
5. Grants I. Gerbeth G. Linear three-dimensional instability of a magnetically driven rotating flow. // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 463. pp. 229-239.
6. Nikrityuk P. Spin-up of a liquid metal flow driven by a rotating magnetic field in a finite cylinder: A numerical and an analytical study. // Phys. Fluids. 2005. pp. 067101.
7. Gerwin R. Stability of the Interface between Two Fluids in Relative Motion. // Rev. Mod. Phys. 1968. Vol. 40. pp. 652-658
8. Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow. // Eur. Phys. J. Plus. 2024. Vol. 139. P. 846.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ И МАССОПЕРЕНОСА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КАСКАДНОЙ MRT МОДЕЛИ

И.В. Володин^{1}, А.А. Алабужев^{1,2}*

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королева, 1

² ПГНИУ, 614068, Пермь, Букирева, 15
e-mail: ivanwolodin@gmail.com

В работе проводится численное моделирование термомоноцентрационной конвекции в удлиненном канале, заполненном пористой средой. Все границы области считаются твердыми: верхняя и нижняя стенки считаются теплоизолированными и непроницаемыми, на боковых стенках поддерживаются фиксированные значения температуры и концентрации, формирующие отрицательный горизонтальный градиент (см. рис. 1). Эффекты Дюфура и Соре не учитываются, коэффициенты пористости и проницаемости однородны.

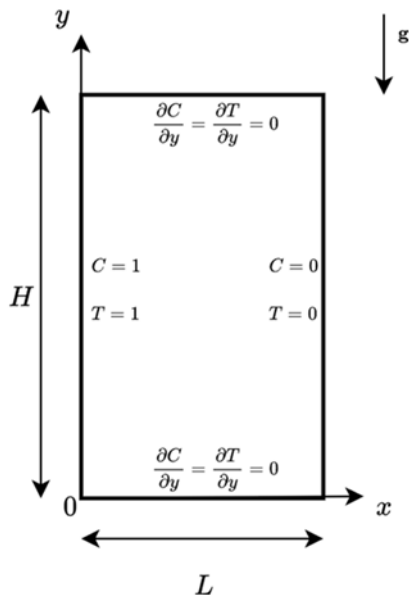


Рис. 1. Геометрия задачи

Задача решается методом решеточных уравнений Больцмана [1–3]. В настоящей работе применена MRT-модель, обладающая повышенной численной устойчивостью и точностью по сравнению с традиционными схемами. Для представления пористой структуры использовался REV-подход [4, 5]. Для моделирования сопряжённого массо- и теплопереноса использовались дополнительные наборы функций распределения, что обеспечивает согласованное описание взаимодействующих транспортных процессов [1–6].

В результате проведенных вычислительных экспериментов получены изолинии температуры, концентрации и функции тока. На левой стенке области рассчитаны средние значения числа Нуссельта и числа Шервуда, характеризующие интенсивность переноса тепла и вещества соответственно. Показано, что при заданных условиях формируется устойчивое течение, интенсивность которого зависит от значения температурных и концентрационных градиентов и от характеристики пористой структуры.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения MRT-модели метода решеточных уравнений Больцмана для задач сопряженного тепло- и массопереноса в пористых средах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00379, <https://rscf.ru/project/24-21-00379/>

Список литературы

1. Succi S. The Lattice Boltzmann Equation: For Complex States of Flowing Matter. – Oxford, UK: Oxford University Press, 2018. – 761 с.
2. Krüger T., Kusumaatmaja H., Kuzmin A., Shardt O., Silva G., Viggen E. The Lattice Boltzmann Method. – Cham: Springer, 2017. – 694 с.
3. Viggen E. M. The lattice Boltzmann method: Fundamentals and acoustics: Ph.D. thesis. – Trondheim: NTNU, 2014. – 225 с.
4. Guo Z., Zhao T. S. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media // Physical Review E. – 2002. – Т. 66. – № 3. – 036304.
5. Liu Q., He Y.-L., Li Q., Tao W.-Q. A multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for convection heat transfer in porous media // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 73. – С. 761–775.
6. Meng X., Guo Z. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for incompressible miscible flow with large viscosity ratio and high Péclet number // Physical Review E. – 2015. – Т. 92. – № 4. – 043307.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УПРАВЛЯЕМОГО ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ЗОНДА В ЖИДКОСТИ

А.А. Губин^{1*}, Д.В. Волосников¹, И.И. Поволоцкий¹

¹Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А
e-mail: artyom.gubin@vk.com

При подборе теплоносителя для того или иного теплообменного устройства важной характеристикой является его тепловая проводимость. Особенно важную роль эта величина играет в быстрых тепловых процессах, когда теплоперенос в среде полностью обусловлен теплопроводностью. Такие режимы переноса тепла наблюдаются во многих современных электронных чипах и интегральных схемах.

Метод импульсного нагрева проволоочного зонда хорошо себя зарекомендовал при исследовании теплофизических процессов в жидких средах, в частности при измерении теплопроводности жидкостей. В данном методе существует несколько вариантов нагрева. Одним из них является подход «температурного плато», когда температура зонда поддерживается постоянной. В данном подходе основной измеряемой величиной является подводимая к зонду мощность $P_{\text{экс}}(t)$, которая, как правило, со временем убывает по закону $\sim 1/\sqrt{t}$ при малых временах нагрева. Причём коэффициент пропорциональности зависит от коэффициента теплопроводности исследуемой жидкости $\lambda_{\text{ж}}$, поэтому его величину можно определить по величине $P_{\text{экс}}(t)$.

В настоящей работе предлагается алгоритм расчёта $\lambda_{\text{ж}}$ с помощью метода оптимизации Нелдера-Мида и метода конечных элементов. Алгоритм построен следующим образом. В специализированном пакете Comsol Multiphysics задаётся двумерная модель, соответствующая условиям эксперимента. В данной модели решается основное уравнение теплопроводности для платинового зонда, где параметрами являются плотность ρ , теплоёмкость C_p и теплопроводность $\lambda_{\text{ж}}$ моделируемой жидкости. Величины ρ и C_p задаются либо постоянными величинами, либо аппроксимационными полиномами, зависящими от температуры. При заданном комплексе $\lambda_{\text{ж}} / \rho C_p$ расчёт методом конечных элементов даёт численную мощность $P_{\text{числ}}(t)$, соответствующую при прочих равных условиях мощности $P_{\text{экс}}(t)$. Тогда введя функцию отклонения эксперимента от модели $f = \sum |P_{\text{экс}}(t) - P_{\text{числ}}(t)|$ и минимизируя её по параметру $\lambda_{\text{ж}}$ в соответствии с выбранным методом оптимизации (в данной работе это метод Нелдера-Мида), можно вычислить $\lambda_{\text{ж}}$.

Цель работы – разработка алгоритма расчёта теплопроводности с помощью метода конечных элементов и метода оптимизации по результатам управляемого импульсного нагрева зонда в исследуемом веществе.

Реализация алгоритма проводилась на языке Python с использованием коммерческого пакета Comsol Multiphysics и сторонней библиотеки MPh, представляющей собой API для Comsol. Созданная программа позволяет проводить оптимизацию не только по одному, но и по нескольким параметрам.

Таким образом, в ходе исследования с помощью разработанного алгоритма были вычислены теплопроводности таких гликолей как МПГ, ДПГ, ТПГ, РРГ-425 и РРГ-725, а также рапсового масла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>

Список литературы

1. П.В. Скрипов, А.А. Старостин, Д.В. Волосников, ДАН. 390, 2 (2003)
2. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, А.А. Старостин, П.В. Скрипов, Теплофизика высоких температур, 59, 384 (2021).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ИЗОГНУТОЙ ТРУБЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ СТЕНКИ

Д.К. Журба^{1*}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
e-mail: dzh2812@yandex.ru

Важное значение в развитии энергетики имеет исследование особенностей использования жидких металлов в качестве теплоносителя. В частности интерес представляет изучение их поведения в условиях воздействия на них сил, возникающих в таких конструктивных элементах энергетического оборудования, как повороты трубопроводов и змеевики.

Проведен комплекс численных исследований течений ртути в изогнутой трубе с постоянной температурой стенки. Результаты получены для режимов нагрева ($\Theta_c = 1, \Theta_{ж} = 0$) и охлаждения ($\Theta_c = 0, \Theta_{ж} = 1$) при различных числах Рейнольдса.

Расчёты проводились с помощью метода численного моделирования с использованием кольцевой системы координат [1] в программном комплексе вычислительной гидродинамики ANES [2].

В результате исследования получены поля температуры и скоростей, а также зависимости средней локальной температуры и скорости по длине расчётной области. В случае нагрева и охлаждения обнаружено сильное влияние инерционных и гравитационных сил на характеристики течения, нарушающее осевую симметрию полей скорости и температур. На рис. 1. приведен пример поля скорости, по которому отчётливо видно влияние центробежных сил: ядро потока смещается к периферийной стенке.

Результаты расчётов хорошо сходятся с теоретическими предположениями, что говорит о работоспособности выбранного метода.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований в режимах, соответствующих полученным численным результатам, которые позволят верифицировать расчётный метод и уточнить математическую модель.

