



РКТС17

ЧЕЛЯБИНСК

6—10 ИЮЛЯ 2026

ПРОГРАММА И СБОРНИК ТЕЗИСОВ

XVII РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)

ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ВЕЩЕСТВ

(РКТС-17)

Организаторы



2026 год

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-17 состоится в Южно-Уральском государственном университете, Корпус «Сигма», г. Челябинск.

Предыдущая конференция РКТС-16 проводилась в научно-оздоровительном комплексе «Журавли», г. Махачкала, Республика Дагестан в 2023 г.

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
- Национальный исследовательский университет «МЭИ»
- Московский физико-технический институт (государственный университет)
- Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
- Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

ISBN 978-5-6056286-1-3

Содержание

ГЛАВА 1. Уравнения состояния, фазовые переходы и критические явления	11
<u>Иосилевский И.Л., Грязнов В.К., Шутов А.В.</u> Зоны аномальной термодинамики и энтропийные фазовые переходы в плотном горячем веществе	12
<u>Левашов П.Р., Минаков Д.В.</u> Квантовые расчеты теплофизических свойств жидких металлов	13
<u>Хищенко К.В.</u> Модели уравнений состояния материалов на основе различных характеристических функций при высоких плотностях энергии	15
<u>Онегин А.С., Левашов П.Р., Щелкачев Н.М.</u> Исследование конгруэнтности плавления системы Ni—Al с использованием нейросетевых потенциалов межатомного взаимодействия	16
<u>Устюжанин Е.Е., Рыков С.В., Рыков В.А., Боярских К.А., Хищенко К.В.</u> Некоторые методы прогнозирования плотности жидкости и газа на линии насыщения в окрестности критической точки CO ₂ и SF ₆ . .	17
<u>Боярских К.А., Хищенко К.В.</u> Термодинамические свойства жидкой фазы тербия при высоких давлениях и температурах	18
<u>Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</u> Уравнение состояния меди и медьсодержащих смесей при высоких давлениях и температурах в ударных волнах	19
<u>Обручкова Л.Р., Боярских К.А., Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</u> Учет плавления в уравнении состояния алюминия при высоких температурах в ударных волнах	20
<u>Маевский К.К.</u> Моделирование ударно-волнового нагружения диоксида германия	21
<u>Волосников Д.В.</u> Вскипание перегретой воды в случае импульсного изотермического воздействия	22
<u>Поволоцкий И.И., Старостин А.А., Шангин В.В., Волосников Д.В., Котов А.Н., Скрипов П.В.</u> Теплообмен в разбавленных водных растворах 1-бутанола и 1-гептанола в условиях импульсного нагрева	23

<u>Перевоицков Е.Е., Жуховицкий Д.И.</u> Перегрев кластеров при неизотермической нуклеации	24
<u>Хотиенкова М.Н., Андабаева В.Н.</u> Определение свойств растворов пропан–азот и н–бутан–азот на основе уравнения состояния	25
<u>Османова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р., Джанпаров Т. А.-Г.</u> Экспериментальное исследование термодинамических свойств системы (вода + н-гексан + 2-пропанол) равных долей компонентов в жидком, газообразном и сверхкритическом состояниях	26
<u>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А.</u> Линии фазового равновесия цезия, ртути и натрия	28
<u>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков В.А.</u> Уравнения состояния NH_3 и CO_2 в рамках феноменологической теории критической точки	29
<u>Булава А.С., Брыкин М.В., Вервикишко Д.Е., Вервикишко П.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А.</u> Модифицированный метод спектроскопии для определения температуры плавления циркония и гафния .	30
<u>Кудрявцева И.В., Рыков С.В.</u> Новые корреляции между критическими амплитудами и критическими индексами	31
<u>Григорьев Б.А., Александров И.С., Герасимов А.А., Поднек В.Э.</u> Термодинамические свойства тетралина в широком диапазоне параметров состояния	32
<u>Макарова С.В., Субботин Д.И., Снетов В.Н.</u> Исследование водных дисперсий нанообъектов, синтезированных электрическим разрядом в воде на электродной паре Ag-W	34
<u>Думин Ю.В., Свирская Л.М.</u> Переход “проводник–изолятор” в стационарной ультрахолодной плазме .	36

ГЛАВА 2. Транспортные, оптические и радиационные свойства веществ **37**

<u>Фокин В.Б., Минаков Д.В., Парамонов М.А., Демьянов Г.С.</u> Первопринципные расчеты электропроводности и оптических свойств циркония и гафния	38
--	----

<u>Богатищева Н.С., Никитин Е.Д., Попов А.П., Файзуллин М.З.</u> Теплофизические свойства алкиловых эфиров молочной кислоты	39
<u>Горбатов А.И., Ивлиев А.Д.</u> Распространение температурной волны через полупрозрачное твердое тело .	40
<u>Филанович А.Н., Лукоянов А.В., Повзнер А.А.</u> Фононный ангармонизм и решеточная теплопроводность удвоенных полугейслеровых сплавов $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$ и $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$: исследование с использованием теории функционала плотности и машинного обучения . . .	42
ГЛАВА 3. Термодинамические свойства веществ в конденсированном состоянии	43
<u>Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Рабаданов М.Х.</u> Уравнение Майера для классических проводников	44
<u>Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Гаджисагомедов С.Х.</u> Связь фононного теплосопротивления и коэффициента теплового расширения сверхпроводников ниже критической температуры	45
<u>Андабаева В.Н., Хотиенкова М.Н.</u> Поверхностное натяжение углеводородных растворов с водородом, гелием, азотом и метаном	47
<u>Русанов Б.А., Базлов А.И., Русанова А.И., Сидоров В.Е., Ладьянов В.И.</u> Кристаллизация аморфных сплавов FeNiBSiNb и их свойства при высоких температурах	48
<u>Русанов Б.А., Мухаметзянов Т.А.</u> Сверхбыстрая калориметрия аморфных сплавов Al-Ni-Co-PZM	49
<u>Абдуллаев Р.Н., Агажанов А.Ш., Хайруллин Р.А., Хайруллин А.Р., Станкус С.В.</u> Экспериментальное исследование теплофизических свойств расплавов системы литий-калий-свинец	50
<u>Компан Т.А., Пухов Н.Ф., Власова В.В.</u> Результаты исследований удельной теплоёмкости Bi , Ni , УУКМ .	51
<u>Беспятов М.А., Кузин Т.М., Шевелев Д.С., Трифонов В.А., Назарова А.А., Гельфонд Н.В.</u> Низкотемпературная теплоёмкость и термодинамические свойства LiRbMoO_4	52

<u>Попов А.А., Петрова Е.В., Кокорин А.Ф., Гроховский В.И.</u> Моделирование абляции обыкновенных хондри- тов.	53
---	----

ГЛАВА 4. Теплофизические свойства веществ при высоких температурах **54**

<u>Станкус С.В., Абдуллаев Р.Н., Агажанов А.Ш., Са- мошкин Д.А., Хайруллин А.Р., Хайруллин Р.А., Мо- сунова Н.А.</u> Экспериментальное исследование тепло- физических свойств свинца в интервале температур 293-2021 К	55
<u>Скрипов П.В.</u> Явление перегрева жидкостей: история ис- следований и современное состояние	56
<u>Рютин С.Б., Мелких А.В., Скрипов П.В.</u> Сверхкрити- ческий переход жидкость-флюид в быстрых процессах	57
<u>Гаврильев А.Ч., Сенченко В.Н., Мельников С.А.</u> Иссле- дование теплового расширения карбидных систем на основе тугоплавких металлов с применением метода импульсного нагрева	59
<u>Олянина Н.В., Бельтюков А.Л., Сапегина И.В., Ладья- нов В.И.</u> Вязкость жидкого никеля	60
<u>Горбатов В.И., Ивлиев А.Д., Кукулина А.А., Смирнов А.Л., Талуц С.Г.</u> Термическое расширение твердых сплавов системы Zr-Nb при высоких температурах .	61
<u>Русанов Б.А., Симонов Д.К., Петрова С.А., Андри- енко Д.С.</u> Плотность высокоэнтропийных сплавов AlNiCoFeCr и AlNiCoCuZr в твёрдом и жидком со- стояниях	63
<u>Сенченко В.Н., Гаврильев А.Ч., Мельников С.А.</u> Иссле- дование теплового расширения керамики из эквимо- лярной смеси карбидов методом быстрого резистив- ного нагрева	64
<u>Дороватовский А.В., Шейндлин М.А., Минаков Д.В.</u> Высокотемпературные измерения теплофизических свойств методом импульсного нагрева электриче- ским током	65
<u>Русанова А.И., Русанов Б.А., Сон Л.Д., Сидоров В.Е.</u> Релаксационные процессы и двухмасштабные неод- нородности в расплавах Ga-PЗМ	66

<u>Мельников С.А., Сенченко В.Н., Гаврильев А.Ч.</u> Измерение плотности ванадия и титана в твердом и жидком состоянии при быстром нагреве импульсом тока	67
<u>Каюмов Р.Р., Абдуллин И.Ш., Исмагилов Д.М.</u> Температурная диагностика струйного ВЧ-разряда с жидкой плазмообразующей средой	68
ГЛАВА 5. Экстремальные состояния вещества	69
<u>Шестаков М.А., Хищенко К.В.</u> Гидродинамическое моделирование физико-химического превращения полиимида в ударных волнах	70
<u>Шумихин А.С.</u> Расчёт термодинамических свойств плотной плазмы металлов палладиевой группы в широком диапазоне температур и плотностей	71
<u>Смирнова А.Р., Казаков Е.Д., Ткаченко С.И.</u> Исследование изменения давления на поверхности мишени, дополненное учетом радиационных потерь в плазменном столбе в диодном зазоре ускорителя “Кальмар”	72
<u>Ларичев М.Н., Беляев Г.Е., Белов О.В.</u> Образование критического состояния Al_2O_3 при облучении ВЭИ	73
<u>Шестаковская Е.С., Клиначева Н.Л., Стариков Я.Е., Яловец А.П.</u> Определение параметров уравнения состояния полимерных материалов по результатам экспериментов с синхротронной диагностикой	74
<u>Смирнов Н.А.</u> Расчёты упругих и термодинамических свойств Мо, Та и W при высоких давлениях и температурах	75
<u>Помыкалов Е.В., Аетпаева М.С., Яловец А.П.</u> Численное исследование механизма образования горячих точек в энергетическом материале	76
<u>Маслов С.А., Тригер С.А.</u> Дефект массы и радиальное распределение плотности в гравитирующем газовом шаре	77
<u>Тригер С.А.</u> О влиянии затухания фонон-ротонных возбуждений на обобщенную формулу Фейнмана	78

<i>Батраков П.К., Медведев М.А., Огинов А.В.</i> Двухканальная лазерная интерферометрия для реконструкции плотности электронов в лабораторных атмосферных разрядах	79
ГЛАВА 6. Базы данных по теплофизическим свойствам веществ	80
<i>Очков В.Ф., Устюжанин Е.Е., Шацких Ю.В., Егорова Н.В., Абрамова Д.А.</i> Некоторые методы применения современных баз данных в курсах «Техническая термодинамика» и «Теория теплофизических свойств веществ»	81
<i>Еркимбаев А.О., Зицерман В.Ю., Кобзев Г.А.</i> Неструктурированные теплофизические данные и ИИ	82
ГЛАВА 7. Техника теплофизических измерений	83
<i>Сенченко В.Н.</i> Методы и приборы для оптической диагностики температуры в быстропротекающем теплофизическом эксперименте	84
<i>Старостин А.А., Гурашкин А.Л., Котов А.Н., Скрипов П.В., Поволоцкий И.И.</i> Применение световода для исследований жидкости в пузырьковой мини-камере	85
<i>Каменских Ю.И., Компан Т.А., Кулагин В.И., Кондратьев С.В., Пухов Н.Ф., Власова В.В.</i> Средства повышения точности измерений термогравиметрического анализа	86
<i>Ливерко Е.А., Шахатов В.А.</i> Диагностика температуры пламени горелки и электрического разряда посредством оптической спектроскопии	87
ГЛАВА 8. Компьютерное моделирование в теплофизике	88
<i>Крутова И.Ю., Казачинский А.О.</i> Линеаризация и численное моделирование на точном решении полной системы уравнений Навье—Стокса	89
<i>Смирнов О.М., Писарев В.В.</i> Поведение смешанных хлоридов на границе раздела системы н-додекан/вода	90
<i>Губин А.А., Антонов Д.В.</i> Моделирование нагрева и испарения капли методом diffuse interface	91

