



**ХVI РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**  
(с международным участием)  
**ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ**  
(РКТС–16)  
24–29 сентября 2023 г.

**ПРОГРАММА**  
**И СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

Москва, 2023

Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ (РКТС) является одним из основных теплофизических форумов, проводимых в мире, в число которых входят: Европейская конференция по теплофизическим свойствам; Азиатская конференция по теплофизическим свойствам и Симпозиум по теплофизическим свойствам, проводимый в США.

Конференция РКТС-16 состоится в научно-оздоровительном комплексе «Журавли», г. Махачкала, Республика Дагестан.

Предыдущая конференция РКТС-15 проводилась на базе ОИВТ РАН в г. Москва в 2018 году.

Организаторы:

- Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
- Российская академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
- Национальный комитет по теплофизическим свойствам веществ
- Объединенный институт высоких температур РАН
- Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал Объединенного института высоких температур РАН
- Национальный исследовательский университет «МЭИ»
- Московский физико-технический институт (государственный университет)
- Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
- Дагестанский государственный университет «ДГУ»

## ПРОГРАММА

XVI Российской конференции (с международным участием)  
по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16)  
(24-29 сентября 2023 г., г. Махачкала, Республика Дагестан)

### 24 сентября 2023 г.

19:00. Фуршет

### 25 сентября 2023 г.

9:00-10:00. Регистрация участников конференции.

10:00-10:15. Открытие конференции

#### *Уравнения состояния, фазовые переходы и критические явления*

- 10:15–10:45 **Абдулагатов Ильмутдин Магомедович** (ИГиВЭ, Махачкала, Россия; ДагГУ, Махачкала, Россия) *Критические аномалии теплофизических свойств сверхкритических флюидов и линии Видома, Френкеля, и Фишера–Видома (приглашенный доклад)*
- 10:45–11:15 **Скрипов Павел Владимирович** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия) *Явление перегрева: к 100-летию пионерских опытов Висмера (приглашенный доклад)*
- 11:15–11:30 **Хабриев Ильнар Шамилевич** (ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия), Хайрутдинов В.Ф., Габитов И.Р., Шамсетдинов Ф.Н., Абдулагатов И.М. *Термодинамические характеристики систем участвующих в процессе смешения полимеров с использованием сверхкритических флюидных сред*
- 11:30–12:00 Кофе-брейк
- 12:00–12:15 **Парамонов Михаил Анатольевич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия), Минаков Д.В., Левашов П.Р. *Исследование металлов в околоскритическом состоянии методом квантовой молекулярной динамики*
- 12:15–12:30 **Гальцов Илья Сергеевич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия), Парамонов М. А., Фокин В. Б., Минаков Д. В., Дороватовский А. В., Шейндлин М. А. *Железо: исследование теплофизических свойств на основе первопринципных расчетов и эксперимента по импульсному нагреву*
- 12:30–12:45 **Базаев Эмиль Ахмедович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Базаев А.Р., Абдулагатов И.М., Османова Б.К. *Фазовые превращения и критические свойства системы 1-пропанол–н-гептан*
- 12:45–13:00 **Османова Баджиханум Камильевна** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Базаев Э.А., Базаев А.Р. *Энергетические характеристики системы вода–1-пропанол*
- 13:00–14:30 Обед

#### *Уравнения состояния, фазовые переходы и критические явления*

- 14:30–15:00 **Шищенко Константин Владимирович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия; ЮУрГУ, Челябинск, Россия; ФИЦ ПХФ и МХ РАН,

Черноголовка, Россия; Филиал МГУ, Саров, Россия) *Модели уравнений состояния материалов в широком диапазоне давлений и температур (приглашенный доклад)*

9. 15:00–15:15 **Смирнов Григорий Сергеевич** (НИУ ВШЭ, Москва, Россия; ОИВТ РАН, Москва, Россия), Белоножко А.Б. *Линия плавления железа в условиях ядра Земли на основе первопринципных расчетов и анализа экспериментальных данных*
10. 15:15–15:30 **Кулямина Елена Юрьевна** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Зицерман В.Ю. *Согласование термодинамических данных при плавлении осмия*
11. 15:30–15:45 **Боярских Ксения Александровна** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия; ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия), Хищенко К.В. *Уравнение состояния жидкой фазы молибдена при высоких давлениях и температурах в рамках четырех простых моделей*
12. 15:45–16:00 **Середкин Николай Николаевич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МИФИ, Москва, Россия; ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия), Хищенко К.В. *Моделирование ударной сжимаемости сплавов рений—молибден в широком диапазоне давлений и температур*
- 16:00–16:30 **Кофе-брейк**
13. 16:30–16:45 **Щербаков В.Д.** (КФУ, Казань, Россия), Низамутдинов А.С. *Оптическая спектроскопия дефектных центров в кристаллах ряда флюорита  $MeF_2:Mn^{2+}$  ( $Me = Ca, Sr, \beta - Pb, Ba$ )*
14. 16:45–17:00 **Магомедов Рамазан Абдуллаевич** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия), Ахмедов Э.Н. *Применение фрактального уравнения состояния для расчета изотерм метана*
15. 17:00–17:15 **Григорьев Б. А.** (ФГАОУ ВО РГУНГ им. И. М. Губкина, Москва, Россия), Александров И. С., Герасимов А. А., Беркова Е.А. *Термодинамические свойства и уравнение состояния нормального гептадекана*
16. 17:15–17:30 **Устюжанин Евгений Евгеньевич** (МЭИ, Москва, Россия), Очков В.Ф., Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Рыков В.А. *Построение комбинированных скейлинговых моделей на основе совместного обобщения разнородных данных о термодинамических свойствах  $SF_6$  на линии насыщения*
17. 17:30–17:45 **Поднек Виталий Эдуардович** (ИПНГ РАН, Москва, Россия), Кияченко Ю.Ф., Юдин И.К., Григорьев Б.А. *Новый оптический метод определения критических параметров жидких смесей*
18. 17:45–18:00 **Хайрутдинов Венер Фаилевич** (ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия; ООО «ИВЦ «ИНЖЕХИМ», Казань, Россия), Хабриев И.Ш., Салихов И.З., Абдулагатов И.М., Фарахов М.И. *Фазовое равновесие системы «извлекаемая компонента - экстрагент» как ключевой параметр при реализации СКФ экстракционных процессов*

**26 сентября 2023 г.**

**Транспортные, оптические и радиационные свойства веществ**

19. 10:00–10:30 **Абдуллаев Расул Нажмуудинович** (ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия), Хайрулин Р.А., Агажанов А.Ш., Козловский Ю.М., Самошкин Д.А., Хайрулин А.Р., Станкус С.В. *Теплофизические свойства магния и магний-литиевых сплавов (приглашенный доклад)*

20. 10:30– **Богатищева Наталья Сергеевна** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия),  
10:45 Никитин Е.Д., Попов А.П., Файзуллин М.З. *Теплофизические свойства веществ, вовлеченных в производство биотоплив второго поколения*
21. 10:45– **Пашук Евгений Григорьевич** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия),  
11:00 Абдулагатов И.М. *Температурная зависимость скорости ультразвука смесей пропилбензол-октан на линии насыщения в интервале 277...473 К*
22. 11:00– **Щербаков В.Д.** (КФУ, Казань, Россия), Низамутдинов А.С. *Оптическая спектроскопия фазовых переходов второго рода в гомологическом ряду кристаллов со структурой флюорита  $MeF_2$ :  $Mn^{2+}$  ( $Me = Ca, Sr, \beta - Pb, Ba$ )*
23. 11:15– **Магомедов Махач Насрутдинович** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия)  
11:30 *Зависимость поверхностной энергии от P-T-условий и размера нанокристалла*  
11:30– **Кофе-брейк**  
12:00
24. 12:00– **Рамазанова Асбат Энверовна** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия),  
12:15 Абдулагатов И.М. *Теплопроводность резервуарных горных пород, насыщенных углекислым газом*
25. 12:15– **Богатищева Наталья Сергеевна** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия),  
12:30 Галкин Д.А., Никитин Е.Д., Панов Г.В., Попов А.П. *Теплофизические свойства диметилловых эфиров этиленгликолей*
26. 12:30– **Волосников Дмитрий Владимирович** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия),  
12:45 Поволоцкий И.И., Скрипов П.В. *Транспортные и критические свойства разделяющегося водного раствора МБЭЭГ*
27. 12:45– **Антипов Руслан Романович** (КНИТУ-КАИ, Казань, Россия), Билалов Т.Р.,  
13:00 Сабирова А.Д. *Электропроводность сверхкритического  $CO_2$ : исследования, характеристики и перспективы применения*  
13:00– **Обед**  
14:30

### ***Теплофизические свойства веществ при высоких температурах***

28. 14:30– **Сенченко Владимир Николаевич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия)  
15:00 *Экспериментальные исследования теплофизических свойств материалов при высоких температурах методами импульсного электрического нагрева (приглашенный доклад)*
29. 15:00– **Мальцев Максим Александрович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ,  
15:15 Долгопрудный, Россия), Морозов И.В., Осина Е.Л., Миненков Ю.В.  
*Термодинамические свойства двухатомных соединений аргона*
30. 15:15– **Пряжников Максим Иванович** (СФУ, Красноярск, Россия), Минаков А.В.  
15:30 *Объемная вязкость жидкостей и суспензий*
31. 15:30– **Хайрулин Андрей Рашидович** (ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия),  
15:45 Станкус С.В., *Калорические свойства жидких сплавов системы Cs—Pb*
32. 15:45– **Быков Виктор Анатольевич** (ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия),  
16:00 Куликова Т.В., Сипатов И.С., Стерхов Е.В., Ягодин Д.А. *Синтез, структура, теплофизические и электрические свойства высокоэнтропийных сплавов  $CoCrFeNi$*   
16:00– **Кофе-брейк**  
16:30

33. 16:30–  
16:45 **Швецов Даниил Петрович** (ИЦФМЖ УрФУ, Екатеринбург, Россия), Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Каймин В.У., Цепелева Н.П. *Исследование поверхностного натяжения и плотности нержавеющей стали с разным содержанием титана*
34. 16:45–  
17:00 **Фокин Владимир Борисович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия), Минаков Д.В., Парамонов М.А., Левашов П.Р. *Расчет транспортных и оптических свойств циркония и свинца с помощью метода квантовой молекулярной динамики и формулы кубо–гринвуда*
35. 17:00–  
17:15 **Магомедов М.М-Ш.** (ОИВТ РАН, Москва, Россия) *Теплопроводность многокомпонентных водно–солевых систем*
36. 17:15–  
17:30 **Васин Андрей Андреевич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Бгашева Т.В., Петухов С.В., Шейндлин М.А. *Теплофизические свойства карбида циркония при высоких температурах*
37. 17:30–  
17:45 **Косс Ксения Георгиевна** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия), Лисина И.И., Петров О.Ф. *Корректность вычисления фрактальной размерности траектории коллоидной частицы в дисперсионной среде*

19:00-21:00. Стендовая секция

**27 сентября 2023 г.**

***Теплофизические свойства веществ при высоких температурах. Экстремальные состояния***

38. 10:00–  
10:15 **Ивлиев Андрей Дмитриевич** (РГППУ, Екатеринбург, Россия; ТУ УГМК, Верхняя Пышма, Свердловская область, Россия), Горбатов В.И., Полев В.Ф., Куриченко А.А., Смирнов А.Л. *Твердые растворы и интерметаллические соединения в сплавах NiV. влияние отжига образцов на кинетические свойства*
39. 10:15–  
10:30 **Хибиев Азамат Хизирович** (КБГУ, Нальчик, Россия), Алчагиров Б.Б., Коков З.А., Элимханов Д.З. *К вопросу о температурной зависимости поверхностного натяжения ртути вблизи ее кристаллизации (обзор)*
40. 10:30–  
10:45 **Мурлиева Жарият Хаджиевна** (ДагГУ, Махачкала, Россия; ДГУНХ, Махачкала, Россия), Палчаев Д.К. *Корреляция фононного теплосопrotivления с коэффициентом теплового расширения неметаллов*
41. 10:45–  
11:15 **Палчаев Даир Каирович** (ДагГУ, Махачкала, Россия), Мурлиева Ж.Х., Рабаданов М.Х., Исахов М.Э., Гаджимагомедов С.Х., Эмиров Р.М., Рабаданова А.Э. *Природа температурной зависимости электросопротивления проводников (приглашенный доклад)*
42. 11:15–  
11:30 **Дороватовский Андрей Владимирович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Шейндлин М.А., Минаков Д.В. *Прямое измерение наклона кривой плавления металлов с использованием установки по импульсному нагреву*
- 11:30–  
12:00 **Кофе-брейк**
43. 12:00–  
12:15 **Каримов Темур Маратович** (ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия), Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А.Н. *Экспериментальные исследования влияния термодинамических параметров на процесс акватермолиза полистирола в среде суб- и сверхкритической воды*
44. 12:15–  
12:30 **Сидоров Валерий Евгеньевич** (УрГПУ, Екатеринбург, Россия), Русанов Б.А., *Плотность и электросопротивление сплавов Al-PM-P3M при высоких температурах и особенности кристаллизации аморфных лент*



45. 12:30– **Емельянов Андрей Николаевич** (ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия), Шахрай Д.В. *Электропроводность жидкого висмута при ударном сжатии*  
12:45
46. 12:45– **Ткаченко Светлана Ивановна** (ОИВТ РАН, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия), Хищенко К.В. *Реализация и распад метастабильных состояний при электрическом взрыве проводников*  
13:00  
13:00– **Обед**  
14:30

### **Базы данных и компьютерное моделирование**

47. 14:30– **Левашов Павел Ремирович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Поварницын М.Е. *Расчет теплофизических свойств нитридов, карбидов и оксидов металлов методом функционала плотности (приглашенный доклад)*  
15:00
48. 15:00– **Кнотько Александр Валерьевич** (МГУ, Москва, Россия), Мусоев Ш.А., Мардонова Р., Ерёмин Н.Н. *Атомистическое моделирование энергии перехода из  $\beta$ - в  $\alpha$ - форму  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$*   
15:15
49. 15:15– **Лукьянчук Вячеслав Георгиевич** (МФТИ, Долгопрудный, Россия; ОИВТ РАН, Москва, Россия), Кондратюк Н.Д., Сайтов И.М. *Метастабильные состояния молекулярного и атомарного жидкого водорода при высоких давлениях*  
15:30
50. 15:30– **Аливердиев Абутраб Александрович** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия; ДагГУ, Махачкала, Россия), Алиев Р.М., Амирова А.А., Бейбалаев В.Д., Григорьев Б.А., Заричняк Ю.П., Эфендиева М.Р. *К температурно-барическому поведению эффективной теплопроводности горных пород*  
15:45
51. 15:45– **Алишаев Мухтар Гусейнович** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия), Аливердиев А.А. *Конденсация по скважине влажного пара и аппроксимации его свойств*  
16:00  
16:00– **Кофе-брейк**  
16:30
52. 16:30– **Абдулагатов Ильмутдин Магомедович** (ДагГУ, Махачкала, Россия) *Потребность ведущих отраслей индустрии и энергетики в достоверных данных о теплофизических свойствах веществ и материалов. Глобальная теплофизическая база данных для научных и практических применений и экспертная система*  
16:45
53. 16:45– **Дещеня Владимир Игоревич** (МФТИ, Долгопрудный, Россия; ОИВТ РАН, Москва, Россия), Кондратюк Н.Д. *Конформационная подвижность молекулы сахарозы в водном растворе*  
17:00
54. 17:00– **Кондратюк Николай Дмитриевич** (НИУ ВШЭ, Москва, Россия; МФТИ, Долгопрудный, Россия; ОИВТ РАН, Москва, Россия), Писарев В.В. *Универсальное соотношение между парной энтропией и вязкостью углеводов*  
17:15
55. 17:15– **Паторкин Даниил Витальевич** (МЭИ, Москва, Россия) *Разработка интерактивных инструментов для теплофизических расчетов применительно к циклам ПГУ-КУ*  
17:30
56. 17:30– **Ильиных Нина Иосифовна** (ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия; ЮУрГУ, Челябинск, Россия), Гельчинский Б.Р. *Термодинамическое моделирование расплавов систем In-Sb и In-Bi*  
17:45

28 сентября 2023 г.

**Техника теплофизических измерений. Наноматериалы**

57. 10:00– **Котов Артем Николаевич** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия), Старостин А.А., Скрипов П.В. *Применение световода для регистрации быстрых процессов при активированном вскипании жидкости в пузырьковой камере*  
10:15
58. 10:15– **Старостин Александр Алексеевич** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия), Котов А.Н., Шангин В.В., Бобин С.Б., Лончаков А.Т. *Оптоволоконная терморелефлектметрия малых образцов в установке сильного магнитного поля*  
10:30
59. 10:30– **Джамбулатов Роман Суламбекович** (КНИИ РАН, Грозный, Россия; ЧГУ, Грозный, Россия) *Особенности измерения поверхностного натяжения дисперсных систем с учетом влияния седиментации*  
10:45
60. 10:45– **Джамбулатов Роман Суламбекович** (ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия), Иноземцев А.В., Воробьев А.Б., Матюшин Ю.Н. *Бомбовый калориметр сгорания с изотермической оболочкой*  
11:00
61. 11:00– **Дрей Максим Игоревич** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Костановский А.В., Пронкин А.А., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е. *Экспериментальная установка по исследованию спектральной отражательной способности тугоплавких материалов в ИК диапазоне длин волн*  
11:15
62. 11:15– **Гусейнов Гасан Гусейнович** (ИФ ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия) *Устройство для измерения теплопроводности*  
11:30  
11:30– **Кофе-брейк**  
12:00
63. 12:00– **Яруллин Ленар Юлдашевич** (ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия), Хайрутдинов В.Ф., Габитов Ф.Р., Ахметзянов Т.Р., Сабирова Л.Ю. *Определение растворимости веществ в сверхкритическом диоксиде углерода динамическим методом*  
12:15
64. 12:15– **Асрорзода Н.С.** (ТТУ им.акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан), Сафаров М.М., Сафаров С.К. *Влияние фуллереноподобных наночастиц на изменение теплопроводности и электрического сопротивления твердых материалов с эффектом «памяти форм»*  
12:30
65. 12:30– **Магомедов Махач Насрутдинович** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия) *Изменение барической зависимости температуры плавления при уменьшении размера нанокристалла*  
12:45
66. 12:45– **Гаджимагомедов Султанахмед Ханахмедович** (ДагГУ, Махачкала, Россия), Рабаданов М.Х., Гаджиев М.Х., Рабаданова А.Э., Эмиров Р.М., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Сайпулаев П.М., Фараджев Ш.П. *Плазменная обработка для создания градиентных материалов на основе сложных оксидов*  
13:00  
13:00– **Обед**  
14:30

**Теплофизические свойства для атомной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники**

67. 14:30– **Беляев Иван Александрович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия) *Экспериментальные исследования процессов теплообмена с использованием модельных жидкостей (приглашенный доклад)*  
15:00



68. 15:00– **Алчагиров Борис Батокович** (КБГУ, Нальчик, Россия), Канаметова О.Х.,  
15:30 Дышкекова Ф.Ф., Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А. *Смачиваемость реакторных сталей жидким литием (обзор) (приглашенный доклад)*
69. 15:30– **Минаков Дмитрий Вячеславович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Парамонов  
15:45 М.А., Дороватовский А.В., Фокин В.Б., Шейндлин М.А., Левашов П.Р. *Совместное теоретическое и экспериментальное исследование высокотемпературных теплофизических свойств циркония методами квантовой молекулярной динамики и высокоскоростного импульсного нагрева*
70. 15:45– **Чусов Игорь Александрович** (АНО ДПО "Техническая академия Росатома",  
16:00 Обнинск, Россия), Обысов Н.А., Козлов А.Д., Новиков Г.Е., Колобаев В.А.,  
Бабаева Ю.А., Брежнев А.И. *База данных ГК «РОСАТОМ» по свойствам жидкометаллических теплоносителей ядерной техники*
- 16:00– Кофе-брейк  
16:30
71. 16:30– **Брежнев Андрей Иванович** (АНО ДПО «Техническая академия Росатома»,  
16:45 Обнинск, Россия), Чусов И.А., Бабаева Ю.А. *Применение интервальной математики к задаче построения рекомендованных соотношений для расчета физических и транспортных свойств жидкометаллических теплоносителей*
72. 16:45– **Бабаева Юлия Андреевна** (АНО ДПО «Техническая академия Росатома»,  
17:00 Обнинск, Россия), Чусов И.А., Брежнев А.И. *Расчетные соотношения для оценки свойств легких жидкометаллических теплоносителей*
73. 17:00– **Алхасова Джамиля Алибековна** (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия),  
17:15 Алхасов А.Б., Рамазанов М.М. *Скважина для съема тепла в геотермальном пласте*
74. 17:15– **Вердиев Надинбег Надинбегович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Алхасов А.Б.,  
17:30 Мусаева П.А., Магомедов М.М., Мурадова Л.С., Вердиева З.Н. *Термический анализ системы из галогенидов и сульфатов натрия и калия*

## 29 сентября 2023 г.

### ***Теплофизические свойства нефтей, газовых конденсатов, газогидратов и природного газа***

75. 10:00– **Файзуллин Марс Закиевич** (ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия),  
10:30 Виноградов А.В., Томин А.С., Захаров М.С., Коверда В.П. *Формирование метастабильных пересыщенных газовых гидратов в сверхзвуковых потоках (приглашенный доклад)*
76. 10:30– **Яковлев Николай Семенович** (ТИУ, Тюмень, Россия), Заночуев С.А.,  
10:45 Пономарева Т.С., Агаев С.Г. *Теплофизические свойства высших жирных спиртов и их фракций*
77. 10:45– **Пономарева Татьяна Сергеевна** (ТННЦ, Тюмень, Россия), Заночуев С.А.,  
11:00 Громова Е.А., Поляков А.В. *Изучение теплофизических свойств конденсатов различного типа, приуроченных к залежам газа берегового месторождения*
78. 11:00– **Базаев Ахмед Рамазанович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Базаев Э.А.,  
11:15 Османова Б.К. *Моделирование объёмных свойств нефтей в условиях разработки их месторождений методом закачки водяного пара в пласт*
- 11:15– Кофе-брейк  
11:45

12:45-13:00. Закрытие конференции

## Стендовая секция

1. **Кияченко Юрий Федорович** (ИПНГ РАН, Москва, Россия), Поднек В.Э., Сирота А.С., Григорьев Б.А. *Типизация околокритических пластовых флюидов по интенсивности критической опалесценции на пограничной кривой*
2. **Устюжанин Евгений Евгеньевич** (МЭИ, Москва, Россия), Очков В.Ф., Рыков В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В. *Некоторые термодинамические свойства и комплексы  $SF_6$  на бинодали в окрестности критической точки*
3. **Расчектаева Елена Павловна** (ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия), Станкус С.В. *Комплексное исследование теплопроводности теплоносителей серии Novac*
4. **Дутова Ольга Степановна** (ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия) *Уравнение для расчета коэффициента вязкости жидкости, газа и флюида инертных газов. Неон*
5. **Мацкевич Ната Ивановна** (ИНХ СО РАН, Новосибирск, Россия), Семерикова А.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В., Безверхий П.П. *Термодинамические характеристики монокристалла дивольфрамата натрия*
6. **Сабирова Алия Джавдатовна** (КНИТУ-КАИ, Казань, Россия), Биалалов Т.Р. *Описание растворимости ацетилацетоната меди в СК- $CO_2$*
7. **Раджабова Саёхат Сайфуллоевна** (ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан), Сафаров М.М. *Удельная изобарная теплоемкость некоторых электролитов в зависимости от концентрации кремниевых фуллеренов, температуры и давления*
8. **Русанов Борис Андреевич** (УрГПУ, Екатеринбург, Россия), Букреева Ю.К., Сабирзянов А.А., Карфидов Э.А., Русанова А.И., Сидоров В.Е., Сон Л.Д. *Теплофизические свойства высокоэнтропийных сплавов Al-Ni-Co-Cu-Zr*
9. **Русанова Анастасия Игоревна** (ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия), Сон Л.Д., Русанов Б.А., Сидоров В.Е. *Релаксационные процессы в расплавах Al(Ga)-PЗМ*
10. **Костановский Александр Викторович** (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. *Экспериментальное исследование распределения температуры в окрестности контактной поверхности графита*
11. **Элимханов Джабраил Зайндиевич** (ФГБОУ ВО "ЧГУ им. А.А. Кадырова", Грозный, Россия; ГКНУ «Академия наук Чеченской Республики», Грозный, Россия), Дадашев Р.Х., Алчагиров Б.Б., *Поверхностное натяжение, плотность и адсорбция компонентов в тройной системе таллий-свинец-висмут*
12. **Рабаданова Аида Энверовна** (ДагГУ, Махачкала, Россия), Палчаев Д.К., Гаджимагомедов С.Х., Мурлиева Ж.Х., Фараджев Ш.П. *Корреляция электросопротивления и коэффициента теплового расширения YBCO в области сверхпроводящего перехода*
13. **Сафаров Шохин Рустамович** (БГУ имени Носира Хусрава, Бохтар, Таджикистан), Ойматова Х.Х., Шарипов М.Л., Сафаров М.М. *Получение эмпирических уравнений для расчета коэффициента набухания смесей тернарных систем при комнатной температуре*
14. **Умарализова М.У.** (ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан), Сафаров М.М., Неъматов Г.Н. *Теплоемкость наножидкостей системы о-ксилола и фуллерена при различных состояниях*
15. **Сафаров Парвиз Махмадалиевич** (ТТУ им.акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан), Зоиров Х.А., Гуломов М.М. *Влияние температуры, давления и нанопорошка диметилкетона на изменение теплопроводности воды*
16. **Сафаров Сухроб Кукиевич** (ТГМУ им. А.Сино, Душанбе, Таджикистан), Зарипова М.А., Зайниддинов Д.Р., Сафаров М.М. *Теплопроводность некоторых твердых наночастиц с эффектом «памяти форм», применяемых в медицине и составлении математической модели*

17. Тиллоева Тахмина Рустамовна (ТГУ им.акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан), Гортышов Ю.Ф., Абдуджалилзода Ф., Сафаров М.М. *Применение некоторых теплофизических свойств теплоносителя для оптимизации теплообменных процессов в солнечных коллекторах*
18. Сафарова Фарзона Амруллоевна (ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан), Тиллоева Т.Р., Собиров Д.Ф., Зайниддинов Д.Р. *Теплопроводность системы жидкого четыреххлористого углерода и бензола*
19. Бакмаев Абумуслим Гасанович (ИФ ДНЦ РАН, Махачкала, Россия), Каллаев С.Н., Бабаев А.А., Билалов А.Р., Омаров З.М. *Свойства терморасширенного графита*
20. Лага Екатерина Юрьевна (ТПУ, Томск, Россия), Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. *Создание материалов с экстремальными свойствами смачивания на основе лазерного текстурирования и химического модифицирования*
21. Сафаров Шохин Рустамович (БГУ имени Носира Хусрава, Бохтар, Таджикистан), Шарипов С.М., Сафаров М.м., Зоиров Х.А. *Получение эмпирических уравнений на основе экспериментальных данных и сравнение их значений*
22. Тарарушкин Евгений Викторович (НИУ ВШЭ, Москва, Россия), Смирнов Г.С., Калиничев А.Г. *Компьютерное моделирование структуры и динамики водородных связей в дефектной  $10\{a\}$  фазе*
23. Эмиров Руслан Мурадович (ДагГУ, Махачкала, Россия), Гаджимагомедов С.Х., Рабданова А.Э., Алиханов Н.М-Р., Фараджев Ф.Ш. *Электрохимический синтез магнитных наночастиц в трёхэлектродной ячейке*
24. Благодеров Лев Александрович (МГУ, Москва, Россия), Карчевский О.О., Ларюшин Т.В. *Прямые измерения коэффициента теплового расширения тяжелой воды компенсационным методом с применением двойной модуляции.*
25. Волков Владислав (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Бирюков Д.А. *Определение полей скоростей при термогравитационной конвекции в жидком свинце*
26. Перетягко Виктория (ОИВТ РАН, Москва, Россия), Кизяева Э.С., Бирюков Д.А. *Экспериментальное определение скорости и температуры в кавитирующей струе*
27. Боброва Ксения Олеговна (ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия), Докутович В.Н. *Коэффициент теплопроводности расплавленных смесей  $FLiNaK-CeF_3$*
28. Куликова Татьяна Владимировна (ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия), Быков В.А., Стерхов Е.В., Коваленко Д.А. *Теплофизические свойства экваторного сплава  $CoCrFeNi$  при высоких температурах*
29. Лепешкин Александр Роальдович (МАИ, Москва, Россия) *Методика определения теплопроводности металлических материалов и никелевых сплавов при воздействии центробежных сил инерции*
30. Мальгинова Наталья Андреевна (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева", Санкт-Петербург, Россия), Корчагина Е.Н. *О прямых измерениях энергии сгорания газообразного топлива на объемный и массовый базис*
31. Заречнова Анастасия Алексеевна (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева", Санкт-Петербург, Россия), Корчагина Е.Н., Шеховцов Д.А. *Разработка новых типов стандартных образцов высшей (удельной) энергии сгорания на основе полимерных материалов*
32. Михеев Владислав Александрович (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева", Санкт-Петербург, Россия) *Метрологическое обеспечение единства измерений теплопроводности и теплового сопротивления*
33. Эмиров Руслан Мурадович (ДагГУ, Махачкала, Россия), Исхаков М.Э., Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Рабданов М.Х., Акаев Х.Р. *Корреляция температурных коэффициентов электросопротивления и теплового расширения интерметаллида  $Ti_{67}Al_{33}$*

# СОДЕРЖАНИЕ

## 1. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

|  |    |
|--|----|
| <i>Абдулагатов И.М.</i> Критические аномалии теплофизических свойств сверхкритических флюидов и линии Видома, Френкеля и Фишера–Видома . . . . .                                     | 10 |
| <i>Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Агажанов А.Ш., Козловский Ю.М., Самошкин Д.А., Хайрулин А.Р., Станкус С.В.</i> Теплофизические свойства магния и магний-литиевых сплавов . . . . . | 10 |
| <i>Скрипов П.В.</i> Явление перегрева: к 100-летию пионерских опытов Висмера . . . . .   | 11 |
| <i>Левашов П.Р., Поварницын М.Е.</i> Расчет теплофизических свойств нитридов, карбидов и оксидов металлов методом функционала плотности . . . . .                                    | 12 |
| <i>Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Захаров М.С., Коверда В.П.</i> Формирование метастабильных пересыщенных газовых гидратов в сверхзвуковых потоках . . . . .           | 13 |
| <i>Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Дышкова Ф.Ф., Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А.</i> Смачиваемость реакторных сталей жидким литием (обзор) . . . . .                                      | 13 |
| <i>Хищенко К.В.</i> Модели уравнений состояния материалов в широком диапазоне давлений и температур . . . . .  | 15 |
| <i>Сенченко В.Н.</i> Экспериментальные исследования теплофизических свойств материалов при высоких температурах методами импульсного электрического нагрева . . . . .                | 15 |
| <i>Беляев И.А.</i> Экспериментальные исследования процессов теплообмена с использованием модельных жидкостей . . . . .   | 16 |

## 2. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

|  |    |
|--|----|
| <i>Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Кудрявцева И.В., Рыков С.В., Рыков В.А.</i> Построение комбинированных скейлинговых моделей на основе совместного обобщения разнородных данных о термодинамических свойствах SF <sub>6</sub> на линии насыщения . . . . . | 17 |
| <i>Боярских К.А., Хищенко К.В.</i> Уравнение состояния жидкой фазы молибдена при высоких давлениях и температурах в рамках четырех простых моделей . . . . .   | 17 |
| <i>Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</i> Моделирование ударной сжимаемости сплавов рений—молибден в широком диапазоне давлений и температур . . . . .  | 18 |
| <i>Парамонов М.А., Минаков Д.В., Левашов П.Р.</i> Исследование металлов в околокритическом состоянии методом квантовой молекулярной динамики . . . . .   | 19 |
| <i>Гальцов И. С., Парамонов М. А., Фокин В. Б., Минаков Д. В., Дороватовский А. В., Шейндлин М. А.</i> Железо: исследование теплофизических свойств на основе первопринципных расчетов и эксперимента по импульсному нагреву . . . . .                   | 20 |
| <i>Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Габитов И.Р., Шамсетдинов Ф.Н., Абдулагатов И.М.</i> Термодинамические характеристики систем участвующих в процессе смешения полимеров с использованием сверхкритических флюидных сред . . . . .                      | 21 |
| <i>Хайрутдинов В.Ф., Хабриев И.Ш., Салихов И.З., Абдулагатов И.М., Фарахов М.И.</i> Фазовое равновесие системы «извлекаемая компонента - экстрагент» как ключевой параметр при реализации СКФ экстракционных процессов . . . . .                         | 21 |
| <i>Григорьев Б. А., Александров И. С., Герасимов А. А., Беркова Е.А.</i> Термодинамические свойства и уравнение состояния нормального гептадекана . . . . .  | 22 |
| <i>Смирнов Г.С., Белоножко А.Б.</i> Линия плавления железа в условиях ядра Земли на основе первопринципных расчетов и анализа экспериментальных данных . . . . .   | 23 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Османова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р.</i> Энергетические характеристики системы вода-1-пропанол . . . . .  | 23 |
| <i>Лукьянчук В.Г., Кондратюк Н.Д., Саитов И.М.</i> Метастабильные состояния молекулярного и атомарного жидкого водорода при высоких давлениях . . . . .   | 24 |
| <i>Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдулагатов И.М., Джаппаров Т.А.-Г., Османова Б.К.</i> Фазовые превращения и критические свойства системы 1-пропанол-н-гептан                                      | 25 |
| <i>Кнотько А.В., Мусоев Ш.А., Мардонова Р., Ерёмин Н.Н.</i> Атомистическое моделирование энергии перехода из $\beta$ - в $\alpha$ - форму $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . . . . .                | 25 |
| <i>Магомедов Р.А., Ахмедов Э.Н.</i> Применение фрактального уравнения состояния для расчета изотерм метана . . . . .  | 26 |
| <i>Поднек В.Э., Кляченко Ю.Ф., Юдин И.К., Григорьев Б.А.</i> Новый оптический метод определения критических параметров жидких смесей . . . . .  | 27 |
| <i>Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В.</i> Некоторые термодинамические свойства и комплексы $\text{SF}_6$ на бинадали в окрестности критической точки . . . . . | 27 |

### **3. ТРАНСПОРТНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ**

|   |    |
|---|----|
| <i>Щербаков В.Д., Низамутдинов А.С.</i> Оптическая спектроскопия фазовых переходов второго рода в гомологическом ряду кристаллов со структурой флюорита $\text{MeF}_2: \text{Mn}^{2+}$ ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}, \beta - \text{Pb}, \text{Ba}$ ) . . . . . | 29 |
| <i>Щербаков В.Д., Низамутдинов А.С.</i> Оптическая спектроскопия дефектных центров в кристаллах ряда флюорита $\text{MeF}_2: \text{Mn}^{2+}$ ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}, \beta - \text{Pb}, \text{Ba}$ ) . . . . .   | 30 |
| <i>Антипов Р.Р., Билалов Т.Р., Сабирова А.Д.</i> Электропроводность сверхкритического $\text{CO}_2$ : исследования, характеристики и перспективы применения . . . . .   | 30 |
| <i>Фокин В.Б., Минаков Д.В., Парамонов М.А., Левашов П.Р.</i> Расчет транспортных и оптических свойств циркония и свинца с помощью метода квантовой молекулярной динамики и формулы кубо-гринвуда . . . . .   | 31 |
| <i>Косс К.Г., Лисина И.И., Петров О.Ф.</i> Корректность вычисления фрактальной размерности траектории коллоидной частицы в дисперсионной среде . . . . .  | 32 |
| <i>Расчектаева Е.П., Станкус С.В.</i> Комплексное исследование теплопроводности теплоносителей серии Novac . . . . .  | 33 |
| <i>Дутова О.С.</i> Уравнение для расчета коэффициента вязкости жидкости, газа и флюида инертных газов. Неон . . . . .   | 34 |

### **4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ**

|   |    |
|---|----|
| <i>Кулямина Е.Ю., Цицерман В.Ю.</i> Согласование термодинамических данных при плавлении осмия . . . . .   | 35 |
| <i>Магомедов М.Н.</i> Зависимость поверхностной энергии от P-T-условий и размера нанокристалла . . . . .  | 36 |
| <i>Рамазанова А.Э., Абдулагатов И.М.</i> Теплопроводность резервуарных горных пород, насыщенных углекислым газом . . . . .                                    | 36 |
| <i>Богатищева Н.С., Галкин Д.А., Никитин Е.Д., Панов Г.В., Попов А.П.</i> Теплофизические свойства диметилловых эфиров этиленгликолей . . . . .               | 37 |
| <i>Богатищева Н.С., Никитин Е.Д., Попов А.П., Файзуллин М.З.</i> Теплофизические свойства веществ, вовлеченных в производство биотоплив второго поколения     | 38 |
| <i>Пашук Е.Г., Абдулагатов И.М.</i> Температурная зависимость скорости ультразвука смесей пропиленбензол-октан на линии насыщения в интервале 277...473 к . . | 39 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Ильиных Н.И., Гельчинский Б.Р.</i> Термодинамическое моделирование расплавов систем In-Sb и In-Bi . . . . .  | 39 |
| <i>Мацкевич Н.И., Семерикова А.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В., Безверхий П.П.</i> Термодинамические характеристики монокристалла дивольфрамата натрия  | 40 |
| <i>Сабирова А.Д., Былалов Т.Р.</i> Описание растворимости ацетилацетоната меди в СК-СО <sub>2</sub> . . . . .   | 41 |
| <b>5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СРЕД</b>  |    |
| <i>Пряжников М.И., Минаков А.В.</i> Объёмная вязкость жидкостей и суспензий . . . . .   | 42 |
| <b>6. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ</b>   |    |
| <i>Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Рабаданов М.Х., Исхаков М.Э., Гаджимагомедов С.Х., Эмиров Р.М., Рабаданова А.Э.</i> Природа температурной зависимости электросопротивления проводников . . . . .  | 44 |
| <i>Дороватовский А.В., Шейндлин М.А., Минаков Д.В.</i> Прямое измерение наклона кривой плавления металлов с использованием установки по импульсному нагреву . . . . .   | 44 |
| <i>Васин А.А., Бгашева Т.В., Петухов С.В., Шейндлин М.А.</i> Теплофизические свойства карбида циркония при высоких температурах . . . . .   | 45 |
| <i>Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К.</i> Корреляция фононного теплосопротивления с коэффициентом теплового расширения неметаллов . . . . .  | 46 |
| <i>Хибиев А.Х., Алчагиров Б.Б., Коков З.А., Элимханов Д.З.</i> К вопросу о температурной зависимости поверхностного натяжения ртути вблизи ее кристаллизации (обзор) . . . . .  | 46 |
| <i>Магомедов М.М.-Ш.</i> Теплопроводность многокомпонентных водно-солевых систем .  | 47 |
| <i>Швецов Д.П., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Каймин В.У., Цепелева Н.П.</i> Исследование поверхностного натяжения и плотности нержавеющей стали с разным содержанием титана . . . . .   | 48 |
| <i>Быков В.А., Куликова Т.В., Сипатов И.С., Стерхов Е.В., Ягодин Д.А.</i> Синтез, структура, теплофизические и электрические свойства высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNi . . . . .  | 49 |
| <i>Станкус С.В., Хайруллин А.Р.</i> Калорические свойства жидких сплавов системы Cs—Rb . . . . .  | 49 |
| <i>Ивлиев А.Д., Горбатов В.И., Полев В.Ф., Куриченко А.А., Смирнов А.Л.</i> Твердые растворы и интерметаллические соединения в сплавах NiV. влияние отжига образцов на кинетические свойства . . . . .                                  | 50 |
| <i>Волосников Д.В., Поволоцкий И.И., Скрипов П.В.</i> Транспортные и критические свойства разделяющегося водного раствора МБЭЭГ . . . . .   | 51 |
| <i>Русанов Б.А., Сидоров В.Е.</i> Плотность и электросопротивление сплавов Al-ПМ-РЗМ при высоких температурах и особенности кристаллизации аморфных лент .  | 51 |
| <i>Мальцев М.А., Морозов И.В., Осина Е.Л., Миненков Ю.В.</i> Термодинамические свойства двухатомных соединений аргона . . . . .   | 52 |
| <i>Рабаданова А.Э., Палчаев Д.К., Гаджимагомедов С.Х., Мурлиева Ж.Х., Фараджев Ш.П.</i> Корреляция электросопротивления и коэффициента теплового расширения YBCO в области сверхпроводящего перехода . . . . .                          | 53 |
| <i>Эмиров Р.М., Исхаков М.Э., Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Акаев Х.Р.</i> Корреляция температурных коэффициентов электросопротивления и теплового расширения интерметаллида Ti <sub>67</sub> Al <sub>33</sub> . . . . . | 54 |



|  |    |
|--|----|
| <i>Дадашев Р.Х., Алмагиров Б.Б., Элимханов Д.З.</i> Поверхностное натяжение, плотность и адсорбция компонентов в тройной системе таллий-свинец-висмут . . . . .                          | 54 |
| <i>Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронжин А.А.</i> Экспериментальное исследование распределения температуры в окрестности контактной поверхности графита . . . . . | 55 |
| <i>Русанова А.И., Сон Л.Д., Русанов Б.А., Сидоров В.Е.</i> Релаксационные процессы в расплавах Al(Ga)-РЗМ . . . . .  | 56 |
| <i>Русанов Б.А., Букреева Ю.К., Сабирзянов А.А., Карфидов Э.А., Русанова А.И., Сидоров В.Е., Сон Л.Д.</i> Теплофизические свойства высокоэнтропийных сплавов Al-Ni-Co-Cu-Zr . . . . .    | 56 |
| <i>Раджабова С.С., Сафаров М.М.</i> Удельная изобарная теплоемкость некоторых электролитов в зависимости от концентрации кремниевых фуллеренов, температуры и давления . . . . .         | 57 |