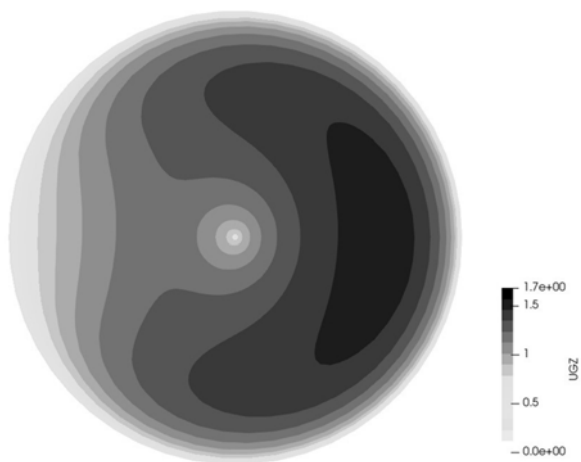


Рис. 1. Поле скоростей U_z для режима нагрева с $Re = 20000$.

Список литературы

1. Разуванов Н.Г., Белавина Е.А., Полянская О.Н., Беляев И.А. Решение задачи конвективного теплообмена в кольцевой трубе в криволинейной системе координат // Теплоэнергетика – 2022 - № 8 - с. 39–49.
2. В.И. Артемов, А.Г. Муров, Г.Г. Яньков. Система автоматизации численного эксперимента ANES: идеология и архитектура// Препринт ИВТАН, № 8 - 247, Москва, 1988.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ CaCl_2 - KCl МЕТОДОМ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ

Ф.М. Кучеренко^{1}, В.Н. Докучович¹*

¹ Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
620137, Екатеринбург, Академическая, 20
e-mail: kucherenko@ihte.ru

Металлический кальций известен как восстановитель оксидов в металлургии тугоплавких и редких металлов. На сегодняшний день основным методом получения кальция является электролиз расплава смеси CaCl_2 - KCl хлорида с жидким медным катодом [1]. Существует необходимость в изучении теплофизических свойств данной системы.

В данной работе были исследованы теплофизические свойства расплавленной системы CaCl_2 - KCl методом коаксиальных цилиндров [2]. Были экспериментально определены температурные зависимости теплопроводности и температуропроводности для 74,1 моль % CaCl_2 – 25,9 моль % KCl , 75,7 моль % KCl – 24,3 моль % CaCl_2 , 50 моль % KCl – 50 моль % CaCl_2 .

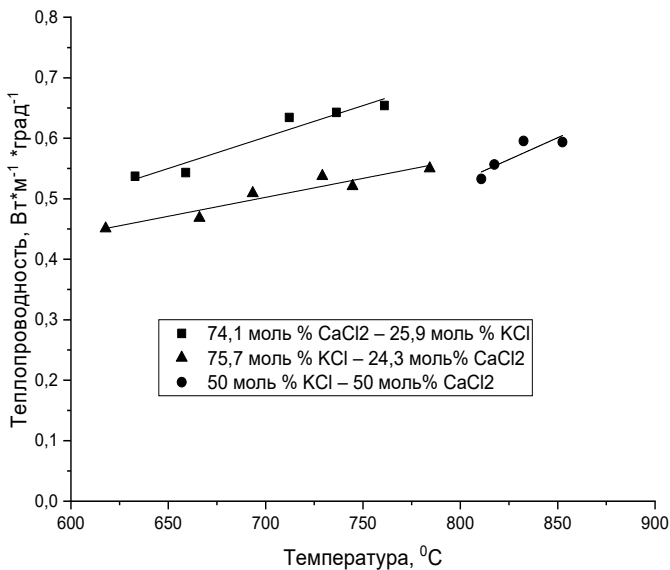


Рис. 1. Теплопроводность системы CaCl_2 - KCl эвтектических составов и эквимольного состава.

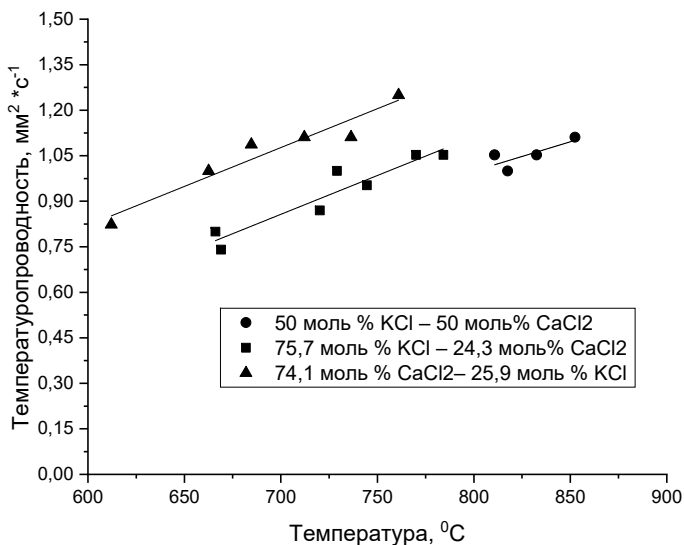


Рис. 2. Температуропроводность системы $\text{CaCl}_2\text{-KCl}$ эвтектических составов и эквимольного состава.

Экспериментальное определение теплофизических свойств осуществлялось в герметичной ячейке, заполненной осушенным аргоном, материал цилиндров – никель марки НП-2. Измерение теплопроводности проводилось в стационарном режиме, а температуропроводности в регулярном режиме первого рода.

Для всех составов наблюдается возрастающая линейная зависимость теплопроводности и температуропроводности от температуры (см. рис. 1 и 2). Также наблюдаемая концентрационная зависимость теплопроводности и температуропроводности возрастает монотонно, нелинейно с увеличением содержания хлорида кальция.

Список литературы

1. Зайков Ю.П., Шуруп Н.И., Суздальцев А.В. Высокотемпературная электрохимия кальция. – Екатеринбург: РИО УрО РАН 2013. 200 с.
2. Smirnov M.V., Khokhlov V.A., Filatov E.S. Thermal conductivity of molten alkali halides and their mixtures // *Electrochimica Acta*. 1987. V. 32. I. 7. P. 1019-1026.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М.В. Лоцманов^{1}, Р.Ф. Рахимов¹, Н.Е. Балабаев¹, И.П. Перцев,
И.А. Беляев¹*

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13с2
e-mail: lotsmanovmv@mail.ru

Магнитогидродинамические (МГД) течения жидких металлов (ЖМ) представляют интерес для исследования, в связи с возможностью потенциального применения ЖМ в качестве теплоносителя в термоядерной энергетике. Одной из малоизученных проблем подобных устройств являются нестационарные быстроизменяющиеся МГД-процессы [1] – срывы плазмы, способные вызывать серьезные механические нагрузки. В численной модели [2] показаны реакции жидкого металла на быстро меняющееся магнитное поле, при этом вопрос экспериментальных исследований таких систем до сих пор остается открытым. Основная сложность связана с проведением измерений в условиях импульсных магнитных полей.

В рамках данной работы поставлена задача измерить пульсации давления длительностью порядка 100 мс, соответствующие времени срыва плазмы, в условиях постоянного и импульсного магнитных полей. Существуют различные типы датчиков давления: механические, электрические и другие типы. Широкое применение находят электрические датчики, обусловленные возможностью создать автоматизацию процессов. Для исследования были выбраны пьезоэлектрические (Kistler 601A и уменьшенная версия 601A, Kistler 701A) и резистивные датчики. Исследования последнего типа показали появления устранимых постоянных смещений в случае возникновения магнитного поля. Параллельно идут работы по воссозданию оптоволоконных датчиков давления [3].

Калибровка датчиков проводилась на калибраторе давления ЭЛЕМЕР-АКД-12КИ (рис. 1), с помощью которого подавалось давление через трубку, в которую помещался датчик давления.

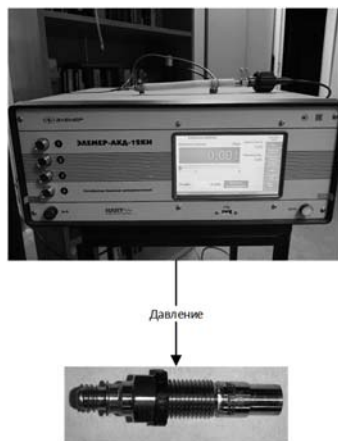


Рис.1 Схема калибровки датчика давления Kistler 601A

Для исследования влияния магнитного поля на датчики использовался электромагнит на базе РК-3 [4]. Первоначально калибровка проводилась с выключенным магнитом. После этого магнит включался, проводилась калибровка в магнитном поле и сразу после получения выборки данных проводились повторно измерения с выключенным магнитом.

Построенные графики позволяют оценить стабильность работы и влияние магнитного поля на характеристики датчика. Результат одного из рассматриваемых средств измерения представлен на рисунке 2. Данная зависимость была получена после калибровки пьезоэлектрического датчика давления Kistler 601A при индукции магнитного поля $B = 1$ Тл (рис. 2 (2)) и $B = 1,7$ Тл (рис. 2 (4)). На графиках наблюдается относительно стабильная линейная характеристика. Влияние магнитного поля проявляется в смещении калибровочной кривой относительно измерений без магнитного поля. При этом важно упомянуть, что угол наклона зависимостей не изменился, что позволяет в дальнейшем учесть влияние магнитного поля, вводя поправочные коэффициенты.