<u>Князев Д.В., Левашов П.Р.</u> Применение непрерывной формулы Кубо-Гринвуда для расчёта электропроводности жидкого алюминия	92
<u>Мирзоев А.А., Верховых А.В.</u> Ab initio моделирование энергии растворения водорода в неупорядоченных ГЦК сплавах Ti-V	93
<u>Писарев В.В., Вараксин И.М.</u> Температуры плавления н-алканов в силовых полях семейства OPLS-AA	94
<u>Гасратов Ф.К., Байдин И.С., Батраков П.К., Огинов А.В.</u> Моделирование стримеров и анализ излучаемого поля с использованием метода Монте-Карло	95
ГЛАВА 9. Теплофизические свойства материалов атомной энергетики	96
<u>Чусов И.А., Новиков Г.Е., Бабаева Ю.А., Брежнев А.И.</u> Национальная база данных по физическим, термодинамическим и транспортным свойствам жидкометаллических теплоносителей в области использования атомной энергии	97
<u>Чусов И.А., Бабаева Ю.А.</u> Физические, термодинамические и транспортные свойства жидкого натрия как теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах	98
<u>Ситдыков А.А., Волосников Д.В.</u> Теплоотдача в теплоноситель на основе водного раствора борной кислоты и антикоррозионных добавок	100
ГЛАВА 10. Теплофизические свойства материалов авиационной и ракетно-космической техники	101
<u>Лепешкин А.Р.</u> Методика определения теплопроводности металлических материалов при воздействии низкочастотных механических колебаний	102
ГЛАВА 11. Теплофизические свойства нефтей, газовых конденсатов, газогидратов и природного газа	103
<u>Поднек В.Э., Кияченко Ю.Ф., Юдин И.К., Дешабо В.А., Григорьев Б.А.</u> Перспективы использования метода светорассеяния в изучении фазового поведения пластовых флюидов	104

<i>Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С.</i> Кристаллизация газонасыщенных слоев аморфного льда с зародышевыми кристаллами	105
ГЛАВА 12. Теплофизические свойства материалов в системах возобновляемой энергетики	106
<i>Костановский А.В., Зеодинев М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А.</i> Контактное электрическое сопротивление поверхности медь–графит и мельхиор–графит	107
СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ	108
СПИСОК УЧАСТНИКОВ	111
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	114

1. Уравнения состояния, фазовые переходы и критические явления

Зоны аномальной термодинамики и энтропийные фазовые переходы в плотном горячем веществе

Иосилевский И.Л.^{1,®}, Грязнов В.К.² и Шутов А.В.²

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, акад. Семенова 1, Черноголовка, Московская область, 142432, Россия

® iosilevskiy@gmail.com

В приложении к физике плотного горячего вещества обсуждаются свойства малоизученных термодинамических объектов — единых Зон Аномальной Термодинамики (ATR), объединяющих два сопряженных термодинамических объекта — зону с регулярными (т.е. безразрывными), но аномальными термодинамическими свойствами, и являющийся частью ATR необычный («энтропийный») фазовый переход (S-PT) [1]. Зона ATR это зона (аномальной) отрицательности большой группы вторых перекрестных производных термодинамического потенциала, таких как параметр Грюнайзена и др. Физический «драйвер» аномалий термодинамики в зоне ATR — это «делокализация давлением» — принудительный «распад» при сжатии каких-то связанных комплексов. Главная формально-геометрическая особенность зон ATR — многослойность термодинамических поверхностей: — $T(P,V)$, $S(P,V)$, $U(P,V)$ (температура, энтропия и внутренняя энергия). Следствием этой многослойности является аномальный характер пересечения зоны ATR P - V траекториями экстремального воздействия на вещество — ударного и изоэнтропического сжатия и расширения и изохорического нагрева вещества. Это ведет к потере в зоне ATR свойства глобальной вогнутости этих траекторий (условия Бете–Вейля) и возможности последующей гидродинамической неустойчивости простой («одноволновой») формы ударного и изоэнтропического сжатия и расширения.

[1] Iosilevskiy I L 2015 **653** 012077 arXiv:1504.058504

Квантовые расчеты теплофизических свойств жидких металлов

Левашов П.Р.^{1,®} и Минаков Д.В.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® pasha@jiht.ru

Жидкие металлы представляют собой чрезвычайно сложные физические системы, теоретическое описание которых сильно затруднено. Электронная подсистема в жидких металлах, как правило, сильно вырождена, а межэлектронное взаимодействие является достаточно существенным, поэтому классическое описание для этого случая неприменимо. Ионная подсистема является сильновзаимодействующей, а теоретические подходы для случая сильной неидеальности до настоящего времени не разработаны. Таким образом, жидкие металлы представляют собой сильно-неидеальную кулоновскую систему с вырожденной электронной подсистемой, и для получения ее свойств необходимо привлекать квантовые методы моделирования.

Сегодня наиболее точным методом моделирования двухкомпонентных кулоновских систем является метод квантовой молекулярной динамики (КМД). В основе КМД лежит метод функционала электронной плотности, имеющий строгое теоретическое обоснование. При моделировании методом КМД ионы считаются классическими точечными частицами и движутся под действием сил со стороны других ионов и электронов, а электроны мгновенно подстраиваются под текущее положение ионов. Описанный подход позволяет рассчитывать целый комплекс теплофизических свойств в широком диапазоне параметров, включая структурные, термодинамические, электронные и ионные транспортные, а также оптические свойства.

В докладе будут представлены результаты для ряда металлов по расчетам уравнения состояния, структурного фактора, теплоемкости, ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки, коэффициентов электропроводности и электронной теплопроводности, самодиффузии, вязкости и отражательной способности. Также будут обсуждаться методы оценки критических параметров. Будут

подробно рассмотрены результаты расчетов для натрия, свинца, молибдена, вольфрама, циркония в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ No. 24-19-00746.

Модели уравнений состояния материалов на основе различных характеристических функций при высоких плотностях энергии

Хищенко К.В.^{1,®}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® konst@ihed.ras.ru

Уравнения состояния материалов необходимы для моделирования нестационарных теплофизических процессов методами механики сплошных сред в качестве замыкающего соотношения системы уравнений движения. В адиабатических условиях замыкающим соотношением может служить уравнение состояния, связывающее давление, внутреннюю энергию и объем (единицы массы) вещества. Для учета переноса тепла в модели термодинамики требуется определить также и температуру. В настоящей работе рассматриваются различные модели уравнений состояния на основе характеристических функций, задаваемых в разных термодинамических переменных. Для переменных объема и температуры в качестве характеристической функцией задается свободная энергия, а для переменных объема и внутренней энергии — энтропия. Приводятся примеры построения уравнений состояния для некоторых металлов (железо, медь, молибден) и диэлектриков (хлорид натрия, полиметилметакрилат) на основе этих характеристических функций, а также результаты расчетов по этим уравнениям состояния в сравнении с имеющимися экспериментальными данными при высоких плотностях энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Исследование конгруэнтности плавления системы Ni—Al с использованием нейросетевых потенциалов межатомного взаимодействия

Онегин А.С.¹, Левашов П.Р.^{1,®} и Щелкачев Н.М.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® pasha@jiht.ru

В работе исследуется плавление упорядоченного B2-NiAl методом молекулярной динамики с использованием нейросетевого потенциала взаимодействия. Температура плавления $T_m(P)$ определяется на основе моделирования сосуществования двухфазного твердого и жидкого вещества в широком диапазоне давлений. По сравнению с имеющимися экспериментальными данными и предыдущими результатами молекулярной динамики, представленные расчеты предсказывают более сильное повышение температуры плавления с увеличением давления. Чтобы оценить термодинамическую согласованность рассчитанной линии плавления, определяются изменения энтальпии и объема при плавлении, а далее наклон кривой плавления из уравнения Клапейрона—Клаузиуса сопоставляется с производной от аппроксимации $T_m(P)$. Эти две оценки хорошо согласуются в большей части исследованного диапазона давлений, что подтверждает согласованность результатов моделирования. Было обнаружено, что сосуществующая жидкость остается, по существу, равноатомной при всех изученных давлениях с отклонениями доли алюминия от стехиометрического значения, не превышающего 5×10^{-3} . Это дает прямое атомистическое доказательство того, что плавление B2-NiAl остается конгруэнтным в рамках настоящей модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-29-01649.

Некоторые методы прогнозирования плотности жидкости и газа на линии насыщения в окрестности критической точки CO_2 и SF_6

Устюжанин Е.Е.^{1,®}, Рыков С.В.², Рыков В.А.³,
Боярских К.А.⁴ и Хищенко К.В.⁴

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», Красноказарменная 14, Москва, 111250, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Большая Морская 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия

³ Университет ИТМО, Кронвергский 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

⁴ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® evgust@gmail.com

В настоящей работе на линиях насыщения CO_2 и SF_6 рассматриваются плотности жидкости и газа (ρ_l и ρ_g), а также некоторые термодинамические комплексы. Указанные комплексы содержат плотности ρ_l , ρ_g и ρ_{cr} (плотность в критической точке на бинадали) в своей структуре. В эти комплексы включены относительная плотность жидкости $\Delta\rho_l = (\rho_l - \rho_{\text{cr}})/\rho_{\text{cr}}$, диаметр бинадали f_d , параметр порядка f_s , комплекс $Z_l = \Delta\rho_l/f_s$. Также отобраны уравнения, следующие из скейлинговой теории критических явлений. Поставлены следующие цели, связанные с CO_2 и SF_6 . Во-первых, оценить значения плотностей ρ_l , ρ_g и τ , а также значения комплексов Z_l , Z_g , ... в области экстраполяции $\Delta\tau_{\text{extr}}$, где $\tau = (T - T_{\text{cr}})/T_{\text{cr}}$, $\Delta\tau_{\text{extr}}$ — интервал $2 \times 10^{-6} < \tau < 5 \times 10^{-3}$. Во-вторых, определить диапазоны, в которых могут располагаться значения реальных значений $\rho_{l\text{real}}$, $\rho_{g\text{real}}$ и T в области $\Delta\tau_{\text{extr}}$. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Термодинамические свойства жидкой фазы тербия при высоких давлениях и температурах

Боярских К.А.^{1,®} и Хищенко К.В.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® shagom55@gmail.com

Редкоземельные элементы находят применение при решении задач современной науки на практике. В частности, как компоненты при изготовлении материалов, которые эксплуатируются в условиях высоких давлений и температур. По этой причине необходимо знать термодинамические характеристики редкоземельных металлов в широкой области фазовой диаграммы. В настоящей работе представлены результаты теоретического анализа термодинамических свойств расплава тербия при высоких плотностях энергии. На основе простой термодинамически полной модели предложено уравнение состояния жидкой фазы рассматриваемого металла. Модель представлена зависимостью удельной свободной энергии от удельного объема и температуры. Параметры (константы) модели определены из условия оптимального описания данных из ударно-волновых экспериментов, а также опытной информации о тепловом расширении металлического расплава. По полученному уравнению состояния проведены расчеты термодинамических характеристик жидкого тербия в условиях, соответствующих рассмотренным экспериментам. Достигнуто согласие модельных зависимостей с опытными данными. Результаты настоящей работы могут быть использованы при математическом моделировании физических процессов при высоких плотностях энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Уравнение состояния меди и медьсодержащих смесей при высоких давлениях и температурах в ударных волнах

Середкин Н.Н.^{1,®} и Хищенко К.В.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® nikser12@yandex.ru

В настоящей работе уравнения состояния для меди и других компонентов, используемых в смесях с этим металлом, построены с использованием термодинамической модели в форме функции удельной энергии Гельмгольца (свободной энергии) от удельного объема и температуры. Уравнения состояния для медьсодержащих смесей разработаны в предположении механического и термического равновесия между компонентами в форме функции удельной энергии Гиббса от давления и температуры, которая складывается из произведений удельных энергий Гиббса и массовых долей компонентов. Получено согласие рассчитанных ударных адиабат для компонентов и смесей с экспериментальными данными по сжатию рассматриваемых материалов в ударных волнах во всем исследованном диапазоне плотностей и давлений. Представленные уравнения состояния могут быть использованы для численного моделирования теплофизических процессов в материалах при высоких давлениях и температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Учет плавления в уравнении состояния алюминия при высоких температурах в ударных волнах