## **7. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

|   |    |
|---|----|
| <i>Каримов Т.М., Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А.Н.</i> Экспериментальные исследования влияния термодинамических параметров на процесс акватермолиза полистирола в среде суб- и сверхкритической воды . . . . . | 59 |
| <i>Емельянов А.Н., Шахрай Д.В.</i> Электропроводность жидкого висмута при ударном сжатии . . . . .  | 59 |
| <i>Ткаченко С.И., Хищенко К.В.</i> Реализация и распад метастабильных состояний при электрическом взрыве проводников . . . . .  | 60 |
| <i>Кривошеев С.И., Адамьян Ю.Э., Магазинов С.Г.</i> Средство электрической и механической импульсной прочности диэлектриков . . . . .   | 61 |

## **8. БАЗЫ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ**

|   |    |
|---|----|
| <i>Аливердиев А.А., Алиев Р.М., Амирова А.А., Бейбалаев В.Д., Григорьев Б.А., Заричняк Ю.П., Эфендиева М.Р.</i> К температурно-барическому поведению эффективной теплопроводности горных пород . . . . .  | 62 |
| <i>Абдулагатов И.М.</i> Потребность ведущих отраслей промышленности и энергетики в достоверных данных о теплофизических свойствах веществ и материалов. Глобальная теплофизическая база данных для научных и практических применений и экспертная система . . . . . | 62 |
| <i>Сафаров Ш.Р., Ойматова Х.Х., Шарипов М.Л., Сафаров М.М.</i> Получение эмпирических уравнений для расчета коэффициента набухания смесей тернарных систем при комнатной температуре . . . . .  | 63 |

## **9. НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОЖИДКОСТИ, МЕЖФАЗНЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

|  |    |
|--|----|
| <i>Асрорзода Н.С., Сафаров М.М., Сафаров С.К.</i> Влияние фуллереноподобных наночастиц на изменение теплопроводности и электрического сопротивления твердых материалов с эффектом «памяти форм» . . . . .  | 65 |
| <i>Гаджимагомедов С.Х., Рабаданов М.Х., Алиханов Н.М.-Р., Гаджиев М.Х., Рабаданова А.Э., Эмиров Р.М., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Сайпулаев П.М., Фараджеев Ш.П.</i> Плазменная обработка для создания градиентных материалов на основе сложных оксидов . . . . . | 66 |
| <i>Магомедов М.Н.</i> Изменение барической зависимости температуры плавления при уменьшении размера нанокристалла . . . . .  | 66 |

|   |    |
|---|----|
| <u>Сафаров С.К., Зарипова М.А., Зайниддинов Д.Р., Сафаров М.М.</u> Теплопроводность некоторых твердых наночастиц с эффектом «памяти форм», применяемых в медицине и составлении математической модели . . . . . | 67 |
| <u>Умарализова М.У., Сафаров М.М., Незматов Г.Н.</u> Теплоемкость наножидкостей системы о-ксилола и фуллерена при различных состояниях . . . . .  | 69 |
| <u>Тарарушкин Е.В., Смирнов Г.С., Калинин А.Г.</u> Компьютерное моделирование структуры и динамики водородных связей в дефектной 10 <sup>Å</sup> фазе . . . . .   | 70 |
| <u>Сафаров Ш.Р., Шарипов С.М., Сафаров М.м., Зоиров Х.А.</u> Получение эмпирических уравнений на основе экспериментальных данных и сравнение их значений .  | 71 |
| <u>Лага Е.Ю., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.</u> Создание материалов с экстремальными свойствами смачивания на основе лазерного текстурирования и химического модифицирования . . . . .                           | 72 |
| <u>Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Бабаев А.А., Билялов А.Р., Омаров З.М.</u> Свойства терморасширенного графита . . . . .  | 72 |
| <u>Сафаров П.М., Зоиров Х.А., Гуломов М.М.</u> Влияние температуры, давления и нанопорошка диметилкетона на изменение теплопроводности воды . . . . .   | 73 |
| <u>Сафарова Ф.А., Тиллоева Т.Р., Собиров Д.Ф., Зайниддинов Д.Р.</u> Теплопроводность системы жидкого четыреххлористого углерода и бензола . . . . .   | 75 |
| <u>Тиллоева Т.Р., Гортышов Ю.Ф., Абдуджалилзода Ф., Сафаров М.М.</u> Применение некоторых теплофизических свойств теплоносителя для оптимизации теплообменных процессов в солнечных коллекторах . . . . .       | 76 |
| <u>Эмиров Р.М., Гаджимагомедов С.Х., Рабаданова А.Э., Алиханов Н.М-Р., Фараджеев Ф.Ш.</u> Электрохимический синтез магнитных наночастиц в трёхэлектродной ячейке . . . . .                                      | 78 |

## **10. ТЕХНИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

|  |    |
|--|----|
| <u>Дрей М.И., Костановский А.В., Пронкин А.А., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е.</u> Экспериментальная установка по исследованию спектральной отражательной способности тугоплавких материалов в ИК диапазоне длин волн . . . . . | 79 |
| <u>Котов А.Н., Старостин А.А., Скрипов П.В.</u> Применение световода для регистрации быстрых процессов при активированном вскипании жидкости в пузырьковой камере . . . . .  | 79 |
| <u>Старостин А.А., Котов А.Н., Шангин В.В., Бобин С.Б., Лончаков А.Т.</u> Оптоволоконная терморелефлектметрия малых образцов в установке сильного магнитного поля . . . . .  | 80 |
| <u>Джамбулатов Р.С.</u> Особенности измерения поверхностного натяжения дисперсных систем с учетом влияния седиментации . . . . .   | 81 |
| <u>Иноземцев Я.О., Иноземцев А.В., Воробьев А.Б., Матюшин Ю.Н.</u> Бомбовый калориметр сгорания с изотермической оболочкой . . . . .   | 81 |
| <u>Гусейнов Г.Г.</u> Устройство для измерения теплопроводности . . . . .   | 82 |
| <u>Яруллин Л.Ю., Хайрутдинов В.Ф., Габитов Ф.Р., Ахметзянов Т.Р., Сабирова Л.Ю.</u> Определение растворимости веществ в сверхкритическом диоксиде углерода динамическим методом . . . . .  | 83 |
| <u>Перетягтько В.В., Кизяева Э.С., Бирюков Д.А.</u> Экспериментальное определение скорости и температуры в кавитирующей струе . . . . .  | 83 |
| <u>Волков В.И., Бирюков Д.А.</u> Определение полей скоростей при термогравитационной конвекции в жидком свинце . . . . .   | 84 |
| <u>Благодрагов Л.А., Карчевский О.О., Ларюшин Т.В.</u> Прямые измерения коэффициента теплового расширения тяжелой воды компенсационным методом с применением двойной модуляции. . . . .  | 85 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Михеев В.А.</i> Метрологическое обеспечение единства измерений теплопроводности и теплового сопротивления . . . . . | 85 |
|--|----|

**11. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОФИЗИКЕ**

|   |    |
|---|----|
| <i>Алишаев М.Г., Аливердиев А.А.</i> Конденсация по скважине влажного пара и аппроксимации его свойств . . . . .                | 87 |
| <i>Дещеня В.И., Кондратюк Н.Д.</i> Конформационная подвижность молекулы сахарозы в водном растворе . . . . .                    | 87 |
| <i>Кондратюк Н.Д., Писарев В.В.</i> Универсальное соотношение между парной энтропией и вязкостью углеводов . . . . .            | 88 |
| <i>Паторкин Д.В.</i> Разработка интерактивных инструментов для теплофизических расчетов применительно к циклам ПГУ-КУ . . . . . | 89 |

**12. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

|  |    |
|--|----|
| <i>Чусов И.А., Обысов Н.А., Козлов А.Д., Новиков Г.Е., Колобаев В.А., Бабаева Ю.А., Брежнев А.И.</i> База данных ГК «РОСАТОМ» по свойствам жидкометаллических теплоносителей ядерной техники . . . . .   | 90 |
| <i>Брежнев А.И., Чусов И.А., Бабаева Ю.А.</i> Применение интервальной математики к задаче построения рекомендованных соотношений для расчета физических и транспортных свойств жидкометаллических теплоносителей . . . . .   | 91 |
| <i>Бабаева Ю.А., Чусов И.А., Брежнев А.И.</i> Расчетные соотношения для оценки свойств легких жидкометаллических теплоносителей . . . . .  | 91 |
| <i>Минаков Д.В., Парамонов М.А., Дороватовский А.В., Фожин В.Б., Шейндлин М.А., Левашов П.Р.</i> Совместное теоретическое и экспериментальное исследование высокотемпературных теплофизических свойств циркония методами квантовой молекулярной динамики и высокоскоростного импульсного нагрева . . . . . | 92 |
| <i>Боброва К.О., Докучович В.Н.</i> Коэффициент теплопроводности расплавленных смесей FLiNaK–CeF <sub>3</sub> . . . . .  | 93 |

**13. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

|  |    |
|--|----|
| <i>Куликова Т.В., Быков В.А., Стерхов Е.В., Коваленко Д.А.</i> Теплофизические свойства эквиатомного сплава CoCrFeNi при высоких температурах . . . . .    | 94 |
| <i>Лепешкин А.Р.</i> Методика определения теплопроводности металлических материалов и никелевых сплавов при воздействии центробежных сил инерции . . . . . | 95 |

**14. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТЕЙ, ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ, ГАЗОГИДРАТОВ И ПРИРОДНОГО ГАЗА**

|  |    |
|--|----|
| <i>Базаев А.Р., Базаев Э.А., Османова Б.К.</i> Моделирование объёмных свойств нефтей в условиях разработки их месторождений методом закачки водяного пара в пласт . . . . .                    | 96 |
| <i>Заночуев С.А., Пономарева Т.С., Яковлев Н.С., Агаев С.Г.</i> Теплофизические свойства высших жирных спиртов и их фракций . . . . .  | 96 |
| <i>Пономарева Т.С., Заночуев С.А., Громова Е.А., Поляков А.В.</i> Изучение теплофизических свойств конденсатов различного типа, приуроченных к залежам газа берегового месторождения . . . . . | 97 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Мальгинова Н.А., Корчагина Е.Н.</i> О прямых измерениях энергии сгорания газообразного топлива на объемный и массовый базис . . . . .  | 98 |
| <i>Поднеж В.Э., Кляченко Ю.Ф., Сирота А.С., Григорьев Б.А.</i> Типизация околокритических пластовых флюидов по интенсивности критической опалесценции на пограничной кривой . . . . . | 99 |

**15. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

|   |     |
|---|-----|
| <i>Алхасова Д.А., Алхасов А.Б., Рамазанов М.М.</i> Скважина для съема тепла в геотермальном пласте . . . . .  | 100 |
| <i>Вердиев Н.Н., Алхасов А.Б., Мусаева П.А., Магомедов М.М., Мурадова Л.С., Вердиева З.Н.</i> Термический анализ системы из галогенидов и сульфатов натрия и калия . . . . .  | 100 |
| <i>Заречнова А.А., Корчагина Е.Н., Шеховцов Д.А.</i> Разработка новых типов стандартных образцов высшей (удельной) энергии сгорания на основе полимерных материалов . . . . . | 102 |
| <b>АВТОРСКИЙ ИНДЕКС</b> . . . . .   | 103 |

**КРИТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ И ЛИНИИ ВИДОМА, ФРЕНКЕЛЯ И  
ФИШЕРА–ВИДОМА**

*Абдулагатов И.М.*

<sup>1</sup>*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия, <sup>2</sup>ДагГУ, Махачкала, Россия*

*ilmutdina@gmail.com*

Кроссоверное уравнение состояния [1,2] и кроссоверная модель уравнения для транспортных свойств [3] чистых флюидов использованы для количественной оценки границы области влияния критических флуктуаций на термодинамические и транспортные свойства, т.е., для оценки вклада флуктуационной составляющей на экспериментально наблюдаемый аномальный рост термодинамических и транспортных свойств сверхкритических флюидов. Исследованы поведения линий максимумов изохорной теплоемкости сверхкритических флюидов на основе кроссоверной модели уравнения состояния. Дается интерпретация сверхкритических кроссоверных переходов от «жидкоподобного» к «газоподобному» состояниям (линий Видома, Френкеля, и Фишера-Видома) на основе концепции крупномасштабных критических флуктуаций и кроссоверной теории критических явлений. Обсуждаются микроскопические основы кроссовера сверхкритического флюида из «жидкоподобного» к «газоподобному» состоянию.

- 
1. Kiselev S.B., Ely J., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Crossover SAFT Equation of State and Thermodynamic Properties of Propan-1-ol. Int. J. Thermophys., 2000. V.21. P.1373-1405.
  2. S.B. Kiselev, J.F. Ely, I.M. Abdulagatov, M.L. Huber, Generalized SAFT-DFT/DMT model for the thermodynamic, interfacial, and transport properties of associating fluids: Application for n-alkanols. Ind. Eng. Chem. Res., 2005. V.44. P.6916-6927.
  3. R.A. Perkins, J.V. Sengers, I.M. Abdulagatov, M.L. Huber, Critical thermal-conductivity enhancement in molecular fluids, Int. J. Thermophys., 34 (2013) 191-212.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИЯ И МАГНИЙ-ЛИТИЕВЫХ  
СПЛАВОВ**

*Абдуллаев Р.Н.,\* Хайрулин Р.А., Агажанов А.Ш., Козловский Ю.М.,  
Самошкин Д.А., Хайрулин А.Р., Станкус С.В.*

*ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия*

*\*abdullaev.rasul88@gmail.com*

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.

В настоящей работе проведено комплексное экспериментальное исследование термических, калорических и транспортных свойств чистого магния и сплавов Mg-Li с содержанием 21, 23, 25 и 30 ат. % лития в широком интервале температур (80–1240 К) твердого, жидкого состояний и в области фазовых переходов. Используются магний и литий чистотой не хуже 99,95 вес. % и хорошо зарекомендовавшие себя методы измерений: метод

просвечивания образцов узким пучком монохроматического гамма-излучения, дилатометрический метод, метод лазерной вспышки, ДСК-метод, метод смешения и нестационарный метод плоского источника тепла.

Экспериментальные результаты настоящей работы либо уточняют имеющиеся в литературе данные, либо являются уникальными. Так, впервые проведено измерение коэффициента теплопроводности магния в интервале температур 870–1220 К. Также, в ходе исследования теплового расширения и теплоемкости рассмотренных сплавов Mg-Li в твердом состоянии был обнаружен фазовый переход в окрестности 237–239 К, сопровождающийся скачкообразными изменениями коэффициента теплового расширения и удельной теплоемкости. Обнаруженные особенности указывают на необходимость комплексного исследования фазового состава, фазовых равновесий, а также других свойств сплавов системы Mg-Li ниже 293 К для адекватного анализа перспектив их использования в качестве основы для сверхлегких конструкционных материалов, которые предполагается эксплуатировать в широкой области температур.

## ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕГРЕВА: К 100-ЛЕТИЮ ПИОНЕРСКИХ ОПЫТОВ ВИСМЕРА

*Скрипов П.В.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*pavel-skrpov@bk.ru*

Перегретая (растянутая) жидкость представляет собой обычную жидкость, но в необычном состоянии. Оно получается при пересечении линии равновесия жидкость–пар без фазового превращения. При достаточно малом значении произведения объема перегретой фазы на продолжительность ее наблюдения удается пробиться сквозь фон готовых и легко активируемых центров кипения и достичь высоких перегревов, предсказываемых теорией гомогенной нуклеации. Релаксация системы в таком случае протекает по механизму взрывного вскипания, сосредоточенному во времени и по температуре. Актуальность исследования перегретых жидкостей связана, в первую очередь, с решением задач отведения тепловых потоков высокой плотности и поиска новых рабочих тел, в том числе, растворов с ограниченной растворимостью компонентов.

В докладе будут рассмотрены следующие вопросы: история исследования явления перегрева, начатая с обстоятельных работ Висмера с соавторами [1, 2]; методы и результаты измерения температуры достижимого перегрева; методы и результаты измерения свойств перегретых жидкостей [3–7]; вскипание растворов с нижней критической температурой растворения [8]; новые методы исследования; перспективные и нерешенные задачи.

В заключительной части доклада будет представлено обсуждение причин рассогласования малой степени перегрева воды, регистрируемой макроскопической аппаратурой, и вполне удовлетворительного результата по генерации дочерних капель в опытах по паффингу/микровзрыву двух-жидкостных капель (вода в топливе) [9]; сильного эффекта растворения микро-количества влаги в углеводородах на достижимый перегрев и плотность отводимого от металлического нагревателя теплового потока [10], а также перспектива исследований быстропротекающих процессов при фазовых переходах жидкость–пар по методикам денситометрии и велосиметрии [11].

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

1. K.L. Wismer, The Pressure-Volume Relation of Superheated Liquids. J. Phys. Chem. 1922, 26, 301–315, DOI: 10.1021/j150220a001



2. F.B. Kenrick, C.S. Gilbert, K.L. Wismer, By superheating of liquids. *J Phys Chem*, 28 (1924) 1297–1307, <https://doi.org/10.1021/j150246a009>
3. В.П. Скрипов. *Метастабильная жидкость*. М.: Наука, 1972.
4. V.P. Skripov. *Metastable states. J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 17 (1992), 193–236.
5. P.V. Skripov, A.P. Skripov, The phenomenon of superheat of liquids: in memory of Vladimir P. Skripov, *Int. J. Thermophys.* 31 (2010) 816–830, <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0738-4>
6. Puchinskis, S.E., Skripov, P.V. The Attainable Superheat: From Simple to Polymeric Liquids. *Int. J. Thermophys.* 22, 1755–1768 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1013191017223>
7. Г.В. Ермаков. *Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей*. Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
8. Igolnikov, A.A., Skripov, P.V., Characteristic Features of Heat Transfer in the Course of Decay of Unstable Binary Mixture. *Energies* 2023, 16, 2109. <https://doi.org/10.3390/en16052109>
9. Antonov, D.V.; Fedorenko, R.M.; Strizhak, P.A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits. *Energies* 2022, 15, 7670. <https://doi.org/10.3390/en15207670>
10. Lukianov K.V., Kotov A.N., Starostin A.A., Skripov P.V. Heat transfer enhancement in superheated hydrocarbons with traces of water: The effect of pressure // *Interf. Phenom. Heat Transfer*, 7(3), 2019, 283–294. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020032696
11. Kotov, A.N.; Starostin, A.A.; Gorbatov, V.I.; Skripov, P.V. Thermo-Optical Measurements and Simulation in a Fibre-Optic Circuit Using an Extrinsic Fabry–Pérot Interferometer under Pulsed Laser Heating. *Axioms* 2023, 12, 568. <https://doi.org/10.3390/axioms12060568>

## РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИТРИДОВ, КАРБИДОВ И ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

*Левашов П.Р.,\* Поварницын М.Е.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*pasha@jih.ru*

Нитриды, карбиды и оксиды металлов широко применяются в науке и технике благодаря их уникальным свойствам: высокой температуре плавления, высокой микротвердости и коррозионной стойкости. Однако теплофизические свойства этих веществ изучены недостаточно: для большинства из них существуют измерения только при нормальной температуре, а при температурах выше 2000 К экспериментальных данных очень мало. В данной работе методом функционала плотности с использованием квазигармонического приближения проведены расчеты механических, термодинамических и транспортных свойств ряда нитридов, карбидов и оксидов, включая TiN, NbC и ZrO<sub>2</sub>. Были получены температурные зависимости упругих модулей, модулей Юнга, сдвига и всестороннего сжатия, коэффициента Пуассона, коэффициента теплового расширения, изохорной и изобарной теплоемкости и коэффициента теплопроводности вплоть до температуры плавления. Коэффициент теплопроводности вычислялся из решения кинетического уравнения в приближении времени релаксации для фононов и электронов. Сравнение с имеющимися экспериментальными данными демонстрирует хорошее согласие, что подтверждает предсказательную способность современных численных кодов, основанных на методе функционала плотности.

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ПЕРЕСЫЩЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ

*Файзуллин М.З.,\* Виноградов А.В., Томин А.С., Захаров М.С., Коверда В.П.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*faizullin@itp.uran.ru*

Интерес к газовым гидратам обусловлен широким их распространением в природе и возможностью их использования в качестве перспективного источника природного газа. Энергетический ресурс разведанных запасов газовых гидратов на нашей планете заметно превышает энергетический ресурс всех известных видов ископаемого топлива вместе взятых. Внимание к природным газовым гидратам объясняется также влиянием их состояния на глобальный климат. Уникальное свойство газовых гидратов связывать большие объемы газа открывает перспективу для разработки технологий их производства с целью компактного и безопасного хранения и транспортировки газов.

В настоящей работе экспериментально исследовано формирование газового гидрата низкотемпературной конденсацией нанокластеров в сверхзвуковых потоках разреженного пара и газа. Встречные потоки водяного пара и этана одновременно поступали в вакуумную камеру через сопла Лаваля, которые разгоняли их до сверхзвуковых скоростей. Адиабатическое расширение потоков на выходе из сопла сопровождается падением температуры и образованием кристаллических нанокластеров. Газонасыщенный образец аморфного льда осаждался на медную подложку, охлаждаемую жидким азотом, для его последующего исследования. При его нагревании наблюдали стеклование и спонтанную кристаллизацию. При кристаллизации газонасыщенных конденсатов в присутствии зародышевых кристаллов льда образуется газовый гидрат. В условиях глубокой метастабильности реализуется спонтанный режим кристаллизации, который обеспечивает захват молекул газа и образование газового гидрата.

Осаждение низкотемпературных газонасыщенных конденсатов с использованием встречных сверхзвуковых потоков пара и этана показало высокое содержание газа в полученных образцах гидрата, значительно превышающее его содержание в равновесных газовых гидратах. Избыточное содержание этана указывает на присутствие газовых молекул, адсорбированных в пористую среду образца.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00116, <https://rscf.ru/project/23-29-00116/>

## СМАЧИВАЕМОСТЬ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ ЖИДКИМ ЛИТИЕМ (ОБЗОР)

*Алчагиров Б.Б.,\*<sup>1</sup> Канаметова О.Х.,<sup>1</sup> Дышкова Ф.Ф.,<sup>1</sup> Дадашев Р.Х.,<sup>2</sup> Кутуев Р.А.<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>КБГУ, Нальчик, Россия, <sup>2</sup>ЧГУ, Грозный, Россия, <sup>3</sup>КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

*\*boris@alchagirov.ru*

Смачиваемость и растекание жидких металлов по поверхностям металлов и реакторных сталей имеет большое практическое значение для технологии производства аккумуляторов, пайки и сварки и т.д. В термоядерных устройствах литий и литиевые покрытия используются для защиты пластин первой стенки, обращенных к плазме, способствуя более длительному ее удержанию [1]. Исследования смачиваемости поверхностей вещества жидкими металлами ведутся давно и накоплен большой материал. Имеющиеся в литературе к началу 2000 года основные сведения о смачиваемости щелочными металлами

поверхностей чистых металлов и различных сталей были проанализированы в [2, 3]. Они показали, что смачиваемость в системах с участием щелочных металлов изучена слабо, одной из причин которого являются экспериментальные трудности работы с высокоактивными щелочными металлами, исключающие всякий контакт с атмосферным воздухом и многими другими материалами.

В настоящем сообщении главное внимание уделяется новым результатам, полученным за последние два десятилетия по изучению смачиваемости поверхностей конструкционных материалов жидким литием. В частности, рассматриваются ряд способов управляемого изменения смачиваемости жидким литием различных материалов в результате влияния предварительного напыления тонких пленок, вариации степени шероховатости на краевые углы смачивания и т.д. В работах [4–6] показано, что достигаемый при этом эффект оказался зависящим от толщины пленок, оптимальные значения которых также определены, а шероховатость поверхностей может влиять на смачиваемость настолько существенно, что может привести к резкому повышению литиефобности поверхности твердого тела. В [6] смачиваемость жидким литием нержавеющей стали 316SS осуществлялась в температурном интервале 473 – 600 К. Согласно полученным результатам, температура смачивания литием стали 316SS составила 588 К. Покрытие поверхности нержавеющей стали тонкой пленкой (2,5 мкм) испаренного лития перед нанесением капли лития привело к смачиваемости стали во всем исследованном диапазоне температур. Для снижения температуры смачиваемости на поверхность стали 316SS затем был нанесен слой алмазоподобного углерода в надежде, что интеркалированный в литий углерод также даст подобный эффект. Но при изученных температурах не удалось добиться смачиваемости литием нержавеющей стали с углеродным покрытием.

Было обнаружено, что очистка поверхности подложки плазмой, как и испарение тонкого слоя жидкого лития на поверхность перед выполнением измерений также снижает температуру смачивания: для необработанного молибдена температура смачивания составила 600 К, а после ее обработки аргоновой плазмой в течение 120 минут она понизилась и достигла 500 К, при которой температурный порог смачивания также уменьшился до 400 град.

Заключение:

1. Плазменная очистка и/или предварительное покрытие литиефобных поверхностей тонкими пленками испаренного лития могут оказаться достаточно эффективными для существенного улучшения смачиваемости литием различных материалов.

2. В последнее время проявляется значительный интерес к исследованиям смачиваемости литием нового класса материалов – оксидов, нитридов и карбоната лития. Данные по краевым углам смачивания этих реактивов востребованы в аэрокосмической индустрии, алюминиевой промышленности, где карбонат лития является сырьевым продуктом для получения металла на этапе плавки и т. д.

3. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области исследований смачиваемости и взаимодействия в системах «жидкий литий - поверхность реакторной стали», ввиду сложности процессов, сопровождающих явление смачиваемости, остаются ряд не до конца решенных проблем как по теории, так и в плане практических исследований с использованием современных средств техники и технологии эксперимента.

- 
1. Вертков А.В., Люблинский И.Е. Опыт разработки жидкометаллических элементов, обращённых к плазме стационарного токамака ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. Вып. 3. С. 5–13.
  2. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. // ТВТ. Теория и методы. 1994. Т. 32. Вып. 4. С. 590–626. ТВТ. Эксперимент. 1994. Т. 32. Вып. 5. С. 756–783.
  3. Nicolas Eustathopoulos Wetting by Liquid Metals-Application in Materials Processing: The Contribution of the Grenoble Group Metals. 2015. V. 5(1). P. 350–370.

4. Wang J. et al. // Energy Storage Materials. 2018. V. 14. P. 345–350.
5. Krat S. A. et al. Wetting properties of liquid lithium on lithium compounds // Fusion Engineering and Design. 2017. V. 117. P. 199–203.
6. Fiflis P. et al. // Fusion Engineering and Design. 2014. V. 89. №. 12. P. 2827–2832.

## МОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

*Хищенко К.В.*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>3</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия, <sup>4</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия, <sup>5</sup>Филиал МГУ, Саров, Россия

*konst@ihed.ras.ru*

Уравнения состояния представляют интерес для расчетов термодинамических характеристик материалов в различных процессах, протекающих в экстремальных условиях при высоких давлениях и температурах. Построение уравнения состояния вещества в таких условиях методами статистической физики сталкивается с трудностью учета взаимодействия между частицами в случае сильной неидеальности системы. Уравнение состояния в широком диапазоне плотностей и давлений может быть построено в рамках полуэмпирического подхода, при котором выражения для термодинамических функций формулируются из теоретических представлений, а входящие в эти выражения модельные параметры определяются из требования хорошего согласия с экспериментальными данными.

В этом докладе дается краткий обзор моделей термодинамики материалов в области высоких плотностей энергии. Представлены полуэмпирические уравнения состояния для конденсированной фазы тугоплавких металлов (тантал, вольфрам и другие) в широком диапазоне степеней сжатия и нагрева. Приведены примеры учета фазовых переходов (плавление, испарение) при высоких температурах. Результаты расчетов показаны в сопоставлении с данными экспериментов при высоких давлениях. Представленные модели уравнений состояния могут быть использованы в численном моделировании теплофизических процессов при интенсивных импульсных воздействиях на материалы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ МЕТОДАМИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

*Сенченко В.Н.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*pyrolab@ihed.ras.ru*

В докладе представлен обзор экспериментальных исследований теплофизических свойств веществ, выполненных в Объединенном институте высоких температур РАН методом быстрого нагрева мощным импульсом электрического тока миллисекундной и микросекундной длительности [1, 2]. В частности, в докладе рассмотрены различные экспериментальные установки, реализующие метод нагрева электропроводных веществ мощным импульсом тока, особенности отдельных узлов — системы высокого давления, системы скоростной визуализации, сбора данных и математической обработки полученных экспериментальных данных. Особое внимание уделено методам измерения температуры в

теплофизическом эксперименте на примере разработанных в институте специальных пирометров и пирометрических систем. Также приведены экспериментальные данные по исследованию теплофизических свойств ряда тугоплавких металлов, графита и карбидов при высоких температурах в твердой и жидкой фазах при килобарном статическом давлении окружающего газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

1. Сенченко В. Н., Мельников С. А. // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17–22 октября 2022 г.). М.: Издательство МЭИ, 2022. Т. 2. С. 235–236.
2. Baitin A. V., Lebedev A. A., Romanenko S. V., Senchenko V. N., Sheindlin M. A. // High Temp.–High Press. 1990. V. 21. P. 157–170.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

*Беляев И. А.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*bia@ihed.ras.ru*

В докладе представлены текущие результаты работ, проводимых ОИВТ РАН, по экспериментальному исследованию теплообмена жидких металлов и расплавов солей. При планировании работ [1] учитывалась формируемая концепция развития ядерной энергетики России. Эта концепция предусматривает, наряду с тиражированием водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) и быстрых реакторов типа БН с натриевым теплоносителем, создание быстрых реакторов нового поколения БРЕСТ, а также термоядерных энергетических реакторов и термоядерных источников нейтронов. В качестве основных теплоносителей в таких ядерных энергоустановках рассматриваются тяжелые жидкие металлы: свинец и сплав свинца и лития. В качестве альтернативы рассматриваются расплавленные соли – фториды лития и бериллия (“флайб”) и фториды щелочных металлов (“флинак”) с добавками фторида урана.

Экспериментальные исследования выполняются с использованием модельных теплоносителей, позволяющих реализовать эксперимент в контролируемых лабораторных условиях, что снижает трудоемкость работ и упрощает диагностику. В частности, для моделирования свинца и свинца лития применяется ртуть. Для моделирования течения флайба и флинака используются водные растворы,  $KNO_3 - NaNO_3$ . Постановка собственных экспериментальных исследований предполагает проведение численных расчетов и верификации расчетных кодов. Параллельно с экспериментами авторы проводят исследования всех рассматриваемых конфигураций течений численными методами с использованием пакетов COMSOL, ANES, КОМПАС Flow и авторскими кодами.

Применение модельных жидкостей предъявляет высокие требования к данным и об их теплофизических свойствах, и о свойствах перспективных теплоносителей с учетом изменений в ходе эксплуатации.

1. Беляев И. А., Свиридов В. Г., Батенин В. М., Бирюков Д. А., Никитина И. С., Манчха С. П., Пятницкая Н. Ю., Разуванов Н. Г., Свиридов Е. В., 2017. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики. Теплоэнергетика, т.11, стр.66-74.

**ПОСТРОЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СКЕЙЛИНГОВЫХ МОДЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ОБОБЩЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ  
О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ SF<sub>6</sub> НА ЛИНИИ  
НАСЫЩЕНИЯ**

*Устюжанин Е.Е.,<sup>\*1</sup> Очков В.Ф.,<sup>1</sup> Кудрявцева И.В.,<sup>2</sup> Рыков С.В.,<sup>2</sup> Рыков В.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>МЭИ, Москва, Россия, <sup>2</sup>СПбГИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup>evgust@gmail.com

Целью работы является методический подход, на основе которого можно рассчитать  $(\rho_l, \rho_g, T)$  данные SF<sub>6</sub> с помощью нескольких компонентов, в том числе с привлечением экспериментальных  $(h, T)$  значений; здесь  $h$  — высота, на которой размещается мениск, разделяющий две фазы образца, находящегося в экспериментальной ячейке,  $T$  — температура образца,  $(\rho_l, \rho_g)$  плотности SF<sub>6</sub> на линии насыщения. Указанные опыты отвечают следующим граничным условиям: а) двухфазный образец SF<sub>6</sub> заполняет горизонтальную цилиндрическую ячейку, б) в ячейке наблюдается мениск, который разделяет фазы и имеет высоту,  $h$ , в)  $(h, T)$  данные измеряются в эксперименте Garrabos (2018 г.) в узком интервале относительных температур ( $10^{-6} < \tau < 10^{-3}$ ). В качестве второго компонента метода рассматривается параметр порядка в аналитической форме,  $f_s(\tau)$ , которая соответствует масштабной теории критических явлений (МТ) и опирается на  $(\rho_l, \rho_g, T)$  данные Вагнера (1998 г.) в интервале ( $10^{-3} < \tau < 0.3$ ). В работе рассмотрен ряд задач, включая проблему, которая связана с построением комбинированных моделей,  $\rho_l(\tau)$ ,  $\rho_g(\tau)$ . В прикладной части исследования получены некоторые результаты, в том числе сформирован исходный массив, который включает новые  $(\rho_l, \rho_g, T)$  данные и результаты Вагнера (2001 г.), а также исследовано поведение функций  $(\rho_l(\tau), \rho_g(\tau), f_s(\tau))$ ,  $f_d(\tau)$ , отвечающих МТ в интервале ( $10^{-1} < \tau < 10^{-6}$ ).

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ МОЛИБДЕНА ПРИ  
ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В РАМКАХ ЧЕТЫРЕХ  
ПРОСТЫХ МОДЕЛЕЙ**

*Боярских К.А.,<sup>\*1,2,3</sup> Хищенко К.В.<sup>1,2,3,4,5</sup>*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>3</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН,  
Черноголовка, Россия, <sup>4</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия, <sup>5</sup>Филиал МГУ, Саров, Россия

<sup>\*</sup>shagom55@gmail.com

В работе представлены уравнения состояния жидкой фазы молибдена на основе модели Ван-дер-Ваальса [1] и трех других простых моделей, две из которых представлены в работах [2, 3]. Параметры в этих моделях определены с помощью экспериментальных данных по изобарическому расширению жидкой фазы молибдена при высоких температурах [4]. Для подтверждения достоверности полученных уравнений состояния проведено сравнение результатов расчетов с данными других экспериментов. В частности, определены области применимости этих уравнений на основе сравнения расчетных ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки ударно-сжатых исходно пористых образцов с ударно-волновыми данными. Также по полученным уравнениям состояния молибдена определены параметры критической точки перехода жидкость—пар, результаты сопоставлены с оценками других авторов.



Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

1. Van der Waals J. D. On the Continuity of the Gaseous and Liquid States. Leiden, 1873.
2. Ликальтер А. А. // УФН. 2000. Т. 170. № 8. С. 831–854.
3. Петрик Г. Г., Гаджиева З. Р. // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. № 1. С. 67–78.
4. Pottlacher G., Kaschnitz E., Jager H. // J. Phys.: Condens. Matter. 1991. V. 3. № 31. P. 5783–5792.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ СПЛАВОВ РЕНИЙ—МОЛИБДЕН В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

*Середкин Н. Н.*, \*<sup>1,2,3</sup> *Хищенко К. В.*<sup>1,3,4,5,6</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МИФИ, Москва, Россия, <sup>3</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия, <sup>4</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>5</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия, <sup>6</sup>Филиал МГУ, Саров, Россия

\**nikser12@yandex.ru*

Знание термодинамических свойств материалов представляет интерес для решения фундаментальных и прикладных задач теплофизики интенсивных импульсных воздействий [1, 2]. Взаимосвязь между термодинамическими характеристиками вещества определяется его уравнением состояния.

Сплавы рения с молибденом применяются в аэрокосмической [3] и атомной технике [4], в различных энергетических устройствах [5, 6].

В настоящей работе представлена модель термодинамики сплава Re–Mo при высоких давлениях и температурах на основе уравнений состояния и массовых долей компонентов сплава.

Калорическое и термическое уравнения состояния каждого компонента определяется в виде сумм:

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T), \quad (1)$$

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T), \quad (2)$$

где  $E$  и  $P$  — удельная внутренняя энергия и давление;  $V$  и  $T$  — удельный объем и температура;  $E_c$  и  $P_c$  — холодные составляющие внутренней энергии и давления при  $T = 0$ ;  $E_a$  и  $P_a$  — тепловой вклад тяжелых частиц (атомов, ионов) в  $E$  и  $P$ ;  $E_e$  и  $P_e$  — тепловой вклад электронов в  $E$  и  $P$ .

С учетом этого уравнение состояния сплава задается соотношениями для объема и энергии:

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T), \quad (3)$$

где  $V_{1N}$  и  $E_{1N}$  — удельный объем и удельная внутренняя энергия сплава;  $V_i$ ,  $E_i$  и  $\alpha_i$  — удельный объем, удельная внутренняя энергия и массовая доля  $i$ -того компонента;  $N$  — количество компонентов.

Результаты расчетов ударных адиабат на основе этих уравнений состояния для компонентов (Re и Mo) и сплава Re–Mo с разными массовыми долями Re и Mo согласуются с ударно-волновыми данными в широком диапазоне плотностей, давлений и внутренних энергий.

Эти результаты также сопоставлены с ударными адиабатами сплавов Re–Mo, рассчитанными по методу аддитивности ударных адиабат компонентов [7, 8]:

$$V_{1N}(P) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P). \quad (4)$$

Здесь удельные объемы соответствуют точкам на ударных адиабатах при заданном давлении. В рассмотренном диапазоне давлений ударного сжатия результаты расчетов по методу аддитивности (в которых ударные адиабаты компонентов рассчитывались по их уравнениям состояния) и по уравнению состояния сплава оказываются ближе друг к другу, чем погрешность имеющихся данных ударно-волновых экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

1. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л., Фортов В. Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногловка: ИХФ АН СССР, 1988.
2. Красюк И. К., Пашилин П. П., Семенов А. Ю., Фортов В. Е. Изучение теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 7. С. 593–608.
3. Mannheim R. L., Garin J. L. Structural identification of phases in Mo–Re alloys within the range from 5 to 95% Re // J. Mater. Process. Technol. 2003. V. 143. P. 533–538.
4. Busby J. T., Leonard K. J., Zinkle S. J. Radiation-damage in molybdenum–rhenium alloys for space reactor applications // J. Nucl. Mater. 2007. V. 366. № 3. P. 388–406.
5. Xu J., Leonhardt T., Farrell J., Effgen M., Zhai T. Anomalous strain-rate effect on plasticity of a Mo–Re alloy at room temperature // Mater. Sci. Eng. A. 2008. V. 479. № 1–2. P. 76–82.
6. Singh V., Schneider B. H., Bosman S. J., Merckx E. P. J., Steele G. A. Molybdenum-rhenium alloy based high- $Q$  superconducting microwave resonators // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 22. P. 222601.
7. Дремин А. Н., Карпунин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. 1960. № 3. С. 184–188.
8. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152–155.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ В ОКОЛОКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

*Парамонов М. А.*,<sup>\*1,2</sup> *Минаков Д. В.*,<sup>1,2</sup> *Левашов П. Р.*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия

\**mikhail.a.paramonov@phystech.edu*

Знание высокотемпературных теплофизических свойств материалов, используемых в атомной энергетике, а также их уравнений состояния (УРС), представляет критическую важность для анализа ядерной безопасности и моделирования поведения атомных реакторов при экстремальных условиях. Область жидкой фазы вещества и сверхкритическое состояние можно достичь в ударно-волновых экспериментах, однако, имеется лишь небольшое количество измерений температуры сжатых металлов. Особую ценность представляют полные термодинамические данные, получаемые с помощью метода изобарического расширения (ИЕХ), но скорость и сложность происходящих физических процессов часто затрудняет интерпретацию результатов таких экспериментов. А теоретическое описание области высоких температур и давлений также затруднено из-за сложной электронной

структуры и сильного кулоновского взаимодействия в плазме вольфрама, молибдена и циркония.