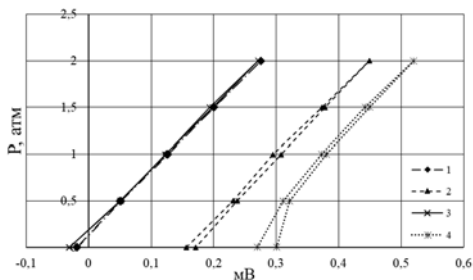


Рис. 2. Калибровка Kistler 601A: 1 – без магнитного поля, 2 – в магнитном поле ($B = 1$ Тл), 3 – сразу после отключения магнитного поля, 4 – в магнитном поле ($B = 1,7$ Тл).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 25-19-00642 "МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкости"

Список литературы

1. ITER EDA N. J. W. S. et al. MHD stability, operational limits and disruptions. – 1999.
2. Smolyanov I., Zikanov O. Exploratory study of liquid-metal response to rapid variation of applied magnetic field //Physical Review E. – 2025. – Т. 111. – №. 6. – С. 065104
3. Жилин В. Г. и др. Оптико-механические преобразователи давления //Теплофизика высоких температур. – 1979. – Т. 17. – №. 5. – С. 1064-1068.
4. Беляев И. А. и др. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики. Теплоэнергетика, (11), 66-74 (2017).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЁРДЫМИ РАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ: ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ И ИХ ПРИРОДЫ

А.В. Микулич^{1,2}, Д.В. Антонов^{1,2}

¹ Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,
Лаборатория теплообмена, Томск 634050, Россия

² Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской академии наук, Новосибирск 630090, Россия
e-mail: avo34@tpu.ru

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) около 2 миллиардов людей по всему миру не имеют доступа к безопасной питьевой воде [1]. Одной из значительных причин ухудшения качества водных ресурсов является наличие в них нерегламентированных примесей, в том числе твердых растворимых, среди которых соли, например хлорид натрия (NaCl) [2,3], сульфат кальция (CaSO₄) и карбонат магния (MgCO₃) [4], а также другие, которые не только влияют на вкус и запах воды, но и представляют серьезную опасность для здоровья человека.

Цель настоящей работы – математическое моделирование теплопереноса неоднородных капель воды с твердыми растворимыми примесями в составе одиночных капель и спрея при варьировании концентрации примесей в диапазоне от 0 и до 5 wt.% и их природы (NaCl, NH₄Cl, CuSO₄).

Валидация математических моделей

На рис. 1 представлена динамика изменения скорости прогрева и испарения (ER) одиночных капель водного раствора хлорида натрия (NaCl) с различными концентрациями ($\eta = 0-5$ wt.%) во времени (t). В промежуток времени до 110 с скорость испарения (ER) для всех рассматриваемых случаев сопоставима, что свидетельствует о слабом влиянии соли на прогрев и испарение капель. Далее после 110 с влияние концентрации примеси (η) увеличивается. И в результате составы с большей концентрацией соли (η) испаряются медленнее в связи с формированием пористого каркаса и снижением парциального давления паров воды в приповерхностном слое неоднородной капли. Сопоставление экспериментально полученных (ER_{exp}) и теоретических (ER_{model}) значений массовой скорости испарения (ER) демонстрирует тенденцию к увеличению разницы между ними с увеличением концентрации (η) раствора NaCl. Но на всем протя-

жении испарения воды отличия не превышают 7%. Это обусловлено формированием агломератов кристаллов соли при высокой их концентрации, что не учитывалось в текущем моделировании.

При увеличении отношения расстояния между каплями к диаметру в 2 раза время испарения снижается в 2.25 раз. Экспериментальные данные коррелируются с результатами численного моделирования, отклонение составило 8%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели, учитывающей термодинамические свойства компонентов системы.

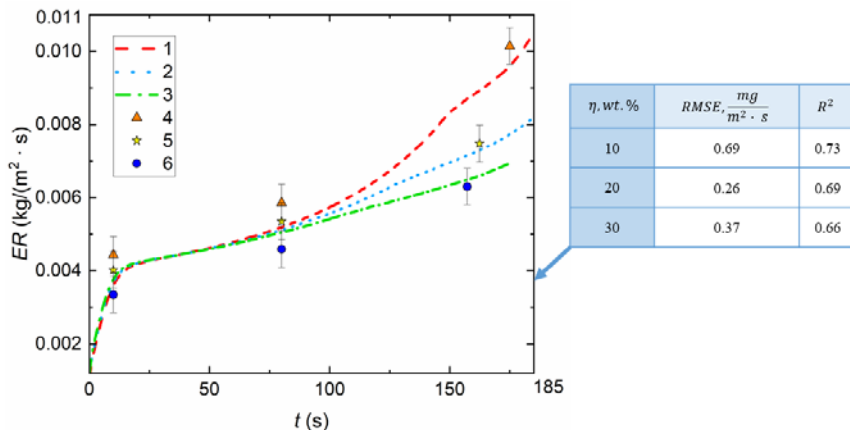


Рис. 1. Мгновенные массовые скорости испарения (ER) одиночных капель водного раствора NaCl при $Rd0 = 1.3 \text{ mm}$ и $Tg = 680 \text{ K}$: 1 – ER_{model} при $\eta=10 \text{ wt.}\%$; 2 – ER_{model} при $\eta=20 \text{ wt.}\%$; 3 – ER_{model} при $\eta=30 \text{ wt.}\%$; 4 – ER_{exp} при $\eta=10 \text{ wt.}\%$; 5 – ER_{exp} при $\eta=20 \text{ wt.}\%$; 6 – ER_{exp} при $\eta=30 \text{ wt.}\%$.

Исследование выполнено при поддержке Национального исследовательского Томского политехнического университета (научный проект 075-15-2025-007).

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения, (n.d.). <https://www.who.int/>, (n.d.).
2. Y. He, X. Li, T. Li, C. Srinivasakannan, S. Li, S. Yin, L. Zhang, Research progress on removal methods of Cl- from industrial wastewater, J. Environ. Chem. Eng. 11 (2023) 109163
3. M.H. Sadafi, I. Jahn, A.B. Stilgoe, K. Hooman, Theoretical and experimental studies on a solid containing water droplet, Int. J. Heat Mass Transf. 78 (2014) 25–33.
4. S. Cho, J. Lim, H. Cho, Y. Yoo, D. Kang, J. Kim, Novel process design of desalination wastewater recovery for CO2 and SOX utilization, Chem. Eng. J. 433 (2022) 133602.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЕРДЫМИ НЕРАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ

М.Е. Микулич^{1,2}, Д.В. Антонов^{1,2}*

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской
академии наук, Новосибирск, 630090, Россия
e-mail: mem7@tpu.ru

Введение

В современном мире сложно найти сферу человеческой деятельности, которая бы не зависела от непрерывного использования природных богатств как для производства высокотехнологической продукции, так и для личного потребления [1]. Среди наиболее востребованных ресурсов является чистая вода [2,3]. Однако экологически чистой воды, пригодной как для технологических нужд, так и для личного потребления становится крайне мало. Это связано с различными загрязнениями, обусловленными антропогенными факторами, что приводит к изменению химического состава и физических свойств воды [4]. Одним из путей решения этой проблемы является разработка и внедрение современных и ресурсоэффективных технологий очистки сточных вод с помощью термических методов от нерегламентированных примесей, включая органические соединения [5], тяжелые металлы [5] и патогенные микроорганизмы [4].

Цель настоящей работы – математическое моделирование теплопереноса неоднородных капель воды с твердыми нерастворимыми примесями при варьировании концентрации примесей в диапазоне от 0 и до 5% и их природы (глина, угольный шлам, полиамид).

Результаты и обсуждения

В данной работе проанализировано влияние твердых нерастворимых примесей на процессы прогрева и высокотемпературного испарения неоднородных капель воды. Разработаны модели, основанные на решении системы уравнений энергии, диффузии компонентов и движения (формула Стокса), в которых учитываются седиментация твердых нерастворимых примесей и процесс образования пористого каркаса.

На рис. 1 представлено сравнение мгновенных скоростей испарения капель воды при использовании разных подходов к моделированию, упомянутых выше. Результаты моделирования с учетом седиментации примесей продемонстрировали более (в 2-3 раза) высокие значения скоростей

испарения по сравнению с результатами без учета этого эффекта. Это связано с менее сферической формой капли и более высокими температурными градиентами, что приводит к развитию конвекции Марангони.

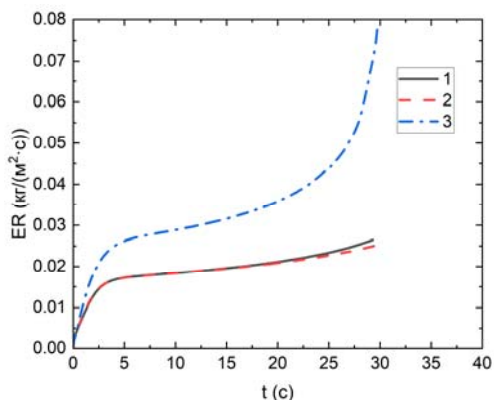


Рис. 1. Мгновенные скорости испарения каплей (ER) воды с добавлением глины ($n = 4\%$, $R_d=1.25$ mm, $T_g=663$ K, $U = 3.15$ м/с, $\varphi = 30\%$): 1 – теоретическое значение Matlab без учета образования пористого каркаса; 2 – теоретическое значение Matlab, учитывающее образование пористого каркаса; 3 – теоретическое значение Comsol с учетом седиментации.