Обручкова Л.Р.^{1,®}, Боярских К.А.¹, Середкин Н.Н.¹ и
Хищенко К.В.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® o_liliya@ihed.ras.ru

Термодинамические свойства материала зависят от его фазового состояния, и учет фазовых переходов может оказывать заметное влияние на результаты численного моделирования процессов с интенсивным импульсным энерговыделением. В настоящей работе рассматривается простая модель учета фазового перехода твердого тела в жидкость при построении уравнения состояния металла в широком диапазоне плотностей и температур. Предложены выражения для функции свободной энергии от своих естественных переменных для твердотельных и жидкостных состояний вещества. На основе этой модели для алюминия проведены расчеты кривой плавления и ударных адиабат образцов с различной начальной плотностью. Результаты этих расчетов сопоставлены с имеющимися данными из экспериментов с ударными волнами. Предложенное уравнение состояния может быть эффективно использовано при моделировании плавления металла под действием больших термомеханических нагрузок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Моделирование ударно-волнового нагружения диоксида германия

Маевский К.К.^{1,®}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия

® konstantinm@hydro.nsc.ru

Исследования поведения оксидов при высоких давлениях и температурах представляет большой интерес в различных областях физики конденсированных сред, включая геофизику [1]. Фазы сверхвысокого давления кварца (SiO_2) важны для понимания динамики нижних слоев мантии и на границах ядро-мантия крупных каменных планет, при этом диоксид германия (GeO_2) может рассматриваться как аналог SiO_2 . В данном исследовании представлены результаты моделирования ударно-волнового нагружения GeO_2 до давлений 900 ГПа с учетом полиморфных фазовых переходов. Образец рассматривается как смесь фаз низкого и высокого давления в области фазового перехода. Модель, используемая для расчетов, предполагает, что компоненты материала находятся в термодинамическом равновесии при ударно-волновом нагружении [2, 3]. Получено уравнение состояния для фазы низкого давления В1 (α -кварцевого типа GeO_2) в диапазоне до 60 ГПа, уравнение состояния для фазы В2 GeO_2 (тип HP-PdF₂) для давления до 400 ГПа. Также получено уравнение состояния для фазы В3 сверхвысокого давления (типа котуннита) в диапазоне до 900 ГПа. Проведена верификация полученных результатов моделирования с данными полученными на основании экспериментов и расчетами других авторов [1, 4].

- [1] Kim D, Ocampo I K, Smith R F, Coppari F, Millot M, Wicks J K, Rygg J R, Eggert J H and Duffy T S 2023 *Phys. Rev. X*. **13**(3) 031025
- [2] Maevskii K K 2024 *Combust., Expl., Shock Waves*. **60**(2) 260–268
- [3] Maevskii K K 2025 *J Appl Mech Tech Phy*. **66**(S1) S72–S77
- [4] Jackson I and Ahrens T J 1979 *Phys. Earth Planet. Inter.* **20**(3) 60–70

Вскипание перегретой воды в случае импульсного изотермического воздействия

Волосников Д.В.^{1,®}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® dima_volosnikov@mail.com

Сведения о значениях температуры перегрева при больших скоростях нагрева необходимы для развития и создания технологий локального импульсного воздействия. Резкое изменение тепловой нагрузки, включение или переключение в условиях джоулевого тепловыделения обычно связаны со значительными тепловыми потоками и происходят в малоизученной области перегретых, не вполне устойчивых состояний. В данном исследовании методика управляемого импульсного (длительностью 1 с) нагрева проволоочного зонда была дополнена скоростной видеосъемкой (СВС) процессов теплообмена в полном масштабе микронагревателя (площадью менее 1 кв.мм), погруженного в воду (находящейся при 25 С и атмосферном давлении). Выявлены температурные значения четырех режимов теплообмена между нагревателем и перегретой водой: режим кондуктивного теплообмена, режим кондуктивно-конвективного теплообмена (100 – 150)С, режим спонтанного вскипания (150 – 170)С и режим сверхинтенсивного теплообмена (СИТ) (170 – 184) С. С помощью СВС установлено, что при вскипании в режиме СИТ возникают термомеханические колебания зонда, а коэффициент теплоотдачи увеличивается в два раза, относительно случая спонтанного вскипания на неподвижном зонде. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>.

Теплообмен в разбавленных водных растворах 1-бутанола и 1-гептанола в условиях импульсного нагрева

Поволоцкий И.И.^{1,®}, Старостин А.А.¹, Шангин В.В.¹,
Волосников Д.В.¹, Котов А.Н.¹ и Скрипов П.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® iliyapov@rambler.ru

Исследование нестационарного теплообмена в жидкостях, которые в англоязычной литературе называют «self-rewetting fluids», актуально для решения ряда задач, связанных с анализом работоспособности элементов теплообменного и энергетического оборудования в условиях импульсного тепловыделения. Эти жидкости представляют собой разбавленные водные растворы алифатических спиртов с числом атомов углерода в молекуле ≥ 4 . Большинство исследований этих жидкостей было выполнено в условиях квазистационарного режима нагрева.

В данной работе исследовались свойства нестационарной теплоотдачи и величины критического теплового потока на поверхности тонкого проволочного зонда в разбавленных водных растворах 1-бутанола (C_4H_9OH) и 1-гептанола ($C_7H_{16}O$) в условиях импульсного нагрева.

Опыты поставлены методом управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, погруженного в исследуемую жидкость. Суть метода заключается в разогреве зонда прямоугольным импульсом электрического тока длительностью 100 мс.

Установлено, что в условиях нестационарного теплообмена, введение спиртовых добавок в воду приводит к некоторому ухудшению теплоотдачи на стадии кондуктивного теплообмена, но в 1,5 раза повышает диапазон высокоинтенсивного пузырькового кипения и величину критического теплового потока.

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

Перегрев кластеров при неизотермической нуклеации

Перевощиков Е.Е.^{1,2,@} и Жуховицкий Д.И.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

² Московский физико-технический институт, Институтский пер. 9, Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

@ perevoshchikyy@jiht.ru

Исследована стационарная нуклеация пар-жидкость в системе Леннарда-Джонса в изотермических и неизотермических условиях с использованием молекулярной динамики. В неизотермических расчетах термостатированы только мономеры, тогда как более крупные кластеры эволюционируют свободно.

Получено распределение температуры по размерам кластеров [1] в широком диапазоне пересыщений. При низких пересыщениях S малые кластеры оказываются холоднее мономеров. По мере роста кластеров их температура увеличивается, достигая прежних значений при околоскритических размерах. При более высоких пересыщениях зависимость температуры от размера становится монотонно возрастающей. Определяя распределение кластеров по размерам, неизотермичность влияет на неидеальность пара. Так, при пересыщении $S \approx 2.96$ перегрев увеличивает концентрации докритических кластеров, снижая фактор сжимаемости в ≈ 1.6 раза по сравнению с изотермической кинетикой; при $S \approx 3.75$ уменьшаются концентрации кластеров во всем диапазоне размеров, что повышает фактор сжимаемости на $\approx 15\%$.

Измеренные скорости нуклеации для неизотермического случая согласуются с двухпараметрической моделью, дополненной поправкой на неизотермическую диффузию [2], предсказывающей снижение скорости примерно на порядок по сравнению с изотермической кинетикой. Отличительным моментом является наблюдение ретроградной зависимости скорости нуклеации от пересыщения.

[1] Perevoshchikov E E and Zhukhovitskii D I 2025 *Colloid J.* **87**(4) 537

[2] Zhukhovitskii D I 2024 *J. Chem. Phys.* **160**(19) 194505

Определение свойств растворов пропан–азот и н-бутан–азот на основе уравнения состояния

Хотиенкова М.Н.^{1,®} и Андбаева В.Н.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® mary-anton@bk.ru

Данные о фазовом равновесии и термодинамических свойствах растворов являются фундаментальной основой для определения поверхностного натяжения. В этой связи особенно актуальна разработка надежных моделей для предсказания свойств многокомпонентных систем. Поэтому в данной работе были построены уравнения состояния для технологически значимых растворов пропана–азота и н-бутана–азота. Предложенные уравнения состояния позволяют с высокой точностью вычислять концентрации и плотности растворов в широком диапазоне параметров состояния. В работе использовалось уравнение состояния, построенное на основе свободной энергии Гельмгольца. Свободная энергия Гельмгольца смеси представлена в виде суммы трех частей: 1 — описывает свойства идеальной газовой смеси, 2 — задает свойства чистых компонентов, 3 — учитывает смешивание компонентов раствора. Состав сосуществующих фаз раствора и значения ортобарных плотностей жидкой и паровой фаз определяются по значению равновесного давления. Проведено сравнение полученных значений с доступными данными из литературы.

Экспериментальное исследование термодинамических свойств системы (вода + н-гексан + 2-пропанол) равных долей компонентов в жидком, газообразном и сверхкритическом состояниях

Османова Б.К.^{1,®}, Базаев Э.А.¹, Базаев А.Р. и
Джаппаров Т. А.-Г.

¹ Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук,
Шамиля 39а, Махачкала, Республика Дагестан, 367030, Россия

® badji@mail.ru

Методом пьезометра постоянного объёма по изохорам получены значения p, T и зависимости $p(\rho, T)$ исследуемой тройной системы вода + н-гексан + 2-пропанол (равные молярные доли компонентов) в диапазоне температур 373,15–623,15 К, плотностей 40–590 кг/м³ и давлений до 60 МПа.

Зависимость давления от плотности и температуры описана полиномиальным уравнением состояния через фактор сжимаемости Z :

$$Z = \frac{p}{RT\rho_m} = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \frac{\varpi^i}{\tau^j},$$

откуда

$$p = RT\rho_m \left[1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \frac{\varpi^i}{\tau^j} \right].$$

Здесь:

- ρ_m — молярная плотность (моль/м³);
- $\varpi = \rho/\rho_k$, $\tau = T/T_k$ — приведённая плотность и приведённая температура;

- ρ_k, T_k — критическая плотность и критическая температура смеси;
- $R = 8,314 \text{ J (mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$ — универсальная (молярная) газовая постоянная.

Среднее относительное отклонение рассчитанных по уравнению значений давления от экспериментальных составляет 0,9 %.

На основе приведённого уравнения состояния и стандартных термодинамических соотношений [1] вычислены основные термодинамические свойства исследованной эквимолярной системы в жидком, газообразном и сверхкритическом состояниях.

[1] Шпильраин ЭЭ и Кессельман П 1977 *Основы теории теплофизических свойств веществ* (М.: Энергия)

Линии фазового равновесия цезия, ртути и натрия

Рыков С.В.^{1,®}, Кудрявцева И.В.² и Рыков В.А.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Большая Морская 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия

² Университет ИТМО, Кронвергский 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

® togg1@yandex.ru

В рамках системы взаимосогласованных уравнений [1] разработана линия фазового равновесия ряда металлов в диапазоне от тройной точки до критической. Давление и плотность насыщенного пара, плотность насыщенной жидкой фазы ртути описываются уравнениями, согласованными друг с другом по показателям степени и коэффициентам, и передаются во всем указанном диапазоне, включая широкую окрестность критической точки, с неопределенностью, соответствующей неопределённости опытных данных. Методически предложенный подход к описанию линии фазового равновесия цезия, ртути и натрия опирается на теорию ренормализационной группы и модифицированное уравнение Клапейрона-Клаузиуса [1, 2]. Показано, что в области малых давлений предложенный метод позволяет, во-первых, согласовать разность теплоемкостей насыщенной жидкости и идеально-газовой теплоемкости с производной теплоты парообразования по температуре, во-вторых, обеспечить предельный переход на паровой ветви линии насыщения к уравнению состояния Менделеева-Клапейрона. В широкой окрестности критической точки линия насыщения описывается с учетом асимметрии реальной жидкости [2], а линия упругости – в соответствии с масштабной теорией критической точки. Выполнено сравнение с известными моделями линии насыщения цезия, ртути и натрия, в частности, моделью Апфельбаума-Воробьева [3].