Таким образом, в настоящее время единственным доступным теоретическим подходом, который может дать информацию о теплофизических свойствах вещества в области горячей расширенной жидкости, является первопринципный метод квантовой молекулярной динамики (КМД), основанный на теории функционала электронной плотности.

В данной работе на основе данных табличного УРС из КМД расчетов были оценены критические параметры и восстановлены критические изобары вольфрама, молибдена и циркония. Это позволило оценить кривые сосуществования жидкость–газ на фазовых диаграммах. Полученные новые данные помогут улучшить существующие определяющие соотношения для этих металлов, исключив неопределенность в их теплофизических свойствах при высоких температурах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10398, <https://rscf.ru/project/20-79-10398/>

## ЖЕЛЕЗО: ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИМПУЛЬСНОМУ НАГРЕВУ

*Гальцов И. С.,<sup>\*1,2</sup> Парамонов М. А.,<sup>1,2</sup> Фокин В. Б.,<sup>1,2</sup> Минаков Д. В.,<sup>1,2</sup>  
Дороватовский А. В.,<sup>1</sup> Шейндлин М. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия

\*[galtsov.is@phystech.edu](mailto:galtsov.is@phystech.edu)

Железо является наиболее важным компонентом конструкционных материалов, которые подвергаются интенсивным механическим и термическим нагрузкам. Поэтому большую значимость представляет получение надежных данных как об уравнении состояния железа, так и о его транспортных и оптических свойствах. Однако на сегодняшний день существует множество противоречивых данных о параметрах теплового расширения железа и величине его удельного сопротивления, в особенности в жидкой фазе.

В данной работе представлены результаты исследования теплофизических свойств железа двумя независимыми подходами: теоретическим – на основе расчетов методом квантовой молекулярной динамики, и экспериментальным – в опытах по электровзрыву железных проволочек путем микросекундного импульсного нагрева. Отдельное внимание уделено необходимости учета спиновой поляризации для более корректного описания свойств железа при проведении первопринципных расчетов. Восстановлены кривая теплового расширения железа и температурная зависимость энтальпии как с учетом, так и без учета спиновой поляризации. Приведено сравнение с экспериментальными данными, в том числе полученными авторами этой работы. Также из *ab initio* расчетов найдены удельное сопротивление и нормальная спектральная излучательная способность твердого и жидкого железа. Эти данные получены с использованием формулы Кубо–Гринвуда и преобразования Крамерса–Кронига. Методом последовательного приближения к критической изотерме получена оценка параметров железа в критической точке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10398, <https://rscf.ru/project/20-79-10398/>

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ  
УЧАСТВУЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ СМЕШЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ СРЕД**

*Хабриев И.Ш.,<sup>\*1</sup> Хайрутдинов В.Ф.,<sup>1</sup> Габитов И.Р.,<sup>1</sup> Шамсетдинов Ф.Н.,<sup>1</sup>  
Абдулагатов И.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ Казань, Россия, <sup>2</sup>ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия

*\*termi0@yandex.ru*

Смешивание термодинамически несовместимых полимеров позволяет получить материалы с улучшенными физическими и механическими свойствами. Однако большинство смешанных полимеров термодинамически не смешиваются, и для получения максимального комбинированного эффекта, превышающего сумму их отдельных эффектов, требуется совместимость.

Развитие промышленности постоянно требует создания новых полимерных материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Одним из путей решения этой проблемы является использование смесей полимеров, особенно на основе таких широко известных материалов, как полиэтилен (ПЭ), поликарбонат (ПК) и поливинилхлорид (ПВХ), которые относятся к материалам с высоким потреблением.

В настоящее время одним из перспективных направлений смешения полимерных материалов является достаточно большая группа методов, использующих процессы с участием СКФ сред и, несомненно, сверхкритического диоксида углерода.

В работе приведены результаты экспериментального исследования фазового равновесия системы "СО<sub>2</sub> – толуол/хлороформ" в интервале температур 313–353 К. Представлены результаты совместного диспергирования полимерных смесей ПК и ПЭ, осуществленного в диапазоне давлений 8.0–25 МПа при температурах 313–353 К с использованием метода SEDS. Исследованы кинетики кристаллизации и превращения фаз в смесях полимеров, полученных смешением в расплаве и с использованием метода сверхкритического флюидного антирастворителя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-73-10029, <https://rscf.ru/project/19-73-10029/>

**ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ СИСТЕМЫ «ИЗВЛЕКАЕМАЯ КОМПОНЕНТА  
- ЭКСТРАГЕНТ» КАК КЛЮЧЕВОЙ ПАРАМЕТР ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ  
СКФ ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

*Хайрутдинов В.Ф.,<sup>\*1,2</sup> Хабриев И.Ш.,<sup>1</sup> Салихов И.З.,<sup>1</sup> Абдулагатов И.М.,<sup>1,3</sup>  
Фарахов М.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия, <sup>2</sup>ООО «ИВЦ «ИНЖЕХИМ», Казань, Россия,

<sup>3</sup>ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия

*\*kvener@yandex.ru*

Сверхкритические флюидные (СКФ) технологии, основанные на использовании рабочих сред в суб- и сверхкритическом флюидном состояниях, в настоящем являются одним из перспективных инновационных научно-технологических направлений. Разнообразие процессов, основанных на особых свойствах суб- и СКФ сред, велико.

На сегодняшний день одним из наукоемких и перспективных направлений в целях выделения и очистки, разделения и фракционирования является СКФ экстракционный процесс, основанный на способности, прежде всего, СКФ сред к селективной экстракции тех или иных веществ (групп веществ) в соответствующих термодинамических условиях.

Повышение эффективности экстракционного процесса в части достижения максимального выхода экстракта в значительной степени зависит и определяется изученностью характеристик фазового равновесия систем «извлекаемая компонента - экстрагент».

Интенсивно развивающиеся СКФ технологии в мире реализованы практически с использованием лишь двух сред в СКФ состоянии: CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, тогда как, большой группе задач в нефтедобыче, нефтепереработке и нефтехимии предпочтительным экстрагентом являются углеводороды и прежде всего, n-алканы и конечно в СКФ состоянии.

В связи с чем, в данной работе исследованы фазовые равновесия ранее неизученных бинарных и тройных систем, а также на примере реализации процесса очистки устья нефтяных скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений с использованием СКФЭ процесса показана значимость этих исследований как ключевой инструмент при реализации данного процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)).

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ НОРМАЛЬНОГО ГЕПТАДЕКАНА

*Григорьев Б. А.,<sup>1</sup> Александров И. С.,\*<sup>2</sup> Герасимов А. А.,<sup>2</sup> Беркова Е. А.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> ФГАОУ ВО РГУНГ им. И. М. Губкина, Москва, Россия, <sup>2</sup> ФГБОУ ВО КГТУ,  
Калининград, Россия*

*\*alexandrov\_kgrd@mail.ru*

Нормальный гептадекан относится к технически важным веществам, для которых необходима надежная информация о термодинамических свойствах (ТДС). Наилучшим решением является разработка фундаментального уравнения состояния (ФУС), описывающего все ТДС в широком диапазоне параметров состояния. Выполнен сбор и анализ экспериментальных данных о ТДС n-гептадекана. Установлено, что экспериментальные исследования выполнены только в жидкой фазе при температурах, не превышающих нормальную температуру кипения. Для расширения диапазона применимости ФУС и обеспечения его устойчивости недостаток экспериментальных данных компенсирован расчетными значениями ТДС. Для этого проанализированы существующие методы расчета, из которых отобраны наиболее обоснованные, надежные и широкодиапазонные. По отобранным методикам произведен расчет ТДС в неисследованных областях параметров состояния, включая сверхкритическую область. На основе гибридного массива данных разработано 15-константное ФУС, описывающее безразмерную энергию Гельмгольца в зависимости от собственных переменных - температуры и плотности. Уравнение содержит пять полиномиальных, пять экспоненциальных и пять гауссовых членов и применимо в диапазоне температур от тройной точки до 750 К при давлениях до 100 МПа. Средние относительные отклонения (в процентах) экспериментальных и расчетных данных от результатов, полученных по новому уравнению состояния, следующие: плотность – (0,2...0,5); теплоемкость и скорость звука – (0,5...1,0); давление насыщенных паров – 0,3 (исключая области вблизи тройной и критической точек); плотность насыщенной жидкой фазы – 0,2.

## ЛИНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ ЯДРА ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*Смирнов Г.С.,<sup>\*1,2</sup> Белоножко А.Б.<sup>1,3,4</sup>*

<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, Москва, Россия, <sup>2</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>3</sup>NJU, Нанкин, Китай,

<sup>4</sup>КТН, Стокгольм, Швеция

*\*grsmrnov@gmail.com*

Железо является основным элементом ядра Земли и экзопланет земного типа. Достоверно известно, что в условиях внутреннего ядра Земли (давления 330–360 ГПа и температуры 5000–7000 К) железо находится в твердом состоянии, однако его кристаллическая модификация является предметом дискуссий. Также существует значительный разброс оценок линии плавления на основе экспериментов с ударными волнами и алмазными наковальнями, а также теоретическими оценками на основе расчетов с использованием теории функционала электронной плотности, классической и квантовой молекулярной динамики.

Последние экспериментальные данные обычно интерпретируются как доказательство стабильности ГПУ фазы железа при высоких температурах и давлениях, тогда как первопринципные молекулярно-динамические расчеты в сверхбольших ячейках указывают на существование ОЦК фазы. Маленькие расчетные ячейки (менее 1000 атомов) приводят к разрушению ОЦК структуры.

В данной работе проведен анализ плотностей, координационных чисел и структурных факторов кристаллических модификаций железа, который показывает совпадение расчетных и экспериментальных данных для ОЦК фазы. Эти данные ранее атрибутировали как ГПУ или жидкая фаза.

На основании двухфазного моделирования в больших ячейках вычислена кривая плавления железа в диапазоне 120–500 ГПа. Сравнены границы применимости псевдопотенциальных приближений.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2022–2023 годах.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ВОДА-1-ПРОПАНОЛ

*Османова Б.К.,\* Базаев Э.А., Базаев А.Р.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*badji@mail.ru*

Эффективность энергетических установок, в частности преобразователей тепловой энергии в электрическую, зависит не только от конструкции их тепломеханического оборудования, но и от выбора и полноты исследования теплофизических свойств рабочего вещества (тела) в широком диапазоне параметров состояния. Преимущество смесевых рабочих веществ по сравнению с индивидуальными состоит в возможности изменить диапазон рабочих температур энергоустановок путем подбора их взаимно растворяющихся компонентов с различными критическими температурами и изменением состава. Это позволяет, во-первых, использовать энергоустановки для преобразования тепловой энергии источников с различными температурами, и во-вторых, унифицировать часть тепломеханического оборудования преобразователей, что экономически целесообразно [1]. В работе [2] показано, что эффективный КПД паротурбинной установки (ПТУ) на смеси вода-1-пропанол состава 0.2 мольной доли 1-пропанола составляет 21% (на воде 18.7%). В данной

работе на основе новых экспериментальных данных о  $p, T, x$ -зависимости смеси вода–1-пропанол в широком диапазоне составов ( $x$ ) и параметров рассчитаны её термодинамические свойства, в частности, изменение энтальпии и энтропии. Для оценки энергетической эффективности ПТУ проведен сравнительный расчет циклов Ренкина на воде и на смеси вода–1-пропанол по методике [3] в одинаковых условиях. Результаты расчета показали, что термический и эффективный КПД ПТУ на смеси вода–1-пропанол состава  $x=0.1$  мол. доли 1-пропанола принимают максимальные значения соответственно 34.7% (на воде 24.4%) и 27.5% (на воде 18.7%).

1. Васильев В.А., Крайнов А.В., Говорков И.Г. Расчет параметров унифицированной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси // Теплоэнергетика. 1996. No. 5. P. 27.
2. Alhasov A.B., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Osmanova B.K. Thermodynamic properties and energy characteristics of water+1-propanol // Journal of Physics Conference Series No. 1. P. 891.
3. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

## МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО И АТОМАРНОГО ЖИДКОГО ВОДОРОДА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

*Лукьянчук В.Г.,<sup>\*1,2</sup> Кондратюк Н.Д.,<sup>1,2,3</sup> Саитов И.М.<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>2</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>3</sup>ВШЭ, Москва, Россия

*\*lukianchuk.vg@phystech.edu*

На сегодняшний день существует достаточно большое количество работ, в которых исследуется влияние учета квантовых эффектов ядер на термодинамические свойства систем, содержащих водород при высоких давлениях [1, 2]. Метод интегралов по траекториям совместно с теорией функционала плотности позволяет эффективно рассчитывать данные поправки [3].

В работе впервые предлагается исследовать влияние данного эффекта на область существования метастабильных состояний (атомарного и молекулярного) жидкого водорода при высоких давлениях (100–200 ГПа). Освоена техника проведения расчетов в рамках метода молекулярной динамики на интегралах по траекториям с использованием программных пакетов VASP и PIMD. Обнаружены метастабильные состояния во флюиде водорода, существование которых является однозначным указанием на то, что наблюдаемый переход, действительно, является фазовым переходом первого рода. Этот факт особенно важен для фазовых переходов с малой величиной скачка плотности.

Рассчитаны изотермы для диапазона температур 700–1500 К. Разработан и успешно применён метод моделирования метастабильных состояний для всех исследуемых изотерм. Получена фазовая кривая и оценка на метастабильные области. О сохранении молекулярной фазы вдоль метастабильных ветвей свидетельствуют высокие значения высот первых пиков парной корреляционной функции. Получена оценка теплоты фазового перехода через скачок парной энтропии. Данная работа выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение 075–02–2021–1316 от 30.09.2021).

1. Deemyad S., Silvera I.F. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. No. 15. P. 155701.
2. Celliers P.M., Millot M., Brygoo S., et al. // Science. 2018. V. 361. No. 6403. P. 677–682.
3. Morales M.A., McMahon J.M., Pierleoni C., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. No. 6. P. 065702.

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ 1-ПРОПАНОЛ–Н-ГЕПТАН

*Базаев Э.А.,\* Базаев А.Р., Абдулагатов И.М., Джаппаров Т.А.-Г.,  
Османова Б.К.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*emilbazaev@gmail.com*

Приведены экспериментальные значения  $(p, \rho, T)_x$  - зависимостей системы 1-пропанол–н-гептан состава  $x$  (0.2, 0.38, 0.5 и 0.8 мольных долей н-гептана) при фазовых превращениях (жидкость–пар)  $\rightleftharpoons$  жидкость и (жидкость–пар)  $\rightleftharpoons$  пар, определенные по фигуративным точкам изломов (изгибов) изохор фазовой диаграммы в  $p, T$  - координатах, и значения ее критических параметров, оцененные на основе анализа кривизны изохор и изотерм в критической области.

Зависимость давления насыщенных паров смесей  $s = f(\rho_s, T_s)$  вдоль кривой сосуществования фаз описана термическим уравнением состояния вириального вида – разложением фактора сжимаемости  $Z_s = p_s/RT_s\rho_{ms}$  в ряды по степеням приведенной плотности и приведенной температуры [1]. Средняя относительная погрешность отклонений рассчитанных значений давления от экспериментальных не превышает 1%.

Температурная зависимость плотности системы на кривой равновесия фаз жидкость–пар описана двумя степенными функциями при значении критического показателя  $\beta_0 = (0.370 \pm 0.002)$ : вдали от критической точки и в симметричной части кривой фазового равновесия. Средняя относительная погрешность составляет 0.8% и 0.6% соответственно.

1. Б.К. Карабекова, Э.А. Базаев. «Уравнение состояния для смесей вода–спирт в широком диапазоне параметров состояния» ЖФХ, т. 89, № 9, р. 1386, 2015

## АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПЕРЕХОДА ИЗ $\beta$ - В $\alpha$ - ФОРМУ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

*Кнотько А.В.,\* Мусоев Ш.А., Мардонова Р., Ерёмин Н.Н,*

*МГУ, Москва, Россия*

*\*knotko@inorg.chem.msu.ru*

Средний фосфат кальция (трикальцийфосфат (ТКФ),  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) широко используется для регенерации поврежденной костной ткани, поскольку в форме спеченного керамического материала он проявляет остеокондуктивные, а в некоторых случаях и остеоиндуктивные свойства.. Другая важная область применения ТКФ для регенеративной медицины – это использование его как высокоосновного компонента смеси для формирования цементов на основе брушита  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , применяемых для залечивания костных дефектов сложной формы. Для указанных медицинских применений используются две формы ТКФ – термодинамически стабильная при комнатной температуре  $\beta$  форма со структурой витлокита и  $\alpha$  форма с с моноклинной структурой, производной от структуры глазерита, стабильная при температуре выше 1430 К. Фазовый переход из  $\beta$ - в  $\alpha$ -форму ТКФ, как показывают многочисленные ДТА и ДСК исследования, эндотермичен, однако численные оценки энергии решеток этих форм ТКФ, сделанные на основе потенциалов межатомного взаимодействия, одинаковых для обеих модификаций, показывают небольшую энергетическую предпочтительность  $\alpha$ -ТКФ. Кроме того, наличие в структуре витлокита ( $\beta$ -ТКФ) наполовину заполненной позиции Са позволяет ожидать энтропийной стабилизации именно этой формы при высоких температурах, что противоречит экспериментальным данным. В данной работе методами атомистического моделирования были



проведены оценки энергий точечных дефектов (катионного и анионного замещения, вакансий Ca) в  $\beta$ - и  $\alpha$ - формах  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , показавшие, что для объяснения экспериментально наблюдаемых термодинамических характеристик перехода из  $\beta$ - в  $\alpha$ - форму  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  необходим учет энтропийного и энергетического факторов, связанных с распределением катионов по 6 структурным вакансиям структуры  $\alpha$ -  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  по сравнению со структурой глазерита.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗОТЕРМ МЕТАНА

*Магомедов Р.А.,\* Ахмедов Э.Н.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*ramazan\_magomedov@rambler.ru*

На основе ранее предложенной методики [1, 2] рассчитано уравнение состояния метана  $\text{CH}_4$  в диапазоне температур от  $T = 300$  К до  $T = 1000$  К. Выражение, использованное для расчёта имеет следующий вид:

$$P = \rho RT \left\{ 1 + \rho B + (1 - \alpha) \left[ \ln \left( \frac{eM}{\rho N_A} \left( \frac{mkT}{2\pi\hbar} \right)^{\frac{3}{2}} \right) + \psi(1) - \psi(2 - \alpha) - \rho B \right] \right\}$$

Полученные расчётные результаты хорошо согласуются с экспериментальными значениями [3]. Следует отметить, что в нашей модели подгоночным является только показатель производной дробного порядка  $\alpha$ . Однако он зависит не только от температуры  $T$ , но и от плотности  $\rho$ . То есть,  $\alpha$  нужно подгонять для каждой экспериментальной точки изотермы. В результате для каждой температуры мы имеем целое семейство немного отличающихся расчётных изотерм. Характер зависимости  $\alpha$  от плотности и температуры меняется в зависимости от исследуемого вещества.

После определения  $\alpha$  для метана путем подгона под экспериментальные значения [3], было обнаружено, что с увеличением температуры, кривая зависимости  $\alpha(\rho)$  пролегает выше, наклон уменьшается, температурная зависимость ослабевает. Такое поведение параметра  $\alpha$  является уникальным для метана. Исходя из того, что температурная зависимость  $\alpha$  ослабевает при приближении к 1000 К и предполагая, что при больших температурах изменение этой зависимости будет не значительным, зависимость  $\alpha(\rho)$  для 1000 К можно аппроксимировать полиномом, и затем использовать его при расчете изотерм уравнения состояния для больших температур.

Успешное применение фрактального однопараметрического уравнения состояния для исследования метана показывает его эффективность для расчета широкого спектра веществ.

1. Мейланов Р.П., Магомедов Р.А. Инженерно-физический журнал, 2014, Т. 87, №. 6, С. 1455-1465.
2. Magomedov R.A. et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, V. 133, №. 2, P. 1189-1194.
3. Сычев В.В. и др. Термодинамические свойства метана: ГСССД, М.: Изд. стандартов, 1979.

## НОВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ

Поднек В.Э.,\*<sup>1</sup> Кияченко Ю.Ф.,<sup>1</sup> Юдин И.К.,<sup>1</sup> Григорьев Б.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИПНГ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>ВНИИГАЗ, Москва, Россия

\*podnek77@gmail.com

Изложен новый инструментальный оптический способ определения критических параметров жидких смесей [1], использующий два основных универсальных признака критической точки (КТ) жидкость–газ, а именно, достижение абсолютного максимума интенсивности светорассеяния (критической опалесценции) и исчезновение/появление мениска на середине внутреннего объема оптической ячейки при пересечении пограничной кривой. Метод реализуется на установке измерения интенсивности рэлеевского рассеяния света в горизонтальной плоскости, делящей внутренний объем оптической ячейки пополам.

Суть метода состоит в измерении температурной зависимости интенсивности светорассеяния на последовательности изохор, покрывающих на фазовой диаграмме смеси окрестность КТ и выделении на них аномалий двух разных типов, а именно, острых (лямбда-образных) пиков интенсивности светорассеяния, связанных с переходом околокритической смеси из однофазного в двухфазное состояние и узких провалов на их низкотемпературных ветвях, связанных с прохождением мениска через плоскость рассеяния. По значениям температуры, плотности и давления, соответствующих указанных аномалиям, строятся пограничная кривая, разделяющая области однофазного и двухфазного состояний и линия мениска – линия равных объемов жидкой и газовой фаз в области двухфазного состояния. При этом положение КТ на экспериментально определенной пограничной кривой определяется двумя физически разными способами, реализуемыми с разных сторон пограничной кривой, а именно, со стороны области однофазного состояния – по абсолютному максимуму интенсивности светорассеяния на пограничной кривой, а со стороны области двухфазного состояния – по точке выхода линии мениска на пограничную кривую. В области доступности оптических измерений способ решает проблему надежного определения критических параметров жидких смесей. Метод апробирован на ряде модельных и пластовых углеводородных смесей.

Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований РАН, НИР № 122022800364-6.

1. Поднек В.Э., Кияченко Ю.Ф., Юдин И.К., Григорьев Б.А. "Способ определения критических параметров флюидов". Патент на изобретение RU 2 786 686, Опубликовано: 23.12.2022, Бюл. № 36.

## НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КОМПЛЕКСЫ SF<sub>6</sub> НА БИНОДАЛИ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

Устюжанин Е.Е.,\*<sup>1</sup> Очков В.Ф.,<sup>1</sup> Рыков В.А.,<sup>2</sup> Рыков С.В.,<sup>2</sup> Кудрявцева И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МЭИ, Москва, Россия, <sup>2</sup>СПбГУИТМО, Санкт-Петербург, Россия

\*evgust@gmail.com

В нашей работе рассматривается ряд задач; среди них первая состоит в том, чтобы в окрестности критической точки исследовать поведение термодинамических свойств вещества ( $(\rho_l, \rho_g)$  и др.), а также комплексов, которые включают в себя несколько свойств ( $f_d = (\rho_l + \rho_g)/(2\rho_c) - 1$  – средний диаметр бинодали,  $f_s = (\rho_l - \rho_g)/(2\rho_c)$  – параметр порядка,  $ur = f_d/f_s$ ,  $Z_l = \Delta\rho_l/\tau^\beta$  и др.), здесь  $\rho_l$  – плотность жидкой фазы,  $\rho_g$  – плотность газовой фазы,  $\rho_c$  – плотность в критической точке,  $\Delta\rho_l = \rho_l/\rho_c - 1$  – относительная

плотность жидкости,  $Z_l$  — комплекс, связанный с  $\Delta\rho_l$ ,  $ur$  — комплекс, связанный с  $f_d$  и  $f_s$ ,  $\beta$  — скейлинговый показатель. В нашей работе рассматриваются следующие цели: 1) увеличить точность расчетных данных о термодинамических свойствах и комплексах  $(\rho_l, \rho_g, f_s, f_d, Z_l \dots)$  в мало исследованной критической области  $\text{SF}_6$ , при этом намечено использовать комбинированные модели  $(\rho_l(D, C, \tau), \rho_g(D, C, \tau))$  [1], 2) исследовать характер бинодали с применением нескольких пар координат, в том числе пары  $(Z_l, ur)$ , здесь  $D = (T_c, \rho_c, \beta, B_{d0}, B_{s0} \dots)$  — критические характеристики вещества,  $C$  — регулируемые коэффициенты,  $\tau = (T_c - T)/T_c$  — относительная температура. Вторая задача работы связана с разработкой комбинированных моделей  $(\rho_l(D, C, \tau), \rho_g(D, C, \tau) \dots)$  [1], которые отвечают требованиям масштабной теории критических явлений. В рамках третьей задачи с помощью моделей  $\rho_l(D, C, \tau)$  и  $\rho_g(D, C, \tau)$  получены, во-первых, численные значения ряда комплексов  $(ur, \Delta\rho_l, ur_{bas} = (B_{d0}/B_{s0})\tau^\beta, Z_l, W = |\Delta\rho_g|/\Delta\rho_l$  и др.) в широком интервале температур, включая окрестность  $T_c$ . Во-вторых, исследовано поведение бинодали с использованием нескольких пар координат, в том числе  $(\Delta\rho_l, ur_{bas}), (\Delta\rho_g, ur_{bas}), (Z_l, ur_{bas}), (Z_g, ur_{bas}), (W, ur_{bas})$ . Решен ряд прикладных вопросов, при этом привлечены: 1) графические формы бинодали в координатах  $(Z_l, ur_{bas}), (Z_g, ur_{bas})$  и  $(W, ur_{bas})$ , 2) литературные  $(\rho_l, \rho_g, T)$  — данные в критической области.

- 
1. Vorobyev V.S. et al. Comparison of the scaling models for substance densities along the saturation line. J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012017.

**ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВТОРОГО  
РОДА В ГОМОЛОГИЧЕСКОМ РЯДУ КРИСТАЛЛОВ СО СТРУКТУРОЙ  
ФЛЮОРИТА  $\text{MeF}_2: \text{Mn}^{2+}$  ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}, \beta - \text{Pb}, \text{Ba}$ )**

*Щербаков В.Д., Низамутдинов А.С.\**

*КФУ, Казань, Россия*

*\*anizamutdinov@mail.ru*

Данная статья представляет обзор исследований, проведенных в области электропроводности сверхкритического  $\text{CO}_2$  (углекислого газа), включая его производство и электропроводность в различных условиях. Были рассмотрены результаты экспериментов, связанных с генерацией плазмы в сверхкритическом  $\text{CO}_2$  с добавлением воды и других веществ. Была подчеркнута важность контроля параметров, таких как давление, температура и содержание примесей в флюиде, для регулирования электропроводности. Различные исследования показали, что добавление определенных веществ и электролитов может повысить электропроводность сверхкритического  $\text{CO}_2$ , что открывает перспективы его использования в процессах электрохимического осаждения металлов и генерации плазмы. В заключение отмечается, что дальнейшие исследования в этой области позволят более глубоко понять и оптимизировать свойства сверхкритического  $\text{CO}_2$  для инновационных промышленных приложений. В заключении можно сделать вывод, что сверхкритический  $\text{CO}_2$  является уникальной средой, обладающей высокой плотностью и диффузионной способностью. Добавление некоторых веществ в сверхкритический  $\text{CO}_2$  может повысить его электропроводность, что позволит использовать полученную смесь для генерации плазмы или электрохимического осаждения металлов. Электропроводность сверхкритического  $\text{CO}_2$  зависит от таких параметров, как давление, температура и содержание примесей во флюиде. Однако, возможность регулирования этих параметров позволяет контролировать электропроводность сверхкритического  $\text{CO}_2$  и использовать его в различных промышленных процессах.

- 
1. Li X, Wang H, Liu K, Liu Y, Qin M. 27.12 MHz plasma generation in supercritical carbon dioxide. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(9):093303.
  2. Philippidis TP, Matthews QL, Ducker WA. Electrochemical deposition of metals from supercritical fluids: a review. *International Journal of Electrochemical Science*. 2014;9(8):4167-4196.
  3. Sato N, Murakami T, Fukuzaki T, Sakai M, Aoki Y. Electrodeposition of metals from supercritical fluids. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2001;20(3):247-257.
  4. Sheikh-Ahmadi P, Zhao B. Review on electrochemical deposition of metals and alloys in supercritical fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2037):20150007.
  5. Belkind A, Burmasov V, Gorbunov A, et al. High-power microwave plasma torch for waste treatment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;121(8):082009.

## ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЕФЕКТНЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ РЯДА ФЛЮОРИТА $\text{MeF}_2:\text{Mn}^{2+}$ ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}, \beta - \text{Pb}, \text{Ba}$ )

*Щербakov В.Д., Низамутдинов А.С.\**

*КФУ, Казань, Россия*

*\*anizamutdinov@mail.ru*

Известно, что кристаллы  $\text{CaF}_2:\text{Mn}^{2+}$  ( $C_{\text{Mn}} = 3 \%$ ) используются в составе дозиметров, а само это соединение уже более 40 лет остается предметом всесторонних исследований как люминесцентный и сцинтилляционный материал. Причиной такой ситуации является важность материала в термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД). Длительное и широкое практическое применение материала при этом не сопровождается пониманием механизмов термолюминесценции, а также образования дефектов, связанных с искажением примесных центров и их устойчивости [1, 2], что усложняет совершенствование дозиметров ТЛД и приводит к так называемой проблеме нулевой дозы [1, 2]. Частично решение кроется в знании количества дефектных центров с участием одиночного и парного центров  $\text{Mn}^{2+}$  в кристаллах  $\text{MeF}_2$ . В настоящей работе мы обсуждаем проявление этих центров в люминесцентной спектроскопии, основываясь на предыдущих работах и представляя новые подходы [3]- [6]. Установлено, что, во-первых, низкосимметричные центры  $\text{Mn}^{2+}$  в  $\text{MeF}_2$  обусловлены сжатием кубического комплекса  $\text{Mn}_8^{6-}$  за счет стрикции обменно-связанных пар  $\text{Mn}^{2+} - \text{Mn}^{2+}$ . Величина этого сжатия определяется разницей ионных радиусов  $R_{\text{Me}^{2+}} - R_{\text{Mn}^{2+}}$ . Во-вторых, объемному сжатию подвергается комплекс  $\text{Mn}_8^{6-}$ , находящийся в поле действия шести магнитно-неэквивалентных пар в  $\text{CaF}_2, \text{SrF}_2$ . Центры в  $\beta\text{-PbF}_2$  и  $\text{BaF}_2$  испытывают внеосевое давление, величина и направление которого определяются суммарной стрикцией четырех и трех обменно-связанных пар, соответственно.

1. Chakrabarti K., Sharma J., Mathur V.K., Barkyomb J.H. // Phys. Rev B. 1995. V. 51. P. 16541
2. Danilkin M., Lust A., Ratas A., Seeman V., Kerikmae M. // Radiat.Meas. 2008. V. 43. P. 300
3. Shcherbakov V.D. // J. Sci. Rep.Kazan. Univ. Phys. Math. Sci. Ser. 2010. V. 152. No 4. P. 21
4. Shcherbakov V.D. // J. Sci. Rep.Kazan. Univ. Phys. Math. Sci. Ser. 2015. V. 157. P. 172
5. Shcherbakov V.D. // Crystallogr. Rep. 2017. V. 62. P. 430
6. Shcherbakov V.D., Nizamutdinov A.S. // J.Lumin. 2019. V. 205. P. 37

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО $\text{CO}_2$ : ИССЛЕДОВАНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

*Антипов Р.Р.\*, Булалов Т.Р., Сабирова А.Д.*

*КНИТУ-КАИ, Казань, Россия*

*\*Gomezradrigo@gmail.com*

Данная статья представляет обзор исследований, проведенных в области электропроводности сверхкритического  $\text{CO}_2$  (углекислого газа), включая его производство и электропроводность в различных условиях. Были рассмотрены результаты экспериментов, связанных с генерацией плазмы в сверхкритическом  $\text{CO}_2$  с добавлением воды и других веществ. Была подчеркнута важность контроля параметров, таких как давление, температура и содержание примесей в флюиде, для регулирования электропроводности. Различные исследования показали, что добавление определенных веществ и электролитов может повысить электропроводность сверхкритического  $\text{CO}_2$ , что открывает перспективы его использования в процессах электрохимического осаждения металлов и генерации плазмы. В заключение отмечается, что дальнейшие исследования в этой области позволят более

глубоко понять и оптимизировать свойства сверхкритического CO<sub>2</sub> для инновационных промышленных приложений. В заключении можно сделать вывод, что сверхкритический CO<sub>2</sub> является уникальной средой, обладающей высокой плотностью и диффузионной способностью. Добавление некоторых веществ в сверхкритический CO<sub>2</sub> может повысить его электропроводность, что позволит использовать полученную смесь для генерации плазмы или электрохимического осаждения металлов. Электропроводность сверхкритического CO<sub>2</sub> зависит от таких параметров, как давление, температура и содержание примесей во флюиде. Однако, возможность регулирования этих параметров позволяет контролировать электропроводность сверхкритического CO<sub>2</sub> и использовать его в различных промышленных процессах.

1. Li X, Wang H, Liu K, Liu Y, Qin M. 27.12 MHz plasma generation in supercritical carbon dioxide. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(9):093303.
2. Philippidis TP, Matthews QL, Ducker WA. Electrochemical deposition of metals from supercritical fluids: a review. *International Journal of Electrochemical Science*. 2014;9(8):4167-4196.
3. Sato N, Murakami T, Fukuzaki T, Sakai M, Aoki Y. Electrodeposition of metals from supercritical fluids. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2001;20(3):247-257.
4. Sheikh-Ahmadi P, Zhao B. Review on electrochemical deposition of metals and alloys in supercritical fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2037):20150007.
5. Belkind A, Burmasov V, Gorbunov A, et al. High-power microwave plasma torch for waste treatment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;121(8):082009.

## РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЯ И СВИНЦА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ФОРМУЛЫ КУБО–ГРИНВУДА

Фокин В.Б.,<sup>\*1,2</sup> Минаков Д.В.,<sup>1,2</sup> Парамонов М.А.,<sup>1,2</sup> Левашов П.Р.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия

\*Vladimir.fokin@phystech.edu

Цирконий и свинец — металлы, которые находят широкое применение в атомной энергетике.

Мы впервые рассчитали транспортные и оптические свойства этих металлов в окрестности критической точки. Поведение металлов в области фазовой диаграммы, соответствующей расширенному нагретому веществу, моделировалось первопринципным методом квантовой молекулярной динамики (с помощью пакета VASP). Для расчета динамической электропроводности использовалась формула Кубо–Гринвуда [1]. После расчета электропроводности оптические свойства (нормальная спектральная излучательная способность, отражательная способность, показатель преломления) восстанавливались с использованием преобразования Крамерса–Кронига [2].

Представлено сравнение удельного электрического сопротивления и нормальной спектральной излучательной способности циркония и свинца с экспериментальными данными [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10398, <https://rscf.ru/project/20-79-10398/>

1. Knyazev D V and Levashov P R 2013 *Computational Materials Science* **79** 817–829
2. Fokin V B, Minakov D V and Levashov P R 2023 *Symmetry* **15** 48

3. Paramonov M A, Minakov D V, Fokin V B, Knyazev D V, Demyanov G S and Levashov P R 2022 *Journal of Applied Physics* **132** 065102

## КОРРЕКТНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ТРАЕКТОРИИ КОЛЛОИДНОЙ ЧАСТИЦЫ В ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЕ

*Косс К.Г.,<sup>\*1,2</sup> Лисина И.И.,<sup>1,2</sup> Петров О.Ф.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия

\**xeniya.koss@gmail.com*

В последнее время все большее значение приобретают задачи, рассматривающие динамику так называемых активных броуновских, или самодвижущихся, частиц. Эти частицы обладают уникальным свойством преобразовывать внешнюю энергию в кинетическую энергию своего движения [1]. Природа этих частиц может быть различной: коллоидные частицы в дисперсионных средах, простейшие организмы и бактерии, химически активированные частицы и даже механические объекты [1]. Активные броуновские частицы и структуры из них, благодаря своей способности к трансформации энергии, обладают рядом исключительных свойств и особенностей, представляющих интерес как для фундаментальной науки, так и для практических задач - в биологии, медицине, технике [1].

Энтропия и другие инструменты, используемые в рамках физики диссипативных систем, являются универсальными, и их можно успешно применять для изучения эволюции активных броуновских систем. Данная работа посвящена исследованию подхода, предложенного в [2], - вычисление средней динамической энтропии первого пересечения (mean first-passage time, MFPT). При таком подходе можно описать движение каждой отдельной (активной или пассивной) броуновской частицы с помощью нескольких параметров (таких, как фрактальная размерность ее траектории и размер области локализации), сравнить различные режимы движения между собой.

Показано [3, 4], что изменение фрактальной размерности траектории активной частицы и области её локализации хорошо коррелирует с изменением фазового состояния системы. Однако остаётся открытым вопрос чувствительности этих величин к параметрам экспериментальной системы и регистрирующего оборудования. В частности, энтропия Колмогорова-Синая, простым приближением которой является динамическая энтропия первого пересечения, отображает внутреннюю скорость производства информации исследуемым объектом (среднее удельное количество информации, передаваемое данным стационарным случайным процессом - динамической системой, источником). Однако, если частота фиксации этой информации (например, частота съёмки положения коллоидной частицы видеокамерой) будет слишком низкой, полученные значения энтропии (а, следовательно, и все её производные параметры) будут некорректными.

Было проведено численное моделирование динамики одиночной коллоидной частицы в рамках различных моделей движения. Рассмотрено броуновское, ланжевеновское, активное движение коллоидной частицы. Варьировались собственная скорость частицы, коэффициент вращательной диффузии, соотношение коэффициента трения и шага по времени ("частоты съёмки"); моделирование проводилось для частицы на неограниченной плоскости и в параболической ловушке. Для каждого исследованного случая получены зависимости среднеквадратичного смещения от времени, динамической энтропии первого пересечения от параметра огрубления. Исследованы статистические распределения фрактальной размерности траекторий частицы и её области локализации в зависимости от длины траектории частицы. Полученные результаты позволят сформулировать критерии корректного выбора параметров экспериментальной регистрации траектории активной частицы.

1. Bechinger, C., Di Leonardo, D., Löwen, H., Reichhardt, C., Volpe, G., Volpe, G. Active particles in complex and crowded environments. // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 045006.
2. Allegrini, P., Douglas, J.F., Glotzer, S.C. Dynamic entropy as a measure of caging and persistent particle motion in supercooled liquids. // *PRE* 1999. V. 60. P. 5714.
3. Koss, X.G., Lisina, I.I., Statsenko, K.B., Petrov, O.F. Localization area, fractal dimension and phase transitions in dissipative two-dimensional Yukawa systems: Numerical simulation. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018, V. 946, P. 012145.
4. Koss X.G., Kononov E.A., Lisina I.I., Vasiliev M.M., Petrov O.F. // *Molecules.* 2022. V. 27. P. 1614.