Исследование выполнено при поддержке Национального исследовательского Томского политехнического университета (научный проект 075-15-2025-007).

Список литературы

1. Yuan F., Zhang P. Are natural resources, sustainable growth and entrepreneurship matter endogenous growth theory? The strategic role of technical progress // Resour. Policy. 2024. Vol. 96. P. 105189.
2. M. S.N. dos Santos, J. H.C. Wancura, C.E.D. Oro, F.D. Vezaro, L.P. Ody, M.V. Tres, G.L. Zobot, Urban agriculture and water recycling: A comprehensive outlook on current panorama, Environmental Development, Vol. 54, 2025.
3. M. Y. Arshad, V. Hessel, A. Halog, D. Lewis, N.N. Tran, Decentralisation transition in the chemical, energy, and waste management sectors: Innovations, opportunities, and sustainable pathways – A review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2025. Vol. 76. P. 104307.
4. C. Liu, H. Yu, B. Zhang, S. Liu, C.G. Liu, F. Li, H. Song, Engineering whole-cell microbial biosensors: Design principles and applications in monitoring and treatment of heavy metals and organic pollutants. Biotechnology advances, Vol. 60, 2022.
5. T.M. Joseph, H.E. Al-Hazmi, B. Śniatała, A. Esmaili, S. Habibzadeh, Nanoparticles and nanofiltration for wastewater treatment: From polluted to fresh water, Environmental Research, Vol. 238, P. 1, 2023.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НА ОСНОВЕ РАСПЛАВА «SOLAR SALT»

*И.П. Перцев**¹, *Н.Ю. Пятницкая*¹, *Р.Ф. Рахимов*¹, *М.В. Лоцманов*¹,
*И.А. Беляев*¹.

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Москва, Ижорская, 13с2
e-mail: iwan.pertseff@gmail.com

В современной энергетике растет потребность в эффективных системах накопления энергии для сглаживания пиковых нагрузок и компенсации неравномерной выработки возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые электростанции. Одним из перспективных решений являются тепловые аккумуляторы фазового перехода (ТАФП), использующие скрытую теплоту плавления рабочего вещества. Такие устройства отличаются высокой энергоёмкостью и компактностью по сравнению с аккумуляторами явной теплоты.

В данной работе представлена разработка и численное моделирование спроектированного экспериментального ТАФП, сочетающего в себе накопление как скрытой, так и явной теплоты. В качестве теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом (ТАМ-ФП) выбрана бинарная смесь 60% нитрата натрия (NaNO_3) и 40% нитрата калия (KNO_3), известная как «solar salt». Этот выбор обусловлен оптимальным соотношением стоимости, теплофизических свойств и широким применением в солнечной энергетике. Конструкция аккумулятора включает в себя корпус из талькохлорита, в который помещается ТАМ-ФП, снаружи эта конструкция покрыта тепловой защитой.

Для исследования процессов теплообмена и гидродинамики была разработана численная модель в программном пакете Comsol Multiphysics 5.6. Моделирование проводилось в двумерной осесимметричной постановке задачи для одной ячейки аккумулятора (Рис. 1.). Математическая модель включает нестационарное уравнение теплопроводности для твёрдых тел и систему уравнений Навье-Стокса и энергии для жидкой фазы с учётом естественной конвекции в приближении Буссинеска. Фазовый переход «жидкость-твёрдое тело» (задача Стефана) реализован с помощью энтропийного метода.

Также был проведён численный эксперимент для цикла разрядки аккумулятора. Результаты полученных полей температур и скоростей в различные моменты времени (Рис. 2, Рис. 3.) показывают, что в процессе

охлаждения в расплаве соли возникают устойчивые свободноконвективные течения, которые способствуют выравниванию температурного поля в рассматриваемом объёме. Также были получены зависимости температуры от времени, где чётко наблюдается изотермический участок, соответствующий процессу кристаллизации ТАМ.

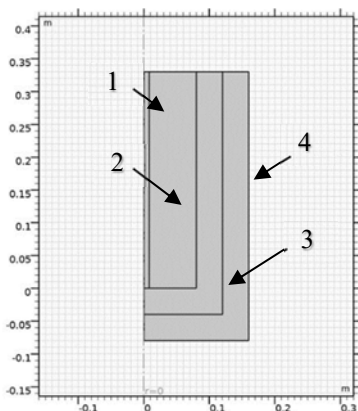


Рис. 1. Геометрия расчётной области: 1 – нагреватель, 2 – ТАМ-ФП, 3 – корпус из талькохлорита, 4 – тепловая защита

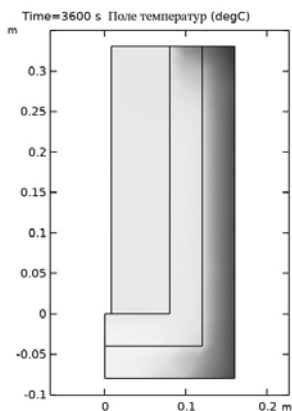


Рис. 2. Распределение температур в момент времени 3600с

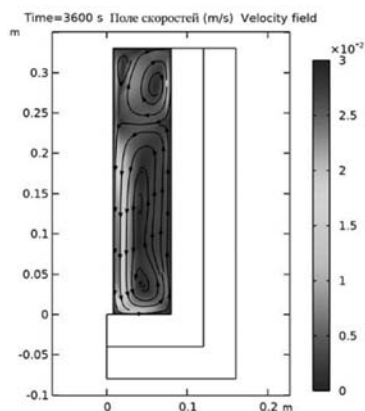


Рис. 3. Распределение скоростей в момент времени 3600с

Список литературы

1. Bauer, T. High temperature molten salts for solar power application / T. Bauer, N. Pflieger, D. Laing [et al.] // Molten Salts Chemistry: From Lab to Applications. - Elsevier, 2013. - Chapter 20.
2. Спицын, И. А. Тепловой аккумулятор фазового перехода / И. А. Спицын, А. А. Орехов, М. В. Чушкин // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - 2008. - № 2. - С. 52-53.
3. Durth, M. Effects of sodium nitrate concentration on thermophysical properties of solar salts and on the thermal energy storage cost / M. Durth, C. Prieto, A. Rodríguez-Sánchez [et al.] // Solar Energy. - 2019. - Vol. 182. - P. 57-63.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОНЕСТАБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

И.С. Романов^{1,2}, А.П. Попов¹*

¹ Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А

² УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19
e-mail: igr.romanov02@gmail.com

Исследование температур спонтанного вскипания и критических параметров является ключевым для понимания фазовых переходов и термодинамических характеристик веществ, поскольку данные о критических свойствах имеют большое практическое значение, так как являются основой для оценки большого количества термодинамических свойств с использованием принципа соответственных состояний.

Целью данного исследования является определение температуры спонтанного вскипания и критических параметров ряда термонестабильных веществ, а также улучшение понимания их фазовых переходов и термодинамических характеристик.

Фазовый переход всегда сопровождается отклонением системы от равновесия, он происходит с участием метастабильной фазы. Понятие метастабильного состояния предполагает локально устойчивое состояние системы, которое сохраняется ограниченное время и переходит в глобально равновесное при достаточно сильных внешних возмущениях, что особенно важно для термонестабильных жидкостей. Поскольку исследуемые вещества являются термонестабильными жидкостями, поэтому исследования критических параметров были выполнены методом импульсного нагрева проволочного зонда [1-3;4], помещенного в исследуемую жидкость. В основе метода лежит нагрев жидкости при помощи импульса электрического тока, подаваемого на тонкий платиновый проволочный зонд. При таком нагреве жидкость достигает температуры, превышающей точку равновесного кипения, оставаясь в метастабильном состоянии до возникновения спонтанного гомогенного зародышеобразования паровой фазы [1,2] без разрушения структуры вещества. Исследуемая жидкость помещалась во фторопластовый стаканчик, что обеспечивало возможность более глубокого входа в метастабильную область: перегревался лишь небольшой объём, и вероятность наличия в нём предрасполагающих центров кипения оставалась крайне малой.

В рамках данного исследования были изучены пять эфиров молочной кислоты (лактаты). Пропиллактат (CASRN 616-09-1) – эфир молочной кислоты и пропанола, применяется в качестве растворителя в лакокрасочной промышленности и производстве биополимеров. Пентиллактат (CASRN 6382-06-5) – эфир молочной кислоты и пентанола, обладает высокой растворяющей способностью для органических веществ и применяется в фармацевтической и косметической промышленности. Бутиллактат (CASRN 138-22-7) – эфир молочной кислоты и бутанола, используется как растворитель, а также в производстве пластиков. Этиллактат (CASRN 97-64-3) – наиболее распространенный эфир молочной кислоты и этанола, широко используется в производстве биоразлагаемых материалов. Метиллактат (CASRN 547-64-8) – эфир молочной кислоты и метанола, обладает высокой растворяющей способностью и экологической безопасностью, используется в процессах очистки и синтезе полимеров. Полученные данные о критических параметрах лактатов важны для областей деятельности, где требуется точное моделирование поведения веществ при высоких температурах и давлениях.

Полученные результаты подтвердили зависимость критической температуры и давления от молекулярной массы лактатов. Поскольку критические свойства этих соединений ранее не измерялись, поэтому сравнение экспериментальных данных производилось с теми, которые были получены с помощью методов групповых вкладов, где вклад элементов определяется природой участвующих атомов.