[1] Rykov S V, Kudryavtseva I V and Rykov V A 2024 *Thermophys. Aeromech.* **31**(4) 685–698

[2] Zhou Z, Cai J and Hu Y 2022 *Molecular Physics* **120** e1987541

[3] Apfelbaum E M and Vorob'ev V S 2015 *J. Phys. Chem. B.* **119**(35) 11825–11832

Уравнения состояния NH_3 и CO_2 в рамках феноменологической теории критической точки

Рыков С.В.¹, Кудрявцева И.В.² и Рыков В.А.^{2,®}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Большая Морская 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия

² Университет ИТМО, Кронвергский 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

® rykov-vladimir@rambler.ru

Для NH_3 и CO_2 разработаны фундаментальные уравнения состояния (ФУС) в форме свободной энергии Гельмгольца. Рабочие диапазоны уравнений состояния (УС): для NH_3 от тройной точки до 1000 К и 110 МПа; для CO_2 – до 1000 К и 800 МПа. В основу подхода положена феноменологическая теория (ФТ) критической точки (КТ) [1], связывающая энтропию с коэффициентом изотермической сжимаемости, изохорной и изобарной теплоемкостью. В рамках ФТ [1] и разработано используемое в данной работе выражение для свободной энергии Гельмгольца, которое удовлетворяет в окрестности КТ масштабной теории, а в регулярной области переходит в УС вириального вида. В структуру ФУС входит сингулярная составляющая, которая обеспечивает выполнение в асимптотической окрестности КТ степенных законов масштабной теории и для расчета параметров которой не нужно привлекать опытные данные о свойствах исследуемого вещества, кроме ацентрического фактора и критического фактора сжимаемости [3,3]. Проведено сравнение предложенного ФУС: для NH_3 , с ФУС Gao и др. (2023), УС Sengers и Edison (1999), таблицами ГСССД Голубева (1978), Клецкого (1978), Рыкова и др. (2009); для CO_2 с ФУС Span и Wagner (1996), УС Безверхова и др. (2020), УС Kiselev и Ely (2007).

[1] Kudryavtseva I V and Rykov S V 2024 *Russ. J. Phys. Chem. A* **98** 2461–2474

[2] Rykov S V and Kudryavtseva I V 2025 *Russ. J. Phys. Chem. A* **99** 659–668

[3] Лысенков В Ф и Рыков В А 1991 *ТВТ* **29** 1236–1238

Модифицированный метод спектропирометрии для определения температуры плавления циркония и гафния

Булава А.С.^{1,®}, Брыкин М.В.¹, Вервикишко Д.Е.¹,
Вервикишко П.С.¹, Фролов А.М.¹ и Шейндлин М.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® bulava.as@phystech.edu

Для измерения излучательной способности циркония и гафния в момент их плавления при нагревании индустриальным лазером был использован модифицированный спектропирометрический метод [1]. Благодаря включению дополнительных данных о нормальной спектральной излучательной способности, полученных с помощью относительной лазерной рефлектометрии, удалось повысить точность измерений температуры плавления в условиях лазерного нагрева. Была определена нормальная спектральная излучательная способность обоих металлов в диапазоне длин волн 600–860 нм в момент плавления. Сравнение измеренных температур плавления с существующими данными, полученными традиционными методами с использованием эталонного черного тела, показывает отличное согласие с рекомендуемыми литературными значениями с погрешностью не более 0.4%.

[1] Sheindlin M, Falyakhov T, Petukhov S, Valyano G and Vasin A 2018 *Adv. Appl. Ceram.* **117** 48–55

Новые корреляции между критическими амплитудами и критическими индексами

Кудрявцева И.В.^{1,®} и Рыков С.В.²

¹ Университет ИТМО, Кронвергский 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Большая Морская 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия

® togg1@yandex.ru

Известные корреляции для критических амплитуд (КА) линии насыщения, критической изотермы и коэффициента изотермической сжимаемости учитывают зависимость КА только от ацентрического фактора ω [1] или соответствующего критического индекса [2, 3]. Эти корреляции имеют принципиальный недостаток: они не учитывают эффект "перемешивания" КА, когда вещество с большим ω имеет КА меньшую, чем КА вещества с меньшим ω . Этот эффект "перемешивания" КА можно учесть, если принять гипотезу: КА линии насыщения, критической изотермы и коэффициента изотермической сжимаемости – это функция трех независимых переменных: соответствующих критических индексов, ω и критического фактора сжимаемости. В рамках данной гипотезы разработаны нелинейные корреляции для КА линии насыщения, критической изотермы и коэффициента изотермической сжимаемости. Для апробации этих корреляций привлечены из литературных источников КА 37 веществ, включая He^4 , UF_6 , натрий, цезий, ртуть и литий. Показано, что отклонения значений КА линии насыщения, критической изотермы и коэффициента изотермической сжимаемости этих веществ от рассчитанных по предложенным корреляциям существенно меньше, чем в случае известных корреляций.

- [1] Perkins R A, Sengers J V, Abdulagatov I M and Huber M L 2013 *Int. J. Thermophys.* **34** 191–212
- [2] Ivanov D Y 2008 *Critical Behavior of Non-Ideal Systems* (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA)
- [3] Rykov S V and Kudryavtseva I V 2025 *Russ. J. Phys. Chem. A* **99** 659–668

Термодинамические свойства тетралина в широком диапазоне параметров состояния

Григорьев Б.А.¹, Александров И.С.^{2,®}, Герасимов А.А.²
и Поднек В.Э.³

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Малоохтинский пр-кт, д. 45, г.
Санкт-Петербург, 195112, Россия

² ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический
университет», Советский проспект, 1, Калининград, 236022, Россия

³ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, ул. Губкина,
д. 3, Москва, 119333, Россия

® alexandrov_kgrd@mail.ru

Тетралин $C_{10}H_{12}$ является представителем гибридных циклических углеводородов. Его можно отнести к технически важным веществам: он достаточно широко применяется в качестве растворителя жиров, смол и лаков, а также используют в производстве поверхностно-активных веществ и инсектицидов. Тетралин применяют в процессах экстракции угля и в качестве теплоносителя в диапазоне температур 480–580 К. В смеси с этанолом тетралин используют в качестве моторного топлива.

Изучение теплофизических свойств (ТФС) тетралина важно не только для практического использования в технологической практике, но и для дальнейшего развития прогнозных методов расчёта ТФС, основанных на теории термодинамического подобия, а также структурно-групповых методах. Тетралин интересен тем, что он имеет гибридную структуру и располагается между декалином $C_{10}H_{16}$ и нафталином $C_{10}H_8$. Установление взаимосвязи между значениями ТФС этих веществ в рамках теории подобия представляет несомненный научный интерес.

В данной работе представлены результаты разработки фундаментального уравнения состояния (ФУС) тетралина в диапазоне температур от тройной точки до 700 К при давлениях до 100 МПа. Уравнение описывает безразмерную свободную энергию Гельмгольца как функцию приведённой плотности и температуры. Избыточная часть свободной энергии Гельмгольца опи-

сывается четырнадцати-константным уравнением, содержащим шесть полиномиальных и восемь экспоненциальных членов. Особенностью разработки данного ФУС является то, что тетралин относится к малоисследованным веществам. Экспериментальные данные имеются в сравнительно узких диапазонах параметров состояния, перечень исследованных свойств также ограничен. Поэтому в массив данных были включены как экспериментальные значения, принятые за основу, так и расчётные, полученные различными прогнозными методами и принятые, в основном, для тестирования экстраполяционных возможностей ФУС.

В работе представлены результаты сравнения экспериментальных и расчётных значений термодинамических свойств с полученными по ФУС. Показана достаточно высокая точность расчётов и хорошие экстраполяционные возможности уравнения применительно ко всем термодинамическим свойствам.

Исследование водных дисперсий нанообъектов, синтезированных электрическим разрядом в воде на электродной паре Ag-W

Макарова С.В.^{1,®}, Субботин Д.И.¹ и Снетов В.Н.¹

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Дворцовая Набережная 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия

® makarovasvetlana98@mail.ru

Синтез нанообъектов является актуальной задачей, связанная с их уникальными свойствами относительно веществ такого же состава в привычном в виде. Нанообъекты могут применяться в различных отраслях таких, как в медицине (производство антибактериальных средств), в косметических средствах (производство солнцезащитных кремов), в производстве топливных элементов в качестве катализаторов, в микро- и оптоэлектронике [1–4]. Одним из методов получения нанообъектов и водных нанодисперсий является синтез с использованием электрического разряда в бидистиллированной воде. Этот метод основан на эрозии электродов обусловленной высокой плотностью тока в точке привязки электрической дуги к электродам и формировании высоких температур на их поверхности. Свойства таких объектов в значительной степени зависит от природы используемых электродов, формы импульса, напряжения, силы тока, геометрии разрядного пространства, а также расхода и чистоты применяемой воды. Данный метод синтеза не требует химических веществ и других мер пробоподготовок, кроме электроэнергии и металлических стержневых электродов. В качестве материалов электрода были применены серебро и вольфрам. Гравиметрическим методом обнаружено, что в водных дисперсиях при использовании вольфрамовых электродов потеря массы составила на аноде 64,16 мг/л, а на катоде 23,12 мг/л. Для электродной пары Ag(анод)–W(катод) потеря массы на аноде составила 80,71 мг/л, а на катоде – 40,0 мг/л. При обратной полярности электродов W(анод)–Ag(катод) наблюдалась потеря массы

на аноде 64,24мг/л, а на катоде – 21,92мг/л. Потеря массы преимущественно приходится на анодную часть - эрозия на аноде превышает эрозию на катоде приблизительно в три раза. В образцах Ag(анод)–W(катод) большая масса эродированного материала также приходится на анодную часть. В обратной полярности W(анод)–Ag(катод) большая потеря по массе приходится на вольфрам. Серебро в этой паре проявляет наименьшую активность. Весовое содержание в Для противоположной системы W(анод)–Ag(катод): 64,18 % вес. вольфрама, 10,16 % вес. серебра и 19,14 % вес кислорода. Возможно в образце присутствуют: WO₃, Ag₂O, Ag.

- [1] Kolikov V A, Kurochkin V E, Panina L K, Rutberg F G, Snetov V N and Stogov A Y 2007 *Journal of Technical Physics* **77**(2) 118–125
- [2] Shitova E S 2023 *Nanotechnology* **16**(1) 30–40
- [3] Tibbetts K M 2019 *Research Outreach* (106) 50–53
- [4] Ahmadi M, R Y and Guinel M F 2014 *Journal of Materials Research*

Переход “проводник–изолятор” в стационарной ультрахолодной плазме

Думин Ю.В.^{1,2,®} и Свирская Л.М.³

¹ Астрономический институт Штернберга, Московский государственный университет имени Ломоносова, Университетский просп. 13, Москва, 119992, Россия

² Институт космических исследований Российской академии наук, Профсоюзная 84/32, Москва, 117997, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

® dumin@yahoo.com

Представлена теоретическая модель ионизационно–рекомбинационного баланса в смеси ультрахолодного ридберговского газа и плазмы, который обусловлен коллективными процессами, а не индивидуальными межчастичными взаимодействиями. Для этого рассмотрена электрон–ионная система, в которой каждый электрон большую часть времени движется в эффективном центробежном потенциале, создаваемом ближайшим ионом, и иногда перескакивает в соседние потенциальные ямы за счёт возмущений от удалённых частиц. Эти возмущения описываются термостатом с эффективной “вириальной” температурой. Таким образом, электроны с достаточно большой энергией, которые могут вылететь из локальной потенциальной ямы, трактуются как свободные (или проводящие); в то время как электроны с достаточно малой энергией, движение которых ограничено потенциальной ямой, – как образующие ридберговские атомы.

Проведённые расчёты показывают, что с возрастанием плотности частиц имеет место весьма резкий переход от изолирующего состояния системы (ридберговского газа) к проводящему (плазме), который отчасти напоминает переход Мотта в физике конденсированных сред. Данная модель представляет интерес для недавних экспериментов со стационарной ультрахолодной плазмой и могла бы стать интересным направлением для дальнейших исследований.

2. Транспортные, оптические и радиационные свойства веществ

Первопринципные расчеты электропроводности и оптических свойств циркония и гафния

Фокин В.Б.^{1,2,®}, Минаков Д.В.^{1,2}, Парамонов М.А.¹ и
Демьянов Г.С.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

² Московский физико-технический институт, Институтский пер. 9,
Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

® Vladimir.fokin@phystech.edu

Цирконий и гафний — тугоплавкие металлы, которые широко используются в атомной промышленности. Произведен расчет удельной электропроводности и нормальной спектральной излучательной способности в широком диапазоне температур (до 10 кК) первопринципными методами посредством квантово-молекулярно-динамического моделирования. Динамическая электропроводность вычисляется с применением формулы Кубо–Гринвуда. На основе вычисленной электропроводности с использованием преобразования Крамерса–Кронига можно получить оптические свойства — излучательную способность, показатель преломления, отражательную способность. Полученные данные по электропроводности и оптическим свойствам можно применять при планировании эксперимента и при проектировании промышленных установок.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ No.26-19-00980).