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ СЕРИИ NOVES

*Расчектаева Е.П.,\* Станкус С.В.*

*ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия*

*\*raschektaevaep@gmail.com*

В работе комплексно, экспериментально и теоретически, исследовалась теплопроводность озонобезопасных теплоносителей Noves 7000 и Noves 7100 с малыми значениями потенциала глобального потепления. Эти теплоносители применяют не только как заменители озоноразрушающих хладагентов, но и в качестве чистящих и промывочных агентов, растворителей, а также в качестве среды для теплопередачи и испытаний диэлектрической прочности.

Измерения теплопроводности были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров в интервалах температур от 323 до 380 К и давлений от 0,10 МПа до 0,27 МПа на 5 изотермах для Noves 7000 и в интервалах температур от 350 до 385 К и давлений от 0,12 до 0,21 МПа для Noves 7100. Подробное описание методики измерений и проведения эксперимента содержит работа [1]. Чистота образцов составляла 0,9989. До начала измерений образцы подвергались циклу замораживание-откачка-разморозка для дегазации. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1,5–2,5%, по температуре — 0,05 К, давлению — не более 4 кПа.

Результаты измерений обрабатывались эмпирической зависимостью:

$$\lambda(T, p) = a_0 + a_{10} \cdot \frac{T}{100} + a_{20} \cdot \frac{100}{T} + p \cdot \left( a_{11} \cdot \frac{T}{100} + a_{21} \cdot \frac{100}{T} \right) + p^2 \cdot \left( a_{12} \cdot \frac{T}{100} + a_{22} \cdot \frac{100}{T} \right), \quad (1)$$

где  $T$  — в К,  $p$  — в МПа,  $\lambda$  — в мВт/(м·К).

В работе показана возможность использования теории термодинамического подобия для расчета теплопроводности данного класса хладагентов с требуемой для практики точностью. В расчетах было применено уравнение состояния Бенедикта-Вебба-Рубина в модификации Ли-Кеслера, которое использует трехпараметрическую корреляцию Питцера [2]. Проведенные измерения и теоретические расчеты подтвердили надежность предложенного подхода для оценки теплопроводности теплоносителей Noves.

1. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC - 227ea // *Теплофизика и аэромеханика.* 2002. Т. 9. №. 3. С. 467.
2. Lee B.I., Kesler M.G. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states // *AIChE Journal.* 1975. Vol. 21. No. 3. P. 510.



## УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ФЛЮИДА ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ. НЕОН

*Дутова О.С.*

*ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия*

*dutova@itp.nsc.ru*

Вязкость является важнейшей физико-химической и технической характеристикой вещества в жидком и газообразном состояниях и одним из самых труднодоступных для высокоточного эксперимента параметров, особенно в области низких и высоких температур и давлений.

Для описания экспериментальных данных по вязкости в достаточно широком интервале параметров состояния в настоящее время широко используются эмпирические зависимости вязкости как функции температуры и плотности. Различные варианты уравнений для расчета вязкости позволяют описывать экспериментальные данные в широкой области параметров состояния.

С помощью установленной ранее [1] зависимости избыточной вязкости  $\Delta\eta$  от плотности внутренней энергии  $x = \Delta U/V$  получено простое малопараметрическое уравнение для описания коэффициента вязкости в широкой области параметров состояния

$$\eta_{cal}(T, P) = Ax \exp\left(\alpha \frac{x_0}{x_0 - x}\right) + B \left(\frac{T}{T_c}\right)^{0.25} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.5} \exp(-\beta x/x_0) + \eta_{en},$$

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,  $\eta_{en}$  — вязкость системы твердых сфер по Энскогу. Это уравнение содержит четыре индивидуальных эмпирических коэффициента, которые необходимо найти из экспериментальных или табличных данных по вязкости. Уравнение описывает вязкость жидкого и газообразного неона при температурах от 26 К до 700 К и давлениях до 50 МПа. Предложенное уравнение позволяет с удовлетворительной точностью осуществлять экстраполяцию коэффициента вязкости далеко за пределы опорного участка. Показано, что рассчитанные по уравнению значения вязкости неона согласуются с наиболее надежными экспериментальными и табличными данными в пределах экспериментальных погрешностей.

- 
1. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Дутова О.С. // Теплофизика и Аэромеханика. 2017. V. 24. No. 2. P. 209.

=====

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ВЕЩЕСТВ В КОНДЕНСИРОВАННОМ  
СОСТОЯНИИ**

=====

**СОГЛАСОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ  
ПЛАВЛЕНИИ ОСМИЯ**

*Кулямина Е.Ю.,\* Зицерман В.Ю.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*kulyamina.elena@gmail.com*

Осмий один из немногих элементов периодической системы, для которого отсутствуют данные по теплоте плавления и лишь недавно измерен наклон кривой плавления. В то же время, именно для Os в стенах ОИВТ РАН проведены обширные исследования калорических [1] и термических свойств [2] твердой фазы. Это открыло возможность использовать принцип согласования разнородных данных, позволяющий выявить неизвестные параметры.

Согласование данных проведено на основе двух закономерностей: соотношения Андерсона  $\Delta S_m = R \ln 2 + \beta_m B_m \Delta V_m$ , связывающего скачки энтропии [3] и объема при плавлении с величиной  $B_m$  (модуль упругости в точке плавления), и линейной зависимости величины  $C_p/\beta$  (отношение теплоемкости к объемному коэффициенту теплового расширения) от изменения энтальпии  $H_T^0 - H_0^0$ .

Анализ допустимых вариаций наклона кривой плавления ( $\Delta V_m/\Delta S_m$ ) и относительного скачка объема  $\Delta V_m/V_m$  позволил дать окончательные оценки для энтропии плавления  $\Delta S_m = 9.8 \pm 1$  Дж/(моль К) и наклона  $(dT/dp)_m = 48.1$  К/ГПа. Величина наклона оказалась почти идентична результату квантово-механического расчета [4], а полученное значение энтропии плавления делает необходимым примерно вдвое снизить принятую в литературе оценку теплоты плавления, с 58 до 32 кДж/моль. Впервые этот результат был получен в работе Фокина и др. [5] на основе аналогии с Re, где подобное расхождение подтверждено экспериментом.

- 
1. Чеховской В.Я., Раманаускас Г.Р. Калорические свойства осмия, иридия, родия и рутения в диапазоне температур 0 К-Тпл // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1989. № 4(78). С. 47.
  2. Онуфриев С.В. Термодинамические свойства рутения и осмия // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 668.
  3. Anderson O.L. Equations of state of solids for geophysics and ceramic science. N.Y.: Oxford University Press, 1995. 432 p.
  4. Burakovsky L., Burakovsky N., Preston D. L. Ab initio melting curve of osmium // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. № 17. 174105.
  5. Фокин Л.Р., Кулямина Е.Ю., Зицерман В.Ю. Новая оценка теплоты плавления осмия // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 61-65.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ Р-Т-УСЛОВИЙ И РАЗМЕРА НАНОКРИСТАЛЛА

*Магомедов М.Н.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*mahmag4@mail.ru*

Нами ранее в [1] было рассчитано уравнение состояния и свойства макрокристалла ГЦК золота. В данной работе изменение свойств золота при переходе от макро- к нанокристаллу было изучено на основе метода из [1], который был обобщен на нанокристалл из  $N$  атомов. Данное обобщение было сделано на основе RP-модели [2], которая позволяет изучать зависимость свойств как от  $N$ , так и от формы нанокристалла в виде прямоугольного параллелепипеда.

В данной работе были рассчитаны следующие свойства:  $\sigma$  — удельная поверхностная энергия грани (100),  $\sigma'(P)_T = (\partial\sigma/\partial P)_T$  — производная функции  $\sigma$  по давлению, изохорная ( $\sigma'(T)_v = (\partial\sigma/\partial T)_v$ ) и изобарная ( $\sigma'(T)_P = (\partial\sigma/\partial T)_P$ ) производные функции  $\sigma$  по температуре. Было изучено изменение этих свойств при переходе от макро-ГЦК-Au к нанокристаллу кубической формы из 306 атомов.

Было показано, что при  $P = 0$  величина  $\sigma$  уменьшается с уменьшением  $N$  тем заметнее, чем выше температура. При низких температурах и высоких давлениях на изотерме имеются две Р-точки, в которых удельная поверхностная энергия не зависит от  $N$ . С ростом температуры эти Р-точки сближаются, и при высоких температурах таких Р-точек на изотерме уже нет. В области, оконтуренной Р-точками величина  $\sigma$  возрастает при изотермо-изобарном уменьшении  $N$ .

Изотермы барической зависимости функции  $\sigma'(P)_T$  для макро- и нано-кристалла при определенном давлении ( $P_x$ ) пересекаются. При  $P < P_x$  функция  $\sigma'(P)_T$  растет при изотермо-изобарическом уменьшении  $N$ , а при  $P > P_x$  функция  $\sigma'(P)_T$  уменьшается.

Показано, что при  $T = 0$  К функции  $\sigma'(T)_v$  и  $\sigma'(T)_P$  при любом давлении достигают своего максимума:  $\sigma'(T)_v = \sigma'(T)_P = 0$ . При низких давлениях выполняется  $|\sigma'(T)_v| < |\sigma'(T)_P|$ . Однако при высоких давлениях это неравенство меняется на противоположное. При изобарном или изотермическом переходе к нанокристаллу величины  $|\sigma'(T)_v|$  и  $|\sigma'(T)_P|$  возрастают.

- 
1. M.N. Magomedov, Computational Condensed Matter, 2022, 31, e00673. DOI: 10.1016/j.cocom.2022.e00673
  2. M.N. Magomedov, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 151, 109905. DOI: 10.1016/j.jpics.2020.109905

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ РЕЗЕРВУАРНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, НАСЫЩЕННЫХ УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ

*Рамазанова А.Э.,\* Абдулагатов И.М.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*ada\_ram@mail.ru*

Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере — одна из наиболее важных экологических проблем. Лучшим способом решения данной проблемы является геологическое хранение  $\text{CO}_2$ , выделяемого в атмосферу. Углекислый газ при выбросе от электростанций может быть уловлен, сжат, транспортирован и сохранен в подземных естественных резервуарах. Этот метод позволяет одновременно извлекать метан и повышать

нефтеотдачу. Физические и химические процессы, происходящие в порах горной породы, насыщенной сверхкритическим (СК)  $\text{CO}_2$ , влияют на теплоперенос через пластовую среду. Поведение  $\text{CO}_2$  в пласте — сложный процесс, который зависит от множества компонентов в системе пласта, включая минералогический состав, наличие трещин, динамику поровой жидкости. Для оценки, прогнозирования и контроля стабильности условий хранения необходимы исследования поведения  $\text{CO}_2$  в пластах, где он будет существовать в виде сверхкритического флюида с особыми термодинамическими и транспортными свойствами, следовательно, будут меняться условия хранения  $\text{CO}_2$  в резервуарах. Для исследования поведения СК  $\text{CO}_2$  в подземном резервуаре-хранилище необходимы надежные теплофизические данные системы порода + СК  $\text{CO}_2$ , и создание модели для расчета термодинамических и транспортных свойств СК  $\text{CO}_2$  в порах породы резервуарного пласта, что позволяет контролировать стабильность условий хранения.

В данной работе представлены новые экспериментальные результаты поведения теплопроводности горной породы, насыщенной СК  $\text{CO}_2$ , при высоких температурах и давлениях. В полученных экспериментах теплопроводность СК  $\text{CO}_2$ , заключенного в порах, не стремится к бесконечности, как это наблюдается в объеме, а демонстрирует некоторое аномальное поведение, которое интерпретировано в терминах теории конечно-размерного скейлинга для систем в ограниченных пространствах. Углекислый газ в микропоре ограничен, и радиус корреляции плотности не может превышать размер пор, теплопроводность  $\text{CO}_2$  вблизи критической точки жидкость-газ остается конечной.

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕЙ**

*Богатищева Н.С.,\* Галкин Д.А., Никитин Е.Д., Панов Г.В., Попов А.П.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*Bogatishcheva@mail.ru*

Существенная роль в сокращении выбросов углекислого газа в атмосферу принадлежит технологиям улавливания и хранения углерода (Carbon Capture and Storage — CCS). Для разработки метода CCS важное значение имеют экологичность и рентабельность технологии, которые зависят от физико-химических свойств применяемых абсорбентов. Выбранные в качестве объектов исследования диметиловые эфиры этиленгликолей (глимы) являются физическими абсорбентами  $\text{CO}_2$  и вместе с химическим компонентом (аминоспиртом) могут быть использованы в составе перспективных гибридных поглотителей.

В докладе будут представлены результаты измерения критической температуры, критического давления, теплопроводности и температуропроводности глимов: диметиловых эфиров этиленгликоля, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля, тетраэтиленгликоля.

Для измерения теплопроводности использовалась оригинальная установка, реализующая ТНВ-метод. Одним из основных условий метода, выполнение которого требует модель, является поддержание постоянной плотности теплового потока. Это достигнуто путем поддержания постоянной мощности на нагревателе-зонде в ходе эксперимента. Коэффициенты температуропроводности были измерены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 Netzsch. Измерения выполнены для каждого вещества при атмосферном давлении в широком диапазоне температур его жидкого состояния.

Критические параметры глимов были экспериментально определены методом импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость. Метод состоит в измерении температуры достижимого перегрева исследуемого образца в зависимости от давления с помощью платинового зонда диаметром 0.02 мм, который служит одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Преимуществом метода, которое делает

его применимым к термонестабильным веществам, является сверхмалое время нагрева зонда и пристеночного слоя жидкости до критической температуры (от 0.02 до 0.95 мс). Погрешность измерения критической температуры составляет 1%, критического давления — 3%, температуропроводности — 5 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00723, <https://rscf.ru/project/23-29-00723/>

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ, ВОВЛЕЧЕННЫХ В ПРОИЗВОДСТВО БИОТОПЛИВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ**

*Богатищева Н.С.,\* Никитин Е.Д., Попов А.П., Файзуллин М.З.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*Bogatishcheva@mail.ru*

Использование в составе моторных топлив компонентов, произведенных из возобновляемого сырья, не только расширяет ресурсы топлив, но часто позволяет улучшить их экологические и эксплуатационные характеристики. В настоящее время активно ведутся исследования в области совершенствования технологий изготовления биотоплив второго поколения, получаемых из различных видов непищевой биомассы. Для этого необходима информация по различным физическим свойствам веществ, вовлеченных в их производство. В докладе будут представлены результаты измерения критической температуры, критического давления, изобарной теплоемкости и коэффициента температуропроводности конечных и промежуточными продуктов в производстве биотоплив второго поколения: 2-метилфурана, 2,5-диметилфурана, 2-метилтетрагидрофурана, фурфурола, фурфурилметанола, 2-фурфурилацетата, 2-тетрагидрофурфурилметанола, гамма-валеролактона, альфа-ангеликалактона, эфиров пентановой кислоты, левулиновой кислоты и ее эфиров.

Измерения критических параметров выполнены методом импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость. Коэффициенты температуропроводности измерены методом лазерной вспышки, для измерения теплоемкости использовался дифференциальный сканирующий калориметр DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch). Измерения теплоемкости и температуропроводности выполнены для каждого вещества при атмосферном давлении в широком интервале температур его жидкого состояния. Погрешность измерения критической температуры составляет 1%, критического давления — 3%, температуропроводности — 5 %, изобарной теплоемкости — 3 %.

Получены уравнения, описывающие зависимость теплоемкости и температуропроводности от температуры, которые использовались для расчета коэффициентов теплопроводности исследуемых соединений. Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, сравнивались с результатами расчетов аддитивно-групповыми методами и использовались для оценки других теплофизических свойств исследуемых веществ с помощью теории термодинамического подобия.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА СМЕСЕЙ ПРОПИЛБЕНЗОЛ-ОКТАН НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ 277...473 К

Пашук Е.Г.,\* Абдулагатов И.М.

ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия

\*epashuk@yandex.ru

Ароматические углеводороды и *n*-алканы, в основном определяют теплофизические свойства биореактивных [1] и биодизельных [2] топлив. Данные о теплофизических свойствах важны для исследований по разработке состава, процессу синтеза и оптимизации эксплуатационных характеристик биотоплива. Это определяет актуальность информации о теплофизических свойствах смесей в широком интервале температур на линии насыщения.

В работе представлены результаты измерения скорости ультразвука в смесях бинарной системы Пропилбензол-Октан в интервале температур 277-473 К на линии насыщения. Измерения проведены импульсным методом с постоянной акустической базой на частоте 6 МГц с погрешностью 0,1-0,2%. Данные о скорости звука использованы для расчета адиабатической сжимаемости и основных термодинамических свойств. Обсуждаются отклонения полученных концентрационных зависимостей от рассчитанных на основании различных моделей идеальных смесей.

1. Staples M.D., Malina R., Suresh P., et al. Aviation CO<sub>2</sub> emissions reductions from the use of alternative jet fuels// Energy Policy 2018. No. 114. P. 342-354.
2. Pitz W. J., Mueller C. J. Recent progress in the development of diesel surrogate fuels// Progress in Energy and Combustion Science 2011. V. 37. No. 3. P. 330-350.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЛАВОВ СИСТЕМ In-Sb И In-Bi

Ильиных Н.И.,\*<sup>1,2</sup> Гельчинский Б.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия

\*ninail@bk.ru

Целью настоящей работы является исследование равновесного состава и термодинамических характеристик бинарных расплавов систем In-Sb и In-Bi в широком интервале температур.

Исследование выполнено с использованием методики термодинамического моделирования, программного комплекса TERRA и модели идеальных растворов продуктов взаимодействия (ИРПВ) [1].

Моделирование выполнено в исходной среде аргона при общем давлении  $P = 10^5$  Па. Исследовалась область температур и составов, соответствующая жидкому состоянию, согласно [2]: система In-Sb:  $T = 1000-1600$  К, In-Bi:  $T = 400-1000$  К,  $0 \leq x_{\text{In}} \leq 1$ , где  $x_{\text{In}}$  — исходное содержание индия в расплаве (мол. доли). При моделировании учитывались термодинамические функции следующих элементов и соединений: газообразных In, Bi, Sb, Sb<sub>2</sub>, Sb<sub>3</sub>, Sb<sub>4</sub>, Ar, Ar<sup>+</sup>, In<sup>+</sup>, Bi<sup>+</sup>, Sb<sup>+</sup>, e<sup>-</sup> (электронный газ) и конденсированных In, Bi, Sb, In, InSb, InBi, In<sub>2</sub>Bi, In<sub>5</sub>Bi<sub>3</sub>. В число компонентов расплавов, наряду атомами In, Bi, Sb, были включены соответствующие ассоциаты: GaSb, InSb, InBi, In<sub>2</sub>Bi, In<sub>5</sub>Bi<sub>3</sub>.

Рассчитаны концентрационные и температурные зависимости содержания компонентов и термодинамических характеристик расплавов. Показано, что для всех соединений, входящих в состав расплавов, наблюдаются немонотонные зависимости с максимумами

при определенных атомных отношениях In:Bi и In:Sb, характерных для образования данных соединений. Активности компонентов обоих расплавов характеризуются отрицательными отклонениями от закона Рауля, что типично для систем с сильным взаимодействием компонентов. С ростом температуры активности In, Bi, Sb уменьшаются. Концентрационные зависимости избыточных интегральных характеристики расплавов являются немонотонными с экстремумами при эквимольном содержании компонентов для расплавов In-Sb и при  $x_{\text{In}} \sim 0.6$  для расплавов In-Bi.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.

1. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. - М.: Металлургия, 1994. - 353 с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Лякишева Н.П. - М.: Машиностроение, 1996-2000 г.г.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛА ДИВОЛЬФРАМАТА НАТРИЯ

*Мацкевич Н.И.,\*<sup>1</sup> Семерикова А.Н.,<sup>1</sup> Самошкин Д.А.,<sup>1,2</sup> Станкус С.В.,<sup>2</sup>  
Безверхий П.П.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, Новосибирск, Россия, <sup>2</sup>ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия

\**nata.matskevich@yandex.ru*

Монокристаллы на основе молибдатов и вольфраматов щелочных металлов являются перспективными материалами для оптоэлектроники, поиска двойного безнейтринного бета распада, упругого когерентного рассеяния нейтрино и темной материи. В настоящей работе определены термодинамические характеристики дивольфрамата натрия.

Монокристалл дивольфрамата натрия был выращен низкоградиентным методом Чохральского [1]. Характеризация выполнена рентгенофазовым и химическим анализами. Стандартная энтальпия образования была измерена методом реакционной калориметрии. На основании экспериментальных данных рассчитаны энергия стабилизации и энтальпия решетки. Показано, что монокристалл дивольфрамата натрия является термодинамически устойчивым по отношению к распаду на простые оксиды.

Теплоемкость была измерена в интервале температур 320-980 К на калориметре DSC 404 F1 с использованием платинового тигля с корундовым вкладышем со скоростью 6 К/мин в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин). В качестве калибровочного образца использовали сапфир. Результаты экспериментальных измерений теплоемкости показали, что для исследуемого соединения в интервале температур 320-980 К отсутствуют фазовые переходы.

Настоящая работа поддержана РНФ (проект 19-19-00095-П).

1. Borovlev Yu.A., Ivannikova N.V., Shlegel V.N., Vasiliev Ya.V., Gusev V.A. // J. Cryst. Growth 2001. V. 229. P. 305.

## ОПИСАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ АЦЕТИЛАЦЕТОНАТА МЕДИ В СК-СО<sub>2</sub>

Сабилова А.Д.,\* Билалов Т.Р.

КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

\*A.D.Sabirova@yandex.ru

В настоящее время важной задачей является задача модификации полимерных композитных материалов (ПКМ), в особенности придание им биоцидных и электропроводных свойств. В работе [1] представлен обзор данных по растворимости ряда комплексов меди, а также результаты проведенного исследования на примере ацетил-ацетоната меди  $\text{Cu}(\text{acac})_2$ .

Стоит отметить, что важнейшим этапом исследования растворимости является описание полученных результатов с использованием различных математических моделей [2].

Подробнее методика описания растворимости описана в [3]. В рамках работы [4] описан метод определения параметров критической точки комплекса. Используя этот метод, мы получили следующие значения параметров критической точки:  $T_{\text{кр}} = 4021,93 \text{ K}$ ,  $P_{\text{кр}} = 301,306 \text{ МПа}$ . Погрешность описания предложенным методом составила менее 7%.

Полученные результаты позволяют нам с высокой точностью рассчитывать растворимость  $\text{Cu}(\text{acac})_2$  в исследуемых диапазонах параметров, а также экстраполировать их в небольших пределах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации тема № 123030600044-3, FZSU-2023-0004.

1. А.Д. Сабилова, Т.Р. Билалов Растворимость ацетилацетоната меди(II) в сверхкритическом диоксиде углерода как основа технологии модификации полимерных композитных материалов // Сверхкритические Флюиды. Теория и практика. – 2022. – Т. 17. – № 1. – С. 26-36.
2. Mukhopadhyay M., Rao G.V.R. Thermodynamic modeling for supercritical fluid process design // Ind. Eng. Chem. Res. 1993. № 32, P. 922 - 930.
3. . Bilalov T.R., Gumerov F.M., Le Neindre B. Description and generalization of solubility in supercritical fluids. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH 'I&' Co. KG.Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saar-brucken, Germany. 2018, 113 P.
4. Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р., Харлампиди Х.Э., Федоров Г.И., Сагдеев А.А., Яруллин Р.С., Якушев И.А. Синтез и регенерация палладиевых катализаторов с использованием сверхкритического диоксида углерода // Сверхкритические флюиды. Теория и практика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 34-52.



**ОБЪЁМНАЯ ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И СУСПЕНЗИЙ**

*Пряжников М.И.,\* Минаков А.В.*

*СФУ, Красноярск, Россия*

*\*arrivent@yandex.ru*

Объемная вязкость (иногда называемая второй вязкостью) является характеристикой процесса диссипации энергии при объемных деформациях среды. Упоминание об объемной вязкости можно найти, например, в книге по гидродинамике Ландау [1]. Как отмечают в Хаппель и Бреннер [2], объемная вязкость важна в случаях, в которых жидкость подвержена действию быстропеременных сил, как, например, при ультразвуковых колебаниях. Исследованию динамической вязкости сред в свое время было уделено очень много внимания, в то время как данных по объемной вязкости даже чистых жидкостей практически нет.

Для ньютоновских жидкостей коэффициент поглощения  $\alpha$  пропорционален так называемой продольной вязкости  $\eta_{long}$ , которая складывается из динамической вязкости  $\eta_{shear}$  и объёмной вязкости  $\eta_{vol}$ :

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho V^3} \eta_{long} = \frac{\omega^2}{2\rho V^3} \left[ \frac{4}{3} \eta_{vol} + \eta_{vol} \right]$$

где  $V$  — скорость звука,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\omega$  — частота излучения.

В данной работе при помощи акустической спектроскопии проведено систематическое экспериментальное исследование зависимости объёмной вязкости воды и этиленгликоля от температуры, а также водных суспензий от концентрации и размера наночастиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Помимо этого получены данные о коэффициенте поглощения ультразвука, а также скорость звука в жидкостях.

Использовались дистиллированная вода, этиленгликоль (ос.ч.) Также использовались суспензии наночастиц, приготовленные на основе дистиллированной воды. В качестве наночастиц были рассмотрены наночастицы оксидов кремния и алюминия разных размеров. Массовая концентрация наночастиц варьировалась от 0.025 до 50 %, а их размер от 18 до 108 нм.

Скорость звука и спектр его коэффициента поглощения измеряли при помощи акустического и электроакустического спектрометра DT1202 (Dispersion Technologies). Данный прибор предназначен для характеристики дисперсий в широком диапазоне массовой концентрации частиц (0.1÷60 %). Акустический сенсор прибора измеряет коэффициент затухания ультразвука ( $0 \div 20 \pm 0.01$  дБ см<sup>-1</sup> МГц<sup>-1</sup>) в широком динамическом диапазоне частот (от 1 до 100 МГц), а также скорость звука. В спектрометре имеется камера, в которой расположены излучатель ультразвуковых волн и приемник ультразвукового сигнала. Камера заполняется исследуемой жидкостью, в которой происходит распространение ультразвука от излучателя к приемнику. При этом ультразвуковые волны испытывают рассеяние на частицах, что приводит к изменениям в спектре ультразвукового сигнала, которое фиксируется прибором.

Измерение коэффициента сдвиговой вязкости жидкости проводилось с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV2T. Во всех рассмотренных случаях осуществлялось измерение зависимости коэффициента вязкости от скорости сдвига. В процессе измерения контролировалась температура. Температура исследуемой жидкости варьировалась от 10 до 40°C.

Получены корреляции, описывающие зависимость объёмной, сдвиговой и продольной вязкости воды и этиленгликоля от температуры. Проведено определение объёмной вязкости суспензий наночастиц. Показано, что коэффициент объёмной вязкости суспензий возрастает с увеличением концентрации наночастиц [3]. При этом при низких концентрациях наночастиц коэффициент затухания, как правило, не зависит от частоты излучения. При увеличении концентрации наночастиц такая зависимость появляется. С увеличением частоты объёмная вязкость наносуспензий снижается.

Исследована зависимость объёмной вязкости наносуспензий от размера частиц [4]. Показано, что с увеличением среднего размера частиц объёмная вязкость наносуспензий возрастает. При этом чем выше средний размер наночастиц, тем сильнее проявляется зависимость объёмной вязкости суспензии от частоты излучения. При одинаковой концентрации и близких размерах наночастиц различного материала объёмная вязкость их суспензий значительно отличается.

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

- 
1. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. London: Pergamon, 1959.
  2. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976.
  3. Пряжников М.И., Минаков А.В. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. No. 12. С. 37.
  4. Минаков А.В., Пряжников М.И., Дамдинов Б.Б., Немцев И.В. // Акуст. журн. 2022. Т. 68. No. 2. С. 182.

═══════════ **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ** ════════════  
**ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

**ПРИРОДА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ**

*Палчаев Д.К.,\* Мурлиева Ж.Х., Рабаданов М.Х., Исхаков М.Э.,  
Гаджимагомедов С.Х., Эмиров Р.М., Рабаданова А.Э.*

*ДагГУ, Махачкала, Россия*

*\*dairpalchaev@mail.ru*

В докладе представлены сведения об определяющей роли ангармонизма колебаний при формировании температурной зависимости электросопротивления  $\rho(T)$  металлов, сплавов, интерметаллидов и неметаллических соединений – в системах с электростатическим взаимодействием частиц и проявляющих относительно высокую проводимость. Актуальность рассмотрения этих сведений в том, что при интерпретации  $\rho(T)$  проводников, например, классических металлов их тепловым расширением теорией пренебрегается. Тогда как экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при любой температуре, в пределах существования соответствующей фазы, отношение  $\rho(T)$  к безразмерному термодинамическому комплексу, представляющему собой произведение коэффициента  $\beta(T)$  теплового расширения на температуру, является характеристической постоянной  $\rho^*$  для каждого проводника. Этот факт позволил получить исходное уравнение, необходимое для построения термодинамики нелинейных неравновесных процессов. Представлена расшифровка природы «нескомпенсированной теплоты» в терминологии Клаузиуса, т.е. теплоты, которая была поглощена при неравновесном процессе, дополнительно к равновесному количеству. Вклад этой энергии, согласно I начала термодинамики, реализуется в виде работы системы по изменению объема, обусловленного ангармонизмом колебаний атомов. Эффект ангармонизма имеет дискретный характер, в виду расщепления уровней энергии электронов в атомах. По сути, дополнительный вклад энергии накапливается электронной подсистемой при переходе из одного равновесного состояния в другое из-за квантовой хаотизации зарядов и роста энтропии этой подсистемы. Очевидно, что при температуре абсолютного нуля, ее значение максимально. Показано, что противоречие обратной и прямой зависимости электросопротивления от времени релаксации в выражениях Друде и Максвелла, соответственно, разрешается при учете определяющей роли ангармонизма колебаний атомов. В нелинейных системах, таких как интерметаллиды и проводники из неметаллических соединений, обнаруживается связь между их температурными коэффициентами сопротивления и теплового расширения.

Работа выполнена в рамках Гос. задания FZNZ-2020-0002.

**ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ НАКЛОНА КРИВОЙ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ ПО ИМПУЛЬСНОМУ НАГРЕВУ**

*Дороватовский А.В.,\* Шейндлин М.А., Минаков Д.В.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*a.dorovatovskiy@gmail.com*

В данной работе выполнялись измерения температуры плавления циркония и никеля при разных давлениях в диапазоне от 1 до 4000 бар с применением имеющейся установки для измерения термодинамических свойств материалов методом импульсного нагрева электрическим током [1–3]. На текущий момент авторам не известно о других работах

по импульсному нагреву, которые бы напрямую измеряли изменение температуры плавления в зависимости от давления. Полученная зависимость дает оценку наклона кривой плавления циркония 62 К/ГПа, что согласуется с результатами первопринципных расчетов. Методика базируется на предположении о независимости излучательной способности металлов от давления. Проведение такого эксперимента осложняется высокими требованиями к стабильности пирометра и оптического тракта. Так, например, при росте давления изменяется коэффициент преломления газа, и следовательно, коэффициент пропускания на границе газ-сапфир. Изменение пропускания оптического тракта при давлении гелия в несколько килобар, по сравнению с атмосферным составляет  $\sim 1\%$ , что сопоставимо с изменением яркости излучения при росте температуры плавления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10398, <https://rscf.ru/project/20-79-10398/>.

1. Савватимский А.И., Коробенко В.Н. Высокотемпературные свойства металлов атомной энергетики (цирконий, гафний и железо при плавлении и в жидком состоянии). М.: Изд-во МЭИ, 2012. 216 с.
2. Leitner M., Pottlacher G. Density of Liquid Iridium and Rhenium from Melting up to the Critical Point // Int. J. Thermophys. 2020. V. 41. №. 10. P. 139.
3. Kloss A., Hess H., Schneidenbach H., Grossjohann R. Scanning The Melting Curve Of Tungsten By A Submicrosecond Wire-Explosion Experiment // Int. J. Thermophys. 1999. V. 20. №. 4. P. 1199-1209.

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*Васин А.А.,\* Бгашева Т.В., Петухов С.В., Шейндлин М.А.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*av65536@gmail.com*

Область применения карбида циркония - высоко- и сверхвысокотемпературные технологии, поэтому данные о термофизических свойствах этого материала при высоких температурах чрезвычайно важны. В то же время, работы, в которых эти свойства системно исследовались в широком диапазоне составов, практически отсутствуют. Представлены результаты измерения термофизических свойств системы Zr-C в области гомогенности при температурах от 1500 до 3200К. Были измерены теплопроводность, теплоемкость и коэффициент теплового расширения. Разработан бесконтактный метод измерения КТР при помощи фотокамеры высокого разрешения. Представлен модифицированный метод лазерной вспышки, позволяющий проводить измерения при лазерном нагреве образца. Этот метод позволяет измерять не только температуропроводность, но и теплоемкость материалов при температурах до 3500К. Экспериментальная установка, реализующая эти методы позволяет измерять все термофизические параметры совместно, в одном эксперименте.

## КОРРЕЛЯЦИЯ ФОНОННОГО ТЕПЛОСОПРОТИВЛЕНИЯ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ НЕМЕТАЛЛОВ

*Мурлиева Ж.Х.,<sup>\*1,2</sup> Палчаев Д.К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ДагГУ, Махачкала, Россия, <sup>2</sup>ДГУНХ, Махачкала, Россия

*\*zhariyat@mail.ru*

Теория теплопроводности конденсированных сред, построенная в квазигармоническом приближении, позволяет лишь качественно интерпретировать ее температурной зависимость. Поскольку ангармонизм тепловых колебаний атомов определяет [1] не только конечность теплопроводности, но и особенности температурной зависимости теплосопротивления  $W(T)$ . Более того, эффект роста ангармонизма с повышением температуры обуславливает переход системы из одного равновесного состояния в другое. Общее теплосопротивление неметаллов аддитивная величина вкладов от рассеяния тепла на статических (границы образца и дефекты) и динамических дефектах – фононах. На большом экспериментальном материале нами [2] показана линейная связь фононного теплосопротивления с произведением коэффициента теплового расширения (КТР) на температуру в области низких и высоких температур, в том числе и для рыхлоупакованных структур, претерпевающих инверсию знака КТР. В работе [3] показано, что угловой коэффициент этой корреляции есть характеристическое теплосопротивление, приходящееся на один атом для каждого вещества, а при интерпретации зависимости  $W(T)$  можно использовать «максвелловское» представление о «времени растекания» локального теплового возбуждения в среде. Из полученной закономерности следует, что температурная зависимость атермического теплосопротивления определяется температурной зависимостью КТР т.е. относительной свободной энергией системы и обусловлена ее переходом из одного равновесного состояния в другое в квазистатическом процессе.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002.

1. Рейсленд Дж. Физика фононов. М.: Мир, 1975. 365с.
2. Murlieva Zh. Kh., Kazbekov K.K., Palchaev D.K., et. al. //Phys. of the Solid State Vol. 45. No 12, 2003, pp 2276-2280.
3. Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х. Монография. – Махачкала: Издательство ДГУ, 2021, 248 с.

## К ВОПРОСУ О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ РТУТИ ВБЛИЗИ ЕЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ (ОБЗОР)

*Хибиев А.Х.,<sup>\*1</sup> Алчагиров Б.Б.,<sup>1</sup> Коков З.А.,<sup>1</sup> Элимханов Д.З.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>КБГУ, Нальчик, Россия, <sup>2</sup>ЧГУ, Грозный, Россия

*\*azamat0603@mail.ru*

Исследования поверхностного натяжения (ПН) ртути и ее амальгам, обладающие рядом уникальных физико-химических свойств, по-прежнему остаются вполне актуальными и востребованы при решении множества практически важных задач [1, 2]. Анализ имеющихся в литературе исследований ПН чистой ртути показывает, что число работ, посвященных измерениям ПН ртути в области отрицательных температур, насчитывает лишь несколько статей [2–5]. Настоящее сообщение посвящено экспериментальному изучению ПН ртути в области отрицательных температур, непосредственно примыкающей к температуре ее кристаллизации. В нем приводятся данные авторов о температурной зависимости поверхностного натяжения высокочистой ртути в интервале от +26 до –38°С, полученные методом большой лежащей капли в условиях статического вакуума  $10^{-4}$  Па.

Показано, что поверхностное натяжение высокочистой ртути при температуре кристаллизации ( $-38,8^{\circ}\text{C}$ ) составляет  $486,2 \pm 3,5$  мН/м, а в изученном интервале температур полимера поверхностного натяжения описывается линейным уравнением с отрицательным температурным коэффициентом  $d\sigma/dt = \sim 0,287$  мН/(м $\times$ t). Полученные нами результаты не подтверждают обнаруженную ранее L. Bircumshaw [5] аномалию на температурной зависимости ПН ртути в виде максимума при  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Заключение:

1. Имеющиеся в литературе температурные зависимости поверхностного натяжения ртути в области отрицательных температур были получены лишь по нескольким (5-6) экспериментальным точкам, которые не согласуются не только количественно, но и качественно.

2. Показано, что по данным настоящей работы, поверхностное натяжение ртути при температуре ее кристаллизации ( $-38,8^{\circ}\text{C}$ ) составляет  $486,2 \pm 3,5$  мН/м, а в изученном интервале температур  $\sigma(T)$  описывается уравнением прямой с отрицательным температурным коэффициентом и, таким образом, не подтверждают обнаруженную ранее в литературе аномалию в виде максимума на температурной зависимости ПН ртути при  $-35^{\circ}\text{C}$ .

1. Использование жидких металлов в народном хозяйстве: Сборник докладов межотраслевой конференции «Теплофизика-91» / Под ред. Ф.А. Козлова. Обнинск: ФЭИ, ОНТИ, 1993. 268 с.
2. Kozin L.F., Hansen S. C. Mercury handbook: chemistry, applications and environmental impact // Royal society of chemistry. 2013. 324 p.
3. Вукалович М.П., Иванов А.И., Фокин Л.Р., Яковлев А.Т. Теплофизические свойства ртути. М.: Изд.-во стандартов, 1971. 312 с.
4. Wilkinson M. C. The Surface Properties of Mercury // Chemical Reviews. 1972. V. 72. № 6. P. 575-625.
5. Bircumshaw L.L. The National Physical Laboratory. Collected Researches. 1935. V. 25. P. 329-367.

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВОДНО-СОЛЕВЫХ СИСТЕМ

*Магомедов М.М.-Ш.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*6242@mail.ru*

Информация о теплофизических свойствах воды и водных растворов солей необходима в расчётах при конструировании теплообменных аппаратов для геотермальной энергетики, при проектировании геотермальных электростанций (ГеоЭС); при выщелачивании ценных компонентов из рудного сырья; при извлечении химкомпонентов из геотермальных рассолов; при создании оптимальных установок для выращивания кристаллов; при производстве удобрений; при создании теории растворов и для эффективного воздействия при добыче и эксплуатации подземных геотермальных вод. Надежные данные по теплопроводности водных растворов солей при проектировании технологических процессов способствуют повышению эффективности производства, снижению материальных затрат, а в ряде случаев обеспечивают безаварийную работу энергетических установок.

На основе анализа экспериментальных данных представлена обобщенная формула, которая позволит многим ученым получать достоверный и точный материал по теплопроводности водных растворов солей.

В работе приведены расчетные данные о теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем при температурах 293–473 К, давлениях  $P_s$ –100 МПа и концентрациях 0–25% (масс.). Получаемые значения согласуются с экспериментальными данными в преде-

лах 1.6%. А также, подготовлен программный продукт, который позволяет получать значения теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем в указанных диапазонах температур, давлений и концентраций. Водные растворы электролитов широко применяются в энергетических установках на тепловых и атомных электростанциях, установках с использованием солнечной и геотермальной энергий, нефтяной и газовой промышленности. В таких производствах, как производство минеральных удобрений, электрохимические способы получения неорганических соединений металлов электролизом водных растворов, производство соды, широко применяются водные растворы неорганических веществ.

Для эффективного использования водных растворов электролитов в указанных областях техники требуются точные сведения об их теплофизических свойствах, и в частности по теплопроводности в широком диапазоне параметров состояния.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ТИТАНА**

*Швецов Д.П.,\*<sup>1</sup> Цепелев В.С.,<sup>1</sup> Вьюхин В.В.,<sup>1</sup> Каймин В.У.,<sup>2</sup> Цепелева Н.П.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ИЦФМЖ УрФУ, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>WHU, Ухань, Китай*

*\*shwedmail@gmail.com*

При температуре расплавленного металла титан вступает в реакцию с кислородом и образует оксиды различного стехиометрического состава. Большая часть этих оксидов не успевает удаляться в шлак и остаётся внутри кристаллизующейся отливки [1].