В ходе данного исследования впервые получены достоверные критические параметры для ряда лактатов, ранее недоступных для прямого измерения. Это восполняет пробелы в термодинамических базах данных и открывает новые возможности в исследовании сложных жидкостей. А также новые экспериментальные данные позволяют усовершенствовать методы групповых вкладов, тем самым расширяя границы предсказательного моделирования для токсичных, нестабильных или дорогостоящих веществ в физической химии и инженерной практике.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. – М.: Наука 1972. 312 с.
2. Скрипов В.П., Синицын Е.Н., Павлов П.А. и др., Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: Справочник. – М.: Атомиздат 1980.
3. Павлов П.А., Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР 1988.
4. Никитин Е.Д., Павлов П.А., Попов А.П. Таблицы стандартных справочных данных. Критическая температура и критическое давление индивидуальных веществ (ГСССД 268-2012). – М.: Стандартинформ, 2012. 27 с.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ, ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б.А. Русанов^{1}, В.Е. Сидоров¹, С.А. Петрова², Л.Д. Сон^{1,2}*

¹ Уральский государственный педагогический университет,
620091, Екатеринбург, Космонавтов, 26

² Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 101

e-mail: rusanov@uspu.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), характеризующиеся отличительными значениями энтропии смешения и склонностью к образованию твёрдых растворов, активно исследуются в последние годы различными научными группами. ВЭС привлекают внимание благодаря высоким значениям механических свойств и коррозионной стойкости. В настоящей работе изучены физические свойства ВЭС AlNiCoCuZr в твёрдом и жидком состояниях.

Сплавы AlNiCoCuZr с различным соотношением компонентов (всего 5 составов) получены методом электродуговой плавки в защитной атмосфере аргона. Изучена их структура методом рентгеновской дифракции, а также физические свойства: плотность (методом проникающего гамма-излучения), электрическое сопротивление (бесконтактным методом во вращающемся магнитном поле) и магнитная восприимчивость (методом Фарадея). Исследования свойств проведены в широком температурном интервале (300 – 1800 К) в защитной атмосфере гелия.

Установлено, что полученные ВЭС представляют собой многофазные сплавы, содержащие твёрдые растворы, а также интерметаллиды. Плотность сплавов монотонно уменьшается при нагреве, в жидком состоянии может быть описана функциями линейной аппроксимации. Показано аномальное изменение электросопротивления и магнитной восприимчивости, которое зависит от концентрации кобальта в составе сплавов. На основе экспериментальных данных рассчитаны некоторые параметры электронной структуры сплавов: парамагнитная температура Кюри, эффективный магнитный момент, приходящийся на атом и число электронов на уровне Ферми.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов получения ВЭС AlNiCoCuZr, а также при их дальнейших исследованиях в качестве перспективных функциональных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00029, <https://rscf.ru/project/23-22-00029/>

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЛАВАХ Al-РЗМ И Ga-РЗМ (РЗМ = Nd, Sm, Gd)

А.И. Русанова^{1}, Л.Д. Сон^{1,2}, Б.А. Русанов²*

¹ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 101

² Уральский государственный педагогический университет,
620091, Екатеринбург, Космонавтов, 26
e-mail: nastmoroz97@yandex.ru

Бинарные сплавы на основе алюминия и галлия с редкоземельными металлами (РЗМ) являются предметом систематического исследования различных научных групп благодаря их уникальным эксплуатационным характеристикам. Так, сплавы Al-РЗМ имеют низкий удельный вес, высокую стеклообразующую способность и коррозионную стойкость. Наряду с этим сплавы Ga-РЗМ характеризуются низкой температурой плавления и широкой областью двухфазного состояния. Диаграммы состояния систем на основе галлия и алюминия с РЗМ имеют большое количество схожих особенностей. В настоящей работе впервые проведено систематическое исследование физических свойств – плотности и вязкости сплавов Al-РЗМ и Ga-РЗМ при высоких температурах.

Сплавы Al-РЗМ получены методом электродуговой плавки из чистых исходных компонентов в атмосфере аргона, составы Ga-РЗМ подготовлены в печи сопротивления в защитной атмосфере гелия, после чего проведен их химический анализ. Концентрация РЗМ (Nd, Sm, Gd) в сплавах не превышала 10 ат. %. Плотность образцов исследована методом проникающего гамма-излучения на автоматизированной установке в температурном интервале 300 – 1800 К в тиглях из Al₂O₃ в атмосфере гелия. Погрешность определения плотности не превышала 1,5 %. Вязкость расплавов изучена методом затухающих крутильных колебаний (метод Е.Г. Швидковского) в интервале температур от ликвидуса до 1800 К в тиглях из Al₂O₃ в атмосфере гелия. Относительная погрешность не превышала 3 %.

Установлено, что исследованные составы характеризуются несовпадением температурных зависимостей плотности и вязкости, полученных при нагреве и последующем охлаждении. Показано, что существенный перегрев расплавов выше температуры плавления приводит к их переходу в более однородное состояние, характеризующееся гладким видом поли-терм. По результатам экспериментов при длительных изотермических выдержках показано, что расплавы Al-РЗМ и Ga-РЗМ имеют длительные не-

монотонные изменения плотности и вязкости (релаксационные процессы), продолжительность и вид которых зависит от температуры перегрева.

Полученные результаты могут использоваться для оптимизации процессов получения новых функциональных материалов, а экспериментальные данные о релаксационных процессах в расплавах Al-PЗМ и Ga-PЗМ позволят предложить модель, описывающую переход расплавов из микронеоднородного в гомогенное состояние.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-00022, <https://rscf.ru/project/25-72-00022/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СПЛАВОВ $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_{15}\text{Si}_3\text{Nb}_4$ И $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{24}\text{V}_{19}\text{Si}_5\text{Nb}_4$ В ТВЁРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

Д.К. Симонов¹, Б.А. Русанов¹, В.Е. Сидоров¹*

¹ Уральский государственный педагогический университет,
620091, Екатеринбург, Космонавтов, 26
e-mail: trytrytrytry23@mail.ru

Сплавы на основе железа и кобальта в объёмно-аморфном состоянии активно изучаются в последние годы благодаря их уникальным электромагнитным свойствам. Эти объекты начинают использоваться в качестве перспективных материалов для сердечников трансформаторов и других устройств. Информация о физических свойствах таких сплавов является одним из востребованных направлений в теплофизике и физике конденсированного состояния. В настоящей работе экспериментально исследована плотность сплавов FeNiBSiNb и CoFeBSiNb в широком температурном интервале, включая жидкое состояние.

Сплавы составов $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_{15}\text{Si}_3\text{Nb}_4$ и $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{24}\text{V}_{19}\text{Si}_5\text{Nb}_4$ получены в индукционной печи из чистых (> 99,9 ат. %) исходных компонентов при их сплавлении при температуре 1800 К в защитной атмосфере аргона в течение получаса. Плотность образцов исследована абсолютным вариантом метода проникающего гамма-излучения. Образцы исследовались в тиглях из Al_2O_3 в защитной атмосфере гелия. Эксперименты проводились в режиме нагрева и последующего охлаждения со скоростью 2 К/мин в температурном интервале 300 – 1550 К.

По результатам экспериментов установлено, что плотность сплава $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{39}\text{V}_{15}\text{Si}_3\text{Nb}_4$ в твёрдом состоянии уменьшается при нагреве, при температуре солидус ($T_S = 1263$ К) начинается процесс плавления. Переход сплава в жидкое состояние происходит при температуре ликвидус ($T_L = 1372$ К). Для сплава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{24}\text{V}_{19}\text{Si}_5\text{Nb}_4$ температура солидус составляет $T_S = 1279$ К, температура ликвидус $T_L = 1384$. Для изученных сплавов характерно ступенчатое уменьшение плотности при нагреве в температурном интервале T_L - T_S , в жидком состоянии плотность может быть описана линейными функциями. На основе экспериментальных данных рассчитаны значения молярных объёмов сплавов при высоких температурах.

Результаты, полученные в рамках проведённых экспериментов, могут быть использованы при дальнейшем исследовании данных сплавов, а также для оптимизации процесса производства новых функциональных объёмно-аморфных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00049, <https://rscf.ru/project/25-23-00049/>

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ К СЛАБОМУ РАСТВОРУ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

А.А. Ситдыков^{1,2*}, Д.В. Волосников¹, И.И. Поволоцкий¹

¹ Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А

² УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19
e-mail: aleksey_sitdykov@mail.ru

Одним из «фирменных отличий» Института теплофизики УрО РАН является сосредоточенность на исследованиях метастабильных состояний, в том числе перегретых образцов диэлектрических жидкостей. Основы данного направления научных изысканий были заложены в работах В.П. Скрипова и П.А. Павлова [1, 2], а в дальнейшем развиты в работах Е.Д. Никитина [3, 4] и П.В. Скрипова [5, 6] в стандарты исследований. Как правило, измерения теплофизических свойств перегретых жидкостей проводятся с помощью методов импульсного нагрева зонда. В настоящий момент активно расширяется перечень объектов для исследований в данной области экспериментальной теплофизики [7]. Речь идет о возможности исследований свойств не только диэлектрических жидкостей, но и слабых растворов кислот. Актуальность данного направления связана с поиском оптимального состава теплоносителя для энергетической отрасли. Поиска компонентного состава с улучшенными антикоррозионными свойствами [8].