Теплофизические свойства алкиловых эфиров молочной кислоты

Богатищева Н.С.^{1,®}, Никитин Е.Д.¹, Попов А.П.¹ и
Файзуллин М.З.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул.
Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® Bogatishcheva@mail.ru

Алкиловые эфиры молочной кислоты, лактаты, представляют собой важный класс органических соединений с широким спектром промышленного применения. Благодаря низкой токсичности, высокой растворяющей способности и биоразлагаемости эти вещества рассматриваются в качестве перспективной альтернативы традиционным растворителям и пластификаторам. Разработка новых технологических процессов с использованием лактатов требует наличия достоверных данных об их теплофизических свойствах. В докладе будут представлены результаты измерения критических параметров, изобарной теплоемкости и коэффициента температуропроводности метилового, этилового, пропилового, бутилового и пентилового эфиров молочной кислоты. Для определения критической температуры и давления лактатов был применен метод импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость, позволяющий исследовать свойства термически неустойчивых соединений. Изобарная теплоемкость измерялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии с помощью установки DSC 204 F1 Phoenix Netzsch, коэффициент температуропроводности - методом лазерной вспышки на установке LFA-457 Netzsch при атмосферном давлении в широком температурном диапазоне. В эксперименте использовались образцы веществ с чистотой не менее 99%. Относительные расширенные неопределенности при доверительной вероятности 0.95: $U_r(T_c) = 0.015$, $U_r(p_c) = 0.04$, $U_r(C_p) = 0.03$, $U_r(a) = 0.05$.

Распространение температурной волны через полупрозрачное твердое тело

Горбатов А.И.^{1,2,®} и Ивлиев А.Д.^{3,4}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева, 30, Екатеринбург, Свердловская обл., 620144, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

³ Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

⁴ Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования "Технический университет УГМК", пр-т Успенский, 3, г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., 624091, Россия

® ad_i48@mail.ru

В качестве современных конструкционных и теплозащитных материалов используются, в частности, полупрозрачные среды. Такими материалами являются, например, различного рода керамики. Распространение тепловых возмущений через полупрозрачные среды сопровождается появлением двух потоков энергии, один из которых кондуктивный, связан с передачей энергии за счет теплопроводности, второй – радиационный, обусловленный передачей энергии излучением. Представляет интерес изучение процесса распространения температурной волны через полупрозрачные среды. Рассмотрено воздействие гармонического теплового потока на поверхность плоскопараллельной пластины. Пластина представляет собой полупрозрачное серое тело с заданными показателем преломления и коэффициентами поглощения и рассеяния излучения. Кроме того, плотность, теплоемкость и теплопроводность материала пластины считаются заданными и независимыми от температуры. На поверхностях пластины находятся тонкие поглощающие покрытия, характеризующиеся коэффициентами отражения и коэффициентами излучения (степенью черноты) не зависящими от частоты излучения. Предполагается наличие конвективно-радиационного теплообме-

на пластины с окружающей средой. Перенос энергии описывается интегро-дифференциальным уравнением, аналитическое решение которого в поставленной задаче невозможно. В приближении метода моментов это уравнение решено численно. Численное решение связанной задачи теплопроводность – излучение, основано на консервативном интегро-интерполяционном методе и итерационной схеме, основанной на методе Ньютона при учете нелинейности. Результаты решения данной задачи сравнивались с известным аналитическим приближенным решением подобной задачи для импульсного теплового воздействия и показали удовлетворительное согласие. При рассмотрении гармонического воздействия рассматривался сдвиг фазы колебаний температуры на второй поверхности пластины по отношению к фазе падающего на первую поверхность гармонического теплового потока. Расчеты, выполненные в данной работе, показали наличие зависимости величины фазового запаздывания от степени прозрачности (коэффициента поглощения) материала пластины. Определены численные значения частот температурных волн (частот модуляции теплового потока) для заданного значения толщины и коэффициента поглощения материала пластины, при которых параметры волны определяются в основном либо кондуктивной, либо радиационной составляющими теплового потока.

Фононный ангармонизм и решеточная теплопроводность удвоенных полугейслеровых сплавов $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$ и $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$: исследование с использованием теории функционала плотности и машинного обучения

Филанович А.Н.^{1,2,@}, Лукоянов А.В.^{1,2} и Повзнер А.А.¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 21, Екатеринбург, 620000, Россия

² Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, Софья Ковалевская ул. 18, Екатеринбург, 620219, Россия

@ a.n.filanovich@urfu.ru

Удвоенные полугейслеровы сплавы представляют собой новый класс материалов с низкой решеточной теплопроводностью, перспективных для термоэлектрических применений [1, 2]. В данной работе фононные спектры, параметры Грюнайзена и решеточная теплопроводность удвоенных полугейслеровых сплавов $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$ и $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$ исследуются с использованием *ab initio* методов и недавно разработанного универсального потенциала межатомного взаимодействия [3] MACE. Мы сравниваем результаты, полученные различными методами расчета решеточной теплопроводности, включая решение линейаризованного транспортного уравнения Больцмана, метод Дебая–Каллауэя и формулу Слэка. Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИФМ УрО РАН и контракта FEUZ-2026-0013.

[1] Anand S *et al.* 2019 *Joule* **3** 1226–1238

[2] Filanovich A N, Povzner A A and Lukoyanov A V 2023 *Mater. Chem. Phys.* **306** 128030

[3] Wines D and Choudhary K 2025 *ACS Materials Lett.* **7** 2105–2114

3. Термодинамические свойства веществ в конденсированном состоянии

Уравнение Майера для классических проводников

Палчаев Д.К.^{1,®}, Мурлиева Ж.Х.¹ и Рабаданов М.Х.¹

¹ Дагестанский государственный университет, Магомеда Гаджиева 43а, Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия

® dairpalchev@mail.ru

Дебаевский подход к интерпретации температурной зависимости кинетических коэффициентов, как и для теплоемкости, представляется интерполяционными выражениями [1], основанными на выборе специальной функции с управляющим подгоночным параметром. Причем этот параметр (температура Дебая) сам зависит от температуры сложным, «пока не понятным, образом» [1]. В работе [1] цитируется фраза Грюнейзена: «Мне кажется сомнительным, учитывая сложные процессы в электропроводности, что эмпирически найденное соответствие ... имеет прямое теоретическое объяснение».

Нами установлена универсальная связь формирования температурных зависимостей атермического электросопротивления, коэффициента теплового расширения и теплоемкости, разделенных на текущую температуру на примере классических металлов. Температурные зависимости для пятнадцати металлов, в приведенных координатах, ложатся на одну кривую. Она описывается уравнением Майера, где второе слагаемое, отражающее процесс компенсации теплового давления изменением объема решетки, представляется выражением, включающим параметр ангармонизма и время релаксации зарядовых возбуждений.

Установлено, что каждому проводнику характерен «энергостат», задаваемый уровнем энергии Ферми, размытие которого ограничивается характеристической частотой колебаний атомов. Таким образом, в докладе представлена расшифровка связи кинетических и термодинамических свойств классических металлов, упоминаемой Грюнейзеном.

Работа выполнена при поддержке ГЗ FZNZ-2025-0003.

[1] Grimvall G 1999 *Thermophysical Properties of Materials* (Stockholm, Sweden: Elsevier Science B.V.) the Royal Institute of Technology

Связь фононного теплосопротивления и коэффициента теплового расширения сверхпроводников ниже критической температуры

Мурлиева Ж.Х.^{1,®}, Палчаев Д.К.¹ и
Гаджимагомедов С.Х.¹

¹ Дагестанский государственный университет, Магомеда Гаджиева 43а,
Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия

® zhariyat@mail.ru

Отсутствует интерпретация наблюдаемого факта роста [1,2] теплопроводности сверхпроводников ниже температуры перехода. Фононный вклад в теплосопротивление обусловлен ангармонизмом колебаний атомов, который проявляется в виде теплового расширения. В высокотемпературных сверхпроводниках при переходе коэффициент теплового расширения (КТР) уменьшается до нуля [3, 4], затем приобретает отрицательный знак. На основе экспериментальных данных [5] установлено, что в каждом равновесном состоянии фононное теплосопротивление прямо пропорционально произведению КТР на температуру. Коэффициент пропорциональности представляет собой характеристическое для каждого материала теплосопротивление, различное для области положительных и отрицательных значений КТР. На образцах монокристаллического кремния разного размера нами [5] было показано стремление теплосопротивления к нулю при инверсии знака КТР. В случае теплосопротивления этот эффект «смазывается» из-за рассеяния фононов на границах образца, поэтому следует ожидать лишь его уменьшение ниже значения, определяемого граничным вкладом. Здесь показано наличие прямой линейной корреляции теплосопротивления и КТР, представленной в приведённых координатах, для сверхпроводящего состояния YBCO в области положительных и отрицательных значений КТР.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZNZ-2025-0003.

- [1] Ginzburg V L 1998 *Sov. Phys. Usp.* **41** 307–311
- [2] Cohn J L, Skelton E F, Wolf S A *et al.* 1992 *Phys. Rev. B* **45** 13144–13147
- [3] Meingast C 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 1634–1637
- [4] Rabadanova A E, Palchaev D K, Efimchenko V S *et al.* 2025 *Next Materials* **9** 100901
- [5] Murlieva Z K, Kazbekov K K, Palchaev D K *et al.* 2003 *Physics of the Solid State* **45** 2173–2176

Поверхностное натяжение углеводородных растворов с водородом, гелием, азотом и метаном

Андбаева В.Н.^{1,®} и Хотиенкова М.Н.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® andbaeva@mail.ru

Переход на водородную энергетику и расширение областей применения сжиженных углеводородных газов требуют глубокого понимания теплофизических характеристик бинарных смесей. Изучение теплофизических свойств растворов имеет большое значение для развития фундаментальной базы знаний и создания точных методов расчета фазового равновесия. В статье представлены результаты экспериментального определения поверхностного натяжения растворов углеводородов (пропана, изобутана, *n*-бутана) с азотом, гелием, метаном и водородом. Измерения проводились дифференциально-капиллярным методом вдоль изотерм в диапазоне давлений от давления насыщения чистого углеводорода до 4 МПа. Были определены барические и концентрационные зависимости поверхностного натяжения растворов в широком диапазоне температур. Установлена качественная разница в влиянии небольших добавок водорода и гелия на барические и концентрационные зависимости растворов. Полученные данные о поверхностном натяжении можно использовать для определения достижимой температуры перегрева растворов в рамках классической теории нуклеации.

Кристаллизация аморфных сплавов FeNiBSiNb и их свойства при высоких температурах

Русанов Б.А.^{1,®}, Базлов А.И.², Русанова А.И.³,
Сидоров В.Е.¹ и Ладьянов В.И.⁴

¹ Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

² Национальный университет науки и технологий MISIS, Ленинский просп. 4, Москва, 119049, Россия

³ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Амундсена 101, Екатеринбург, Свердловская область, 620016, Россия

⁴ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. Татьяны Барамзиной, 34, Ижевск, Удмуртская Республика, 426067, Россия

® rusanov@uspu.ru

В настоящей работе впервые изучены электрическое сопротивление и магнитная восприимчивость сплавов FeNiBSiNb, а также кристаллизация аморфных образцов. Сплавы FeNiBSiNb с различным соотношением Fe/Ni получены в индукционной печи. Электрическое сопротивление исследовано бесконтактным методом во вращающемся магнитном поле, магнитная восприимчивость - методом Фарадея. Опыты выполнены в температурном интервале 900-1800 К в тиглях из Al₂O₃ в защитной атмосфере гелия. Аморфные ленты получены методом спиннингования в защитной атмосфере аргона. Кристаллизация лент изучена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Установлено, что температурные зависимости магнитной восприимчивости сплавов при высоких температурах могут быть описаны обобщённым законом Кюри-Вейса, а сопротивление может быть описано линейными функциями. Рассчитаны некоторые параметры электронной структуры сплавов FeNiBSiNb. Кристаллизация аморфных образцов проходит в несколько стадий. Рассчитаны наиболее известные критерии GFA.