Проведены измерения поверхностного натяжения и плотности методом лежащей капли образцов нержавеющей стали, марки 12X18H9ТЛ, с разным содержанием титана в диапазоне от 0,022 до 0,595 мас.%, которые были отобраны по ходу плавки [2, 3]. Значения поверхностного натяжения при температурах солидуса после предварительных нагревов до высоких температур неплохо коррелируют с данными монографии [4].

В процессе плавки при первичном введении титана поверхностное натяжение и плотность имели минимальный разброс и поверхность капли была идеальной. При доплаве и повторном введении титана до марки поверхностные свойства и плотность образцов ухудшались. Потребовалось несколько циклов нагрева для разрушения оксидной пленки.

1. Изменение свойств и структуры износостойких железо-марганцевых сталей и чугунов при легировании титаном / Ткаченко Ф.К., Ефременко В.Г., Якименко С.Д., и др. // ГВУЗ «Приазовский университет». 1995. №1.–С.95-98.
2. Стародубцев Ю. Н., Цепелев В. С. Влияние размера атомов на изотермический модуль объемного сжатия и поверхностное натяжение жидких металлов // *Металлургия и материаловедение В: Технологическая металлургия и материаловедение*, 2022, 53, 4, С. 2547-2552.
3. Патент № 2 663 321. Способ и устройство определения поверхностного натяжения и плотности металлических расплавов // А. М. Поводатор, В. С. Цепелев, В. В. Вьюхин, В. В. Коншаков, 2018. – Бюл. №22.
4. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах.: Металлургия, 1994.

## СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ CoCrFeNi

*Быков В.А.,\* Куликова Т.В., Сипатов И.С., Стерхов Е.В., Ягодин Д.А.*

*ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*wildrobert@gmail.com*

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) в настоящее время представляют большой исследовательский интерес в области физики конденсированного состояния, материаловедения и техники. В отличие от обычных сплавов, которые содержат один и редко два базовых элемента, ВЭС содержат несколько основных элементов, причем возможное количество ВЭС-композиций значительно больше, чем у обычных бинарных и трехкомпонентных сплавов. В ходе всестороннего изучения ВЭС возникла основная нерешенная фундаментальная проблема – какой микроскопический механизм отвечает за формирование однофазной структуры и как эта структура влияет на основные функциональные характеристики ВЭС. Среди многообразия высокоэнтропийных сплавов система CoCrFeNi занимает особое место. В данной системе удастся реализовать однофазное состояние не только для эквиатомного состава, но и для большого количества концентраций. В тоже время для системы CoCrFeNi хорошо изученной с точки зрения механических свойств систематические исследования теплофизических свойств не проводились. В работе проведено комплексное экспериментальное исследование теплофизических свойств высокоэнтропийных сплавов  $\text{Co}_a\text{Cr}_b\text{Fe}_c\text{Ni}_{1-a-b-c}$  ( $a=20-40$   $b=20-40$   $c=20-40$  ат. %) в исходном состоянии, полученным электродуговым сплавлением и после длительного высокотемпературного отжига. Согласно проведенному рентгенно-структурному анализу структура полученных сплавов представляет собой однофазный твердый раствор на основе ГЦК решетки. Получены данные по электросопротивлению, температуропроводности, теплоемкости и теплопроводности сплавов  $\text{Co}_a\text{Cr}_b\text{Fe}_c\text{Ni}_{1-a-b-c}$  ( $a=20-40$   $b=20-40$   $c=20-40$  ат. %) в закаленном и отожженном состоянии в интервале температур от комнатной до 1300 К. Значения исследованных теплофизических свойств имеют величины близкие к сплавам типа инконель и слабо зависят от варьирования компонентов сплава CoCrFeNi. Подтверждена стабильность структуры однофазного раствора указанных сплавов после длительного изотермического отжига (температура отжига – 1200 К, время отжига – 10 часов).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-22-00137).

## КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Cs—Pb

*Станкус С.В.,\* Хайруллин А.Р.*

*ИТ СО РАН, Новосибирск-90, Россия*

*\*stankus@itp.nsc.ru*

Жидкие сплавы системы цезий—свинец относятся к классу веществ, которые, согласно современным представлениям, склонны к образованию плотных ионных ассоциатов. Образование ионных связей в таких системах связано с большой разницей в электроотрицательности компонентов, что приводит к тому, что свинец (имеющий электроотрицательность 2,33 по Полингу) выступает в роли окислителя. Существование таких ионных комплексов косвенно подтверждается как нейтронографическими исследованиями, так и аномальным поведением многих структурно чувствительных свойств. Калорические свойства сплавов системы Cs—Pb на данный момент практически не исследованы. Для дальнейшего изучения данного класса веществ (включающего в себя и другие сплавы вида



щелочной металл—свинец) были проведены измерения энтальпии и теплоемкости сплавов системы Cs—Pb.

Измерения проводились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой. Погрешность получаемых данных не превышала 0,3% по энтальпии и 0,5% по теплоемкости. Были исследованы четыре сплава системы Cs—Pb, содержащие 40, 50, 60 и 66,7 ат.% Pb в интервале температур от 430 до 1075 К. Подготовка образцов происходила в перчаточном боксе в атмосфере аргона, ампулы с образцами герметизировали электродуговой сваркой.

Для исследованных сплавов были построены рекомендуемые температурные зависимости и таблицы рекомендуемых значений энтальпии и теплоемкости. Рассчитаны отклонения теплоемкости от значений, полученных по правилу аддитивности. Была построена концентрационная зависимость теплоемкости при различных температурах, на которой наблюдается выраженный максимум при содержании 50 ат.%Pb, что согласуется с существующим в литературе предположением о формировании в структуре жидких сплавов системы Cs—Pb тетраэдрических комплексов из анионов свинца, окруженных катионами цезия.

## ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ И ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В СПЛАВАХ NiV. ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА ОБРАЗЦОВ НА КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Ивлиев А.Д.,<sup>\*1,2</sup> Горбатов В.И.,<sup>3,4</sup> Полев В.Ф.,<sup>3</sup> Куриченко А.А.,<sup>3</sup>  
Смирнов А.Л.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>РГППУ, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>ТУ УГМК, Верхняя Пышма, Свердловская область, Россия, <sup>3</sup>УГГУ, Екатеринбург, Россия, <sup>4</sup>ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*ad\_i48@mail.ru*

Сплавы, изготовленные на основе системы никель-ванадий (NiV), длительное время используются в различных отраслях промышленности. Тем не менее, многие свойства этой системы при высоких температурах остаются неизученными. В настоящей работе анализируется влияние отжига на температуропроводность и удельное электрическое сопротивление сплавов NiV.

Система NiV обладает сложной диаграммой состояний [1] и содержит как твердые растворы, так и интерметаллические соединения. Сплавы для проведения исследований выплавляли в вакуумной дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере гелия из чистых исходных компонентов. Исследование температуропроводности производилось методом температурных волн, а удельного электросопротивления — четырехзондовым методом на постоянном токе.

Эксперимент показал, что значения кинетических характеристик определяются, в основном, электронным механизмом. В данной ситуации удобно проводить анализ, опираясь на исследования удельного электросопротивления.

В областях существования твердых растворов и всех интерметаллических соединений, кроме Ni<sub>2</sub>V, отжиговые эффекты практически не проявляются. В группе сплавов, содержащих Ni<sub>2</sub>V, отношение сопротивлений не отожженных и отожженных образцов достигает четырех. Наблюдаемые изменения удельного электросопротивления сплавов являются следствием существенных изменений параметров электронной системы.

Концентрационная зависимость удельного электросопротивления выше 1500 К приобретает монотонный вид, характерный для твердых растворов.

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: Т. 3. Кн. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001.

## ТРАНСПОРТНЫЕ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗДЕЛЯЮЩЕГОСЯ ВОДНОГО РАСТВОРА МБЭЭГ

*Волосников Д.В.,\* Поволоцкий И.И., Скрипов П.В.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*dima\_volosnikov@mail.ru*

Разработка способов охлаждения микроэлектронники с циркуляцией теплоносителя в микро и миниканалах подразумевает применение эффективных теплоносителей и поиск способов интенсификации теплообмена [1].

Цель работы – определение коэффициента теплоотдачи к импульсно перегретому раствору [2] в сопоставлении с теплоотдачей, наблюдаемой в области устойчивых состояний раствора и в чистых компонентах, в том числе, на фоне фазового перехода жидкость-жидкость и спинодального распада; определение критических параметров (жидкость) образцов данного раствора [3].

Объектом исследования служил водный раствор монобутилового эфира этиленгликоля (МБЭЭГ, CAS No. 111-76-2) в полном диапазоне концентраций. Особенностью фазовой диаграммы (температура-концентрация) раствора является наличие замкнутой области несовместимости, которую образуют смыкающиеся ветви бинодалей с ВКТР и НКТР [4].

Обнаружено, что в образцах, соответствующих области неустойчивых состояний (30-40 мас.% МБЭЭГ) происходит интенсификация теплоотдачи на 20-60 % относительно аддитивных значений исходных компонентов. Данный результат представляет исследовательский интерес для определения положения спинодали в области температур, недоступной квазистатическим методам. Значения критических температур раствора определены для области устойчивых состояний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00115-П, <https://rscf.ru/project/19-19-00115/>.

1. Xing W., Ullmann A., Brauner N., Plawsky J., Peles Y. // Sci. Rep. 2018, V. 8. P.12093.
2. Volosnikov D.V., Povolotsky I.I., Starostin A.A., Skripov P.V. // High Temp., 2021, V.59. No.2–6, P. 283.
3. Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V. // J. Engin. Thermophys. 2022. V.31. No.4. P.664.
4. Zhang Y., Ding B., Zhao D.-Y., Zhao S., Gong L. // Int. J. Heat and Mass Transf. 2023. V.201. P. 123566.

## ПЛОТНОСТЬ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ АІ-ПМ-РЗМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ ЛЕНТ

*Русанов Б.А., Сидоров В.Е.\**

*УрГПУ, Екатеринбург, Россия*

*\*vesidor@mail.ru*

Аморфные и нанокристаллические сплавы АІ-ПМ-РЗМ получают всё более широкое распространение благодаря их малому удельному весу, отличным механическим свойствам и высокой коррозионной стойкости. Однако для получения качественных изделий необходима определенная подготовка расплава перед закалкой, разработать которую можно

лишь имея информацию о свойствах сплавов в кристаллическом и жидком состояниях. В настоящей работе изучены плотность и электрическое сопротивление сплавов Al-Ni-Co-PЗМ (PЗМ = Nd, Sm, Gd, Tb, Yb), склонных к аморфизации, в интервале температур 300-1600 К.

Установлено, что в жидком состоянии сплавы остаются микронеоднородными даже при значительных перегревах над ликвидусом, о чём свидетельствует нелинейный вид политерма  $d(T)$ , и лишь при температурах выше  $T = 1300-1350$  К политермы могут быть описаны линейными функциями. При последующем охлаждении от 1600 К зафиксирован гистерезис плотности, начинающийся ниже 1300 К. Температурные зависимости электросопротивления сплавов в жидком состоянии также остаются нелинейными до 1350 К, однако гистерезиса при охлаждении не наблюдалось.

Опираясь на результаты исследования, был предложен режим термообработки расплавов перед закалкой и методом спиннингования получены качественные аморфные ленты. Структура и особенности кристаллизации лент изучены с использованием рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Показано, что на первой стадии кристаллизации выделяются нано-частицы ГЦК-Al, а на второй на границах нано-зерен алюминия появляются тройные интерметаллиды Al<sub>19</sub>Ni<sub>5</sub>PЗМ<sub>3</sub> (Al<sub>23</sub>Ni<sub>6</sub>PЗМ<sub>4</sub>), которые замедляют дальнейший рост наночастиц алюминия. Таким образом, удастся «застабиллизировать» наноструктурированное состояние сплавов Al-Ni-Co-PЗМ, применяя специальную термообработку расплавов перед закалкой.

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 22-23-00177.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХАТОМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРГОНА

*Мальцев М.А.,<sup>\*1,2</sup> Морозов И.В.,<sup>1,2</sup> Осина Е.Л.,<sup>1</sup> Миненков Ю.В.<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>3</sup>ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия

*\*daerus21@yandex.ru*

Двухатомные соединения аргона являются слабосвязанными молекулами, поэтому их экспериментальное исследование затруднено. В то же время эти соединения встречаются как в астрофизических газах, так и лабораторных условиях, в частности, при использовании аргона в качестве буферного газа для масс-спектрометрии с тлеющим разрядом или индуктивно-связанной плазмой. Учитывая высокую концентрацию аргона в такой плазме, даже небольшое количество соединений Ar с другими компонентами плазмы может существенно влиять на получаемые масс-спектры [1].

Для количественного и качественного анализа распространенности соединений аргона (аргидов) в низкотемпературной плазме необходимы данные об их термодинамических функциях. Более того, для исследования влияния параметров генерации плазмы на результаты масс-спектрометрического эксперимента необходимы температурные зависимости термодинамических функций в широком диапазоне температур (до 10 000 К). В случаях, когда данные о молекулярных постоянных двухатомных соединений имеют недостаточную точность или они отсутствуют, термодинамические функции могут быть получены на основе расчета энергетического спектра молекулы из потенциала межатомного взаимодействия, который в свою очередь может быть определен на основе квантово-химического моделирования [2-5].

В данной работе представлены результаты расчета термодинамических функций ArCo<sup>+</sup>, ArV<sup>+</sup>, Ar<sub>2</sub>, Ar<sub>2</sub><sup>+</sup>, ArO, ArO<sup>+</sup>, ArH, ArH<sup>+</sup>, ArN, ArN<sup>+</sup>. Полученные функции бы-

ли использованы для термодинамического моделирования состава плазмы индуктивно-связанной плазмы, используемой в масс-спектрометрии.

1. Witte T.M., Houk R.S. // Spectrochimica Acta Part B. 2012. V. 69. P. 25
2. Мальцев М.А., Осина Е. Л. // Вестник ОИВТ РАН. 2019. Т. 2, С. 41
3. Мальцев М.А., Осина Е.Л., Морозов И.В. // ТВТ. 2019. Т. 57, С. 42
4. Мальцев М.А., Осина Е.Л., Морозов И.В. // ТВТ. 2019. Т. 58, С. 367
5. Maltsev M.A., Aksenova S.A., Morozov I.V., Minenkov Y., Osina E.L. // J. Comput. Chem. 2023 V. 44 P. 1189

## КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ YBCO В ОБЛАСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПЕРЕХОДА

*Рабданова А.Э.,\* Палчаев Д.К., Гаджимагомедов С.Х., Мурлиева Ж.Х.,  
Фараджев Ш.П.*

*ДагГУ, Махачкала, Россия*

*\*Rabadanova.aida@mail.ru*

Высокая проводимость в  $YBa_2Cu_3O_y$  связывается с возможностью увеличения заселенности, в направлении  $\mathbf{b}$ , атомами лабильного кислорода и их упорядочения, приводящих к орторомбичности решетки при варьировании  $y$  в пределах от 6.4 до 7. Начиная со значений  $y > 6.4$ ,  $T_c$  для  $YBa_2Cu_3O_y$  увеличивается немонотонно. Подобная зависимость  $T_c$  наблюдается и от параметра решетки  $c$ . Содержание кислорода отражается на изменениях параметров решетки, четко отражая переход от несверхпроводящей тетрагональной фазы к сверхпроводящей орторомбической при некоторой концентрации кислорода. Кроме того, изменения температуры также могут приводить к изменению параметров решетки, поэтому следует ожидать появления особенностей на температурных зависимостях параметров решетки при переходе из несверхпроводящей фазы в сверхпроводящую. Изменение параметров решетки различных ВТСП, в том числе, для YBCO вблизи  $T_c$  представляется разрывом функции температурной зависимости объема и непрерывности ее производной по температуре. Разность коэффициентов теплового расширения (КТР) YBCO в направлениях  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{a}$  демонстрирует критическое поведение вблизи  $T_c$ . Все аномалии для ВТСП, связанные с изменением объема, указывают на прямую связь  $T_c$  с деформацией решетки. Приведенные результаты исследований электросопротивления и КТР монокристаллического образца YBCO со сверхпроводящими фазами с различной кислородной стехиометрией в направлениях  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{c}$  показывают наличие аномалий изменения температурных коэффициентов электросопротивления и теплового объемного расширения, при переходе каждой из фаз в сверхпроводящее состояние.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 20-32-90170 и ГЗ № FZNZ-2020-0002.*

**КОРРЕЛЯЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ  
ИНТЕРМЕТАЛЛИДА  $Ti_{67}Al_{33}$**

**Эмиров Р.М.,\* Исхаков М.Э., Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х.,  
Акаев Х.Р.**

*ДагГУ, Махачкала, Россия*

*\*aderron@mail.ru*

Исследования температурных зависимостей электросопротивления  $\rho(T)$  монокристалльного  $Ti_{67}Al_{33}$  [1] указывают на полупроводниковый характер его проводимости, тогда как, в поликристаллическом образце наблюдается конкуренция двух типов проводимости. Представлены результаты исследования температурных зависимостей  $\rho(T)$  и теплового расширения  $a_V(T)$  этого поликристаллического образца после различных термообработок. На зависимостях  $\rho(T)$  и  $a_V(T)$  имеются некоторые особенности при 550 К и в области температур от 700 К до 800 К. Обнаружена прямая корреляция температурного коэффициента сопротивления  $a_\rho(T)$  и атермического теплового расширения  $a_V(T)/T$ . Достоверность и обоснованность этой корреляции определяется еще и тем, что зависимости  $\rho(T)$  и  $a_V(T)$  измерялись одновременно. Заметим, что на зависимостях  $a_\rho(T)$  и  $a(T)/T$  большой разброс данных, однако на температурных зависимостях отношений  $a_\rho/a_V$  и  $a_V/a_\rho$  он заметно снижается. Это указывает на то, что часть отклонений  $a_\rho(T)$  и  $a_V(T)/T$  от их средних значений определяется изменениями структуры исследуемого образца при изменении температуры, непосредственно, в процессе измерений. Одновременные измерения (textitin situ) позволяют выполнять тщательные исследования, непосредственно, вблизи критических температур для установления критических показателей температуры на зависимостях  $a_\rho(T)/a_V(T)$  и  $a_V(T)/a_\rho(T)$ .

Интерпретация корреляции  $a_\rho(T)$  и  $a_V(T)/T$  позволит решить задачу по установлению механизмов формирования и релаксации зарядовых возбуждений в конденсированных средах, в том числе при фазовых превращениях и изменениях типа проводимости. Исследование этих вопросов имеет важное значение в рамках решения проблемы создания основ нелинейной неравновесной термодинамики и проектирования функциональных материалов с заданными свойствами.

Работа выполнена в рамках ГосЗадания FZNZ-2020-0002.

1. Mooij, J. H. (1973). Electrical conduction in concentrated disordered transition metal alloys. *physica status solidi (a)*, 17(2), 521-530.

**ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ, ПЛОТНОСТЬ И АДСОРБЦИЯ  
КОМПОНЕНТОВ В ТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ ТАЛЛИЙ-СВИНЕЦ-ВИСМУТ**

**Дадашев Р.Х.,<sup>1,3</sup> Алчагиров Б.Б.,<sup>2</sup> Элимханов Д.З.\*<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "ЧГУ им. А.А. Кадырова Грозный, Россия, <sup>2</sup>КБГУ, Нальчик, Россия,

<sup>3</sup>КНИИ РАН, Грозный, Россия, <sup>4</sup>ГКНУ «Академия наук Чеченской Республики»,  
Грозный, Россия

*\*edzhabrail@mail.ru*

В работе представлены результаты исследования плотности поверхностного натяжения (ПН), адсорбции компонентов тройных расплавов таллий-свинец-висмут. Измерения температурной зависимости плотности проведены усовершенствованным ареометром, а поверхностного натяжения в гравитационном приборе, методом максимального давления в капле. Суммарная погрешность измерения ПН составляет 0,8% , а плотности-0,2%.

Измерения проводились в вакууме 10-6мм. рт. ст. от температуры ликвидус до 773 К. по секущим разрезам ХТl:ХРb= 1:9, 1:3, 1:1, 3:1,9:1. В экспериментах использованы металлы: таллий-000, свинец-0000 и висмут-000. Температурная зависимость плотности и ПН чистых металлов боковых двойных и тройных расплавов линейные. Молярные объемы тройных расплавов имеют положительные отклонения от аддитивных значений. При этом наибольшие отклонения наблюдаются в расплавах таллий-висмут и в тройных расплавах, прилегающих к этой системе. Показано, что на концентрационной зависимости ПН отсутствуют минимумы и максимумы. Во всех изученных лучевых сечениях Тl:Рb = const при добавлении третьего компонента (висмута) зависимость ПН от состава экспоненциально уменьшается до значения чистого висмута. Определены изотермы адсорбции висмута (N –вариант Гуггенгейма-Адама) в тройных системах таллий-свинец-висмут, что позволило выявить особенности адсорбционных явлений в изученной системе. Выявлено, что адсорбция таллия в большей части концентрационного треугольника отрицательна и только в небольших областях, прилегающих к вершинам свинца в расплавах Тl-Рb-Вi, энергетически выгодной оказалась положительная адсорбция таллия.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

*Костановский А.В.,\* Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*kostanovskiy@gmail.com*

Представлены результаты экспериментального определения распределения температуры вдоль продольной оси сплошного цилиндрического образца в окрестности плоскости неподвижного контактного электрического сопротивления. Экспериментальный образец диаметром 7.55 мм и рабочей длиной 90 мм был вырезан параллельно плоскости приложения давления при прессовании из графита марки МПГ-7. Цилиндр был разрезан пополам перпендикулярно продольной оси. Образец, собранный из двух частей, устанавливали вертикально, нагружали гирей, расположенной на верхнем торце цилиндра. По образцу пропускали постоянный электрический ток. Измерения проводили в вакууме при давлении  $10^{-4}$  Па. Распределение температуры измеряли «моделями абсолютно черного тела» — метками, которые были выполнены по четыре цилиндрических отверстия диаметром 1.0 мм и глубиной 0.5 мм с каждой стороны и расположены на равном расстоянии от плоскости контакта. Расстояние от контактной поверхности до первой метки составляло 2 мм, далее расстояния между моделями равнялось 3 мм. Температуру в моделях измеряли пирометром Raytek в диапазоне значений 750–1700 К. Эксперименты показали, что выполняется симметричное распределение температуры относительно плоскости контакта вдоль продольной оси образца. Это означает выполнение симметричного распределения локальных значений плотности теплового потока в силу равенства локальных значений теплопроводности. Равенство температуры и плотности теплового потока в плоскости контактной поверхности (предел «слева» и «права») означает, что выполняются граничные условия четвертого рода, когда теплообмен между соприкасающимися телами происходит по закону теплопроводности (тепловая задача). Экспериментально показано, что граничные условия четвертого рода выполняются при последовательном повышении давления на контактную поверхность 40, 70 и 110 кПа; и при смене полярности постоянного электрического тока. Экспериментальные результаты и сделанные выводы расширяют наше понимание физики соприкасающихся тел (слоистые среды) при контактных электрических явлениях.

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЛАВАХ Al(Ga)-РЗМ

*Русанова А.И.,\*<sup>1</sup> Сон Л.Д.,<sup>1</sup> Русанов Б.А.,<sup>2</sup> Сидоров В.Е.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>УрГПУ, Екатеринбург, Россия*

*\*nastmoroz97@yandex.ru*

Бинарные сплавы с редкоземельными металлами (РЗМ), склонные к формированию аморфного состояния, имеют особенности при измерениях теплофизических свойств в виде долговременных релаксационных процессов. Для сплавов систем Al-РЗМ такие процессы при измерении вязкости были показаны в работе [1]. Сплавы Ga-РЗМ имеют схожий тип фазовых диаграмм, что делает эти объекты актуальными для изучения. В настоящей работе исследованы температурные и временные зависимости теплофизических свойств (вязкость, плотность, электрическое сопротивление) расплавов Al-РЗМ, а также выдвинута гипотеза о существовании долговременных релаксаций при изучении этих свойств в бинарных сплавах Ga-РЗМ в жидком состоянии.

Сплавы Al(Ga)-РЗМ для исследований получены методом электродуговой плавки в атмосфере аргона. Плотность сплавов измерена методом проникающего гамма-излучения на автоматизированной установке. Вязкость сплавов измерена методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом (метод Швидковского). Электрическое сопротивление изучено с использованием бесконтактного метода во вращающемся магнитном поле. Все измерения свойств проводили в защитной атмосфере гелия в широком температурном интервале. В жидком состоянии для композиций Al(Ga)-РЗМ получены термо-временные зависимости.

По результатам опытов показано, что сплавы Al(Ga)-РЗМ характеризуются длительными релаксационными процессами перехода в более однородное состояние при температурах значительно превышающих температуру ликвидус. Релаксационные процессы происходят в течение нескольких часов (для некоторых составов) и могут быть связаны с процессами распада крупномасштабных неоднородностей, которые сохраняются в структуре сплава в жидком состоянии. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации процессов подготовки расплавов перед быстрой закалкой.

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект №21-13-00202.

1. А.Л. Бельтюков, Б.А. Русанов, Д.А. Ягодин, А.И. Мороз, Е.В. Стерхов, Л.Д. Сон, В. И. Ладьянов. Релаксация в аморфизирующемся расплаве Al-La // Расплавы. 2022. № 5. С. 485-493.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ Al-Ni-Co-Cu-Zr

*Русанов Б.А.,\*<sup>1</sup> Букреева Ю.К.,<sup>1</sup> Сабирзянов А.А.,<sup>1,2</sup> Карфидов Э.А.,<sup>1,3</sup>*

*Русанова А.И.,<sup>4</sup> Сидоров В.Е.,<sup>1</sup> Сон Л.Д.<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>УрГПУ, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>УрГУПС, Екатеринбург, Россия, <sup>3</sup>ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, <sup>4</sup>ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*rusanov@uspu.ru*

Высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) активно исследуются в последние годы благодаря их высоким эксплуатационным свойствам. На сегодняшний день ведется поиск составов ВЭС, которые бы обладали низкой плотностью, высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Однако для получения таких сплавов требуется информация об их свойствах в кристаллическом и жидком состояниях. В настоящей работе изучены теплофизические свойства (плотность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость) ВЭС AlNiCoCuZr.

Сплавы составов AlNiCoCuZr получены методом электродуговой плавки исходных компонентов в атмосфере аргона. Переплавка образцов проводилась не менее 4 раз для получения однородных слитков. Плотность сплавов AlNiCoCuZr измерена методом проникающего гамма-излучения на автоматизированной установке. Электрическое сопротивление изучено с использованием бесконтактного метода во вращающемся магнитном поле. Магнитная восприимчивость измерена на экспериментальной установке, реализующей метод Фарадея. Все измерения свойств проводили в защитной атмосфере гелия в широком температурном интервале, включая жидкое состояние. Тепловые реакции сплавов определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

По результатам опытов установлено, что ВЭС составов AlNiCoCuZr имеют высокую температуру плавления. Значения температуры солидус в зависимости от композиции составляют от 1250 до 1500 К. Показано, что сплавы имеют практически линейные температурные зависимости плотности и сложный вид зависимостей электрического сопротивления (включая участки уменьшения и увеличения). Процесс плавления занимает широкий температурный интервал (около 250 К). Установлено, что в сплавах AlNiCoCuZr при нагреве в твердом состоянии происходят процессы перераспределения компонентов, приводящие к изменению свойств. Полученные результаты могут стать основой при оптимизации процессов подготовки ВЭС AlNiCoCuZr (их предварительном отжиге) перед получением готовых изделий.

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект №23-22-00029.

## УДЕЛЬНАЯ ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ ФУЛЛЕРЕНОВ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

*Раджабова С.С.,\*<sup>1</sup> Сафаров М.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>ТГУ им. акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан

\*mahmad1@list.ru

В промышленности и технологиях достаточно часто применяется кремний. Кремний и его производные являются важными материалами для промышленности, например, в полупроводниках, оптоэлектронике и телекоммуникации. Линейные размеры нанодIAMAZOV колеблются от 10 нм до 50 нм. Диаметр углеродных нанотрубок колеблется от 4 нм до 20 нм, а их длина от 100 нм до 2 мкм [1–4]. Открытие углеродных фуллеренов привело к интенсивному поиску и изучению фуллереноподобных наночастиц других элементов и неорганических соединений. Первым претендентом в этой гонке стал кремний, элемент, наиболее близкий по свойствам к углероду. Однако было обнаружено, что кремниевые фуллерены не могут поддерживать идеальную каркасную структуру, как углеродные фуллерены. Расчеты теории функционала плотности показали, что даже с инкапсулированными частицами почти все эндодральные кремниевые фуллерены демонстрируют сильно сморщенные каркасные структуры по сравнению с их углеродными аналогами [3]. В частности, структуры фуллерена и нанотрубок кремния можно стабилизировать путем инкапсуляции металла или водородного захвата [4]. В рамках приближения MINDO/3 с учетом межатомных взаимодействий методом Монте-Карло были оптимизированы структуры фуллеренов  $\text{Si}_n$  и  $\text{Si}_n\text{H}_n$  с размерами  $20 < n < 60$  и стабильность полых кластеров кремния, состоящих более чем из 36 атомов [2–4].

Электролит NaCl: №1–(H<sub>2</sub>O+5% NaCl); №2–(H<sub>2</sub>O+10% NaCl); №3–(H<sub>2</sub>O+12,5% NaCl); №4–(H<sub>2</sub>O+15% NaCl); №5 – (H<sub>2</sub>O+24,26% NaCl). Литературные данные по теплоемкости водных растворов NaCl при различных температурах (288–323)К приводятся в работах



[5–6]. Результаты исследования теплоемкости водных растворов NaCl в зависимости от температуры при атмосферном давлении авторами [5–6] и наши измерения по теплоемкости исследуемых растворов с внедрением в них наноразмерных кремниевых фуллеренов при различных давлениях. Результаты измерения теплоемкости водных растворов и наночастиц кремниевых фуллеренов показали, что теплоемкость исследуемых растворов зависит от концентрации наполнителя, их фракции, температуры и давления. С повышением температуры (288-433) К теплоемкость растворов, в то же время электролита NaCl, уменьшается по линейному закону и с ростом давления также уменьшается. Добавки наночастиц повышают теплоемкость исследуемых растворов.

1. Калеева, А.А., Тимеркаев Б.А., Шамсутдинов Р.С., Сайфутдинов А.И., Шакиров Б.Р. Микродуговой способ синтеза наноструктур кремния. / 1-ая Всероссийская конференция с международным участием. «Газоразрядная плазма и синтез нано-структур», « КНИТУ-КАИ », Казань, 2020.-С.120-122.
2. Kumar, V. Nanosilicon. Elsevier, Oxford, 2007, p.368.
3. Gao, Yi, Zeng X.C. e.t.: Metalencapsulated tetrahedral silicon fullerene //The journal of Chemical Physics- 2005-N.123-p.204325-4.
4. Галашев, А.Й. Термическая неустойчивость фуллеренов кремния, стабилизируемых водородом. Компьютерный эксперимент //ФТП – 2008 – Т.42, N.5 - С.611-617.
5. Ковалевская, Н.С. Теплоемкость водных растворов NaCl./Н.С.Ковалевская// Дис . . . к.т.н., М.: МЭИ.-1954.-198с.
6. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей /Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филипов и др.// Изд-во стандартов, М.,1963.-708с

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС  
АКВАТЕРМОЛИЗА ПОЛИСТИРОЛА В СРЕДЕ СУБ- И  
СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ**

*Каримов Т.М.,\* Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А.Н.*

*ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия*

*\*temyr-96@mail.ru*

На сегодняшний день ключевой проблемой является переработка полимерных материалов и, прежде всего, переработка полистирольных материалов, составляющих большую часть твердых бытовых отходов. В данной работе представлен метод переработки полистирола в среде суб- и сверхкритической воды на установке периодического типа. [1] При контакте полистирола с суб- и сверхкритической водой, осуществляется реакция деполимеризации, в результате которой полимеры превращаются в мономеры. Были проведены экспериментальные исследования переработки полистирола в среде суб- и сверхкритической воды в диапазоне температур  $T = 375\text{--}425^\circ\text{C}$ , давлении  $P = 19\text{--}30,3$  МПа, времени реакции  $t = 150$  мин. По результатам газовой хроматографии и масс-спектрометрии (ГХ-МС) было выявлено что, основными продуктами разложения полистирола являются: стирол, этилбензол, толуол, Бензол, метилстирол, Нафталин, 2-фенил-, 1,1':3',1''-терфенил, 5'-фенил-, 1,1':2',1''-терфенил, 4'-фенил-. По мере увеличения температуры образования толуола, этилбензола и нафталина увеличивалась, так же с увеличением температуры, нафталин разлагался на 1,1':3',1''(1,1':2',1'')-терфенил, 5'(4')-фенил-.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)) с использованием аналитического оборудования центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

1. Каримов Т.М., Загребев И.Р., Захаров А.С., Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А.Н. //VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция/Казань.2022. с.140-143.

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОГО ВИСМУТА ПРИ УДАРНОМ  
СЖАТИИ**

*Емельянов А.Н.,\* Шахрай Д.В.*

*ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черногоровка, Россия*

*\*emelyanov@fcr.ac.ru*

Экспериментальное исследование плавления веществ в ударных волнах является важной задачей. При плавлении металлов на ударных адиабатах, как правило, отсутствуют изломы, поэтому для обнаружения факта плавления в ударных волнах часто используют измерение электропроводности исследуемого вещества [1]. Висмут обладает металлической проводимостью, поэтому для расчета его теплопроводности применим закон Видемана-Франца. Висмут-свинцовые эвтектики используют как теплоносители для теплосъема с

ядерных реакторов. Зная теплопроводность компонентов сплава и эвтектики можно оценить теплопроводность различных висмут-свинцовых твердых растворов.

В представленной работе были проведены измерения электропроводности висмута при ударном сжатии. Для измерения электропроводности использовался импульсный генератор тока [2]. В процессе эксперимента измерялась электропроводность висмута и давление в экспериментальной сборке с помощью манганинового датчика. Образец висмута представлял собой тонкую пластину толщиной 0,15–0,25 мм. Измерения электропроводности висмута проведены четырех-контактным методом, сопротивление манганинового датчика измерялось двух-контактным методом [2]. Для получения расплава висмута перед ударным сжатием образец нагревался до температуры 225°C.

- 
1. Гатилов Л. А. Электросопротивление ударно-сжатого свинца. Поведение веществ под воздействием сильных ударных волн. Т. 2. с. 231. Саров, 2007.
  2. Кулиш М. И., Емельянов А. Н., Голышев А. А., Дудин С. В., Шахрай Д. В. // Приборы и техника эксперимента. 2023. No. 1. с. 100.

## РЕАЛИЗАЦИЯ И РАСПАД МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

*Ткаченко С.И.,<sup>\*1,2</sup> Хищенко К.В.<sup>1,2,3,4,5</sup>*

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>3</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия, <sup>4</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия, <sup>5</sup>Филиал МГУ, Саров, Россия

\*svt@ihed.ras.ru

При пропускании мощного импульса тока через проводники они нагреваются, испытывают различные фазовые переходы. Если при этом скорость нагрева настолько высока, что термодинамические состояния успевают существенно измениться, и при этом зародышеобразование новой фазы настолько медленно (зародыши имеют размеры меньше критического), что не происходит существенного объема образования равновесной фазы, это приводит к перегреву вещества — реализации метастабильных состояний [1]. При локальном уменьшении интенсивности источника должен происходить распад метастабильного состояния [2–4]. Эти явления необходимо учитывать при численном и экспериментальном исследовании процессов, происходящих в веществе при наличии мощных источников тепловыделения.

В настоящей работе представлены некоторые результаты численного моделирования начальной стадии электрического взрыва тонких проволок и фольг из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена и других) под действием мощного импульса тока. В расчетах используются уравнения состояния этих металлов с учетом фазовых переходов (плавления и испарения) и возможности реализации метастабильных состояний жидкой фазы в широком диапазоне плотностей и температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

- 
1. Ткаченко С. И., Хищенко К. В., Воробьев В. С., Левашов П. Р., Ломоносов И. В., Фортов В. Е. // ТВТ. 2001. Т. 39. № 5. С. 728–742.
  2. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
  3. Zhakhovsky V. V., Pikuz S. A., Tkachenko S. I., Sasorov P. V., Shelkovenko T. A., Knapp P. F., Saylor Ch. C., Hammer D. A. Cavitation and formation of foam-like structures inside exploding wires // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 1207–1210.

4. Baksht R. B., Tkachenko S. I., Zhigalin A. S., Rousskikh A. G., Oreshkin V. I. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 062706.

## СРОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Кривошеев С.И.,\* Адамьян Ю.Э., Магазинов С.Г.*

*СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия*

*\*ksi.mgd@mail.ru*

Импульсная механическая прочность материалов существенно зависит не только от свойств материала (скорость звука, модуль Юнга, статическая прочность на разрыв, температуры и т.д.), но и от режимов нагружения. Известно, что и при испытаниях материала в откольной схеме нагружения в ударно-волновом и динамических режимах, и в испытаниях на динамическую трещиностойкость наблюдается рост разрушающих нагрузок при уменьшении длительности воздействия и задержка разрушения.

Независимо от вида/типа диэлектриков их поведение в сильных импульсных электрических полях демонстрирует аналогичный эффект, а именно повышение электрической прочности с уменьшением времени приложения напряжения к межэлектродному промежутку (напряженности электрического поля в среде). Типичным описанием такого поведения электрической прочности являются вольт-секундные характеристики, качественно проявляющиеся одинаково для газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

Допуская, что потенциальная энергия, соответствующая переходу среды в изменённое (разрушенное) состояние, должна существовать определенное для материала время (время аккумуляции энергии), проведен анализ литературных данных по импульсной механической и электрической прочности диэлектриков. С применением потенциала Ландау выявлена обобщенная зависимость относительной мощности разрушения от относительной длительности воздействующего импульса.

**К ТЕМПЕРАТУРНО-БАРИЧЕСКОМУ ПОВЕДЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОЙ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Аливердиев А.А.,\*<sup>1,2</sup> Алиев Р.М.,<sup>1,3</sup> Амирова А.А.,<sup>4</sup> Бейбалаев В.Д.,<sup>1,2</sup>  
Григорьев Б.А.,<sup>5</sup> Заричняк Ю.П.,<sup>6</sup> Эфендиева М.Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия, <sup>2</sup>ДагГУ, Махачкала, Россия, <sup>3</sup>ДГТУ,  
Махачкала, Россия, <sup>4</sup>ИФ ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия, <sup>5</sup>ООО «Газпром ВНИИ ГАЗ»,  
Развилка, Московская обл., Россия, <sup>6</sup>ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

\*aliverdi@mail.ru

В докладе представлены результаты исследований суммарного влияния температуры, давления, а также флюидонасыщения на эффективную теплопроводность горных пород, что имеет ключевое значение при описании процессов тепломассопереноса в призабойной зоне скважин.

Особое внимание уделяется гранитам и гранитоидам, для которых проводится анализ экспериментальных зависимостей эффективной теплопроводности в температурном и барическом диапазонах 273–900 К и 0.1–1500 МПа, что соответствует параметрам горных пород от поверхностного слоя до глубин более 50 км континентальной коры.

Перекрытие диапазонов различных экспериментальных методик (которые также обсуждаются в докладе) делает возможным непосредственное сравнение результатов и обобщение выводов. Кроме того приводится сравнительный анализ температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности для пород с различной структурной упорядоченностью, но с близким ее абсолютным значением при атмосферном давлении и комнатной температуре. Обсуждается предлагаемое малопараметрическое описание температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности горных пород, границы его применимости, а также возможность сокращения входящих в него параметров.

Доклад посвящается памяти профессора С.Н. Эмирова (1935-2020).