Цель данного исследования – экспериментальное определение мгновенного коэффициента теплоотдачи к воде с малыми добавками борной кислоты и другими антикоррозионными добавками. Объектом исследования является: слабый раствор борной кислоты, в том числе с микродобавками для нормализации кислотности pH. Предметом исследования является изучение теплообмена в условиях режима импульсного изменения тепловой нагрузки.

В рамках данного исследования был использован метод изотермического воздействия, позволяющий исследовать теплоотдачу к водным образцам как в области устойчивых, так и в области кратковременно перегретых состояний. Метод основан на кратковременном нагреве малоинерционного платинового зонда, расположенного в исследуемом веществе. Нагрев осуществляется от начальной температуры термостата T_0 до заранее установленного значения $T_{st}(t) = const$. По достижении заданной температуры включается система автоматического регулирования нагрева, обеспечивающая поддержание температуры зонда на заданном уровне в

течение длительности импульса 100 мс. В ходе импульса регистрируются значения температуры зонда $T_{st}(t)$ и электрической мощности $P(t)$, необходимой для термостабилизации температуры исследуемого вещества [9,10].

Экспериментально выявлена зависимость тепловой проводимости перегретых растворов от концентрации добавок. Определен диапазон добавок борной кислоты в воду не влияющих или слабо влияющих на результаты зондовых измерений. В частности, наблюдается регистрируемое в опыте, снижение значения коэффициента теплоотдачи раствора от соответствующих данных основного компонента (воды). Подтверждается необходимость дальнейшего, более глубокого исследования теплообмена в водном растворе борной кислоты. Полученные результаты свидетельствуют о применимости разработанной методики для решения практических задач, связанных с эксплуатацией и оптимизацией состава теплоносителя для различных теплообменных аппаратов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. Москва: Наука, 1972. – 312 с.
2. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии /– М.: Атомиздат, 1980. – 208 с.
3. Павлов П.А., Никитин Е.Д. Кинетика зародышеобразования в перегретой воде // ТВТ. 1980. Т. 18, № 2. С. 354-358.
4. Е.Д. Никитин, П.А. Павлов Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ. Методика ГСССД: № ГСССД МЭ 163 -2010.
5. Павлов П.А., Скрипов П.В. Определение температуры предельного перегрева раствора углекислого газа в воде // ТВТ. 1985. Т. 23, № 1. С. 70-76.
6. Рютин С.Б., Скрипов П.В. Методика экспериментального сопоставления теплового сопротивления наножидкостей в широкой области изменения температуры. Методика ГСССД: № ГСССД МЭ 195-2012.
7. D.V. Volosnikov, I.I.Povolotskiy, P.V. Skripov. Heat transfer by transiently superheated fluids: Decay of unstable water-based mixtures, Applied Thermal Engineering 236 (2024) 121532. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121532
8. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М: Логос, 2010. 604 с.
9. Волосников Д.В., Поволоцкий И.И., Старостин А.А. и др. Теплоотдача к водным растворам гликолей в импульсно перегретых состояниях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 3. С. 384-393.
10. Губин А.А., Марчукова А.А., Поволоцкий И.И. и др. Обработка данных импульсного теплофизического эксперимента с помощью python // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 9. С. 1372-1378.

ВЛИЯНИЕ ГОТОВЫХ ЗАРОДЫШЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ АМОРФНОГО ЛЬДА

*А.С. Томин**, *А.В. Виноградов*, *М.З. Файзуллин*

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амурдсена, 107А
e-mail: tomin.a1991.12@gmail.com

Аморфный лед можно получить осаждением водяного пара в вакууме на криогенную подложку. В зависимости от условий и способа осаждения, полученные конденсаты могут иметь различную степень аморфности. Например, при температуре подложки менее 80 К и вакууме выше 10^{-6} мм. рт. ст, осаждением дозвукового потока пара получают аморфные пленки, практически свободные от кристаллических включений. Так же известно, что при истечении пара из сверхзвукового сопла возможно формирование в потоке кристаллических кластеров [1]. Осаждением таких потоков можно получить аморфные слои с замороженными кристаллическими центрами, которые могут проявить себя в качестве готовых зародышей и ускорить кристаллизацию аморфной фазы. Общие подходы и принципы, применяемые при получении аморфного льда, изучении его теплофизических свойств и устойчивости, часто можно распространить как на аморфные формы многих веществ и соединений, так и на метастабильное состояние в целом.

В том случае, если главную роль играет появление и рост флуктуационных зародышей, а присутствием гетерогенных центров можно пренебречь, устойчивость метастабильного состояния описывается в рамках классической теории гомогенной нуклеации. Однако, при некоторых условиях, образование новой фазы на готовых центрах может оказаться сопоставимым или даже доминирующим [2]. При этом, определяющими факторами является природа, размер и количество готовых зародышей, а также их распределение по объему. Поэтому важно оценить их вклад и определить граничные параметры.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований и теоретическая оценка устойчивости аморфных льдов к кристаллизации на готовых кристаллических центрах. На рис. 1 показаны расчетные зависимости в сравнении с полученными экспериментальными данными.

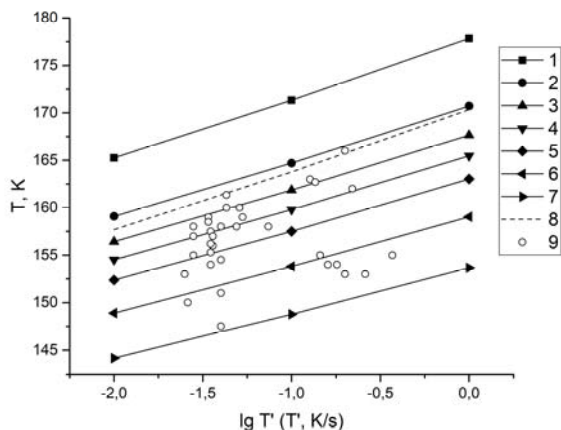


Рис. 1. Зависимость температуры кристаллизации аморфного льда от скорости нагрева. **1-7** – расчетные значения для числа молекул в готовом зародыше $n^* = 10$, **8** – экспериментальная зависимость для гомогенного зародышеобразования [3], **9** – наши экспериментальные данные по кристаллизации на готовых зародышах. **1** – начальная доля кристаллической фазы $X_0 = 10^{-6}$, **2** – 10^{-3} , **3** – 10^{-2} , **4** – $3 \cdot 10^{-2}$, **5** – $6 \cdot 10^{-2}$, **6** – $9 \cdot 10^{-2}$, **7** – $9,9 \cdot 10^{-2}$.

Список литературы

1. Kantrowitz A. Nucleation in Very Rapid Vapor Expansions // J. Chem. Phys. 1951. V. 19. № 9. P. 1097.
2. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П. Нестационарная нуклеация в слоях аморфного льда в присутствии искусственно внесенных кристаллических центров // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 645-649.
3. М. З. Файзуллин, А. В. Виноградов, В. П. Коверда, Свойства газовых гидратов, полученных неравновесной конденсацией молекулярных пучков // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 852–862.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТЕРИАЛА ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА

Е.С. Ушакова, В.Г. Тупоногов, В.А. Хотинков

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19
e-mail: ellizaweta@gmail.com

Для теплоизоляции стенок камеры сгорания реактивного двигателя при воздействии теплового и эрозионного потоков продуктов сгорания применяются теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе бутадиен-нитрильного каучука, обладающие стабильной теплостойкостью и высокими показателями физико-механических свойств [1]. Поскольку в объеме ТЗП при транспортировании и хранении изделия возникает сложное напряженное состояние, обусловленное возникновением разницы значений температуры на поверхности и внутри изделия при циклическом нагреве и охлаждении [2], представляет особый интерес исследование зависимости прочностных характеристик теплозащитного материала (ТЗМ) от скорости его деформирования. Целью данной работы являлось определение скоростной чувствительности материала ТЗП, изготовленного из бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26.

Одной из основных характеристик малопластичных материалов является предел прочности при разрыве σ_b (МПа) – максимальное напряжение, при котором происходит разрушение образца при растяжении. Для определения σ_b нагрузку, при которой произошел разрыв образца, относят к площади поперечного сечения образца F_0 (мм²) до деформации. Для оценки истинного напряжения при растяжении S (МПа) на нагрузку, прикладываемую к образцу, относят к фактическому значению площади его поперечного сечения F_i (мм²) в каждый момент времени.

Влияние скорости деформации при испытаниях на растяжение объясняется скоростью разрастания микродефектов [3]. Установлено, что значение предела прочности оказывается, как правило, тем выше, чем выше скорость деформации [4]. Внешнее усилие, прикладываемое к образцу, распределяясь по межатомным связям во времени, ослабляет силы притяжения атомов, снижая потенциальный барьер, который препятствует распаду межатомных связей.

Для определения свойств ТЗМ изготовлены образцы ТЗП из резиновой смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 СНТ со

¹ ГОСТ 18694-2017 Смолы фенолоформальдегидные. Технические условия

² ГОСТ 127.4-93 Сера молотая для резиновых изделий и каучуков. Технические условия

следующими добавками: уголь древесный, кальция стеарат, смола фенолоформальдегидная (ГОСТ 18694¹) [5], сера техническая (ГОСТ 127.4²). Резиновая смесь вулканизирована компрессионным способом при температуре плюс 150 °С и давлении 12 МПа с выдержкой в течение 90 мин и последующей термообработкой при температуре плюс 135 °С с выдержкой в течение 150 мин. Из вулканизированных заготовок резиновой смеси для определения механических характеристик изготовлены образцы согласно ГОСТ 270³ (тип 2).