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

Сверхбыстрая калориметрия аморфных сплавов Al-Ni-Co-PЗМ

Русанов Б.А.^{1,®} и Мухаметзянов Т.А.²

¹ Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

² Казанский федеральный университет, Кремлёвская ул. 18, Казань, Республика Татарстан, 420008, Россия

® gusanov@uspu.ru

В настоящей работе впервые исследована кинетика кристаллизации аморфных сплавов Al-Ni-Co-PЗМ в широком диапазоне скоростей нагрева. Аморфные сплавы Al-Ni-Co-PЗМ (PЗМ = Nd, Sm, Gd, Tb, Yb) с различным соотношением Ni/Co получены методом спиннингования. Структура сплавов исследована методом дифракции рентгеновских лучей и сканирующей электронной микроскопии. Кристаллизация изучена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при различных скоростях нагрева. Проведены исследования сплавов методом сверхбыстрой калориметрии при скоростях нагрева 10000 К/с и 20000 К/с. Кристаллизация сплавов проходит в несколько стадий в зависимости от соотношения Ni/Co. Увеличение содержания никеля приводит к значительному изменению процесса кристаллизации. Показатель Авраами и другие параметры для аморфных/нано-кристаллических сплавов Al-Ni-Co-PЗМ определены с использованием модели Колмогорова-Джонса-Мела-Авраами (КДМА) в варианте неизотермической кристаллизации. Показано, что использование модели КДМА может обеспечить точное описание доли кристаллической фазы при соответствующих температурах. Установлено, что увеличение концентрации никеля приводит к изменению механизма кристаллизации. По результатам сверхбыстрой калориметрии показано, что процесс кристаллизации значительно различается при различных соотношениях Ni/Co. Впервые обнаружены эндотермические эффекты, предшествующие началу кристаллизации. Показано, что перераспределение атомов алюминия происходит задолго до начала кристаллизации.

Экспериментальное исследование теплофизических свойств расплавов системы литий-калий-свинец

Абдуллаев Р.Н.^{1,®}, Агажанов А.Ш.¹, Хайрулин Р.А.¹,
Хайрулин А.Р.¹ и Станкус С.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Акад. Лаврентьев просп. 1, Новосибирск-90, 630090, Россия

® abdullaev.rasul88@gmail.com

Методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения впервые получены экспериментальные данные по плотности и объемному коэффициенту теплового расширения ряда жидких сплавов системы Li-K-Pb в интервале от температуры ликвидуса до 900-1000 К. Показано, что мольный объем расплавов Li-K-Pb значительно отклоняется от законов идеального раствора (до $\approx 27\%$), что подтверждает существующие представления о жидких сплавах щелочных металлов со свинцом, как об ассоциированных растворах. Выявлено, что добавка 28,6 ат.% Pb к жидкой системе Li-K недостаточна для выхода из области несмешиваемости, границы которой остаются неизвестными. На поверхности ликвидуса тройной системы Li-K-Pb обнаружена эвтектическая точка в области богатой свинцом с температурой 491,7 К и составом близким к 13 ат.% Li, 4 ат.% K, 83 ат.% Pb. Для данного околоэвтектического состава $\text{Li}_{13}\text{K}_4\text{Pb}_{83}$ также были проведены измерения плотности в твердом состоянии и скачка плотности при плавлении-кристаллизации. Более того, методами массивного калориметра смешения и лазерной вспышки получены экспериментальные данные по энтальпии, теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности околоэвтектического состава $\text{Li}_{13}\text{K}_4\text{Pb}_{83}$ в жидком состоянии, выявлено существенное отклонение данных параметров от расчета по правилу аддитивности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 23-79-10095, <https://rscf.ru/project/23-79-10095/>.

Результаты исследований удельной теплоёмкости Bi, Ni, УУКМ

Компан Т.А.¹, Пухов Н.Ф.^{1,®} и Власова В.В.¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Московский пр., 19, Санкт-Петербург, 190005, Россия

® V.V.Vlasova@vniim.ru

Приведены экспериментальные результаты измерений удельной теплоемкости материалов, широко применяемых в электронике и электротехнике, в качестве катализаторов в химической и обрабатывающей промышленности, а также в атомной промышленности: висмута (Bi) марки ВИ00 по ГОСТ 10928-90, никеля (Ni) с содержанием 97,6 %, углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) марки "ТЕРМО-ДФ-КО".

Исследования проведены с помощью дифференциального сканирующего калориметра компенсационного типа DSC 8000 Perkin Elmer. Для уменьшения систематической погрешности измерений использовались методические приемы, указанные в [1], [2], [3]. Применены методики измерений и обработки результатов измерений [4].

- [1] Kompan T A, Kulagin V I and Vlasova V V 2020 *Legal and Applied Metrology* **2** 24–29
- [2] Kompan T A, Kulagin V I and Vlasova V V 2022 *Measurement Techniques* **64**(12) 999–1003
- [3] Vlasova V V 2026 *Mir izmereniy* **1** 40–43
- [4] *GSSSD 454-2024 Tungsten. Temperature coefficient of linear expansion in the temperature range from 150 K to 2700 K and specific heat in the temperature range from 260 K to 870*

Низкотемпературная теплоёмкость и термодинамические свойства LiRbMoO_4

Беспятков М.А.^{1,®}, Кузин Т.М.¹, Шевелев Д.С.¹,
Трифонов В.А.¹, Назарова А.А.¹ и Гельфонд Н.В.¹

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, Акад. Лаврентьев просп. 3, Новосибирск, 630090, Россия

® bespyatov@niic.nsc.ru

Молибдат лития-рубидия (LiRbMoO_4) является перспективным функциональным материалом с сегнетоэлектрическими свойствами. В представленной работе впервые была исследована теплоёмкость LiRbMoO_4 в интервале температур 6–320 К адиабатическим методом (калориметр БКТ-20). Образец был получен методом спонтанной кристаллизации из расплава. Фазовый состав был подтвержден методом рентгенофазового анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-7000). Элементный состав и содержание примесей определены масс-спектрометрическим методом (спектрометр Agilent 8800); содержание примесей в образце составило менее 0.001 масс.%. Расширенная неопределенность измеренной теплоёмкости составляла: 2% в интервале 6–15 К, 0.7% в интервале 15–30 К и 0.2% в интервале 30–320 К. В поведении теплоёмкости не выявлено каких-либо аномалий, связанных с фазовыми переходами. Экспериментальная теплоёмкость была сглажена и экстраполирована к 0 К по закону Дебая. В результате экстраполяции определена характеристическая температура Дебая $\Theta_D(0) = 240 \pm 10$ К. На основе сглаженных и экстраполированных значений теплоёмкости рассчитаны термодинамические функции (энтропия, приращение энтальпии и приведённая энергия Гиббса) в интервале температур 0–320 К.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда N 24-19-00405, <https://rscf.ru/project/24-19-00405/>

Моделирование абляции обыкновенных хондритов.

Попов А.А.^{1,®}, Петрова Е.В.¹, Кокорин А.Ф.¹ и
Гроховский В.И.¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 21, Екатеринбург, 620000, Россия

® aa.popov@urfu.ru

Вторжение метеорита в плотные слои атмосферы Земли сопровождается ярким событием, называемым метеором или болидом. В ходе этого события космическое вещество претерпевает, в том числе, тепловое разрушение, в частности, абляцию – вид теплового разрушения, при котором вещество переходит из твердой фазы в газообразную. В докладе рассматриваются особенности и результаты экспериментального моделирования абляции обыкновенных хондритов Calama 009 L6 и Chelyabinsk LL5 в лабораторной установке со скоростными высокотемпературными газовыми потоками. В эксперименте с использованием плазмотрона получены искусственная кора плавления и оптический эмиссионный спектр абляции. Проведено сравнение валового химического состава внутреннего вещества метеоритов Calama 009 L6 и Chelyabinsk LL5, их природной коры плавления и коры плавления, полученной в эксперименте по моделированию абляции. Данные химического анализа сопоставлены с оптическими эмиссионными спектрами абляции, полученными в том же эксперименте. Проведено сравнение лабораторных оптических эмиссионных спектров со спектральными особенностями абляции обыкновенных хондритов [1]. Выявлены общие для природной и экспериментальной абляции тенденции по обеднению и обогащению коры плавления отдельными химическими элементами. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой "Приоритет-2030".

[1] Matlovic P and et al 2024 *Astron. Astrophys.* **689**(A323) 19

4. Теплофизические свойства веществ при высоких температурах

Экспериментальное исследование теплофизических свойств свинца в интервале температур 293-2021 К

Станкус С.В.^{1,®}, Абдуллаев Р.Н.¹, Агажанов А.Ш.¹,
Самошкин Д.А.¹, Хайрулин А.Р.¹, Хайрулин Р.А.¹ и
Мосунова Н.А.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Акад. Лаврентьев просп. 1, Новосибирск-90, 630090, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Большая Тульская ул. 52, Москва, 115191, Россия

® stankus@itp.nsc.ru

Методами просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения, массивного калориметра смешения и лазерной вспышки получены новые прецизионные экспериментальные данные по плотности, объемному коэффициенту теплового расширения, энтальпии, теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности твердого и жидкого свинца марки С1 от комнатной температуры до температуры кипения при нормальном давлении. Все установки апробированы на эталонных материалах и материалах с хорошо исследованными свойствами. Оцениваемая неопределенность данных составила 0,2–0,5 % и 1,4–2,9 % для плотности и коэффициента теплового расширения; 0,3–0,5 % и 0,5–2,2 % для энтальпии и теплоемкости; 3,6–8,2 % для теплопроводности и температуропроводности. Проведено сопоставление полученных результатов с известными литературными данными. Впервые экспериментально показано существование минимума объемного коэффициента теплового расширения и теплоемкости жидкого свинца в области температур 1300–1500 К. Проведено обсуждение полученных результатов. Исследование выполнено в рамках Государственного контракта No. Н.4о.241.19.24.1034 от 04.04.2024 (государственный заказчик — Госкорпорация "Росатом") и государственного задания ИТ СО РАН No. 126021217052-7.

Явление перегрева жидкостей: история исследований и современное состояние

Скрипов П.В.^{1, @}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, 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, близких к предсказываемым теорией гомогенной нуклеации. В современном мире, в ходе развития мини- и микро-размерных систем и усиления генерируемой ими плотности теплового потока, интерес к данному явлению получил новый импульс. В частности, механизм взрывного вскипания нашел применение в качестве движителя жидкой среды в продвинутых технологиях распыления жидкостей и в технических устройствах, действие которых основано на быстротекающем изменении плотности среды.

В докладе будут рассмотрены следующие вопросы: история исследований явления перегрева, в том числе, осуществленных в Уральской теплофизической школе; современные методы и результаты измерения температуры достижимого перегрева и свойств перегретых жидкостей; перспективные, на взгляд автора, задачи в области перегрева сложных объектов.

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

Сверхкритический переход жидкость-флюид в быстрых процессах

Рютин С.Б.¹, Мелких А.В.¹ и Скрипов П.В.^{1,®}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® pavel-skripov@bk.ru

Теплофизические свойства (ТФС) вещества претерпевают существенные изменения вблизи критической точки (КТ) жидкость-пар. Это обстоятельство делает сверхкритические флюиды (СКФ) актуальным объектом исследования. Одним из практически важных направлений является разработка теплоносителей, в частности, для т.н. Supercritical Fluid Concept Reactors. Действительно, перспективы применения СКФ обоснованы, поскольку кризис кипения невозможен при СК-давлениях. Более того, ТФС жидкостей демонстрируют экстремальный тип поведения непосредственно в окрестности КТ [1–4]. С другой стороны, режим ухудшенной теплоотдачи [4], проявляющийся начиная с определенного значения плотности теплового потока, делает эти перспективы менее очевидными. Он продолжает оставаться препятствием для использования СКФ в процессах, допускающих возможность мощного локального тепловыделения, в том числе, для осуществления идеи применения СК-воды в ядерной энергетике. Именно такие процессы и являются объектом нашего внимания.