**ПОТРЕБНОСТЬ ВЕДУЩИХ ОТРАСЛЕЙ ИНДУСТРИИ И ЭНЕРГЕТИКИ  
В ДОСТОВЕРНЫХ ДАННЫХ О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ  
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ. ГЛОБАЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ  
БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ И  
ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА**

*Абдулагатов И.М.*

*ДагГУ, Махачкала, Россия*

*ilmutdina@gmail.com*

В различных отраслях промышленности, знание о теплофизических свойствах веществ и материалов является необходимым условием для оптимального проектирования процессов и технологических оборудований. К сожалению, теплофизические исследования никогда полностью не удовлетворяли потребности науки и ведущих отраслей промышленности. В данной работе обсуждаются результаты исследований потребностей энергетики и индустрии в надежных и достоверных данных о термодинамических и транспортных свойствах веществ и материалов и связанных с ней ряд проблем теплофизических исследований, таких как: (1) экспериментальные исследования и оценка их достоверности (погрешности

измерений);(2) проблема разработки глобальной теплофизической базы данных для научных и практических применений и экспертная система оценка их достоверности;(3) проблема разработки надежных (стандартных) уравнений состояний чистых веществ и многокомпонентных систем; (4) прогнозирования свойств сложных многокомпонентных систем на основе ограниченных экспериментальных и структурных данных; (5) компьютерное моделирование и теория теплофизических свойств веществ в экстремальных условиях.

Особое внимание уделено на влияние точности измерений теплофизических свойств на эффективность принятия технологических решений, конструкций технологических оборудований (размеров, энергопотребления, оценка безопасности, экология, химические технологии, биотехнология и материаловедение, оптимизация процессов, разработка и технико-экономические обоснования, проектирование, масштабирование и строительство, и т.д.). Обсуждаются какие именно теплофизические свойства (данные о фазовом равновесии, теплопроводности и вязкости, давления насыщенных паров, данные о плотности и критических параметров, и т.д.) и их точность наиболее востребованы для индустрии. Особое внимание также уделено о роли достоверных (стандартных) уравнений состояния, моделирование, и прогнозирования свойств, тепловые свойства новых материалов (композиционных, ионных жидкостей, ионанофлюидов, нанофлюидов, наноматериалов, наночастиц, тонких пленок, взрывчатых веществ, и т.д.). Основная цель данной работы – разработать технологию предоставления критически оцененные данные о теплофизических свойствах жидкостей, газов и смесей для использования промышленностью, научных исследований и другими государственными учреждениями для: (1) разработки и оптимизации процессов химической технологии; (2) фундаментальные исследования молекулярных свойств; (3) оценка качества опубликованных теплофизических данных; (4) принятие оптимального решения.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА НАБУХАНИЯ СМЕСЕЙ ТЕРНАРНЫХ СИСТЕМ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

*Сафаров Ш.Р.,\*<sup>1</sup> Ойматова Х.Х.,<sup>1</sup> Шарипов М.Л.,<sup>1</sup> Сафаров М.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>БГУ имени Носира Хусрава, Бохтар, Таджикистан, <sup>2</sup>ГТУ имени академика, Душанбе, Таджикистан

\*safarov88-88@mail.ru

В настоящей статье обобщены данные по исследованиям и разработкам в области изменения коэффициента набухания смесей тернарных систем в зависимости от времени и массы нанопорошка гидразина с использованием экспериментальных данных, а также предложено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента набухания смесей тернарных систем исследуемых тернарных систем в зависимости от времени и массы нанопорошка гидразина. Для обобщения экспериментальных данных по коэффициенту набухания смесей тернарных систем кремниевой кислоты, многослойной углеродной нанотрубки и нанопорошка гидразина при увлажнении в парах воды использовали функцию термодинамическую правдоподобную [1–3].

Используя экспериментальные данные по коэффициенту набухания были получены эмпирические уравнения.

Проверка полученных уравнений показала, что они с общей относительной погрешностью 0,23–4% описывают коэффициент набухания исследуемых тернарных систем в интервале времени 0–3,5 часов. Общая относительная погрешность определения коэффициента набухания по уравнению (10), то есть после нагревания исследуемого образца составляет от 0,88 до 4,7% и была оценена по результатам измерений. Таким образом,

для произведения расчёта коэффициента набухания тернарных систем необходимо знать массу исследуемого образца.

1. Ойматова, Х.Х. Исследование коэффициента набухания тернарных систем при увлажнении паров воды / Х.Х. Ойматова // Тенденции развития науки и образования (Рецензируемый научный журнал «LJournal»). – Самара, 2022. – №84, (Апрель 2022, Часть 1). – С.98–103.
2. Сафаров, Ш.Р. Влияние порошка гидразина на изменение удельной теплоёмкости тернарных систем кремниевой кислоты и многослойной углеродной нанотрубки в зависимости от температуры / Х.Х. Ойматова, Ш.Р. Сафаров, М.М. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета (научный журнал), Серия естественных наук. – Душанбе, 2020. – №4. – С.165–175.
3. Сафаров, Ш.Р. Влияние нанопорошка гидразина на изменение внутренней энергии тернарной системы многослойной углеродной нанотрубки и кремниевой кислоты / Х.Х. Ойматова, Ш.Р. Сафаров, С.С. Рафиев, Дж.Ф. Собиров, М.М. Сафаров // Вестник Филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе (научный журнал) / Серия естественных наук. – Душанбе, 2018. – №3(2). – С.83–90.

**ВЛИЯНИЕ ФУЛЛЕРЕНОБОДОБНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА ИЗМЕНЕНИЕ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ «ПАМЯТИ ФОРМ»**

*Асрорзода Н.С.,\*<sup>1</sup> Сафаров М.М.,<sup>1</sup> Сафаров С.К.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*ТТУ им.акад. М.С.Осимы, Душанбе, Таджикистан,* <sup>2</sup>*ТГМУ им. А.Сино, Душанбе,  
Таджикистан*

\*mahmad1@list.ru

В работе приводятся результаты экспериментального исследования теплопроводности и электрического сопротивления твердых материалов в интервале температуры (293-373) К. Для измерения коэффициента теплопроводности и электросопротивления исследуемых материалов нами использован метод, осуществляемый мостиком Уитстона. Общая относительная погрешность измерения коэффициента теплопроводности, получаемая данным методом при доверительной вероятности 95%, составляет 0,4%, а для электрического сопротивления 1,2%.

Для численных расчетов дифференциальных уравнений теплопроводности и уравнений теплового баланса необходимо знание теплопроводности и электросопротивления исследуемых веществ в зависимости от температуры. Известно, что диапазон изменения параметров состояния (температуры, концентрации фуллерена) зависит от состояния вещества. Задача нашего исследования на данном этапе заключается в измерении теплопроводности и электрического сопротивления твердых материалов на основе полимеров с внедрением в них фуллеренов.

Мостик Уитстона часто используют для измерения температуры, когда в одну из ветвей моста включают термометр сопротивления в качестве неизвестного резистора. В любом случае, чем больше разность сопротивлений в ветвях, тем больший ток будет течь через диагональ, а при изменении сопротивлений станет изменяться и ток диагонали. Вообще, с помощью моста Уитстона можно измерять самые разные величины: упругую деформацию, освещенность, влажность, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность. Как правило, мост Уитстона подключается в таких случаях через АЦП.

С помощью экспериментальной установки с применением мостика Уитстона можно измерить сопротивление проводников и коэффициент теплопроводности при изменении длины проводника с использованием реохорда [1-4]. Известно, что коэффициент эффективной теплопроводности твердых тел зависит от температуры, концентрации наночастиц. Для измерения температуры опыта предлагаемая установка снабжена тремя нановольтамперметрами, которые измеряют температуру, сопротивление и напряжение соответствующих участков образца, имеющих вид проволоки. Мостик Уитстона позволяет, зная длину отдельных участков проводника, определить общее сопротивление проводника следующим выражением:

- для расчета общего сопротивления исследуемых материалов (проводника) следует в расчетной формуле учесть регулируемое сопротивление и длину проводника.
- для определения коэффициента эффективной теплопроводности проводника была применена модель Дульнева.

В частности для данной установки в качестве эталона использована медная проволока, диаметр которой равен 1,34 мм.

Установлено, что с повышением температуры теплопроводность исследуемых материалов на основе полимеров растет по закону прямой линии. На основе закона термодинамического подобия и экспериментальных данных получены аппроксимационные и корре-



ляционные уравнения.

1. Калашников, Г.С. Электричество, М. Наука, 1985,
2. Телеснин, Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. М.,1969.
3. Сафаров, М.М., Хусравов Дж.Х. Методические разработки по курсу «Электричество». Санадвора, Душанбе,1995.-45с
4. Маджидов, Х., Сафаров М.М. Лабораторные работы по электричеству и магнетизму/ мет. разработки/ ДГПИ им. К. Джураева, Душанбе, 1991.-86с.

## ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ

*Гаджимагомедов С.Х.,\*<sup>1</sup> Рабаданов М.Х.,<sup>1</sup> Алиханов Н.М.-Р.,<sup>1</sup>  
Гаджиев М.Х.,<sup>2</sup> Рабаданова А.Э.,<sup>1</sup> Эмиров Р.М.,<sup>1</sup> Палчаев Д.К.,<sup>1</sup>  
Мурлиева Ж.Х.,<sup>1</sup> Сайпулаев П.М.,<sup>1</sup> Фараджев Ш.П.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ДагГУ, Махачкала, Россия, <sup>2</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*darkusch@mail.ru*

Показана возможность создания градиентных наноструктурированных керамик на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) и  $\text{BiFeO}_3$  (BFO). Для практических применений интересны материалы с градиентными [1] свойствами: слоистые структуры с градиентным химическим составом; градиентная керамика, сочетающая сегнетоэлектрические и ферромагнитные свойствами. Для изготовления таких материалов эффективно применяется [2] методы плазменной обработки поверхности материала, вызывающие широкий спектр химических изменений в контролируемых плазмообразующих средах. Воздействие на образец плазменной струей в течение 60 с осуществлялось при токе 250 А и расходе газа 3 г/с плазмотроном [3]. Показана возможность упрочнения связей между зёрнами в приповерхностном слое керамики и изменения индекса кислородной стехиометрии, в результате плазменной обработки. Размер зёрен, в основном меняется несколько сотен нанометров до десятков микрометров. Зёрна в области слоя, в отличие от объёма образца, имеют монолитное сопряжение.

*Работа выполнена в рамках проектов: грантов РФФИ № 18-08-00092а и № 20-08-00242а и частично Гос. задания FZNZ-2020-0002.*

1. Dedon L. R. et al. // Chemistry of Materials 28 (16) 5952-5961 (2016)
2. Gadzhimagomedov S. Kh. et al. // JPCS 1923(1) 012007 (2021)
3. Гаджиев М.Х. и др. // Письма в ЖТФ. 42 (2) 44-49 (2016).

## ИЗМЕНЕНИЕ БАРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРА НАНОКРИСТАЛЛА

*Магомедов М.Н.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*mahmag4@mail.ru*

Ранее нами в работе [1] был предложен метод расчета зависимости температуры плавления  $T_m$  однокомпонентного кристалла от давления  $P$ . Метод основан на четырех параметрическом парном потенциале межатомного взаимодействия Ми-Леннард-Джонса, и не содержит других подгоночных параметров. При получении формулы для барической

зависимости  $T_m(P)$  был использован делокализационный критерий плавления, который обобщает критерий Линдемманна на случай кристаллизации. Данным методом были рассчитаны барические зависимости температуры плавления  $T_m(P)$  и ее производной по давлению:  $T'_m(P) = dT_m/dP$ , для макрокристаллов золота, платины и ниобия в интервале давлений  $P=0-1000$  GPa.

В данной работе метод из [1] был обобщен на случай нанокристалла из  $N$  атомов, который имеет определенную форму поверхности. Обобщение произведено в рамках RP-модели нанокристалла [2]. Расчеты барических зависимостей функций  $T_m(P)$  и  $T'_m(P)$  были проведены как для макро-, так и для нано-кристалла кубической формы из 306 атомов. Было показано, что значение  $T_m(P)$  для нанокристалла меньше, чем для макрокристалла при любом давлении. Это обусловлено уменьшением среднего (по нанокристаллу) первого координационного числа при уменьшении  $N$ , что уменьшает среднюю потенциальную энергию атома в нанокристалле.

При низких давлениях функция  $T'_m(P)$  для нанокристалла больше чем для макрокристалла. Однако при определенном давлении ( $P_x=13.66$  GPa) барические зависимости функций  $T'_m(P)$  для макрокристалла и нанокристалла пересекаются. Это означает, что при низких давлениях величина  $T'_m(P)$  возрастает, а при  $P > P_x$  величина  $T'_m(P)$  уменьшается при изоморфно-изобарном переходе от макро- к нанокристаллу. Однако разница между данными функциями при  $P > P_x$  не очень большая. Поэтому можно принять, что при  $P > P_x$  функция  $T'_m(P)$  не изменяется при уменьшении размера нанокристалла. Объяснены причины такого размерного изменения функция  $T'_m(P)$ .

1. M.N. Magomedov, Vacuum, 2023, 213, 112079. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112079
2. M.N. Magomedov, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 151, 109905. DOI: 10.1016/j.jpics.2020.109905

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ТВЕРДЫХ НАНОЧАСТИЦ С ЭФФЕКТОМ «ПАМЯТИ ФОРМ», ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ И СОСТАВЛЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

*Сафаров С.К.,<sup>\*1</sup> Зарипова М.А.,<sup>2</sup> Зайниддинов Д.Р.,<sup>3</sup> Сафаров М.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ТГМУ им. А.Сино, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>ТТУ им. акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан, <sup>3</sup>ТУТ, Душанбе, Таджикистан

\*mahmad1@list.ru

В настоящее время в медицине широко используются твердые и сыпучие материалы с эффектом «памяти форм» (пластины, микрочастица и наночастицы) различных форм и фракций в частности в травматологии, зубной технике, терапевтической деятельности и др. В настоящее время развитие уровня науки о нанотехнологиях способствует их широкому применению. Так, например, в медицине используют одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ) и многостенные углеродные нанотрубки (МСУНТ) различной фракции и базового материала изготовления. Для ввода лекарств в организм человека и животных на сегодняшний день без хирургического вмешательства используют углеродные нанотрубки. Известно, что коэффициент теплопроводности веществ зависит от природы получения этих наночастиц, их структуры, геометрических параметров и состояния веществ (твердых, жидких и газообразных и др.). Для исследования теплопроводности перечисленных веществ необходимо выбрать подходящие установки и способы их определения. Кроме того, теплопроводность перечисленных материалов можно получить на основе теории и математических моделей, в частности модели профессора Г.Н. Дульнева [1], Максвелла, Ленарда-Джонса и др. [2-4]. Для измерения теплопроводности материалов

используют метод монотонного разогрева (установка профессора Е.С. Платунова) [5] и метод регулярного теплового режима первого рода (установки профессора И.Ф. Голубева) [6-8], а также метод Монте-Карло [9].

Для исследования теплопроводности пластин, стержней, нано-и микрочастиц различной фракции на основе титана в зависимости от температуры использована экспериментальная установка, основанная на методе монотонного разогрева [5]. Надо отметить, что выбор метода исследования коэффициента эффективной теплопроводности зависит от их структуры, состояния (твердых тел (пластин, стержней, сыпучих материалов, порошков и др.), жидких, газообразных и др.). С помощью этой установки можно измерять эффективную теплопроводность исследуемых образцов с погрешностью до 4,2%.

Результаты исследования эффективной теплопроводности образцов на основе титана при различных температурах показали, что повышение температуры приводит как к росту и теплопроводности, так и к ее уменьшению. Такое отличие теплопроводности образцов зависит от пористости, плотности, структуры и других факторов. На основе закона соответственных состояний и экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых материалов получен ряд аппроксимационных зависимостей, которые представлены в работах [6-8]. Для обработки экспериментальных данных по эффективной теплопроводности исследуемых образцов, используя закон термодинамического подобия и закон соответственных состояний нами получены аппроксимационные зависимости, позволяющие рассчитывать коэффициент теплопроводности образцов с эффектом «памяти форм» при различных температурах [9].

1. Дульнев, Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. "Энергия", Ленинградское отделение. 1974, - 264с.
2. Дмитриев, А.С. Введение в нанотеплофизику/А.С. Дмитриев М.:БИНОМ, Лаборатория знаний.-2015 – 790с.
3. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода.-М.: Изд-во стандарта, 1975.-551 с.
4. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в нано жидкостях: современное состояние проблемы (Обзор). Ч.1. Синтез и свойства наножидкостей. Теплофизика и аэромеханика, 2010, Том 17, №1. С.1-15.
5. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения и приборы. /Е.С.Платунов, С. Е.Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров. //Под общ. ред. Платунов Е.С. –Л.: Машиностроение. Ленинград. Отд., 1986. –256с.
6. Голубев, И.Ф. Бикалориметр для определения теплопроводности газов и жидкостей при высоких давлениях и различных температурах // Тепло-энергетика. – 1963. - № 12. – С.78 –82.
7. Шашков А.Г., Абраменко Т.Н. Теплопроводность газовых смесей./Под. ред. А.В.Лыкова.-М.: Энергия, 1970.-288 с.
8. Сафаров М.М. Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гид-разина в зависимости от температуры и давления. /Махмадали Махмадиевич Сафаров // Дис. . . . . д-ра техн. наук. –Душанбе, 1993. –965 с (в двух томах).
9. Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло. М.:Наука,1973,-312с

## ТЕПЛОЕМКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ СИСТЕМЫ О-КСИЛОЛА И ФУЛЛЕРЕНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Умарализова М. У.,\*<sup>1</sup> Сафаров М. М.,<sup>2</sup> Неъматов Г. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТГПУ им. С. Айни, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>ТТУ им. акад. М. С. Осими, Душанбе, Таджикистан

\*mahmad1@list.ru

Несмотря на определенные успехи развития кинетической теории жидкого состояния, в том числе наножидкостей, проблема, связанная со специфическими особенностями теплового движения, характера переноса тепла и импульса в жидкости, пока остается нерешенной. Овладение знаниями в области нанохимии, химии фуллеренов, нанотрубок, современных подходов к синтезу органических производных фуллеренов для создания наноматериалов и медицинских нанопрепаратов на основе научных и практических навыков позволяет выполнить целенаправленную задачу [1].

Размер образца в таком случае составляет менее 1 мм, а используется он обычно в исследованиях графена. Фуллерены также могут быть использованы в качестве добавок для получения искусственных алмазов методом высокого давления. При этом выход алмазов увеличивается на 30%. Кроме того, фуллерены нашли применение в качестве добавок в интумесцентных (вспучивающиеся) огнезащитных красках. Растворимость функциональных производных фуллере-на в воде определяется наличием в их молекулах достаточного количества полярных гидрофильных групп, которые и удерживают гидрофобный остаток фуллере-на в растворе. Кроме того, наличие ионных групп в заместителях может препятствовать ассоциации молекул (хотя и не всегда, как показано, например, в [2]), что также увеличивает их растворимость. Более того, в некоторых случаях строение продукта сильно зависит от изменений реакционных условий, на первый взгляд, незначительных. Так, известно несколько методов получения полигидроксилированных производных фуллере-на C<sub>60</sub>, называемых фуллере-нолами и отличающихся по числу гидроксильных групп. В работе [3] было проведено сравнение последних четырех методов и показано, что все они дают различные продукты. Таким образом, был получен фуллере-нол и его производные [1].

Для измерения теплоемкости растворов использована установка, работающая по методу монотонного разогрева, которая состоит из измерительной ячейки, грузопоршневого манометра типа МП-600 и МП-2500, класс точности которых равен 0,001. Измерение проводится следующим образом: Измеряется зависимость температуры пустой измерительной ячейки от времени, затем измерительная ячейка заполняется исследуемым веществом и опыт выполняется аналогично приведенному для пустой ячейки. На плоской координате с помощью компьютера вычерчивается график зависимости температуры от времени для пустого и заполненного калориметра. Зная массы растворов в калориметре, время нагрева пустого и заполненного калориметра по расчетной формуле определяем удельную изобарную теплоемкость растворов при заданном интервале температуры и давления. Затем с помощью грузопоршневого манометра изменяется давление раствора, а манометром фиксируется давление опыта. Опыты проводим повторно для данного зафиксированного давления как при других давлениях [3].

Удельная изобарная теплоемкость о-ксилола приведена в Справочнике Чувашского государственного университет имени И.Н. Ульянова, который опубликован в 2016г. [4]. В частности приводятся данные по теплоемкости чистого о-ксилола в интервале температуры (293–473) К и давления 49,01МПа. Для обработки и обобщения данных по удельной изобарной теплоемкости исследуемых растворов нами использован закон термодинамического подобия и на его основе получены аппроксимационные уравнения.

1. Синтез и исследование аминокислотных производных фуллерена-C60, обладающих антивирусными свойствами в отношении вируса птичьего гриппа А/Н5N1- Специальность 02.00.03.- Органическая химия/ Дилрабо Азизбековна Шарипова // Дисс... на соискание учёной степени кандидата химических наук, Душанбе-2020,-131с.
2. Guldi, D. Prato M. Excited-state properties of C60 fullerene derivatives/ D.Guldi // Acc. Chem. Res. – 2000. – Vol.33. – P.695–703.
3. Сафаров, М.М. Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гидразина в зависимости от температуры и давления./ Махмадали Махмадиевич Сафаров // Дисс. ... д-ра т. н. Душанбе, 1993, -950 с.(в двух томах)
4. Справочное пособие к курсовому проектированию по процессам и аппаратам химической технологии «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» Химико-фармацевтический факультет, «Теплофизические свойства жидких веществ и растворов» 2116г.
5. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов. Справочник под. ред. Татевского В.М., М., 1980.-342с.
6. Зарипова, М.А. Теплофизические и термодинамические свойства водных растворов гидразина и фенилгидразина./М.А.Зарипова, А.Б.Бадалов, М.М. Сафаров//Монография. Душанбе, 2007.- 129 с.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ В ДЕФЕКТНОЙ 10Å ФАЗЕ

*Тарарушкин Е.В.,\*<sup>1</sup> Смирнов Г.С.,<sup>1</sup> Калинин А.Г.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, Москва, Россия, <sup>2</sup>Лаборатория СУБАТЕХ (ИМТ Атлантик), Нант, Франция*

*\*etatarushkin@hse.ru*

10Å фаза является важным представителем семейства высокобарических водосодержащих магнезиальных силикатов (DHMS), ответственных за транспорт воды в мантии Земли в зонах субдукции. Структуру 10Å фазы можно представить как триоктаэдрические Т-О-Т слои талька с некоторым количеством молекул H<sub>2</sub>O в межслоевом пространстве. Такая модель уже успешно исследовалась ранее методами молекулярной динамики [1]. Однако недавние эксперименты показывают, что тетраэдрические силикатные слои реальной 10Å фазы содержат в своей структуре замещения гидрогранатового типа в количестве до 10% от атомов кремния [2]. Силанольные группы этих структурных дефектов могут создавать сильные водородные связи с молекулами H<sub>2</sub>O в межслоевом пространстве, что, в свою очередь, несколько меняет свойства дефектной 10Å фазы по сравнению с идеальной моделью на основе структуры гидрофобного талька.

Молекулярно-динамическое моделирование свойств дефектной 10Å фазы и сравнение ее свойств с предыдущей идеальной моделью выполнялось с помощью новой версии силового поля ClayFF-МОН [3], а также с помощью теории функционала электронной плотности (DFT). Сравнение результатов моделирования показало, что силанольные группы дефектов и молекулы H<sub>2</sub>O вблизи дефектов имеет строгую ориентацию как в случае с ClayFF-МОН, так и с DFT. В тоже время применение оригинальной версии ClayFF показало, что силанольные группы имеют свойство менять ориентацию, что сказывается на поведении молекул H<sub>2</sub>O вблизи дефектов.

*Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.*

- 
1. Wang J.W., Kalinichev A.G., Kirkpatrick R.J. // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V.222. P.517.

2. Welch M.D., Pawley A.R., Ashbrook S.E., Mason H.E., Phillips, B.L. // Amer. Mineral. 2006. V. 91. P. 1707.
3. Cygan R.T., Greathouse, J.A., Kalinichev A. G. // J. Phys. Chem. C. 2021. V. 121. P. 17573.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И СРАВНЕНИЕ ИХ ЗНАЧЕНИЙ

*Сафаров Ш.Р.,\*<sup>1</sup> Шарипов С.М.,<sup>1</sup> Сафаров М.м.,<sup>1,2</sup> Зоиров Х.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>БГУ имени Носира Хусрава, Бохтар, Таджикистан, <sup>2</sup>ГТУ имени академика, Душанбе, Таджикистан

\*safarov88-88@mail.ru

В данной работе на основе экспериментальных данных по коэффициенту теплопроводности жидкого метилбутилкетона как в чистом виде, так и внедренных в некотором количестве наночастиц (углеродных нанотрубок) в интервале температуры (от комнатной температуры до температуры кипения метилбутилкетона) при атмосферном давлении (0,101) МПа были выявлены эмпирические уравнения. Полученные уравнения позволяют рассчитать коэффициент эффективной теплопроводности жидкого диметилбутилкетона (х.ч.) в интервале температуры (280-660) К и давления (0,1-50) МПа с общей относительной погрешностью до 3%.

В настоящее время теплопроводность чистого химического диметилбутилкетона (жидкий) изучена при различных температурах и давлениях авторами работ [1-3]. Авторами установлено, что эффективный коэффициент теплопроводности жидкого метилбутилкетона как в чистом виде, так и с добавкой наночастиц с ростом температуры уменьшается, а при повышении давления наблюдается рост теплопроводности наножидкостей на основе метилбутилкетона [4-6]. Целью данного исследования является получение эмпирических уравнений на основе экспериментальных данных коэффициента теплопроводности для изучения коэффициента эффективной теплопроводности жидкого метилбутилкетона как в чистом виде, так и внедренных в некотором количестве наночастиц (углеродных нанотрубок) в интервале температур (от комнатной температуры до температуры кипения) и давлений (0,101) МПа.

На основе экспериментальных данных и закона соответствующего состояния получены аппроксимационные зависимости, с помощью которых можно вычислить теплопроводность наножидкостей на основе метилбутилкетона при различных температурах и давлениях [1-6]. В работе [3] обобщены результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности данных работы [2] жидкого метилбутилкетона и на его основе, используя закон термодинамического подобия, получен ряд аппроксимационных зависимостей.

1. Маджидов, Х., Сафаров М.М. Теплопроводность метилбутилкетона при различных температурах и давлениях. ДАН Тадж. ССР, №2, Т.26, 1983, Душанбе,- С. 183-188.
2. Маджидов, Х.М. Теплопроводность метилбутилкетона. ИФЖ, 1984, Т. XVII, №2,- С.256-262.
3. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П.Филиппов, А.А.Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий,-М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352 с.

## СОЗДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ И ХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

*Лага Е.Ю.,\* Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.*

*ТПУ, Томск, Россия*

*\*laga.ekaterina@yandex.ru*

Поверхности с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофильность/ супергидрофобность) находят широкое применение в энергетике, автомобилестроении, авиационной и космической отрасли.

Известны различные методы создания поверхностей металлов с экстремальными свойствами смачивания (химическое осаждение из газовой фазы, сублимация, литография). Реализация вышеперечисленных методов после формирования развитой многомодальной шероховатости требует нанесения слоя гидрофобизатора. В большинстве случаев слой гидрофобизатора связан с поверхностью слабыми межатомными связями, т.е. физической адсорбцией. По этой причине гидрофобный/гидрофильный слой подвержен истиранию и уносу. Обработка поверхностей лазерным излучением с последующей гидрофобизацией, например фторсиланами, в последнее время зарекомендовала себя как наиболее перспективный метод получения поверхностей с экстремальными свойствами смачивания. Последнее обусловлено тем, что при таком методе гидрофилизация/гидрофобизация поверхностей металлов, сопровождается образованием химических соединений, более стойких, чем слабые межатомные связи.

В работе разработан новый способ получения материалов с контрастным смачиванием на основе комбинации методов лазерного химического модифицирования, текстурирования и пиролиза многокомпонентных углеводородосодержащих жидкостей.

Суть разработанного подхода состоит в создании развитой многомодальной шероховатости на поверхностях традиционных конструкционных материалов (жаростойкая и жаропрочная сталь, сплавы алюминия, медь) и образовании химических соединений СН групп.

По результатам анализа исследования химического состава поверхностных слоев и трехмерных параметров шероховатости сформулирована и доказана гипотеза, объясняющая инверсию свойств смачивания и улучшения функциональных свойств, созданных новым методом конструкционных материалов.

Исследование выполнено при поддержке программы развития ТПУ «Приоритет 2030» (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-114-375-2023).

## СВОЙСТВА ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

*Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г.,\* Бабаев А.А., Билалов А.Р., Омаров З.М.*

*ИФ ДНЦ РАН, Магачкала, Россия*

*\*bakmaev@mail.ru*

Углеродные материалы широко используются в различных областях техники. В последнее десятилетие активно исследуется графен, интерес к которому обусловлен перспективами его применения в электронике, а также при разработке нового поколения термоизоляционных материалов [1-3]. В этой связи повышенное внимание уделяется к созданию и исследованию высокотехнологичного углеродного материала нового поколения на основе терморасширенного графита. В данной работе представлены результаты исследования теплофизических свойств керамики на основе терморасширенного графита из малослойных графеновых кластеров. Можно предположить, что структурные искажения (т.е. центры рассеяния), ограничивающие длину свободного пробега фононов в тер-

морасширенном графите, имеют величину порядка нескольких нанометров и меньше. В качестве таких центров рассеяния могут выступать локальные искажения решетки и смещения тонкослойных фракций (толщина, которых порядка нанометров). Такие искажения могут сыграть существенную роль в ограничении фононного теплопереноса в этих материалах, но в конечном результате оказывается, что длина свободного пробега фононов обратно пропорциональна температуре. На температурной зависимости теплоемкости наблюдаются слабая аномалия в области температур  $T = 600$  К, которая может быть связана со структурными изменениями в ТРГ. За температурную зависимость теплопроводности графитов при высоких температурах практически полностью отвечает фонон-фононное взаимодействие, т.е. ангармонизм, а также рассеяние фононов на границах кристаллитов, неоднородностях структуры и дефектах... В области температур 550-600 К теплопроводность с увеличением температуры почти не изменяется, что может быть связано с повышением теплоемкости в этой температурной области. В этой температурной области электропроводность также не зависит от температуры. По мере роста температуры в области  $\geq 600$  зависимость теплопроводности от температуры спадает в результате увеличения концентрации рассеивающих центров (фононов). Результаты исследования теплофизических свойств показывают, что фононный вклад в процессы теплопереноса в ТРГ является доминирующим. Определена температурная зависимость средней длины свободного пробега фононов. На температурных зависимостях теплоемкости, теплопроводности и электропроводности обнаружены слабые аномалии в области температур 550-600 К, характерные для структурных изменений. Установлено, что теплопроводность ТРГ на 2 порядка меньше чем в обычном графите и на три порядка меньше чем в графене и УНТ.

1. Geim A.K., Novoselov K.S. The Rise of Graphene // Nature Material. 2007. V. 6. P. 183.
2. Fricke J., Elbert H.-P., Wienlader H., Wiener M., Geisler M., Vidi S. // Abstracts of 30 International Conference on Thermal conductivity. Pittsburg. „Anter“. 2009. P. 4.
3. Kicherer R., Schreder F., Dorner L. Radiant heating Unit. US patent N 4713527.1987.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ И НАНОПОРОШКА ДИМЕТИЛКЕТОНА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДЫ

*Сафаров П.М.,<sup>\*1</sup> Зоиров Х.А.,<sup>1</sup> Гуломов М.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ТТУ им.акад. М.С.Осимы, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан

\*mahmad1@list.ru

Для обработки большого объема воды, а также систем с небольшим возвратом конденсата применяют деаэрационные установки. Обеспечение надежной и экономичной работы паровых котлов возможно при отсутствии внутренних отложений на поверхностях нагрева и снижении до минимума уровня коррозии конструкционных материалов. Подобные задачи возможно решить путем организации рационального водного режима, который включает в себя необходимую водоподготовку питьевой воды и некоторые определенные конструктивные мероприятия по очистке питательной воды от газообразных и твердых примесей. Снижение эксплуатационных затрат и защита дорогостоящей техники обеспечиваются внедрением автоматизированного комплекса, осуществлением анализа качества воды, управлением дозирующими устройствами, информированием обслуживающего персонала о появившихся неполадках [1]. Для численных расчетов и составления физической модели деаэрационной установки необходимо знать теплопроводности питательной воды, при различных температурах и давлениях [2].



Для исследования теплопроводности питательной воды системы (нанопорошка диметилкетона от 0-0,5% + дистиллированная вода) в зависимости от температуры (293-473)К и давления (0,101-49.01)МПа использована экспериментальная установка, основанная на методе нагретой нити [2]. С помощью этой установки можно измерять теплопроводность жидкостей и растворов с погрешностью до 4,2%.

Для исследования теплопроводности питательной воды системы (нано-порошка диметилкетона от 0-0,5% + дистиллированная вода) в зависимости от температуры (293-473)К и давления (0,101-49.01)МПа использована экспериментальная установка, основанная на методе нагретой нити [2]. С помощью этой установки можно измерять теплопроводность жидкостей и растворов с погрешностью 4,2%.

Экспериментальная установка (прибор Филлипова Л.П.), на которой студенты филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе выполняли лабораторные работы, была создана и запатентована малым патентом Республики Таджикистан (№ТJ 923,1917г.7с). Прибор Филлипова Л.П., который существовал в филиале МГУ имени М.В. Ломоносова позволял провести измерение коэффициента эффективной теплопроводности газов и жидкостей на линии насыщения. А запатентованная нами установка дает возможность провести измерение теплопроводности жидкостей при различных температурах и давлениях. Для выполнения данной задачи к прибору Филлипова Л.П. приспособлен, т.е. подключен пережимной сосуд высокого давления и грузопрошневой манометр типа МП-600, классом точности 0,001. Общая относительная погрешность измерения теплопроводности при доверительной вероятности 0,95 составляет 4,2%. Для уточнения достоверности работы, экспериментальная установка была протестирована контрольными измерениями. В качестве контрольных образцов были использованы вода и воздух.

Результаты исследования и обработка экспериментальных данных. Результаты исследования теплопроводности воды при различных температурах и концентрации нанопорошка диметилкетона (заменителя гидразина) показали, что повышение температуры, массовой концентрации диметилкетона приводит к росту теплопроводности воды. На основе закона термодинамического подобия и экспериментальных данных по теплопроводности электролитов (дистиллированная вода + нанопорошок диметилкетона) получен ряд аппроксимационных зависимостей [2].

Установлено, что с повышением температуры, концентрации нано-порошка диметилкетона (заменителя гидразина) и давления теплопроводность воды растет по различным закономерностям. Теплопроводность чистой воды, в том числе дистиллированной воды растет до температуры кипения, а затем уменьшается по экспоненциальному закону. На основе экспериментальных данных и закона термодинамического подобия нами получен ряд аппроксимационных выражений, с помощью которых можно численно определить коэффициент эффективной теплопроводности растворов на основе воды с внедрением порошка диметилкетона (заменителя гидразина).

- 
1. Манькина, Н.Н. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций. М., "Энергия", 1977.- 256с.
  2. Гуломов, М.М. Влияние углеродных нанотрубок и нанопорошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей/ Масрур Мирзохонович Гуломов// Дис. . . .д-ра тех.наук., Душанбе, 2021г. в двух томах (том 1-273стр. и том 2-163стр.).

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СИСТЕМЫ ЖИДКОГО ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО УГЛЕРОДА И БЕНЗОЛА

Сафарова Ф.А.,\*<sup>1</sup> Тиллоева Т.Р.,<sup>2</sup> Собиров Д.Ф.,<sup>3</sup> Зайниддинов Д.Р.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>ТТУ им. акад. М.С.Осиими, Душанбе, Таджикистан, <sup>3</sup>БГУ им. Н.Хусрава, Бохтар, Таджикистан, <sup>4</sup>ТУТ, Душанбе, Таджикистан

\*mahmad1@list.ru

В работе приводится обзор выполненных исследований, опубликованных до 1976 г. по теплопроводности бензола [1]. Затем следующими учеными-теплофизиками было проведено экспериментальное измерение теплопроводности газообразного и жидкого бензола на линии насыщения, которое опубликовано в работах [2-5].

Для численных расчетов и составления физической и математической моделей и технологического процесса необходимо знать теплофизические свойства растворов в зависимости от температуры и давления [6]. Жидкий четыреххлористый углерод (тетра-хлорметан) [5] принадлежит к числу жидкостей с наименьшими значениями тепло-проводности и с этой точки зрения удобен для градуировки приборов, особенно когда объектами исследования являются фреоны. С четыреххлористым углеродом (тетрахлор-метаном) можно работать в диапазоне температур от 250 до 350К без повышения давления [5]. Подобно толуолу четыреххлористый углерод (тетрахлорметан) обладает и другими достоинствами: он не токсичен, не агрессивен, может быть сравнительно легко очищен. Теплопроводность жидкого четыреххлористого углерода (тетрахлорметана) изучена достаточно хорошо [5]. Эти экспериментальные данные [5] получены методом плоского слоя, коаксиальных цилиндров, сферического слоя, двумя вариантами, методом нагретой проволоки. Теплопроводность жидкого четыреххлористого углерода (тетра-хлорметана) в зависимости от температуры и давления представлена в [6]. В данной работе также приведены эмпирические уравнения, которые получены авторами.

Экспериментальная часть. Для исследования теплопроводности наножидкостей при высоких параметрах состояния нами была разработана и собрана экспериментальная установка, работающая по методу нагретой нити, на что был получен малый патент РТ №ТJ 923 [2]. В предлагаемом нами устройстве (Патент РТ №ТJ 923), подключенном к устройству с изоляцией (МГУ, филиал МГУ г. Душанбе), мы добавили пережимной сосуд и гидравлический нанос, позволяющее измерять теплопроводность растворов под давлением и в зависимости от температуры. Устройство, в основном, состоит из вакуумного насоса, манометра и измерительной ячейки (стеклянная). Ячейка заполняется исследуемой наножидкостью. Для создания и измерения давления наножидкости экспериментальная установка снабжена пережимным сосудом высокого давления. Подробное описание и схема экспериментальной установки приведены в приложении диссертации. Общая относительная погрешность измерения теплопроводности наножидкостей этим методом при доверительной вероятности = 0,95 равна 4,2%. Достоверность данных по теплопроводности наножидкостей, полученных предлагаемым методом и установкой, была проверена контрольным измерением. В качестве контрольного образца использованы толуол, бензол и воздух. Результаты полученных данных по контрольным образцам в пределе погрешности опыта (до 3%) совпадают с литературными данными (Патент РТ №ТJ 923) [2].

Результаты исследования. Результаты исследования теплопроводности смесей системы бензола и четырех-хлористого углерода (тетрахлорметана) в зависимости от температуры показали, что повышение массовой концентрации (четыреххлористого углерода) приводит к уменьшению теплопроводности. На основе теории подобия и экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых растворов получен ряд аппроксимационных зависимостей. Полученные аппроксимационные зависимости дают возможность рассчитать

теплопроводность исследуемых растворов, в данном случае нет необходимости проводить опыты [7].

1. Теплопроводность жидкостей и газов. / Н.Б.Варгафтик, Л.П.Филлипов, А. А. Тарзи-манов, Е.Е.Тоцкий.М.: Издательство стандартов.1978. - 723 с.
2. Габулов, Д.М. Теплопроводность органических соединений при высоких давлениях. Автореф. дис. . . . . к.т.н., Грозный, 1978.-21с.
3. Kashiwagi, H., Oishi M., Tanaks Y., et. al. // Int. J. Thermophysics.- 1982,-vol.3.- №2.-р.101-116.
4. Li, S.F.Y., Maitland G.S., Wakeham W.A. // Int. J. Thermophysics.- 1984,-vol.5.- №4.-р.351-365.
5. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов./ Н.Б.Варгафтик, Л.П. Филлипов, А.А. Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий, Энергоатомиздат. М.;-1990.- 352с.
6. Palavra, A.M.F., Wakeham W.A., Zalaf M. //Int. J. Thermophysics.- 1985,-vol.4.- №5.-р.427-438.
7. Гуломов, М.М. Влияние углеродных нанотрубок и нанопорошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей/ Масрур Мирзохонович Гуломов// Дис. . . .д-ра тех.наук., Душанбе, 2021г. в двух томах (том 1-273стр. и том 2-163стр.).