Определение истинного значения предела прочности при разрыве S_B (МПа) проводилось при испытаниях на одноосное растяжение образцов ТЗМ при комнатной температуре с использованием испытательной машины Instron 3382. Оценка влияния скорости деформации на значение S_B проводилась в диапазоне скоростей перемещения активного захвата испытательной машины (траверсы) $V = 0,1 \dots 300$ мм/мин. Скорость деформации определялась по формуле:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{l_0},$$

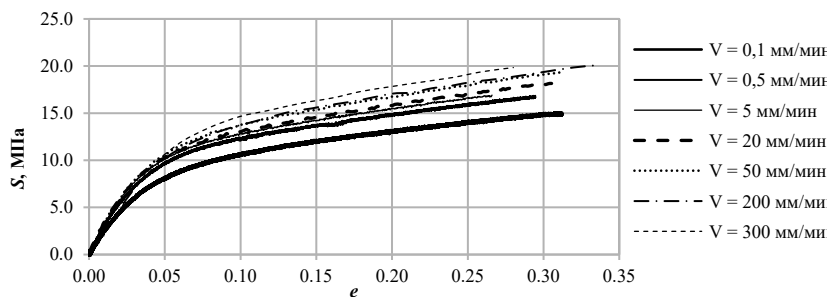
где $l_0 = 25$ мм – длина рабочей части образца типа 2 (ГОСТ 270).

Для большинства материалов влияние скорости деформации на значение величину S_B при определенной температуре может быть описано степенным законом:

$$S_B = C \cdot \dot{\epsilon}^m,$$

где: C – коэффициент аппроксимации, m – скоростная чувствительность материала.

Результаты испытаний ТЗМ на растяжение при различных значениях V в виде диаграмм растяжение - относительная деформация представлены на рис. 1. Показан рост значения истинного предела прочности при разрыве исследуемого материала с увеличением скорости перемещения траверсы испытательной машины.



³ ГОСТ 270-75 Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении

Рис. 1. Диаграммы растяжения при комнатной температуре для образцов ТЗМ при различных значениях скорости перемещения траверсы испытательной машины

Для каждого значения V определено соответствующее значение скорости деформации $\dot{\epsilon}$. Экспериментальные значения истинного предела прочности S_b при различных скоростях деформации представлены в логарифмических координатах на рис. 2. Определена аппроксимирующая степенная зависимость, значения коэффициентов аппроксимации $C = 21$ и скоростной чувствительности $m = 0,032$. Качественно установлена положительная скоростная чувствительность исследуемого ТЗМ. Для количественной оценки на рис. 2 приведены зависимости значений истинного предела прочности от скорости деформации для натурального каучука (НК) и бутил-стирольного каучука марки СКС-30 [6]. Показано, что ТЗП на основе бутадиен-нитрильного каучука марки СКН-26 имеет при повышенных прочностных характеристиках умеренную скоростную чувствительность, выраженную тангенсом угла наклона аппроксимирующей прямой.

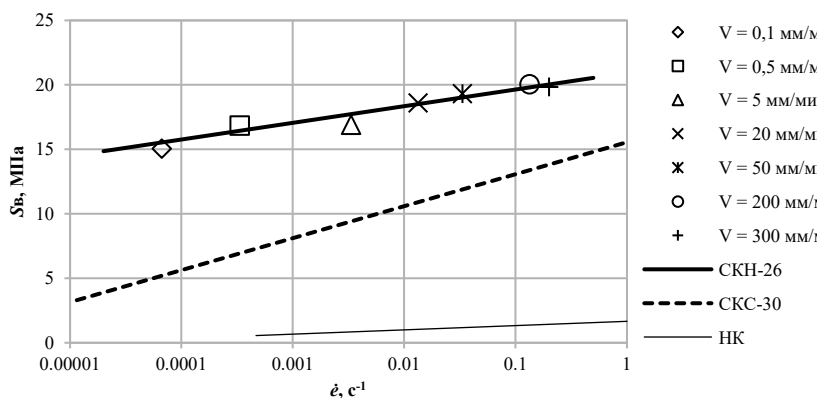


Рис. 2. Экспериментальные данные (для СКН-26) и аппроксимирующие зависимости (для СКН-26, СКС-30 и НК) значений истинного предела прочности от скорости деформации

Таким образом, в результате испытаний на растяжение при значениях скорости перемещения траверсы испытательной машины в диапазоне от 0,1 до 300 мм/мин определена аппроксимирующая зависимость скоростной чувствительности исследуемого материала ТЗМ, получены значения коэффициентов $C = 21$ и $m = 0,032$. Установлено, что скоростная чувствительность m является положительной, т.е. с увеличением скорости деформации растет значение истинного предела прочности в рассмотренном

диапазоне скоростей. Относительно величин S_v для бутил-стирольного каучука марки СКС-30 и НК, скоростная чувствительность ТЗП на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-26 имеет умеренный характер. Полученные данные об исследуемом ТЗМ могут быть положены в основу проектирования ТЗП новых изделий, подверженных воздействию циклического изменения температуры окружающей среды.

Список литературы

1. Чайкун А.М., Алифанов Е.В., Наумов И.С. Резины на основе бутилкаучука (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 6 (24). С. 7.
2. Догадкин В.А., Кольга В.В., Трухин В.Р. Параметрический анализ прочности сопла ракетного двигателя на твердом топливе // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24. № 3. С. 510–520.
3. Валишин А.А., Степанова Т.С., Карташов Э.М. Математическое моделирование разрушения полимеров и композитов в переменных температурно-силовых внешних условиях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2011. № 3. С. 17–33.
4. Терешатов В.В., Макарова М.А., Слободинюк А.И., Внутских Ж.А., Сеничев В.Ю. Новые представления о взаимосвязи структуры, предельных физико-механических свойств и деформационного поведения наноструктурированных полимерных систем на основе олигодиизоцианатов // Вестник Пермского научного центра. 2017. № 1. С. 81–86.
5. Федорова А.Ф., Давыдова М.Л., Соколова М.Д., Павлова В.В. Влияние фенольных антиоксидантов на условную прочность при растяжении бутадиен-нитрильных резин при натурной экспозиции // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 12. С. 22–29.
6. Бартнев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. - М.: Химия 1964. 388 с.

РАСПЫЛ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Р.Е. Черкасов**, *Д.В. Антонов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, Ленина 30
e-mail: rec3@tpu.ru

Введение

Двухтопливные системы имеют широкий потенциал к применению в авиации благодаря высокому удельному импульсу и экономичности. По сравнению с монотопливными системами они обеспечивают лучшие энергетические показатели, снижают концентрации вредных выбросов и стабилизируют процессы горения [1]. Такие двигатели особенно эффективны для задач целевого управления [2]. Одним из ключевых элементов двухтопливных двигателей является форсуночное устройство, которое обеспечивает подготовку топлива к сжиганию в камерах сгорания двигателей [3]. Каким образом будет осуществляться технология распыла топлива влияет на производительность двигателя [4]. Актуальной задачей остается оптимизация работы инжектора, особенно в переменных режимах. Перспективным направлением является микроволновый нагрев, улучшающий смесеобразование топлив.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение характеристик распыления двухжидкостного топлива на примере воды/талового масла в условиях микроволнового излучения.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлены результаты исследования распыла топлив в двухканальной форсунке. С увеличением давления (3–6 атм) средний диаметр капель уменьшается для всех видов топлива. Наименьший размер (~0,1 мм) достигнут при 6 атм для воды, наибольший (~0,9 мм) — при 3 атм для талового масла, что связано с разницей в вязкости жидкостей. Микроволновый нагрев снижает диаметр капель во всех экспериментах. Для воды (рис. 1а) наиболее заметный эффект наблюдался при 3 атм: диаметр уменьшился с 0,5 до 0,35 мм. Для смеси вода/масло (7/3, рис. 1б) тенденция сохранилась, но на 6 атм влияние СВЧ отсутствовало из-за низкой диэлектрической проницаемости масла. При распылении чистого масла (рис. 1в) эффект микроволнового нагрева был минимален: на 3 атм диаметр снизился с 0,9 до 0,85 мм, на 6 атм разницы не зафиксировано.

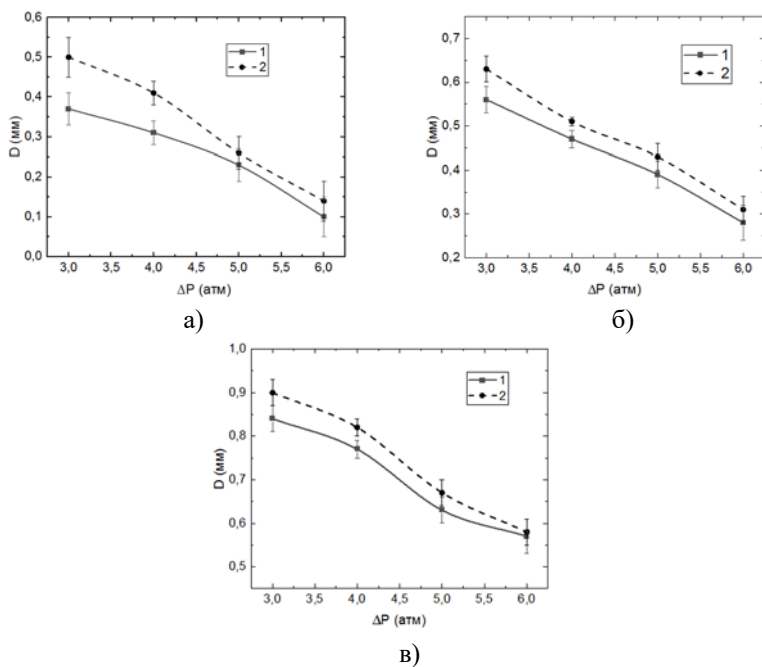


Рис. 1. Зависимость средних диаметров капли от давления впрыска при распылении: а) воды, б) двухжидкостного топлива: вода, масло (7/3), в) талового масла с СВЧ нагревом (1) и без нагрева (2)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10031.