В силу специфики методик, используемых для измерения свойств СКФ в окрестности критической точки, наибольшую трудность, с которой столкнулись исследователи, представляет определение теплопроводности [3, 4]. Действительно, не решены окончательно вопросы контроля неподвижности среды в измерительном объеме, точности поддержания стационарного температурного поля в нем, а также согласования условий опыта с идеализированной моделью, позволяющей пересчитать первичные данные в значения теплопроводности. В наиболее полном

виде они учтены, на наш взгляд, в работах [1], см. также [5]. На примере двуокиси углерода авторы [1, 5] экспериментально выявили факт критического увеличения теплопроводности. Открытым оставался вопрос о степени общности этого явления при повышении масштаба отклонения параметров процесса от идеализированной модели. По-видимому, он впервые был поставлен в [6] на основе анализа результатов опытов по мощному локальному тепловыделению в сжатой до СК-давления жидкости. Отметим, что эти результаты были получены непосредственно из первичных данных в существенно нестационарных и, следовательно, неидеализированных условиях [7] миллисекундного нагрева слоя неподвижной жидкости микронной (в обоих случаях, по порядку величины) толщины на поверхности тонкого проводящего зонда [4, 8]. Они показали, что при быстром переходе сжатой жидкости в СКФ вдоль изобары, где СК-давление служило параметром опыта, тепловое сопротивление СКФ порогово повышалось. В итоге, сложилась парадоксальная ситуация, когда понятие пиков ТФС, известных по стационарным измерениям [?, 1, 2, 4], мирно сосуществует с результатами импульсных опытов, проведенных в условиях мощного выделения теплоты, свидетельствующих о "провале теплоотдачи сопровождающем пересечение критической/псевдокритической области температур.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект No. 23-69-10006).

- [1] Michels A, Sengers J V and van der Gulik P S 1962 *Physica* **28** 1216–1237
- [2] Wagner W and Pruß A 2002 *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **31** 387–535
- [3] Abdulagatov I M and Skripov P V 2020 *Russian Journal of Physical Chemistry B* **14** 1178–1216
- [4] Abdulagatov I M and Skripov P V 2021 *Russian Journal of Physical Chemistry B* **15** 1171–1188
- [5] Sengers J V 2020 *International Journal of Thermophysics* **41** 117
- [6] Рютин С Б and Скрипов П В 2013 *Сверхкритические флюиды: теория и практика* **8** 87–97
- [7] Иванов Д Ю 2003 *Критическое поведение неидеализированных систем* (Москва: Физматлит)
- [8] Skripov P V, Rutin S B and Chen L 2025 *Journal of Supercritical Fluids* **218** 106516

Исследование теплового расширения карбидных систем на основе тугоплавких металлов с применением метода импульсного нагрева

Гаврильев А.Ч.^{1,®}, Сенченко В.Н.¹ и Мельников С.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® gavrilev.ach@phystech.su

Для исследования теплофизических свойств тугоплавких материалов, в том числе теплового расширения в области плавления и жидкой фазе, целесообразен метод высокоскоростного импульсного омического нагрева. В эксперименте образец прямоугольного сечения однородно нагревается коротким импульсом тока большой величины. В ходе эксперимента измеряются следующие параметры в зависимости от времени: сила тока через образец, падение напряжения в центральной части образца, тепловое расширение образца методом теневой фотосъемки, излучение с поверхности образца на двух длинах волн для расчета яркостных температур и определения действительной температуры. Полученные экспериментальные данные обрабатываются для определения удельных свойств исследуемого вещества, а именно удельных энтальпии, теплоемкости, сопротивления, объема (плотность). Также определяются температурные коэффициенты линейного расширения, температура и теплота плавления исследуемого вещества. В данной работе было проведено экспериментальное исследование стехиометрических карбидов тугоплавких металлов (TiC , Mo_2C , VC), а также был экспериментально опробован метод для исследования бинарных карбидных систем типа $(\text{Hf}, \text{Zr})\text{C}$, $(\text{Nb}, \text{Zr})\text{C}$. Полученные экспериментальные данные тепловому расширению хорошо коррелируют с результатами, описанными в научной литературе. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Вязкость жидкого никеля

Олянина Н.В.^{1,®}, Бельтюков А.Л.¹, Сапегина И.В.¹ и
Ладьянов В.И.¹

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук, ул. Татьяны Барамзиной, 34,
Ижевск, Удмуртская Республика, 426067, Россия

® oljanina@udman.ru

Исследования вязкости жидкого никеля проводились методом крутильных колебаний в цилиндрическом корундовом тигле. Эксперименты выполнялись в режиме нагрева от температуры плавления никеля до 1700°C и последующего охлаждения до затвердевания расплава со ступенчатым изменением температуры в защитной атмосфере гелия марки А (не менее 99.995 об. % He). В работе реализованы два способа измерений: стандартный – образец помещен в тигель и имеет свободную верхнюю поверхность, и нестандартный – с закрытой верхней границей расплава. При исследовании вязкости с использованием нестандартных условий эксперимента температурная зависимость вязкости жидкого никеля имеет экспоненциальный вид аррениусовского типа. При реализации стандартного способа измерения вязкости на политермах вязкости жидкого никеля наблюдается резкое (скачкообразное) отклонение от аррениусовского поведения. Данная особенность обусловлена пленочными эффектами из-за образования или исчезновения вязкой пленки на верхней границе расплава, которые приводят к завышению получаемых в эксперименте значений вязкости и появлению аномалий на политермах вязкости. Методом растровой электронной микроскопией с энерго-дисперсионным анализатором исследована свободная поверхность твердых образцов после вискозиметрического эксперимента со стандартным способом измерения вязкости (образец помещен в тигель и имеет свободную верхнюю поверхность). На поверхности твердого никеля обнаружено наличие несплошной пленки, состав которой коррелирует с составом корундового тигля применяемого при измерении вязкости.

Термическое расширение твердых сплавов системы Zr-Nb при высоких температурах

Горбатов В.И.^{1,2}, Ивлиев А.Д.^{3,4,@}, Куклина А.А.^{1,5},
Смирнов А.Л.¹ и Талуц С.Г.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева, 30, Екатеринбург, Свердловская обл., 620144, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

³ Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

⁴ Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования "Технический университет УГМК", пр-т Успенский, 3, г. Верхняя Пышма, Свердловская обл., 624091, Россия

⁵ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 21, Екатеринбург, 620000, Россия

@ ad_i48@mail.ru

Сплавы системы Zr-Nb перспективны для создания новых материалов, обладающих высокими механическими свойствами и жаростойкостью. Исследование свойств данной системы имеет и чисто научный интерес, поскольку в конечном итоге позволит изучить физику процессов, протекающих в этих сплавах и позволит создавать материалы с прогнозируемыми характеристиками. В настоящей работе рассмотрены температурные зависимости линейного теплового расширения. Измерения выполнены вертикальным dilatометром Linseis DIL L75VS1600. Расширенная неопределенность измерений составила 2%. Интервал температур 550-1600 К. Измерения выполнены в защитной атмосфере аргона высокой чистоты (99,998 об.%).

Система Zr-Nb обладает достаточно сложной фазовой диаграммой [1]. В данном случае отметим лишь структурное превращение, протекающее в диапазоне температур от 900 до 1300 К. Данный переход, происходит в интервале концентраций практически от 0 до примерно 85 ат% Nb. В области более низких температур сплав представляет собой смесь α -Zr (ГПУ структура) и Nb

(ОЦК структура). Затем, по мере нагрева, происходит расслоение: β -Zr и β -Nb, представляющие собой соответственно твердый раствор Nb в β -Zr (ОЦК) и твердый раствор β -Zr в ниобии. При более высоких температурах происходит образование твердого раствора Zr-Nb. Целью данной работы явилось изучение особенностей протекания фазовых превращений.

Из экспериментальных результатов следует, что заметные аномалии относительного удлинения возникают не во всем интервале концентраций, а лишь в диапазоне от 0 до 30 ат% Nb. Именно в этой области происходит переход циркония от ГПУ структуры к ОЦК. Этот процесс, как видно из результатов эксперимента, является основным. Он сказывается на процессе расширения образца: при концентрациях до 7 ат% Nb расширение происходит с минимальным коэффициентом линейного термического расширения, а в интервале от 7 до 20 ат% Nb – с максимальным. Имеется хорошая корреляция данных результатов с результатами исследования температуропроводности и удельного электрического сопротивления. Таким образом, основные аномалии в процессе расширения сплавов Zr-Nb соответствуют полиморфному фазовому превращению в цирконии от структуры ГПУ к ОЦК.

- [1] 2001 *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3-х т.: Т.3. Кн. I. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева.* (М.: Издательство "Машиностроение")

Плотность высокоэнтропийных сплавов AlNiCoFeCr и AlNiCoCuZr в твёрдом и жидком состояниях

Русанов Б.А.^{1,®}, Симонов Д.К.¹, Петрова С.А.² и Андриенко Д.С.¹

¹ Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

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

® gusanov@uspu.ru

В настоящей работе впервые проведены систематические исследования плотности ВЭС AlNiCoFeCr и AlNiCoCuZr в широком температурном интервале. Многокомпонентные сплавы AlNiCoFeCr и AlNiCoCuZr с различным соотношением компонентов получены в индукционной печи из чистых исходных компонентов при температуре 1900 К. Исследованы химический состав (атомно-абсорбционным методом) и структура (методом дифракции рентгеновских лучей, сканирующей электронной микроскопии) полученных образцов. Плотность сплавов в твёрдом и жидком состояниях исследована методом проникающего гамма-излучения на автоматизированной установке. Эксперименты проведены в тиглях из алунда в защитной атмосфере гелия в температурном интервале 300-1900 К. На основе экспериментальных данных определены молярные объёмы и коэффициенты теплового расширения сплавов. В твёрдом состоянии основу сплавов AlNiCoFeCr составляет твёрдый раствор на основе фазы Гейслера. В образцах обнаружено неоднородное распределение компонентов в объёме. Сплавы AlNiCoCuZr имеют сложную структуру на основе бинарных и тройных интерметаллидов. В твёрдом состоянии при нагреве плотность сплавов исследованных систем уменьшается до температуры солидус почти линейно. Процесс плавления в изученных ВЭС является многостадийным, а в жидком состоянии плотность может быть описана линейными функциями.

Исследование теплового расширения керамики из эквимольной смеси карбидов методом быстрого резистивного нагрева

Сенченко В.Н.^{1,®}, Гаврильев А.Ч.¹ и Мельников С.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® pyrolab@ihed.ras.ru

Применение субмиллисекундного импульсного резистивного нагрева позволяет определять теплофизические свойства электропроводящих материалов при высоких температурах, в области предплавления и в жидкой фазе. В последнее время все большую актуальность приобретают тугоплавкие карбиды и карбидная керамика на их основе работающие при высоких температурах, что делает важным изучение их теплофизических свойств. Эти тугоплавкие материалы актуальны для приложений в технике. Особый интерес представляет изучение теплового расширения этих материалов при высоких температурах и давлениях, поскольку экспериментальных данных в этих областях недостаточно. Наша экспериментальная установка реализует метод быстрого импульсного резистивного нагрева, что позволяет получать экспериментальные данные при высоких температурах выше точки плавления за время порядка 300 микросекунд в условиях высокого статического давления инертного газа, окружающей образец. В данной работе представлены полученные экспериментальные данные по тепловому расширению керамики из эквимольной смеси карбидов TaC, HfC, ZrC и NbC. Сравнение с литературными данными по твердой фазе показало, что полученные и обработанные экспериментальные данные являются надежными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Высокотемпературные измерения теплофизических свойств методом импульсного нагрева электрическим током

Дороватовский А.В.^{1,®}, Шейндлин М.А.¹ и
Минаков Д.В.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® a.dorovatovskiy@gmail.com

В данной работе проводились измерения зависимости энтальпии, электрического сопротивления, коэффициента теплового расширения от температуры для металлических циркония и гафния в изобарическом эксперименте с давлением от 1 до 4000 бар с применением имеющейся установки для измерения термодинамических свойств электропроводных материалов методом импульсного нагрева электрическим током [1, 2]. Данная методика позволяет измерять свойства в широком диапазоне температур, на несколько тысяч кельвинов превышающих температуру плавления при сохранении формы образца за счёт сил инерции. Типичный темп нагрева в применяемой установке составляет до 2×10^8 К/с. Яркостная температура определяется широкодиапазонным пирометром с диапазоном регистрируемых температур не менее 1300–6000 К. Для пересчёта яркостной температуры в истинную используются как данные специализированных экспериментов по определению излучательной способности, так и результаты первопринципных расчетов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ No.26-19-00980)

- [1] Dorovatovsky A V, Sheindlin M A and Minakov D V 2023 *High Temp.* **61** 871–874
- [2] Paramonov M A, Minakov D V, Dorovatovsky A V, Sheindlin M, Fokin V B, Demyanov G S and Levashov P R 2024 *Phys. Rev. B* **110** 184204

Релаксационные процессы и двухмасштабные неоднородности в расплавах Ga-РЗМ

Русанова А.И.^{1,®}, Русанов Б.А.², Сон Л.Д.¹ и Сидоров В.Е.²

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

² Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия

® nastmorozy97@yandex.ru

В настоящей работе впервые исследованы плотность, вязкость и магнитная восприимчивость сплавов Ga-РЗМ (РЗМ – редкоземельный металл) в широком температурном интервале, а также изучены особенности изменений этих свойств в режиме длительных изотермических выдержек.