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

*Тиллоева Т.Р.,<sup>\*1</sup> Гортышов Ю.Ф.,<sup>2</sup> Абдуджалилзода Ф.,<sup>3</sup> Сафаров М.М.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ТТУ им.акад. М.С.Осимми, Душанбе, Таджикистан, <sup>2</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия, <sup>3</sup>ТГПУ им. С.Айни, Душанбе, Таджикистан

*\*mahmad1@list.ru*

Проблема использования солнечной энергии, которая являлась предметом изучения отдельных исследователей, сегодня привлекает пристальное внимание всей общественности (ученых, государственных деятелей, и т.д.). Это объясняется конечным запасом ископаемого топлива и заставляет задуматься над получением энергии будущего [1-5]. Кроме того, в последние годы остро встал вопрос о защите окружающей среды. Солнечная энергия практически вечный и потенциальный огромный источник энергоснабжения, не вносящий каких-либо загрязнений в окружающую среду. Основные проблемы применения солнечной энергии это высокая стоимость конструкции при использовании, рассредоточенность и дискретность поступления по часам суток, времени года и географическим поясам. Ключевой проблемой применения солнечной энергии является проблема аккумуляции [3,4]. Проблемы получения наноматериалов и применения их в различных областях современной науки и техники, энергетики, электроники, машиностроения, биологии и медицины являются, безусловно, актуальными, а также весьма актуальными являются задачи исследования теплофизических свойств межчастичных взаимодействий, ориентационных эффектов, развивающихся в коллоидных водных растворах наносеребра и теплоносителях с внедрением в них различного количества наночастиц (ОСУНТ, МСУНТ,  $C_{60}$  и  $C_{70}$ ) под действием давления, температуры и концентрации нанонаполнителей. Весьма большое теоретическое значение представляет собой комплексное исследование теплофизических свойств наноматериалов, что связано с фундаментальными физико-химическими проблемами [2,4,7].

Для исследования теплофизических свойств исследуемых растворов, как в чистом виде, так и содержащих различное количество наночастиц нами использованы численные методы (модель профессора Г.Н. Дульнева, Максвелла, Монте-Карло и др.). Образцы, вода как в чистом виде, так и с внедрением наночастиц серебра, ОСУНТ и МСУНТ,  $C_{60}$

и  $C_{70}$  используются в качестве теплоносителей для солнечных коллекторов нового поколения [6,7]. Кроме того, для численных расчетов для исследуемых растворов (плотность) при различных температурах и давлениях с использованием уравнения типа Тейта рассчитана плотность этих растворов [9,10]. В связи с этим, зная коэффициент теплопроводности, плотности и теплоемкости растворов при различных температурах и давлениях нами рассчитана температуропроводность исследуемых растворов в этих диапазонах [10,11,13]. На поверхность коллектора, обращенную к солнцу, наносится селективное покрытие. Эта поверхность способна обеспечить практически полное поглощение солнечных лучей. Остальные поверхности коллектора, на которые не попадают солнечные лучи, теплоизолируются. Резервный аккумулятор также тщательно изолируется. Такой резервуар устанавливается над коллектором, чтобы обеспечить максимальную циркуляцию теплоносителя. Эффективность солнечного плоского коллектора определяется как [6,13], коэффициент полезного действия солнечных коллекторов. Для решения дифференциальных уравнений первого и второго порядка, которые численно позволяют определить тепловой баланс, входят вышеперечисленные теплофизические характеристики, т.е. коэффициент теплопроводности, теплоемкости, плотности и температуропроводности. Поэтому, зная тепловые процессы в солнечных батареях, можно определить коэффициент полезного действия этих батарей [8-12].

1. Бринкворт, Б.Дж. Солнечная энергия для человека: М.: Мир, 1976.-278с.
2. Берковский, Б. М., Кузьмин В.А. Возобновляемые источники энергии на службе человека. М.: Наука, 1987.- 125 с.
3. Богословский, В.Н. Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1983. -122 с.
4. Даф, Дж. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М: Мир, 1971.- 420 с.
5. Кириллин, В.А. Энергетика. Главные проблемы. М.: Знание, 1990. -121с.
6. Тиллоева, Т.Р. Теплофизические и термодинамические свойства коллоидного водного раствора наносеребра. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, Душанбе, 2016,-164с.
7. Дмитриев, А.С. Введение в нанотеплофизику /А.С. Дмитриев. М.: Изд. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015.- 792 с.
8. Дмитриев, А.С., Клименко А.В. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор). Теплоэнергетика. 2020. № 2. -С. 1–16.
9. Сафаров, М.М. Модифицированное уравнение Тейта для расчета теплопроводности простых эфиров ИФЖ, Т.66, №6, 1994, Минск,- С.721-724
10. Сафаров, М.М. Уравнение состояния жидких простых эфиров на основе данных по теплоемкости ИФЖ, Т.68, №4, 1998, Минск,- С.321-329

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ТРЁХЭЛЕКТРОДНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Эмиров Р.М.,\* Гаджимагомедов С.Х., Рабаданова А.Э., Алиханов Н.М.-Р.,  
Фараджеев Ф.Ш.

ДагГУ, Махачкала, Россия

\*aderron@mail.ru

Магнитные наночастицы обладают уникальными электромагнитными свойствами, которые делают их полезными во многих областях, включая медицину, энергетику, электронику, катализ и очистка окружающей среды [1]. Существует различные методы синтеза магнитных наночастиц, включая электрохимическое получение, химический осаждение, гидротермальный синтез и механическое измельчение [2].

В работе исследованы структурные и текстурные характеристик магнитных наночастиц, полученных электрохимическим методом в трехэлектродной ячейке. Структурно-фазовый анализ показал наличие, в полученном порошке, кубической фазы магнетита ( $Fe_3O_4$ ) (пространственная группа  $Fd-3m$ ) с параметрами ячейки  $a=8.4050\text{Å}$ . Средний размер кристаллитов, вычисленный по формуле Шеррера, равен примерно 25 нм.

Методом низкотемпературной адсорбции – десорбции азота определены текстурные характеристики магнетита. Полученный нами нанопорошок имеет удельную поверхность  $19,5\text{ м}^2/\text{г}$ , что во много раз больше, чем у природного магнетита -  $1,78\text{ м}^2/\text{г}$  [3]. Высокое значение удельной поверхности, полученного нанопорошка может сказаться на величине максимальной сорбционной емкости.

Работа выполнена в рамках гранта Главы Республики Дагестан 2022 г.

1. Shukla S.et al. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles, and their applications in wastewater treatment: A review //Environmental Technology and Innovation. – 2021. – Т. 24. – С. 101924.
2. Koo K. N. et al. Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite ( $Fe_3O_4$ ) nanoparticles: A short review //Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2019. – Т. 15. – №. 1. – С. 23-31.
3. Мартемьянов Д. В., Галанов А. И., Юрмазова Т. А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов  $As^{5+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Ni^{2+}$  из водных сред //Фундаментальные исследования. – 2013. – №. 8-3. – С. 666-670.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ  
СПЕКТРАЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ В ИК ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

*Дрей М.И.,\* Костановский А.В., Пронкин А.А., Зеодинов М.Г.,  
Костановская М.Е.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*DreyMI@mpei.ru*

В промышленных и энергетических установках, функционирующих при высоких температурах, изучение теплообмена играет ключевую роль. При повышении температуры увеличивается доля теплового излучения в тепловом балансе. Радиационный теплообмен зависит от оптических свойств материалов, участвующих в этом процессе. При аналитическом исследовании радиационных свойств возникает ряд трудностей. Поэтому экспериментальное исследование радиационных свойств является необходимым.

В настоящее время актуальные данные о радиационных характеристиках тугоплавких материалов в широком температурном и спектральном диапазоне найти проблематично. Поэтому необходимо создание установки для определения интересующих свойств.

Предлагаемая экспериментальная установка состоит из интегрирующей сферы с диффузно отражающим золотым покрытием, внутри которой располагается исследуемый образец, источником зондирующего излучения является CO<sub>2</sub> лазер ИЛГН-705, регистрация излучения в ИК диапазоне длин волн осуществляется болометром БП-2, для нагревания образца используется метод лазерного нагрева с применением RL-400, измерение температуры поверхности образца производится яркостным ИК пирометром.

При разработке установки был проведен анализ различных методов измерения с целью выбора оптимального подхода для данной задачи, учитывая особенности условий. В результате был выбран и применен наиболее подходящий метод измерения отражательной способности. Проверка надежности полученных результатов проводилась при использовании образцов тугоплавких материалов с известными радиационными свойствами. Полученные данные свидетельствуют о надежности методики и правильности работы установки, следовательно, возможности проведения экспериментов по определению отражательной способности тугоплавких материалов.

**ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОДА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ  
ПРОЦЕССОВ ПРИ АКТИВИРОВАННОМ ВСКИПАНИИ ЖИДКОСТИ В  
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ**

*Котов А.Н.,\* Старостин А.А., Скрипов П.В.*

*ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*artem625@mail.ru*

Нарушение кратковременного устойчивого состояния перегретой жидкости может быть вызвано различного рода воздействиями, например, локальным нагревом, локальным механическим ударом или мощным импульсным электромагнитным полем. Для исследования динамики фазового перехода в перегретой жидкости была разработана новая методика и экспериментальная установка. Методика основана на применении мощного импульсного лазерного излучения, позволяющего локализовать фазовый переход в заданном объеме вещества с жесткой временной синхронизацией. [1]. Разработанная установка

позволяет произвести активацию вскипания н-пентана, равномерно перегретого в миниатюрной пузырьковой камере. На исследуемую жидкость подавалось внешнее воздействие низкоэнергетическими лазерными импульсами, создаваемыми на конце световода со следующими характеристиками: длина волны излучения 1530 нм, длительность от 1 до 8 нс, мощность от 1 до 30 Вт. Иницированное вскипание н-пентана может быть получено в широком диапазоне перегретых состояний, в температурном диапазоне от 45 до 105 К при атмосферном давлении. При достижении пороговой интенсивности лазерных импульсов хаотический процесс вскипания переходит в управляемый режим. В зависимости от температуры жидкости, длительности импульса и индивидуальных свойств торца волокна пороговая интенсивность импульса, необходимая для активации кипения, изменялась в широком диапазоне 0,01–10 МВт/см<sup>2</sup>. В докладе будут продемонстрированы разработанная установка и результаты применения импульсной лазерной активации кипения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00115, <https://rscf.ru/project/19-19-00115/>.

- 
1. Kotov, A.N.; Gurashkin, A.L.; Starostin, A.A.; Skripov, P.V. // Int. Phen. and Heat Transfer A. 2022. V. 10. No. 3. P. 10.

## ОПТОВОЛОКОННАЯ ТЕРМОРЕФЛЕКТОМЕТРИЯ МАЛЫХ ОБРАЗЦОВ В УСТАНОВКЕ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Старостин А.А.,\*<sup>1</sup> Котов А.Н.,<sup>1</sup> Шангин В.В.,<sup>1</sup> Бобин С.Б.,<sup>2</sup> Лончаков А.Т.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ИТФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, <sup>2</sup>ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*astar2006@mail.ru*

Исследования термооптических и магнитооптических свойств позволили неразрушающим способом провести обширные исследования полупроводниковых материалов. В частности, исследуются явления термоотражения и магнитоотражения на поверхности образца. Развитие методики измерения термоотражения [1] для применения в установке с источником сильного магнитного поля предлагается по аналогии обозначить как измерение «магнитотермоотражения». Специфика установок сильного магнитного поля заключается в закрытой конструкции с охлаждением сверхпроводящего соленоида до температуры жидкого гелия. В этих условиях практически единственным вариантом оптического интерфейса может быть оптоволокно. В такой оптической схеме, в зазоре между торцом волокна и поверхностью образца, образуется низкодобротный интерферометр Фабри-Перо, что выражается в колебаниях сигнала при изменении зазора с периодом полволны зондирующего излучения. Рабочая точка интерферометра подстраивалась перед проведением очередного измерения на середину линейного участка с наибольшей крутизной с помощью пьезоэлектрического актюатора. В результате удалось достигнуть чувствительности около 5 мВ/нм. Экспериментально показана [2] возможность оценки температуропроводности металлических материалов по измеряемой термодформации поверхности. В случае полупроводниковых образцов ситуация может быть сложнее при изменении комплексного показателя преломления при перестройках электронной структуры. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00789, <https://rscf.ru/project/22-29-00789/>.

- 
1. Starostin A.A., Shangin V.V., Lonchakov A.T., Kotov A.N., Bobin S.B. // Annalen der Physik. 2020. V. 532. No. 8 P. 1900586.
  2. Kotov A.N., Starostin A.A., Gorbatov V.I., Skripov P.V. // Axioms. 2023. V. 12. No. 6. P. 568.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СЕДИМЕНТАЦИИ

*Джамбулатов Р.С.*

<sup>1</sup>КНИИ РАН, Грозный, Россия, <sup>2</sup>ЧГУ, Грозный, Россия

asldzam@mail.ru

Измерение поверхностного натяжения суспензии существенно затруднено из-за влияния на измеряемую величину поверхностного натяжения процесса седиментации. Седиментация частиц твердой фазы суспензии, приводит к временной зависимости поверхностного натяжения. В зависимости от метода измеряемое значение поверхностного натяжения со временем увеличивается или уменьшается, что приводит к недостоверности получаемых результатов. Для решения этой проблемы нами разработана новая методика измерения поверхностного натяжения суспензии, которая практически исключает влияние седиментации частиц бентонита на величину поверхностного натяжения. Суть предложенной методики заключается в том, что измерения поверхностного натяжения суспензии бентонита проводятся двумя способами: методами висячей и лежащей капли. Поскольку в предлагаемых методах, процесс седиментации разнонаправлен относительно поверхности, то усреднение результатов, полученных разными методами (висячей и лежащей капли), приводит к значительному снижению погрешности измерения поверхностного натяжения, обусловленной седиментацией. Для апробации предложенной методики определены временные зависимости поверхностного натяжения водных суспензии бентонитов методами висячей, лежащей капли, а также и усредненные значения поверхностного натяжения этих суспензии. Показано, что средние значения поверхностного натяжения практически не зависят от времени образования капли, что указывает на то, что предложенная методика позволяет нивелировать влияние процесса седиментации на измеряемую величину.

## БОМБОВЫЙ КАЛОРИМЕТР СГОРАНИЯ С ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

*Иноземцев Я.О.,\* Иноземцев А.В., Воробьев А.Б., Матюшин Ю.Н.*

*ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия*

\*vectr1@yandex.ru

Разработан, изготовлен и испытан бомбовый калориметр с изотермической оболочкой, имеющей предел допускаемого относительного среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности калориметра типа МХ-2 величиной 0,05%, при калибровке навеской с массой 0,4 г бензойной кислоты К-3. Калориметрическая бомба 300 кубических сантиметров от серийного калориметра АБК-1В. что позволяет использовать прибор для сжигания горючего газа, в том числе и по авторской методике [1].

Бомбовые калориметры сгорания служат для определения удельной энергии сгорания твердых, жидких и газообразных топлив, в том числе природного газа промышленного и коммунально-бытового назначения, а также для определения энтальпий образования индивидуальных органических и элементоорганических соединений [2]. Калориметры применяются для контроля качества порохов, пиротехнических изделий и ракетных топлив. Сжигание проводится в кислороде, вакууме или в инертной среде при различных давлениях.

Для работы калориметра не требуется внешний термостат и охлаждающая вода. Номинальная температура термостатирования оболочки может быть изменена в зависимости от величины измеряемого тепловыделения и температуры лабораторного помещения. Испытания калориметра подтвердили, что предложенная конструкция обеспечивает высокую



чувствительность и стабильность температурных измерений. Энергетический эквивалент калориметра измеряется с относительной расширенной неопределенностью до 0,04% при тепловыделении около 5 кДж, 0,02% при тепловыделении около 10 кДж, 0,015% при тепловыделении порядка 26 кДж [3].

1. Иноземцев А. В., Иноземцев Я. О., Воробьев А. Б. Измерение теплот сгорания природных горючих газов в калориметре сжигания с бомбой // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 2. С. 24–30. DOI: 10.30826/CE18110204.
2. Иноземцев Я. О., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Матюшин Ю. Н. Калориметрия энергоемких соединений. // Горение и взрыв. 2014. №7. С. 260–270.
3. ГОСТ Р 8.789-2012. Калориметры сжигания с бомбой. Методика поверки. М.: Стандартинформ 2014.

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

*Гусейнов Г.Г.*

*ИФ ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия*

*guseinovgg@mail.ru*

Для науки и производства нужны данные по теплопроводности для новых объектов, в широком интервале температур и давлений. Предлагается устройство для измерения теплопроводности относительным стационарным методом плоского слоя, позволяющее исследовать теплопроводность электролитов, пористых сред, насыщенных флюидов, наноразмерных жидких систем в широком интервале температур и давлений, включая области фазовых переходов второго рода и критических точек растворимости. В устройстве, использованы стандартные материалы теплопроводности: сталь 12X18H10T, оптические кварцевые стекла КВ, КИ, органическое стекло. Основными частями предлагаемого устройства, является изготовление тонкостенных металлических стаканов из стали 12X18H10T, с толщиной стенки в 100 микрон, толщиной дна в 2500 микрон, и высотой, равной 30000 микрон. Тонкостенный стакан, с выставленным определенным зазором, одевается на цилиндр, и заваривается к ней. Получаем ячейку для измерения теплопроводности веществ, содержащую полость. Устройство содержит две ячейки, одна с полостью, для исследуемого вещества, другая с полостью, где размещается образцовый материал теплопроводности. Между ячейками находится рабочий нагреватель, который создает однородное температурное поле в обеих ячейках. В полости нижней ячейки, содержится исследуемое вещество, а в полости верхней ячейки располагается эталонный, образцовый материал теплопроводности. Ячейки, с размещенным между ними нагревателем, плотно прижимаются друг к другу. При измерении теплопроводности, тепло выделяемое нагревателем проходит через слои исследуемого вещества нижней ячейки, и через верхнюю ячейку, где расположен эталонный, образцовый материал теплопроводности. Принцип работы устройства таков: тепло выделяемое нагревателем, распространяется через верхнюю и нижнюю ячейки и, создает градиенты температуры на слое исследуемого образца и образцового материалах. Зная геометрические параметры исследуемого образца, теплопроводность образцового материала, количество теплоты выделенное, внутренним нагревателем, и используя формулу Фурье для плоского метода измерения теплопроводности, можно определить теплопроводность исследуемого материала. Относительный метод измерения теплопроводности прост в конструкции устройства, сокращает время проведения измерения.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ВЕЩЕСТВ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Яруллин Л.Ю.,\* Хайрутдинов В.Ф., Габитов Ф.Р., Ахметзянов Т.Р.,  
Сабирова Л.Ю.*

*ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия*

*\*yarul.lenar@gmail.com*

Представлена экспериментальная установка по измерению растворимости веществ в сверхкритическом CO<sub>2</sub> динамическим методом, в том числе, с возможностью добавления к основному растворителю — CO<sub>2</sub> — соразтворителя. Разработана новая методика определения массового количества сверхкритического диоксида углерода, прошедшего за эксперимент, являющегося важным при определении растворимости.

Получены согласующиеся с литературными экспериментальные данные растворимости дифенила в сверхкритическом диоксиде углерода при различных параметрах температуры и давления.

Экспериментальная установка в будущем позволит получать новые экспериментальные данные по растворимости широкого спектра веществ в сверхкритическом диоксиде углерода, а также в сверхкритическом диоксиде углерода с различными органическими растворителями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В КАВИТИРУЮЩЕЙ СТРУЕ

*Перетьяк В.В.,\*<sup>1</sup> Кизяева Э.С.,<sup>2</sup> Бирюков Д.А.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>МЭИ, Москва, Россия*

*\*peretyatkovika2001@gmail.com*

Прокачивая жидкость через сужающее устройство с наименьшим сечением около 1 мм можно наблюдать свечение этой жидкости. Определение температуры и скорости в кавитирующей струе позволит лучше задать граничные условия для расчетов параметров светящихся областей. Эксперименты проводились на модельной жидкости – воде с целью отработки методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Установка представляет из себя замкнутый контур, состоящий из насоса и сужающего устройства. Сужающее устройство выполнено из прозрачного оргстекла. В конце сужающего устройства установлен термопарный зонд, перемещение которого осуществляется в автоматическом режиме шаговыми двигателями. В экспериментах перепад давления составлял 60 атм. На воде при таком перепаде в сужающем устройстве возникает еле заметное свечение, но его наличие не влияет существенно на получаемые результаты.

Измерение скорости высокоскоростной камерой ранее верифицировалось с результатами, полученными при помощи ПО ActualFlow, где распределения скорости в кавитирующей струе определялось методом цифровой трассерной визуализации. В нашем случае в качестве частиц используются пузырьки воздуха. Полученные результаты распределения полей скоростей хорошо совпадают с результатами [1], где указывается, что форма кавитирующей струи непостоянна. Сначала край струи разрушается, а затем рассеивается

вниз по потоку, причём скорость рассеивающейся области выше, чем скорость основной струи.

Распределение температур проводилось в нескольких сечениях вдоль канала. В центральной части канала температура оказывалась меньше чем по краям, однако перепад несущественный и скорее всего может объясняться неточностью эксперимента, однако он наблюдается постоянно и возможно является неким подобием эффекта Ранка(-Хилша). Экспериментально получены распределения скоростей и температуры в кавитирующей струе. Обнаружены отрывные потоки, скорость которых превышает скорость кавитирующей струи. Температура жидкости на оси меньше чем на периферии в кавитирующей струе.

- 
1. Soyama H.. Luminescence intensity of vortex cavitation in a venturi tube changing with cavitation number // Ultrasonics Sonochemistry 2021.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПРИ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОМ СВИНЦЕ

*Волков В.И.,\* Бирюков Д.А.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*wol4aravolkov@yandex.ru*

Исследование жидкометаллической конвекции в замкнутом объёме актуально как с фундаментальной точки зрения, так и с прикладной, все большее количество энергетических установок планируют создавать на жидких металлах, например на территории Сибирского химического комбината возводится опытно- демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) в составе энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем.

Тематика экспериментального исследования и моделирования термогравитационной конвекции жидких металлов достаточно популярна. Одни из исследований проводили Zwirner L. et al Zwirner:2022 используя GaInSn – сплав с составом 68,5% галлия, 21,5% индия и 10% олова. В исследовании скорость потока измеряется с помощью ультразвуковой доплеровской velocиметрии, которая является признанным методом измерения непрозрачных жидкостей, таких как жидкие металлы. Подобные системы ввиду своих конструктивных особенностей не применимы в работах температура поверхности которых превышает 400°C. Для определения значений скоростей в высокотемпературных непрозрачных средах предлагается использовать корреляционный инвазивный метод. В настоящей экспериментальной работе за основу рабочего участка была взята труба из 08X18H10T размерами 80x80x3 мм. Высота рабочего участка составила 1100 мм. К противоположным длинным сторонам трубы подводится и отводится тепловая мощность. Подведение мощности осуществляется керамическим электронагревателем, охлаждение – воздухом. Через порт в верхнем фланце трубы осуществляется погружение термопарного зонда в расплав свинца.

В ходе проведения эксперимента удалось довести температуру горячей стенки до значений 440°C, температуру холодной стенки – 400°C. Используя термопарный корреляционный зонд было установлено возникновение устойчивого вихря по всей длине экспериментального канала.

- 
1. Zwirner L. et al. //Journal of Fluid Mechanics. 2022. Т. 932.

## ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВОЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ.

*Благонравов Л.А.,\*<sup>1</sup> Карчевский О.О.,<sup>2</sup> Ларюшин Т.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>МГУ, Москва, Россия, <sup>2</sup>ООО АСТ, Москва, Россия

\**blagonravovla@mail.ru*

Дискуссионная тема о возможности фазового перехода второго рода в жидких металлах послужила в своё время поводом для развития методов измерения термодинамических коэффициентов. В 1995 году нами был предложен компенсационный метод прямых измерений коэффициента теплового расширения (КТР) проводящих жидкостей с применением двойной модуляции [1]. Метод довольно сложный в применении его к жидким металлам, поэтому для отработки оптимальных режимов измерений было предложено использовать этот метод также для измерения КТР диэлектрических жидкостей с использованием вспомогательного проводящего твердого образца. В последние годы была проведена модернизация установки для измерения КТР непроводящих жидкостей. Существенное изменение заключалось в замене генератора периодической составляющей давления. Это позволило значительно сократить присутствие высших гармоник в сигнале модулятора давления и, следовательно, в сигнале температурного отклика. Была существенно улучшена точность измерения КТР. Тестовые измерения проводились на образце с тяжёлой водой с целью испытания возможностей установки при работе с предельно малыми сигналами. Для этого измерения проводились в температурной области, в которой D<sub>2</sub>O имеет максимальную плотность, а КТР, соответственно, значение, близкое к нулю. В этом случае компенсация осуществлялась в режиме сложения сигналов, а не в противофазе. Полученные результаты прямых, относительных измерений КТР тяжелой воды показали прохождение этой величины через минимум с последующим четко выявляемым подъемом при температурах ниже 11,6°С. Полученные результаты согласуются с температурной зависимостью КТР, рассчитанной по прецизионным данным по плотности тяжелой воды.

1. Благонравов Л.А. О возможности измерения коэффициента теплового расширения проводящих жидкостей компенсационным методом с использованием упруготермического эффекта. Письма в ЖТФ. Том 21. Выпуск 24. 26 декабря 1995 г. Стр. 51-54

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

*Михеев В.А.*

*ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева Санкт-Петербург, Россия*

*v.a.mikheev@vniim.ru*

В настоящее время метрологическое обеспечение измерений единиц теплопроводности и теплового сопротивления в РФ обеспечивается Государственным первичным эталоном единиц теплопроводности и теплового сопротивления ГЭТ 59-2016 (хранитель — ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева») и Государственным первичным специальным эталоном единицы теплопроводности твердых тел в диапазоне температур от 2 до 300 К (хранитель — ФГУП ВНИИФТРИ). В основном, используемые рабочие СИ теплопроводности, прослеживаются к ГЭТ 59-2016, который возглавляет поверочную схему по ГОСТ 8.140-2009 и состоит из комплекса следующих СИ: 1. Установка А1. 2. Установка А2. 3. Установка А3. 4. Установка А4. 5. Установка А5. 6. Набор мер однозначных и многозначных для воспроизведения единицы, передачи её размера и контроля стабильности эталона. В рамках

рабочей группы WG9 с 2007 по 2010 были проведены пилотные сличения по теплопроводности в диапазоне от 0,03 до 0,05 Вт/(м·К) при температуре от 10°C до 40°C, в которых приняла участие и Россия (ВНИИМ). Результаты измерений, полученные NIST, NPL, LNE и ВНИИМ совпали в пределах 1,2%. Расхождения между остальными участниками сличений доходили до 6%. В 2010 г. ВНИИМ в рамках КООМЕТ провел международные сличения по теплопроводности с Казахстаном. Расхождение результатов измерений не превысило 1%. В 2012 г. в международных сличениях в рамках КООМЕТ также смогла принять участие и Республика Беларусь. Расхождение результатов измерений между тремя странами не превысило 0,5%.

**КОНДЕНСАЦИЯ ПО СКВАЖИНЕ ВЛАЖНОГО ПАРА И  
АППРОКСИМАЦИИ ЕГО СВОЙСТВ**

*Алишаев М. Г.,\* Аливердиев А. А.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*alishaev@rambler.ru*

Паротепловое воздействие на пласт применялось на месторождении Оха (Сахалин). Выбирались пласты высокой проницаемости (до 1500 мД) и пористости (около 27%). Опыт промышленного вытеснения битуминозной нефти паром был продолжен на месторождении Каражанбас в Казахстане. Подтвердилось высокая нефтеотдача, до 52%. Существующие на сегодня промышленные установки генерации пара позволяют достичь температур до 200 °С и расхода массы пара до одной сотни тонн в сутки. При нагнетании пара от устья до забоя он обычно влажный, происходит конденсация пара, выделяется доля теплоты фазового перехода, эта доля не доставляется в пласт. Она отдаётся частично горной породе, часть её идёт на восстановления температуры потока пара вниз.

Наиболее сложная проблема при применении пара, это температурные потери из-за его оттока тепла в горную породу, которые в обычных условиях достигают до 10% на каждые 100 м вглубь скважины. При глубинах скважин 500 м и более потери тепла приводят к полной конденсации пара, теплота фазового перехода достаётся горной породе, а не пласту. Это заметно снижает эффективность нагнетания пара. Тем не менее, методу вытеснения паром эксперты отводят роль основного, наиболее рационального способа извлечения высоковязкой тяжёлой нефти. Методики теплоизоляции и расчётов пока мало разработаны, споры по применению пара ещё продолжаются.

В докладе предложены удобные аппроксимации от температуры и давления свойств влажного пара. Устанавливается зависимость свойств от сухости пара. Предлагается математическое описание снижения сухости пара и его температуры по стволу скважины, и пренебрегается изменением давления. Оценивается снижение сухости пара от устья до забоя для различных величин массового расхода пара.

**КОНФОРМАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ МОЛЕКУЛЫ САХАРОЗЫ В  
ВОДНОМ РАСТВОРЕ**

*Дещеня В. И.,\*<sup>1,2</sup> Кондратьев Н. Д.<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>2</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия, <sup>3</sup>НИУ ВШЭ, Москва,  
Россия

*\*deshchenia.vi@phystech.edu*

Изучение структурных характеристик молекулы сахарозы в воде имеет практическое значение для ряда задач. Конформация молекул и образование водородных связей определяют свойства продуктов в пищевой промышленности, а также возможность стабилизации белка в растворе, что важно для фармацевтической области.

Экспериментальное изучение конформации сахарозы в водном растворе является сложной задачей из-за быстрых структурных изменений. Эффективным инструментом для таких исследований является метод молекулярной динамики. Однако он требует подходящего для системы потенциала, а поиск такового для растворов углеводов ведется до сих пор [2]. За последние пять лет были предложены несколько потенциалов, которые

аккуратно воспроизводят взаимодействия в водных растворах моно-, ди- и полисахаридов [2–4].

В работе используется потенциал, который показал хорошую воспроизводимость экспериментальных коэффициентов диффузии и вязкости [4], для исследования конформаций молекулы сахарозы в водном растворе. Было показано наличие нескольких устойчивых конформаций гликозидной связи, что согласуется с более ранними расчетными работами [5]. Показано, что наиболее стабильная конформация ближе всех находится к кристаллической [1], что подтверждается экспериментальными данными [6]. Для каждой конформации рассчитаны времена жизни и выявлены водородные связи, стабилизирующие её.

Исследование поддержано Программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение 075–02-2021–1316 от 30.09.2021).

1. Brown G.M., Levy H.A. // *Science*. 1963. V. 141, N. 3584. P. 921–923.
2. Jamali S.H., Westen T., Moulton O.A., Vlucht T.J.H. // *J. Chem. Theory Comput.* 2018. V. 14, No. 12. P. 6690–6700.
3. Lay W.K., Miller M.S., Elcock A.H. // *J. Chem. Theory Comput.* 2016. V. 12. No. 4. P. 1401–1407.
4. Deshchenya V.I., Kondratyuk N.D., Lankin A.V., Norman G.E. // *J. Mol. Liq.* 2022. V. 367. P. 120456.
5. Xia J., Case D.A. // *Biopolymers*. 2012. V. 97, No. 5. P. 289–302.
6. Silva D.G.B., Hallwass F., Navarro-Vázquez A. // *Magn Reson Chem.* 2021. V. 59, No. 4. P. 408–413.

## УНИВЕРСАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПАРНОЙ ЭНТРОПИЕЙ И ВЯЗКОСТЬЮ УГЛЕВОДОРОДОВ

*Кондратюк Н.Д.*,<sup>\*1,2,3</sup> *Писарев В.В.*<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, Москва, Россия, <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия, <sup>3</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия

\*nkondratyuk@hse.ru

Масштабирование между избыточной энтропией и коэффициентами переноса жидкостей – интересное свойство, обнаруженное Розенфельдом. Позже Дзугутов предложил оценивать избыточную энтропию на основе парной энтропии. Было показано, что этот подход хорошо работает для атомарных жидкостей и твердых молекул [1], но существует проблема определения парной энтропии для молекулярных веществ в целом. В данной работе мы предлагаем новый метод оценки парного вклада в избыточную энтропию для углеводородных жидкостей. Расчеты проводятся методом молекулярной динамики. Представлены результаты скейлинга энтропии Розенфельда [2] и вязкостей линейных алканов [3] и ароматических соединений [4, 5] в двух разных силовых полях, подкрепленные сравнением с экспериментальными и корреляционными данными. Показано, что наш метод учитывает 75–90% изменений энтропии в молекулярной жидкости, сравнимых с вкладом парной энтропии в атомарных жидкостях. Для каждого соединения при различных температурах наблюдается универсальная зависимость отмасштабированной вязкости и парной энтропии, показана переносимость между моделями силовых полей.

Работа частично подготовлена в ходе проведения исследования в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).

1. Кондратюк Н.Д., Писарев В.В. // *УФН*. 2023. Т. 193. №. 4. С. 437–461.
2. Nikitiuk B.I., Salikova D.I., Kondratyuk N.D., Pisarev V.V. // *J. Mol. Liq.* 2022. V. 368. P. 120714.
3. Kondratyuk N.D. // *J. Chem. Phys.* 2019. V. 151. P. 074502.

4. Kondratyuk N., Lenev D., Pisarev V. // J. Chem. Phys. 2020. V. 152. P. 191104.
5. Kondratyuk N.D., Pisarev V.V. // Fluid Phase Equilib. 2021. V. 544–545. P. 113100.

## РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЦИКЛАМ ПГУ-КУ

*Паторкин Д.В.*

*МЭИ, Москва, Россия*

*danilpator02@gmail.com*

В данном докладе рассматривается ряд объектов, в том числе: парогазовая установка с котлом – утилизатором (ПГУ-КУ), б) сетевые интерактивные алгоритмы (IS – алгоритмы), которые используются в теплофизических (ТФ) расчетах; последние нацелены на определение энергетических критериев,  $Z = Z_1, Z_2, \dots$ ), которые реализуются в термодинамическом цикле ПГУ-КУ при оптимальных граничных условиях,  $Y = (Y_2, Y_3, \dots)$ , здесь  $Z_1$  – электрический КПД,  $Z_2$  – внутренний КПД,  $Y_2$  – температура на входе в блок газовых турбин (ГТ),  $Y_3$  – степень повышения давления в компрессорном блоке. IS-алгоритм позволяет также вычислить свойства,  $R = (v, h, s \dots)$ , рабочих тел в заданных точках цикла ПГУ-КУ. Цель нашего исследования состоит в разработке рекомендаций и методических подходов как для схемной модернизации, так и для параметрической оптимизации режимов работы ПГУ-КУ; указанная оптимизация должна опираться на информационные технологии (IT технологии) и обеспечить улучшение как энергетических, так и экологических критериев этих установок (например, повышения КПД  $Z_2$  для блока ГТ за счет мер по модернизации базовой теплосиловой схемы). Для достижения поставленной цели необходимо решить некоторые задачи, среди них отметим следующие. В рамках задачи 1 формируется два IS-алгоритма, которые представляют методическую основу для определенного программного обеспечения (ПО); это ПО должно иметь форму открытых сетевых инструментов (IS-инструменты), а также опираться на IT технологии и ряд пакетов (Mathcad, SMath, CoolProp, Python и др.). В рамках второй задачи данное ПО применяется пользователем для ТФ расчетов, которые связаны: а) со свойствами,  $R = (v, h, s \dots)$ , рабочих тел и б) с критериями,  $Z$ , установки ПГУ-КУ. В итоге разработанные IS-инструменты доставили: а) свойства,  $R$ , рабочих тел в заданных точках цикла и б) критерии,  $Z$ , установки ПГУ-КУ, в том числе электрический КПД,  $Z_1 = (48, 1 \dots 48, 7)\%$ .

1. Очков В. Ф. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2023.— 212 с.



═══════════      **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**      ═══════════  
**МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**БАЗА ДАННЫХ ГК «РОСАТОМ» ПО СВОЙСТВАМ  
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ**

**Чусов И.А.,\*<sup>3</sup> Обысов Н.А.,<sup>1</sup> Козлов А.Д.,<sup>2</sup> Новиков Г.Е.,<sup>1</sup> Колобаев В.А.,<sup>2</sup>  
Бабаева Ю.А.,<sup>3</sup> Брежнев А.И.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Госкорпорация «Росатом», Москва, Россия, <sup>2</sup>ФГБУ ВНИИМС, Москва, Россия, <sup>3</sup>АНО  
ДПО «Техническая академия Росатома», Обнинск, Россия

\*igrch@mail.ru

В работе излагаются основные сведения о вновь разработанной базе данных по свойствам материалов ядерной техники в части термодинамических и транспортных характеристик жидкометаллических теплоносителей.

В настоящий момент в ядерной энергетике активно используются 13 видов теплоносителей и модельных жидкостей, представляющих собой чистые материалы и их сплавы. Используются как двойные эвтектики, так и тройные. При этом некоторые сплавы представляют собой комбинации совершенно разных веществ, входящих в разные группы элементов таблицы Д.И. Менделеева. Практически все жидкометаллические теплоносители является агрессивными по отношению к конструкционным материалам: контура циркуляции, активной зоны, парогенератора, бассейна выдержки и вспомогательного оборудования.

В базу данных занесены следующие свойства: плотность, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоёмкости, коэффициент динамической вязкости, удельное электрическое сопротивление, местная скорость звука и коэффициент поверхностного натяжения как функция температуры. Всего база данных содержит 769 работ, экспериментального и расчетно-экспериментального характера. Диапазон температур колеблется от температуры плавления до 2400 градусов Цельсия. База содержит примерно 27000 экспериментальных точек полученных различными авторами за период 1885 – 2023 гг. В оценке использовались опытные данные, начиная с 1950 г.

На основании приведенных в базе данных сведений разработана 91 полуэмпирическая зависимость свойств жидкометаллических теплоносителей как функция температуры. Все зависимости являются согласованными, аттестованными и рекомендуемыми (аттестационные паспорта КАСД ГК «Росатом») для проведения конструкторских и технологических расчетов в обоснование безопасности вновь проектируемых и находящихся в эксплуатации реакторных установок.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ К ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ РЕКОМЕНДОВАННЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

*Брежнев А.И.,\* Чусов И.А., Бабаева Ю.А.*

*АНО ДПО «Техническая академия Росатома», Обнинск, Россия*

*\*brezhand@gmail.com*

Основной целью работы ЦДТС (Центр Данных Термодинамических Свойств материалов ядерной техники) ГК «Росатом» является построение согласованных соотношений для расчета физических, термодинамических и транспортных свойств материалов ядерной техники. Одним из основных требований МАГАТЭ к находящимся в эксплуатации и вновь проектируемым реакторным установкам является необходимость разработки системы расчетных кодов обеспечивающих предсказание их поведения при нормальных и аварийных условиях работы, а в ряде случаев и последствий запроектных аварий. Неотъемлемой частью расчетных кодов улучшенной оценки является их константное обеспечение, в частности, расчетные соотношения для определения свойств материалов.

В настоящий момент построение регрессионных соотношений ведется на основании анализа опытных данных, с использованием различной методологии их взвешивания, оценки достоверности, техники проведения эксперимента, чистоты исходного вещества и т.д. При этом используется нелинейный метод наименьших квадратов, основанный на алгоритме типа Левенберга-Марквардта. Результатом этой работы являются полиномиальные или экспоненциальные соотношения, описывающие свойства материалов с той или иной погрешностью.

В настоящем докладе приводятся результаты построения регрессионных соотношений, основанные на теории нечетких множеств, в частности, на методологии интервальной математики. Предметом анализа являлись свойства эвтектики литий-свинец, как наиболее перспективного теплоносителя для термоядерного реактора.

Показано, что в ряде случаев соотношения и их погрешности, построенные с использованием интервальной математики, приводят к более обоснованным, с точки зрения физики результатам, нежели с использованием классического подхода.

## РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ЛЕГКИХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

*Бабаева Ю.А.,\* Чусов И.А., Брежнев А.И.*

*АНО ДПО «Техническая академия Росатома», Обнинск, Россия*

*\*jule4ka-96@mail.ru*

Доклад посвящен обоснованию расчетных соотношений для определения физических, термодинамических и транспортных свойств лития, натрия и калия. Применение этих веществ в качестве теплоносителя для ядерных энергетических установок обусловлено их: термической устойчивостью, высокой температурой кипения и низким давлением насыщенных паров.