Список литературы

1. Boretti A. Dual-fuel engines diesel-LNG // 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). IEEE, 2021. P. 1–5.
2. Inoue C., Oishi Y., Kawatsu K. Direct formulation of bipropellant thruster performance for quantitative cold-flow diagnostic // J. Propuls. Power. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021. Vol. 37, № 6. P. 842–849.
3. Payri R., Viera P., Gopalakrishan V., Szymkowicz P. The effect of nozzle geometry over the evaporative spray formation for three different fuels // Fuel. Elsevier, 2017. Vol. 188. P. 645–660.
4. Garcia A., Monsalve-Serrano J., Sanchis E., Fogue-Robels A. Exploration of suitable injector configuration for dual-mode dual-fuel engine with diesel and OME_x as high reactivity fuels // Fuel. Elsevier, 2020. Vol. 280. P. 118670.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ СТРУИ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ

В.А. Шурупов^{1,2}, К.А. Бусов²*

¹ УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, Мира, 19

² Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107А
e-mail: shurupov.vladislav@yandex.ru

Одна из главных задач в процессах диспергирования вещества [1-3] заключается в получении мельчайших частиц рабочей среды и в определении их размера. Эффективным методом дробления струи жидкости на тонкодисперсный спрей является ее интенсивное вскипание [4]. Распад потока в этом случае происходит за счет фазового перехода жидкость – пар. Так, например, при истечении метастабильной (перегретой) воды из камеры высокого давления через короткий канал, внутри струи образуется большое количество критических паровых зародышей, растягивающих жидкость на пленки при своем увеличении в ее объеме. Разрыв пленок жидкости приводит к образованию большого количества капель различного диаметра.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния перегрева жидкости на дисперсный состав факела распыла.

Исследование струй перегретой воды проводилось при её истечении из герметичного сосуда высокого давления объемом $V=650 \text{ см}^3$ через короткие каналы ($l/d < 7$, l – длина, d – диаметр канала) в неподвижную воздушную среду. В опытах использовались каналы с различным поперечным сечением. Начальные условия (температура, давление) в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широком диапазоне: $T=380 - 580 \text{ К}$, $p=0.1 - 10 \text{ МПа}$. Анализ дисперсного состава факела распыла перегретой дистиллированной воды проводился микроскопическим методом [5].

Из фотографий (рис. 1) видно, что возрастание степени перегрева приводит к значительному уменьшению количества крупных частиц и к существенному увеличению количества мелких капель струи. До проявления интенсивного вскипания в потоке преобладают капли, имеющие размер около $d=30 \text{ мкм}$. В условиях интенсивных фазовых превращений заметно увеличивается число частиц наименьшей фракции. Причем, чем интенсивнее происходит появление паровых пузырьков и их взаимодействие между собой, тем больше образуется капель имеющих размер около $d=10 \text{ мкм}$. Таким образом, распыление жидкости становится более однородным и мелкодисперсным.

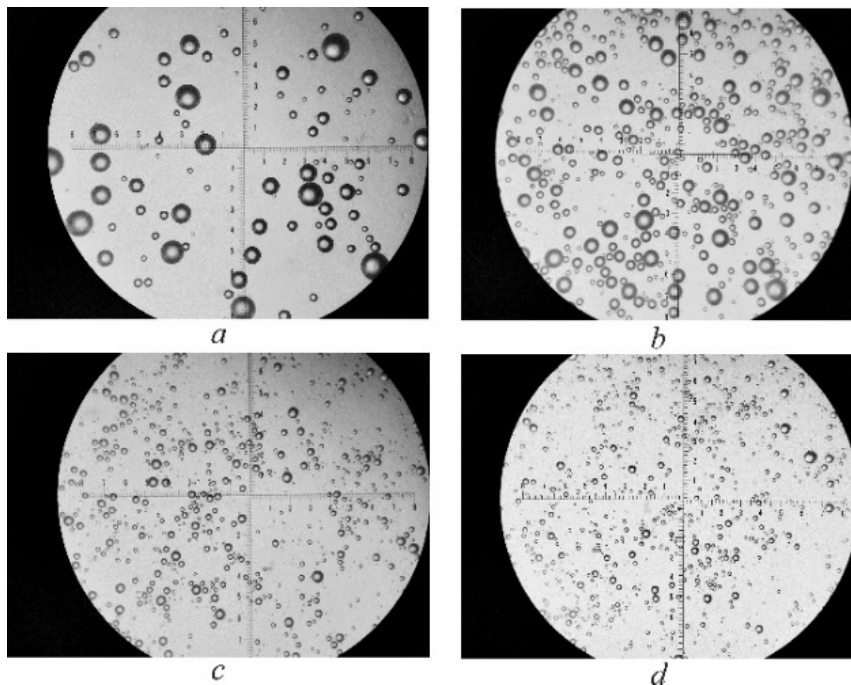


Рис. 1. Фотографии капель (стократное увеличение), образующиеся в процессе вскипания жидкости при следующих температурах: *a* – $T_s=423$ K, *b* – $T_s=453$ K, *c* – $T_s=493$ K, *d* – $T_s=573$ K

Список литературы

1. Brown Ralph, J. Louis York. Sprays formed by flashing liquid jets // AICHE Journal. 1962. V. 8 №. 2. P. 149-153.
2. A. H. Lefebvre, V. G. McDonell, Atomization and Sprays, CRC Press, 2017.
3. N. Ashgriz (ed.), Handbook of atomization and sprays: theory and applications, Springer, 2011.
4. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. – М.: Наука 1972. 312 с.
5. Busov K. A. The Effect of Boiling-Up on the Shape and Droplet Size of a Jet of Superheated Water Discharged Through a Semi-Cylindrical Nozzle // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. №. 136. 106199.

СОДЕРЖАНИЕ

ДВУХФАЗНЫЕ ПАССИВНЫЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА Ю.Ф. Майданик	5
УПРАВЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИКОЙ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФФУЗОРЕ Л.В. Плотников	7
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В Т-ОБРАЗНОЙ ЯЧЕЙКЕ А.А. Бондаренко, И.В. Колесниченко	9
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ И МАССОПЕРЕНОСА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КАСКАДНОЙ MRT МОДЕЛИ И.В. Володин, А.А. Алабужев	11
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УПРАВЛЯЕМОГО ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ЗОНДА В ЖИДКОСТИ А.А. Губин, Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий	13
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ИЗГНУТОЙ ТРУБЕ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ СТЕНКИ Д.К. Журба	15
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ SASL2-KCL МЕТОДОМ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ Ф.М. Кучеренко, В.Н. Докутович	17
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ М.В. Лоцманов, Р.Ф. Рахимов, Н.Е. Балабаев, И.П. Перцев, И.А. Беляев	19
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЁРДЫМИ РАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ: ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ И ИХ ПРИРОДЫ А.В. Микулич, Д.В. Антонов	21
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЕРДЫМИ НЕРАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ М.Е. Микулич, Д.В. Антонов	23
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НА ОСНОВЕ РАСПЛАВА «SOLAR SALT» И.П. Перцев, Н.Ю. Пятницкая, Р.Ф. Рахимов, М.В. Лоцманов, И.А. Беляев	25

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПОНТАННОГО ВСКИПАНИЯ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОНЕСТАБИЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ И.С. Романов, А.П. Попов	27
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ, ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ Б.А. Русанов, В.Е. Сидоров, С.А. Петрова, Л.Д. Сон	29
РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЛАВАХ Al-PЗМ И Ga-PЗМ (PЗМ = Nd, Sm, Gd) А.И. Русанова, Л.Д. Сон, Б.А. Русанов	31
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СПЛАВОВ Fe₃₉Ni₃₉B₁₅Si₃Nb₄ И Co₄₈Fe₂₄B₁₉Si₅Nb₄ В ТВЁРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ Д.К. Симонов, Б.А. Русанов, В.Е. Сидоров	33
КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ К СЛАБОМУ РАСТВОРУ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА А.А. Ситдыков, Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий	35
ВЛИЯНИЕ ГОТОВЫХ ЗАРОДЫШЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ АМОРФНОГО ЛЬДА А.С. Томин, А.В. Виноградов, М.З. Файзуллин	37
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТЕРИАЛА ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА Е.С. Ушакова, В.Г. Тупоногов, В.А. Хотин	39
РАСПЫЛ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Р.Е. Черкасов, Д.В. Антонов	43
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ СТРУИ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ В.А. Шурупов, К.А. Бусов	45