На основании анализа экспериментальных результатов приведенных в более чем в 200 открытых печатных работах обоснован вид полуэмпирических соотношений предназначенных для расчета: плотности, коэффициента теплопроводности, коэффициента теплоемкости, коэффициента динамической вязкости, удельного электрического сопротивления, местной скорости звука и коэффициента поверхностного натяжения как функции температуры. Вычислены коэффициенты регрессии.

При построении регрессионных соотношений каждому набору экспериментальных данных присваивался свой вес, определяемый: методологией проведения эксперимента, чистотой исходного материала, диапазоном температур проведения эксперимента и т.д. Регрессионное соотношение, для каждого из свойств, строилось с использованием нелинейного метода наименьших квадратов, основанного на алгоритме типа Левенберга-Марквардта. Температурный диапазон применимости полученных соотношений определялся максимальной температурой проведения эксперимента.

В работе приводятся результаты сравнения вычисленных физических, термодинамических и транспортных характеристик с результатами расчета по соотношениям из общепризнанных справочников, используемых при расчетном обосновании ядерных энергетических установок под ред. проф. П.Л. Кириллова и проф. В.М. Поплавского. Показано, что в большинстве случаев, вновь предложенные расчетные соотношения имеют более широкий диапазон применимости и, по нашим оценкам, более высокую точность расчета.

### **СОВМЕСТНОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЯ МЕТОДАМИ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА**

*Минаков Д.В.,\* Парамонов М.А., Дороватовский А.В., Фокин В.Б.,  
Шейндлин М.А., Левашов П.Р.*

*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

*\*minakovd@ihed.ras.ru*

Будут представлены последние достижения в описании термодинамических, транспортных и оптических свойств твердого и жидкого Zr в широком диапазоне параметров: от окрестности плавления до критической точки, методом квантовой молекулярной динамики (КМД). Основное внимание уделено анализу теплового расширения, энтальпии, удельного сопротивления и нормальной спектральной излучательной способности. Впервые выполнена оценка параметров критической точки циркония первопринципным методом КМД. Рассчитаны зависимости плотности, энтальпии, изобарной и изохорной теплоемкостей, параметра Грюнайзена и скорости звука от температуры вдоль критической изобары.

Также в докладе будут представлены новейшие высокотемпературные экспериментальные данные по высокоскоростному импульсному нагреву электрическим током циркониевых проволок вплоть до 6000 К. Отмечается отличное согласие между измерениями энтальпии и расчетом. Хорошее согласие наблюдается между зависимостью плотности от температуры вдоль критической изобары, полученной в расчете и в эксперименте. Обсуждаются результаты первопринципных расчетов удельного сопротивления для Zr с помощью формулы Кубо–Гринвуда и сравнение с результатами экспериментальных измерений. Впервые представлены *ab initio* расчеты нормальной спектральной излучательной способности Zr вдоль критической изобары.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10398, <https://rscf.ru/project/20-79-10398/>.

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАСПЛАВЛЕННЫХ СМЕСЕЙ FLiNaK–CeF<sub>3</sub>

*Боброва К.О.,\* Докучович В.Н.*

*ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*ksuybobrova@gmail.com*

Расплавленные солевые смеси являются перспективными кандидатами в качестве теплоносителей, растворителей топливных солей и продуктов деления ЖСР, окислительных сред в новых технологиях переработки отходов [1]. В качестве модельной системы для имитации продуктов деления ЖСР была выбрана система FLiNaK–CeF<sub>3</sub>. Поскольку информация о теплофизических свойствах данной системы в литературе отсутствует, целью работы является получение надежных экспериментальных значений коэффициента теплопроводности расплавов FLiNaK–CeF<sub>3</sub> с содержанием последнего компонента 0–30 мол.%.

Коэффициент теплопроводности был измерен стационарным методом коаксиальных цилиндров в никелевом приборе, конструкция которого подробно описана в работе [2]. Зазор между цилиндрами составлял 1 мм. Измерения проводили в интервале температур 500–800 °С с шагом, обеспечивающим не менее семи измерений через промежутки времени, необходимые для термостатирования расплава и выхода в стационарный режим.

Температурные зависимости коэффициента теплопроводности были получены с учётом вклада радиационного теплопереноса, возникающего за счёт переизлучения стенок цилиндров, предполагая прозрачность всех исследуемых расплавов в области 0,5 – 10 мкм. Без его учета значения теплопроводности завышены, и с ростом температуры это завышение увеличивается.

Для всех изученных смесей в широком интервале температур теплопроводность увеличивается с ростом температуры. С увеличением мольной доли фторида церия теплопроводность уменьшается, что, на наш взгляд, связано с процессом комплексообразования, а именно с увеличением содержания комплексных группировок CeF<sub>6</sub><sup>3-</sup>, CeF<sub>7</sub><sup>4-</sup>, CeF<sub>8</sub><sup>5-</sup> [3].

1. Yao Z. // Chemosphere. 2011. 84(9):1167–74.
2. Smirnov M.V., Khokhlov V.A., Filatov E.S. // Electrochimica Acta. 1987. V. 32. No. 7. P. 1019–1026.
3. Zakiryanov D.O. // Journal of Molecular Liquids. 2022. V. 360. 119400.

=====

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОЙ И  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

=====

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА  
CoCrFeNi ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*Куликова Т.В.,\* Быков В.А., Стерхов Е.В., Коваленко Д.А.*

*ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*kuliko@gmail.com*

В отличие от традиционных сплавов, содержащих один или два основных элемента, высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) или многокомпонентные сплавы состоят из четырех и более основных элементов в эквимоллярном или близком к эквимоллярному составу. ВЭС широко изучаются благодаря их замечательным свойствам, таким как выдающиеся механические свойства при повышенных температурах, хорошая коррозионная стойкость и высокая стойкость к облучению. ВЭС могут образовываться однофазные твердые растворы, такие как гранецентрированная кубическая (ГЦК), объемноцентрированная кубическая (ОЦК) или гексагонально-плотноупакованная (ГПУ). Среди многообразия высокоэнтропийных сплавов система CoCrFeNi занимает особое место. В данной системе удастся реализовать однофазное состояние не только для эквиатомного состава, но и для большого количества концентраций. В тоже время для системы CoCrFeNi хорошо изученной с точки зрения механических свойств систематические исследования теплофизических и электрических свойств при высоких температурах не проводились.

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование микроструктуры, плотности, и тепловой проводимости эквиатомного сплава CoCrFeNi в исходном состоянии, полученным электродуговым сплавлением. Согласно проведенному рентгеноструктурному анализу структура исходного сплава представляет собой однофазный твердый раствор на основе ГЦК решетки. Образец демонстрирует тенденцию к образованию столбчатой структуры с преимущественным направлением (200) – т.е. имеют ярко выраженную текстуру.

Структурная стабильность исходного однофазного состояния сплава изучалась методами дилатометрии и дифференциально-термического анализа. Дилатометрический анализ показывает, что исходный сплав остается структурно стабильными до 650 К. На кривых коэффициента линейного термического расширения (КТЛР) наблюдаются два широких минимума. Температура начала первого пика 650 К, а второго пика – 1000 К. Первый пик может быть связан с эффектами ангармонизма поскольку образец обладает текстурой, а также представляют собой неупорядоченный твердый раствор. Второй пик связан с магнитным превращением (переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное) – температура Кюри. Температуры солидус и ликвидус были определены методом ДТА как 1680 К и 1720 К соответственно. Получены данные по температуропроводности, теплоемкости и теплопроводности исходного сплава CoCrFeNi в интервале температур от комнатной до 1300 К методом лазерной вспышки. Кривые температурных зависимостей теплопроводности и температуропроводности нелинейны, наблюдаются изломы при таких же температурах, что и на кривых КТЛР. Абсолютные значения теплофизических параметров с ростом температуры увеличиваются во всем исследованном интервале температур. Значения исследованных теплофизических свойств имеют величины близкие к жаропрочным сплавам типа инконель, которые в частности применяются для изготовления лопаток компрессора авиационных двигателей.

Работа выполнена при финансовой поддержки Российского научного фонда (№ 23–22–

00137)

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ИНЕРЦИИ**

*Лепешкин А.Р.*

*МАИ, Москва, Россия*

*lepeshkin.ar@gmail.com*

Исследование теплопроводности металлических материалов (никелевых сплавов) вращающихся деталей в поле действия центробежных сил инерции имеет важное значение для авиационно-космической техники. В оценке теплового состояния вращающихся деталей (лопаток) турбин используются характеристики теплопроводности, которые были получены в стационарных условиях земного тяготения на ненагруженных металлических образцах. В реальных условиях рабочие лопатки и диски турбин работают при центробежных ускорениях до нескольких десятков тысяч  $g$  и изменение теплопроводности металлических материалов из никелевых сплавов в этих условиях можно ожидать значимым. Влияние сжимающих сил на теплопроводность металлических сплавов ранее исследовалось. В данной работе проведены электронно-инерционные эксперименты (опыты), которые показывают, что ускорения (центробежные силы инерции) оказывают влияние на перемещение свободных электронов в металле при разгоне и торможении.

В данной работе предложена методика определения теплопроводности вращающегося диска из никелевого сплава в радиальном и окружном направлениях в поле действия центробежных сил инерции на разгонном стенде с испытательной вакуумной камерой. В отверстии полотна диска (из никелевого сплава был установлен мини-электронагреватель и термопары на одинаковом расстоянии от отверстия. Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что скорости нагрева материала диска на частотах вращения 2500 и 5500 об/мин возрастают в 1.5 и 2.5 раза соответственно по сравнению со стационарным состоянием без вращения. Причем, в радиальном направлении скорость нагрева возрастает больше, чем в окружном направлении. Полученные экспериментальные данные подтверждают гипотезу автора об эффекте закрученного движения (тока) свободных электронов в этом случае. В исследуемом явлении теплопроводности присутствуют две составляющие: от действия центробежного ускорения и растягивающей центробежной силы. На основе полученных экспериментальных данных о влиянии растяжения вторая составляющая мала и составляет несколько процентов. Таким образом, указанный рост теплопроводности существенно связан с увеличением электронной проводимости в металле при воздействии центробежных сил инерции. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния высокотемпературных деталей (лопаток, покрытий и др.), работающих в поле центробежных сил инерции в авиа-космической технике, энергетике и других отраслях машиностроения.

===== **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТЕЙ,  
ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ, ГАЗОГИДРАТОВ** =====  
**И ПРИРОДНОГО ГАЗА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ СВОЙСТВ НЕФТЕЙ В УСЛОВИЯХ  
РАЗРАБОТКИ ИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ ЗАКАЧКИ  
ВОДЯНОГО ПАРА В ПЛАСТ**

*Базаев А.Р.,\* Базаев Э.А., Османова Б.К.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*emilbazaev@mail.ru*

Разработка нефтяных месторождений методом закачки в пласт водяного пара (воды) требует количественной оценки многих факторов, влияющих на изменение теплофизических свойств как пористой среды и содержащихся в порах флюидов, так и на процесс вытеснения нефти паром (водой) [1]. В результате растворимости с повышением температуры легкой фракции нефти в водяном паре и растворимости воды в нефти изменяется плотность паровой оторочки и жидкой фазы залежи. Знание объемных свойств этих газобразных и жидких систем необходимо для учета в расчетах процесса вытеснения нефти методом закачки водяного пара (воды) в пласт.

Работа посвящена экспериментальному исследованию объемных свойств бинарных систем — паров смесей  $H_2O-(C_5H_{12}-C_7H_{16})$  (модель паровой оторочки залежи нефти) и жидких растворов  $H_2O-C_6H_{14}$ ,  $H_2O-C_{10}H_{22}$ ,  $H_2O-C_{16}H_{34}$  (модель жидкой фазы нефти), при температурах и давлениях, характерных для метода закачки водяного пара (воды) в пласт [2, 3].

Установлено, что:

- величина избыточного мольного объема смесей  $H_2O-(C_5H_{12}-C_7H_{16})$  принимает положительные, а смесь  $H_2O-C_7H_{16}$  — как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от состава, давления и температуры;
- при растворении воды в жидких n-алканах объем последних может увеличиваться до нескольких десятков процентов.

Можно предположить, что при растворении воды в нефти также будет наблюдаться значительное увеличение объема, которое следует учитывать в расчетах процесса вытеснения нефти термическими методами.

- 
1. Оганов К.А. Основы теплового воздействия на нефтяной пласт. Изд-во Недр, М., 1967, 203 с.
  2. Базаев А.Р., Скрипка В.Г., Намиот А.Ю. Объемные свойства газовых растворов водяного пара с n-гексаном и n-октаном ЖФХ. Т.49 вып.5, 1975, с. 1339.
  3. Базаев А.Р., Скрипка В.Г. Изменение объема жидких углеводородов при растворении в них воды в условиях высоких температур. НТС ВНИИ, вып. 49, М., 1975, с.229–322.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСШИХ ЖИРНЫХ СПИРТОВ И  
ИХ ФРАКЦИЙ**

*Заночуев С.А.,<sup>1</sup> Пономарева Т.С.,<sup>1</sup> Яковлев Н.С.,<sup>2</sup> Агаев С.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ТННЦ, Тюмень, Россия, <sup>2</sup>ТИУ, Тюмень, Россия

*\*sazanochuev@tnnc.rosneft.ru*

Высшие жирные спирты (ВЖС), содержащие гидроксильную группу и углеводородную основу с числом атомов углерода от  $C_{10}$  до  $C_{30}$  получают широкое применение в

нефтегазовой промышленности. ВЖС могут использоваться в качестве растворителей, деэмульгаторов, различных добавок в топлива, повышающие их качество. Применение ВЖС в качестве добавок в растворы на углеводородной основе может повысить эффективность применения буровых растворов. Оптимальное применение тех или иных спиртов зависит прежде всего от их термальных и фазовых характеристик, которые зависят как от состава спиртов, так и от его чистоты.

Методом ДСК изучены теплофизические свойства четных высших жирных спиртов ВЖС с числом атомов углерода от  $C_{10}$  до  $C_{22}$  и их фракции  $C_{20}-C_{22}$  и  $C_{20+}$  (смесь спиртов от  $C_{18}$  до  $C_{30}$ ). Спирты любезно предоставлены фирмой Sasol.

На нагреве индивидуальных ВЖС обнаруживаются только суммарные тепловые эффекты процессов плавления и процессов твердофазных переходов. На охлаждении в индивидуальных ВЖС обнаруживаются тепловые эффекты процессов кристаллизации и твердофазных переходов. Фракции ВЖС независимо от направления процесса обнаруживают энтальпии и высокотемпературных и низкотемпературных фазовых переходов.

Гистерезис индивидуальных ВЖС по суммарным энтальпиям не превышает 11,52 Дж/г. Для фракции ВЖС  $C_{20-22}$  расхождение между суммарной энтальпией на нагреве и на охлаждении дает аномально высокое значение 38,65 Дж/г. Для фракции ВЖС широкого фракционного состава  $C_{20}$  обнаружены аномально низкие значения энтальпий на нагреве (100,82 Дж/г) и охлаждении (94,42 Дж/г).

В ВЖС высокой степени чистоты отсутствует область стабильной гексагональной сингонии. Фракции жирных спиртов, напротив, характеризуются широкой температурной областью переходной и стабильной гексагональной сингонии. Температурный гистерезис по фазовым переходам плавление-кристаллизация независимо от компонентного состава ВЖС не превышает 4,69°C. Гистерезис по низкотемпературным (твердофазным) переходам обнаружен только для фракций ВЖС и составляет 9,7–11,8°C.

## **ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНДЕНСАТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА, ПРИУРОЧЕННЫХ К ЗАЛЕЖАМ ГАЗА БЕРЕГОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Пономарева Т.С., Заночуев С.А.,\* Громова Е.А., Поляков А.В.*

*ТННЦ, Тюмень, Россия*

*\*sazanochuev@tnnc.rosneft.ru*

Береговое НГКМ характеризуется изменчивостью составов и свойств пластовых флюидов как по глубине залегания, так и по площади распространения. Добываемые жидкие углеводороды характеризуются различными типами с преобладанием как изоалкановых (I тип), так и нафтеновых (II тип) структур. В ряде случаев установлено присутствие нефти в продукции скважин. В условиях добычи газа из различных эксплуатационных объектов необходима информация о теплофизических свойствах жидкой составляющей, поступающей в технологическое оборудование для дальнейшей ее подготовки.

Одной из важных характеристик добываемого углеводородного сырья является теплоемкость, данные о которой участвуют в методиках теплового и гидравлического расчета магистральных трубопроводов и при проектировании различных теплообменных установок.

В настоящее время теплоемкость нефтепродуктов изучается на основе аналитических методов, а они нуждаются в развитии и усовершенствовании. В текущих условиях наиболее надежным источником информации на сегодняшний день являются только экспериментальные измерения теплофизических свойств.



В работе освещен опыт определения теплоемкости конденсатов различного типа методом ДСК. Дана оценка неопределенности измерений.

Для конденсатов I-го типа, характеризующихся повышенной плотностью, значения теплоемкости в диапазоне температур 5–45°C закономерно повышаются от 1,761 до 1,877 кДж/(°С·кг). Конденсаты II-го типа в изучаемом диапазоне температур имеют теплоемкость от 1,873 до 1,954 кДж/(°С·кг) при закономерном линейном росте с увеличением температуры.

Показано, что для углеводородных систем, содержащих нефтяные компоненты, в исследуемом диапазоне температур наблюдается фазовый переход, связанный с образованием твердых парафиновых структур. Установлены четкие корреляционные связи теплоемкости конденсатов с основными физико-химическими свойствами (плотность и кинематическая вязкость).

## О ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ЭНЕРГИИ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА НА ОБЪЕМНЫЙ И МАССОВЫЙ БАЗИС

*Мальгина Н. А.,\* Корчагина Е. Н.*

*ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева Санкт-Петербург, Россия*

*\*n.a.malginova@vniim.ru*

Подтверждение измерительных возможностей национальных эталонов обеспечивается международными сличениями, координируемыми региональными метрологическими организациями (BIPM, EURAMET, COOMET). ВНИИМ выступил координатором пилотных сличений в рамках темы COOMET № 780/RU-a/19 национальных эталонных газовых калориметров на образцах газовых смесей с участием метрологических институтов Франции и Турции [1].

В Российской Федерации для определения энергосодержания газообразного топлива принято определение энергии сгорания на объемный базис. Эталонный газовый калориметр «КАТЕТ» из состава Государственного первичного эталона единиц энергии сгорания ГЭТ 16-2018 обеспечивает измерение высшей объемной энергии сгорания газа абсолютным методом. Эталонные газовые калориметры в метрологических учреждениях Франции (LNE), Германии (PTB), Турции (UME) реализуют принцип измерения энергии сгорания газа на массовый базис.

Информация о компонентном составе анализируемых газовых смесей была недоступна участникам сличений при проведении измерений и обработке результатов. По этой причине возникла задача разработки методики приведения объемной энергии сгорания к массовому базису и наоборот.

Для этого разработан проект модифицированной пикнометрической методики, целью которой является повышение точности измерений плотности газа. Проведено сравнение результатов измерений плотности с результатом, основанным на расчетном методе по ГОСТ 31369. Компонентный состав образцов для сличений, изготовленных гравиметрическим методом, был предоставлен изготовителем смесей на завершающем этапе обработки результатов сличений: первый образец состоял из 40,22 мол. % диоксида углерода и метана, другой – из 10,10 мол. % водорода и метана. Полученное расхождение не превысило 0,3 %, что соответствует расширенной неопределенности измерений по разрабатываемой методике.

---

1. Пилотные сличения национальных эталонных газовых калориметров на образцах газовых смесей, <http://www.coomet.org/DB/isapi/isapi.dll>

## **ТИПИЗАЦИЯ ОКОЛОКРИТИЧЕСКИХ ПЛАСТОВЫХ ФЛЮИДОВ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ОПАЛЕСЦЕНЦИИ НА ПОГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ**

*Поднек В.Э.,\*<sup>1</sup> Кияченко Ю.Ф.,<sup>1</sup> Сирота А.С.,<sup>2</sup> Григорьев Б.А.<sup>1,3</sup>*

*<sup>1</sup>ИПНГ РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия, <sup>3</sup>ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, Россия*

*\*podnek77@gmail.com*

Совершенствование классификации однофазных залежей углеводородного (УВ) сырья, находящегося при пластовых условиях в переходном состоянии между нефтью и газом, продолжает оставаться одной из актуальных задач нефтегазовой науки. Температура в указанных залежах близка к критической температуре пластового флюида, вследствие чего их иногда называют «околокритическими». Выделение последних в особую группу залежей «переходного» типа обусловлено особенностями фазового поведения пластового флюида в окрестности критической точки (КТ) жидкость–газ и, прежде всего, сближением свойств жидкости (нефти) и ретроградного пластового газа.

На практике типизация залежей УВ сырья ведется, как правило, на основе промысловых замеров начального значения газожидкостного отношения на поверхности (сепараторе), приведенного к стандартным условиям. Однако, поскольку переход в двухфазное состояние пластового флюида, находящегося при температуре залегания близкой к критической, сопровождается его распадом на сравнимые объемы жидкой и газовой фаз, подобные промысловые замеры не в состоянии однозначно определить тип пластового флюида (нефть или конденсатный газ), что недопустимо при разработке залежей указанного типа. Установление действительного типа околокритического пластового флюида (нефть или газоконденсат) и его последующая более подробная типизация по удалению температуры залегания от критической температуры флюида возможны лишь на основе лабораторных исследований околокритического фазового поведения последнего.

В докладе на примере специально подобранной пластовой смеси проиллюстрирована процедура типизации околокритических залежей УВ сырья по удалению температуры залегания от критической температуры пластового флюида. В качестве классификационного параметра, определяющего тип околокритической залежи, используется интенсивность критической опалесценции пластовым флюидом на пограничной кривой (кривой начала кипения/конденсации).

Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований РАН, НИР № 122022800364-6.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**СКВАЖИНА ДЛЯ СЪЕМА ТЕПЛА В ГЕОТЕРМАЛЬНОМ ПЛАСТЕ**

*Алхасова Д.А.,\* Алхасов А.Б., Рамазанов М.М.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*alkhasova.dzhamilya@mail.ru*

Скважина для съема тепла с термальной воды имеет протяженный горизонтальный ствол в геотермальном пласте. Такая скважина-теплообменник имеет две колонны труб — наружную и внутреннюю. Вторичный теплоноситель от устья скважины опускается по межтрубному кольцевому пространству и отбирает тепло с горной породы, далее теплоноситель при его прохождении по горизонтальному стволу отбирает тепло с термальной воды и со скелета водовмещающей породы, а нагретый теплоноситель поднимается к устью скважины по теплоизолированной внутренней колонне. Преимуществом системы с такой скважиной является то, что термальная минерализованная вода не поднимается на поверхность, что решает важную проблему утилизации агрессивного отработанного теплоносителя, отсутствует необходимость в обратной его закачке и, самое главное, отпадает необходимость в нагнетательной скважине с привлечением огромных капитальных вложений на ее строительство.

В Северокавказском регионе имеются более 2000 простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях [1]. Их реконструкция, с разбуриванием и дополнением горизонтального ствола, позволит отбирать тепло непосредственно в геотермальном пласте.

Изучен процесс тепломассопереноса в скважине-теплообменнике, проведены гидродинамические и тепловые расчеты в вертикальном и горизонтальном стволах скважины и определены оптимальные расходные параметры ее эксплуатации.

Проведено численное исследование влияния естественной конвекции на теплообмен в системе горизонтальная скважина-проницаемая горная порода. Получена зависимость числа Нуссельта от времени для различных чисел Рэлея. Установлено, что вклад конвекции в теплообмен становится значительным для хорошо проницаемого пласта при числе Рэлея порядка единицы и выше. Максимальные скорости конвективного течения при рассмотренных значениях параметров составляют величины порядка 1 м/сут.

- 
1. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алишаев М.Г., Рамазанов А.Ш., Рамазанов М.М. Освоение геотермальной энергии. М.: Физматлит, 2022. - 320 с.

**ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИЗ ГАЛОГЕНИДОВ И  
СУЛЬФАТОВ НАТРИЯ И КАЛИЯ**

*Вердиев Н.Н.,\* Алхасов А.Б., Мусаева П.А., Магомедов М.М., Мурадова Л.С.,  
Вердиева З.Н.*

*ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала, Россия*

*\*verdiev55@mail.ru*

Эвтектические составы из галогенидных и сульфатных смесей s1 элементов обладают высокими значениями энтальпий фазовых превращений, широким интервалом температур кристаллизаций, распространённостью в природе, относительной дешевизной, низкой

летучестью, малым коэффициентом объемного расширения, высокой электропроводностью. Солевые расплавы востребованы в ряде отраслей промышленности, в частности, в гелио- и атомной энергетике в качестве теплоносителей и теплонакопителей [1,2].

Объект исследований — пятерная взаимная система Na, K||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>. Выбор данного сочетания солей обусловлен и тем, что сульфат натрия обладает рядом полиморфных превращений, позволяющих улучшать теплоаккумулирующие свойства невариантных составов, т.е. позволяет генерировать и высвобождать тепловую энергию и при фазовом переходе (плавление-кристаллизация) так и в твердом состоянии.

Исследуемый объект состоит из 12 двух-, 8 трех-, 6 трехкомпонентных взаимных, 2 четверных- и 4 четырёх- компонентных взаимных систем. С целью планирования экспериментальных исследований проведен обзор научной литературы по состоянию изученности элементов ограничения системы Na, K||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>. В результате установлено, что все 12 двух-, 8 трех-, 6 трехкомпонентные взаимные системы исследованы ранее. По двум четырехкомпонентным Na||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>; K||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub> и двум четырехкомпонентным взаимным системам Na, K||F, Br, SO<sub>4</sub>; Na, K||Cl, Br, SO<sub>4</sub> в литературных источниках нет информации. В элементы ограничения четырехкомпонентной системы Na||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub> входят две трехкомпонентные системы: Na||F, Cl, Br и Na||Cl, Br, SO<sub>4</sub> с твердыми растворами и две системы с двумя невариантными составами Na||F, Br, SO<sub>4</sub> и Na||F, Cl, SO<sub>4</sub>. С использованием теории графов [3], произведено разбиение систем Na||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>; K||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub> на симплексы. Для каждой системы, на базе данных о двух- и трехкомпонентных системах ограничения, построены матрицы смежности вершин, составлены логические уравнения, решением которых установлено, что система Na||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub> разбивается на вторичные тетраэдры: NaF-NaCl-NaBr-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>; NaCl-NaBr-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>, связанные между собой треугольником NaCl-NaBr-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>. Система KF-KCl-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> также дифференцируется на тетраэдры KF-KCl-KBr-K<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>; KCl-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> и разделены между собой треугольником KCl-KBr-K<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>. Из выявленных тетраэдров построены фазовые деревья. В обоих случаях деревья фаз линейного характера.

Дифференциальным термическим методом физико-химического анализа, исследованы фазовые равновесия в системе Na||F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>. Планирование эксперимента осуществлено на основе общих правил проекционно-термографического метода [4]. На  $T-x$  диаграмме политермического разреза, выбранного в объеме кристаллизации фторида натрия системы NaF-NaBr-NaCl-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>, на кривых ДТА не зафиксированы термоэффекты совместной кристаллизации четырех фаз. Установлено, что в системе NaF-NaCl-NaBr-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> устойчивы твердые растворы с минимумом при 682°C, как и в системе NaCl-NaBr-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>, но температура минимума составляет 565°C.

Аналогичным образом исследованы все тетраэдры, и выявлено, что рассматриваемые системы характеризуются образованием непрерывных рядов твердых растворов. Выявленные солевые составы могут быть использованы в теплоаккумулирующих устройствах для генерации тепловой энергии в пределах 565–682°C.

1. Трифонов К.И., Ларионов А.С., Кротов В.Е., Никифоров А.Ф. Вязкость солевых расплавов системы KAlCl<sub>4</sub>-ZrCl<sub>4</sub>-HfCl<sub>4</sub> // Расплавы. 2023. № 2. С. 113-177.
2. Вердиев Н.Н., Гаркушин И.К., Бурчаков А.В. и др. Фазовые равновесия в системе NaF-NaCl-NaBr-Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> // Неорганические Материалы. 2020. Т. 56. № 11. С. 1243-1251
3. Краева, А.Г., Давыдова Л.С., Первикова В.И. и др. Метод разбиения (триангуляции) диаграмм состава многокомпонентных взаимных систем с комплексными соединениями с применением графов и ЭВМ // Докл. АН СССР. – 1972. Т. 202. – С. 850 – 853.
4. Космынин А.С., Трунин А.С. Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах. Самара: Самарский гос. тех. ун-т. 2006. 183 с.

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ВЫСШЕЙ (УДЕЛЬНОЙ) ЭНЕРГИИ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Заречнова А.А.,\* Корчагина Е.Н., Шеховцов Д.А.*

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», Санкт-Петербург, Россия*

*\*a.a.zarechnova@vniim.ru*

Экологический кризис, связанный с увеличением полимерных отходов и глобальным загрязнением ими окружающей среды, вызвал растущий интерес к вторичной переработке полимерных материалов, в том числе использование их в топливной энергетике. Калорийность переработанных полимеров значительно варьируется из-за их различных типов, составов и применяемых методов обработки. Поэтому разработка государственных стандартных образцов (ГСО) с установленным значением удельной энергии сгорания позволит получить более точную оценку энергосодержания твердых бытовых отходов и повысит эффективность процессов их переработки.

Для разработки новых типов стандартных образцов твердых бытовых отходов из полимеров в лаборатории калориметрии была исследована высшая энергия сгорания следующих материалов: пленка из политерефталата (Среднее арифметическое (далее Ср.А.)=23332,03 кДж/кг, среднее квадратическое отклонение (далее СКО)=0,03 %), полиметилакрилат (Ср.А.=26610,49 кДж/кг, СКО=0,03 %), полиэтилен (Ср.А.=46494,41 кДж/кг, СКО=0,01 %), биопластик из кукурузного крахмала (Ср.А.=24118,63 кДж/кг, СКО=0,02 %). Все измерения были сделаны в условиях повторяемости в соответствии с требованиями ГОСТ 33108 [1] на Государственном первичном эталоне единиц энергии сгорания, удельной энергии сгорания и объемной энергии сгорания ГЭТ 16-2018. Критерии, предъявляемые к выбору материала в качестве ГСО, были соблюдены с учетом требований и рекомендаций ГОСТ ISO Guide 35 [2].

Разработка новых ГСО позволит не только повысить достоверность измерений энергии сгорания (калорийности), но и станет основой для разработки новых стандартизированных методик и методов измерений калорийности полимерных материалов.

1. ГОСТ 33108 (EN 15400) «Топливо твердое из бытовых отходов. Определение теплоты сгорания», дата введения с 01.04.2016.
2. ГОСТ ISO Guide 35-2015 «Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации) = Reference materials. General and statistical principles for certification», дата введения 2019.09.01.

## АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

- Абдуджалилзода Ф., 76  
Абдулагатов И.М., 10, 21, 25, 36, 39, 62  
Абдуллаев Р.Н., 10  
Агаев С.Г., 96  
Агажанов А.Ш., 10  
Адамьян Ю.Э., 61  
Акаев Х.Р., 54  
Александров И. С., 22  
Аливердиев А.А., 62, 87  
Алиев Р.М., 62  
Алиханов Н.М.-Р., 78  
Алиханов Н.М.-Р., 66  
Алишаев М.Г., 87  
Алхасов А.Б., 100  
Алхасова Д.А., 100  
Алчагиров Б.Б., 13, 46, 54  
Амирова А.А., 62  
Антипов Р.Р., 30  
Асрорзода Н.С., 65  
Ахмедов Э.Н., 26  
Ахметзянов Т.Р., 83  
Бабаев А.А., 72  
Бабаева Ю.А., 90, 91  
Базаев А.Р., 23, 25, 96  
Базаев Э.А., 23, 25, 96  
Бакмаев А.Г., 72  
Бгашева Т.В., 45  
Безверхий П.П., 40  
Бейбалаев В.Д., 62  
Белоножко А.Б., 23  
Беляев И.А., 16  
Беркова Е.А., 22  
Билалов А.Р., 72  
Билалов Т.Р., 30, 41  
Бирюков Д.А., 83, 84  
Благонравов Л.А., 85  
Бобин С.Б., 80  
Боброва К.О., 93  
Богатищева Н.С., 37, 38  
Боярских К.А., 17  
Брежнев А.И., 90, 91  
Букреева Ю.К., 56  
Быков В.А., 49, 94  
Васин А.А., 45  
Вердиев Н.Н., 100  
Вердиева З.Н., 100  
Виноградов А.В., 13  
Волков В.И., 84  
Волосников Д.В., 51  
Воробьев А.Б., 81  
Вьюхин В.В., 48  
Габитов И.Р., 21  
Габитов Ф.Р., 83  
Гаджиев М.Х., 66  
Гаджимагомедов С.Х., 44, 53, 66, 78  
Галкин Д.А., 37  
Гальцов И. С., 20  
Гельчинский Б.Р., 39  
Герасимов А. А., 22  
Гильмутдинов И.И., 59  
Горбатов В.И., 50  
Гортышов Ю.Ф., 76  
Григорьев Б. А., 22  
Григорьев Б.А., 27, 62, 99  
Громова Е.А., 97  
Гуломов М.М., 73  
Гусейнов Г.Г., 82  
Дадашев Р.Х., 13, 54  
Дещеня В.И., 87  
Джамбулатов Р.С., 81  
Джапбаров Т.А.-Г., 25  
Докутович В.Н., 93  
Дороватовский А. В., 20  
Дороватовский А.В., 44, 92  
Дрей М.И., 79  
Дутова О.С., 34  
Дышекова Ф.Ф., 13  
Емельянов А.Н., 59  
Ерёмин Н.Н., 25  
Зайниддинов Д.Р., 67, 75  
Заночуев С.А., 96, 97  
Заречнова А.А., 102  
Зарипова М.А., 67  
Заричняк Ю.П., 62  
Захаров М.С., 13  
Зеодинов М.Г., 55, 79  
Зицерман В.Ю., 35  
Зоиров Х.А., 71, 73  
Ивлиев А.Д., 50  
Ильиных Н.И., 39  
Иноземцев А.В., 81  
Иноземцев Я.О., 81  
Исхаков М.Э., 44, 54  
Каймин В.У., 48  
Калиничев А.Г., 70  
Каллаев С.Н., 72

- Канаметова О.Х., 13  
Каримов Т.М., 59  
Карфидов Э.А., 56  
Карчевский О.О., 85  
Кизяева Э.С., 83  
Кияченко Ю.Ф., 27, 99  
Кнотько А.В., 25  
Коваленко Д.А., 94  
Коверда В.П., 13  
Козлов А.Д., 90  
Козловский Ю.М., 10  
Коков З.А., 46  
Колобаев В.А., 90  
Кондратюк Н.Д., 24, 87, 88  
Корчагина Е.Н., 98, 102  
Косс К.Г., 32  
Костановская М.Е., 55, 79  
Костановский А.В., 55, 79  
Котов А.Н., 79, 80  
Кривошеев С.И., 61  
Кудрявцева И.В., 17, 27  
Куликова Т.В., 49, 94  
Кулямина Е.Ю., 35  
Куриченко А.А., 50  
Кутуев Р.А., 13  
Лага Е.Ю., 72  
Ларюшин Т.В., 85  
Левашов П.Р., 12, 19, 31, 92  
Лепешкин А.Р., 95  
Лисина И.И., 32  
Лончаков А.Т., 80  
Лукьянчук В.Г., 24  
Магазинов С.Г., 61  
Магомедов М.М-Ш., 47  
Магомедов М.М., 100  
Магомедов М.Н., 36, 66  
Магомедов Р.А., 26  
Мальгинова Н.А., 98  
Мальцев М.А., 52  
Мардонова Р., 25  
Матюшин Ю.Н., 81  
Мацкевич Н.И., 40  
Минаков А.В., 42  
Минаков Д. В., 20  
Минаков Д.В., 19, 31, 44, 92  
Миненков Ю.В., 52  
Михеев В.А., 85  
Морозов И.В., 52  
Мурадова Л.С., 100  
Мурлиева Ж.Х., 44, 46, 53, 54, 66  
Мусаева П.А., 100  
Мусоев Ш.А., 25  
Неъматов Г.Н., 69  
Низамутдинов А.С., 29, 30  
Никитин Е.Д., 37, 38  
Новиков Г.Е., 90  
Обысов Н.А., 90  
Ойматова Х.Х., 63  
Омаров З.М., 72  
Орлова Е.Г., 72  
Осина Е.Л., 52  
Османова Б.К., 23, 25, 96  
Очков В.Ф., 17, 27  
Палчаев Д.К., 44, 46, 53, 54, 66  
Панов Г.В., 37  
Парамонов М. А., 20  
Парамонов М.А., 19, 31, 92  
Паторкин Д.В., 89  
Пашук Е.Г., 39  
Перетяцько В.В., 83  
Петров О.Ф., 32  
Петухов С.В., 45  
Писарев В.В., 88  
Поварницын М.Е., 12  
Поволоцкий И.И., 51  
Поднек В.Э., 27, 99  
Полев В.Ф., 50  
Поляков А.В., 97  
Пономарева Т.С., 96, 97  
Попов А.П., 37, 38  
Пронкин А.А., 55, 79  
Пряжников М.И., 42  
Рабаданов М.Х., 44, 54, 66  
Рабаданова А.Э., 44, 53, 66, 78  
Раджабова С.С., 57  
Рамазанов М.М., 100  
Рамазанова А.Э., 36  
Расчектаева Е.П., 33  
Русанов Б.А., 51, 56  
Русанова А.И., 56  
Рыков В.А., 17, 27  
Рыков С.В., 17, 27  
Сабирзянов А.А., 56  
Сабирзянов А.Н., 59  
Сабирова А.Д., 30, 41  
Сабирова Л.Ю., 83  
Сайтов И.М., 24  
Сайпулаев П.М., 66  
Салихов И.З., 21  
Самошкин Д.А., 10, 40

Сафаров М.М., 57, 63, 65, 67, 69, 76  
Сафаров М.м., 71  
Сафаров П.М., 73  
Сафаров С.К., 65, 67  
Сафаров Ш.Р., 63, 71  
Сафарова Ф.А., 75  
Семерикова А.Н., 40  
Сенченко В.Н., 15  
Середкин Н.Н., 18  
Сидоров В.Е., 51, 56  
Сипатов И.С., 49  
Сирота А.С., 99  
Скрипов П.В., 11, 51, 79  
Смирнов А.Л., 50  
Смирнов Г.С., 23, 70  
Собиров Д.Ф., 75  
Сон Л.Д., 56  
Станкус С.В., 10, 33, 40, 49  
Старостин А.А., 79, 80  
Стерхов Е.В., 49, 94  
Тарарушкин Е.В., 70  
Тиллоева Т.Р., 75, 76  
Ткаченко С.И., 60  
Томин А.С., 13  
Умарализова М.У., 69  
Устюжанин Е.Е., 17, 27  
Файзуллин М.З., 13, 38  
Фараджев Ф.Ш., 78  
Фараджев Ш.П., 53, 66  
Фарахов М.И., 21  
Феоктистов Д.В., 72  
Фокин В. Б., 20  
Фокин В.Б., 31, 92  
Хабриев И.Ш., 21  
Хайрулин А.Р., 10, 49  
Хайрулин Р.А., 10  
Хайрутдинов В.Ф., 21, 83  
Хибиев А.Х., 46  
Хищенко К.В., 15, 17, 18, 60  
Цепелев В.С., 48  
Цепелева Н.П., 48  
Чусов И.А., 90, 91  
Шамсетдинов Ф.Н., 21  
Шангин В.В., 80  
Шарипов М.Л., 63  
Шарипов С.М., 71  
Шахрай Д.В., 59  
Швецов Д.П., 48  
Шейндлин М. А., 20  
Шейндлин М.А., 44, 45, 92  
Шеховцов Д.А., 102  
Щербаков В.Д., 29, 30  
Элимханов Д.З., 46, 54  
Эмиров Р.М., 44, 54, 66, 78  
Эфендиева М.Р., 62  
Юдин И.К., 27  
Ягодин Д.А., 49  
Яковлев Н.С., 96  
Яруллин Л.Ю., 83



Печать офсетная. Тираж 130 экз. Заказ № 87

Отпечатано в полном соответствии с предоставленным оригинал-макетом  
ООО «Печатный салон ШАНС»  
125412, г. Москва, ул. Ижорская, дом 13, стр.2  
Тел. (495) 484-26-55