Сплавы Ga-РЗМ (РЗМ = Nd, Sm, Gd, Tb, Ho) получены в печи сопротивления в защитной атмосфере гелия при температуре 1550 К. Плотность сплавов изучена методом проникающего гамма-излучения, вязкость исследована методом затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом, магнитная восприимчивость – методом Фарадея. Все опыты проведены в тиглях из Al_2O_3 в защитной атмосфере гелия до максимальной температуры 1450 К.

Установлено, что сплавы Ga-РЗМ характеризуются наличием долговременных релаксационных процессов перехода в равновесное состояние. Наличие релаксационных процессов в данных расплавах обусловлено существованием двухмасштабных неоднородностей на основе первого интерметаллида. На основе экспериментальных данных определены параметры электронной структуры образцов. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов подготовки расплавов Ga-РЗМ в процессе получения готовых материалов на их основе.

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

Измерение плотности ванадия и титана в твердом и жидком состоянии при быстром нагреве импульсом тока

Мельников С.А.^{1,®}, Сенченко В.Н.¹ и Гаврильев А.Ч.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® melnikov.sa@phystech.edu

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению теплового расширения тугоплавких металлов (в частности, ванадия, V, и титана, Ti), при высоких температурах в области плавления, а также в жидкой фазе. В основе эксперимента лежит метод быстрого импульсного резистивного нагрева. Благодаря прямоугольному импульсу тока большой амплитуды (порядка 10 кА) и малой микросекундной длительности образец однородно по объему нагревается по закону Джоуля–Ленца. Во время эксперимента регистрируются ключевые характеристики (ток, напряжение, температура, теневое изображение образца) в зависимости от времени, что позволяет исследовать комплекс теплофизических свойств вещества. Для исследования теплового расширения материалов на экспериментальной установке используется система, основанная на теневой фотосъемке, которая позволяет получить последовательность серых 8-битных теневых изображений образца с временным разрешением до 4 мкс. Путем оригинальной программной обработки последовательности изображений рассчитывается зависимость относительного расширения образца от температуры, а также температурный коэффициент линейного расширения и плотность исследуемого материала. Полученные экспериментальные результаты по определению плотности металлов (V, Ti) показывают хорошее совпадение с известными литературными данными в области до 2.5 кК. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Температурная диагностика струйного ВЧ-разряда с жидкой плазмообразующей средой

Каюмов Р.Р.^{1,®}, Абдуллин И.Ш.² и Исмагилов Д.М.¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, ул. Карла Маркса 10, Казань, Республика Татарстан, 420111, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карл Маркс, ул. 68, Казань, Республика Татарстан, 420015, Россия

® rushan_250189033@mail.ru

Струйный ВЧ-разряд с жидкой плазмообразующей средой является локальной высокотемпературной неравновесной системой для плазменной обработки материалов [1, 2]. Цель работы – оценить разряд с водным раствором $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ по температурным и спектральным характеристикам.

Разряд формировался в вакуумной камере от ВЧ-генератора 1,76 МГц через струю электролита 3–6 %, $d = 1\text{--}1,5$ мм, $l = 25\text{--}30$ мм. Спектры 195–1105 нм регистрировались прибором PLASUS EC; состав плазмы определялся по линиям Cu I, H I, Na I, Mg I, O I, N I, C I и полосам OH, N_2^+ .

Электронная концентрация по уширению $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\beta$ составляла $6,08 \cdot 10^{15}\text{--}1,709 \cdot 10^{17}$ см⁻³. По полосе OH получены $T_v = 5500\text{--}5700$ К и $T_r = 3300\text{--}3700$ К; различие на 1500–2200 К указывает на неравновесность плазмы. При обработке титана BT1-0 в 6 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при $p = 9,8 \cdot 10^4$ Па, $U_a = 2$ кВ и $I_p = 1,28$ А прирост микротвердости составил 18,59 %. Данные подтверждают применимость эмиссионной спектроскопии для диагностики струйного ВЧ-разряда [3].

- [1] Kayumov R R, Abdullin I S, Gaisin A F and Petryakov S Y 2025 *Plasma Physics Reports* **51** 1420–1429
- [2] Gaisin A F, Gaisin F M, Basyrov R S *et al.* 2023 *High Temperature* **61** 484–491
- [3] Petryakov S Y, Belgibaev E R, Kayumov R R and Gaisin A F 2026 *Engineering Journal: Science and Innovation* 170

5. Экстремальные состояния вещества

Гидродинамическое моделирование физико-химического превращения полиимида в ударных волнах

Шестаков М.А.^{1,®} и Хищенко К.В.^{1,2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

² Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® shestakovma@susu.ru

Проводится численное моделирование физико-химического превращения полимерного материала полиимида при высоких давлениях за фронтом ударной волны. Модель процесса включает в себя систему уравнений гидродинамики, уравнения состояния исходного материала и продуктов превращения, а также кинетическое соотношение для массовой доли продуктов в веществе за фронтом ударной волны. Полученные результаты моделирования прохождения ударных волн различной интенсивности по исходному материалу представляются в сравнении с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов с образцами этого материала различной начальной пористости. Обсуждается влияние способа учета пористости вещества перед фронтом ударной волны на результаты гидродинамического моделирования рассматриваемого процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Расчёт термодинамических свойств плотной плазмы металлов палладиевой группы в широком диапазоне температур и плотностей

Шумихин А.С.^{1, @}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

@ shum_ac@mail.ru

В данном исследовании рассматриваются две химические модели для описания плотной плазмы металлов палладиевой группы (Zr, Nb). Первая – вириальная химическая модель (ВХМ) [1], которая учитывает электроны, ионы, атомы, а также атомы с двойной и тройной ионизацией. Вторая модель – модель «3+» [2], которая учитывает только электроны, ионы и атомы. Сочетание двух химических моделей позволяет рассчитать тепловые и калорические уравнения состояния циркония и ниобия в диапазоне температур от 5000 до 100000 К и плотностей от $0,01 < \rho < \rho_0/2$, где ρ_0 – плотность металла в твердом состоянии. При низких плотностях ($\rho < 0,5$ г/см³) предлагается использовать модель Ван-дер-Ваальса, учитывающую взаимодействие зарядов, для чего выбирается дебаевское приближение в большом каноническом ансамбле [3, 4]. Для расчета термодинамических свойств в околокритической области используется модель «3+», учитывающая межатомное взаимодействие с помощью энергии когезии. Результаты расчетов, полученные с помощью предложенных моделей, показали удовлетворительное соответствие с результатами недавних численных расчетов [5] для циркония.

- [1] Shumikhin A S 2025 *Eur. Phys. J. D* **79** 112
- [2] Khomkin A L and Shumikhin A S 2021 *Phys. Usp.* **64**(11) 1125–1148
- [3] Likalter A A 1969 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **56** 240
- [4] Gryaznov V K, Iosilevskii I L and Fortov V E 1973 *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **14**(3) 353
- [5] Paramonov M A, Minakov D V, Dorovatovsky A V, Sheindlin M A, Fokin V B, Demyanov G S and Levashov P R 2024 *Phys. Rev. B* **110** 184204

Исследование изменения давления на поверхности мишени, дополненное учетом радиационных потерь в плазменном столбе в диодном зазоре ускорителя “Кальмар”

Смирнова А.Р.^{1,2,@}, Казаков Е.Д.² и Ткаченко С.И.^{1,3}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатова площадь 1, Москва, 123182, Россия

³ Московский физико-технический институт, Институтский пер. 9, Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

@ anya4113@gmail.com

Представлены результаты моделирования взаимодействия потоков плазмы от анода и катода в зазоре диода с использованием двумерного кода в цилиндрических координатах. Код включает в себя одножидкостную резистивную магнитогидродинамическую (МГД) модель в условиях локального ионизационного равновесия. Этот код был расширен диффузионной моделью переноса излучения. Начальные условия для моделирования основаны на характеристиках экспериментов, проведенных на ускорителе “Кальмар”. Экспериментальные данные по измерению тока, протекающего через плазму, которая замыкает диод, использовались в качестве граничного условия при расчете магнитного поля. В экспериментах изображения теневого хронограмм были получены, как при продольной, так и при поперечной ориентации щели [1]. Результаты расчетов по МГД-модели использованы для трассировки лучей самоизлучения плазмы с целью визуализации численных хронограмм, чтобы сравнить их с экспериментальными данными. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

[1] Kazakov E D *et al.* 2021 *Plasma Phys. Rep.* **47** 803–813

Образование критического состояния Al_2O_3 при облучении ВЭИ

Ларичев М.Н.^{1,®}, Беляев Г.Е.¹ и Белов О.В.²

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, ул. Косыгина 4 корп. 1, Москва, 119991, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна, Московская область, 141980, Россия

® mlarichev@chph.ras.ru

Облучение широкозонных полупроводников тяжёлыми высокоэнергетическими ионами (ВЭИ) предоставляет уникальную возможность формирования критического (КС), сверхкритического (СКС) и даже экстремального состояний вещества мишени посредством контролируемого поглощения энергии торможения иона в ограниченном объёме формирующегося латентного трека (ЛТ). При этом ЛТ выступает как наноразмерный реактор, в котором при мгновенном 10^{-17} с/нм адиабатическом нагреве при постоянном объёме происходят фазовые переходы, изменяющие состояние вещества. Тепловое воздействие можно регулировать, меняя тип и параметры ВЭИ. Для оценок можно использовать: ПК SRIM - для выбора ВЭИ и его энергии и код TREKIS-3, позволяющий оценивать радиальные зависимости параметров формирующегося ЛТ. Движение ВЭИ через мишень - наиболее быстрый процесс среди превращений, приводящих к нагреву и образованию газофазных продуктов. Для КС и СКС вещества контакт с окружающей средой через входное «отверстие» ВЭИ будет приводить к интенсивному разрушению структуры ядра ЛТ от входного «отверстия» вглубь капилляра, аналогичному процессам детонации сильнодействующих ВВ. Истечение образующихся газов в соответствии с законами внутренней баллистики, происходит параллельно с охлаждением ЛТ вследствие теплопереноса. Параметры формирующегося капилляра определяются соотношением скоростей истечения газов и охлаждения ЛТ до температуры переохлаждённого расплава мишени (для Al_2O_3 1800 K).

Определение параметров уравнения состояния полимерных материалов по результатам экспериментов с синхротронной диагностикой

Шестаковская Е.С.^{1,®}, Клиначева Н.Л.¹,
Стариков Я.Е.¹ и Яловец А.П.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76,
Челябинск, 454080, Россия

® shestakovskaiaes@susu.ru

В работе представлена методика определения параметров уравнений состояния, основанная на сопоставлении численно рассчитанных и экспериментально полученных профилей относительного поглощения синхротронного излучения в исследуемом материале. Для апробации методики было построено уравнение состояния в форме Ми—Грюнайзена, параметры которого рассчитываются в результате решения задачи оптимизации с применением метода Нелдера—Мида и алгоритма Левенберга—Марквардта. Для численного моделирования разработана математическая модель упругопластических течений среды на основе модели пластичности Прандтля—Рейса с учетом методики восстановления плотности по относительному поглощению излучения веществом вдоль луча и реализована в виде программного комплекса. Методика была применена для определения параметров уравнения состояния для полиметилметакрилата по данным ударно-волновых экспериментов с синхротронным излучением. Ударная адиабата, в рамках полученного уравнения состояния, хорошо согласуется с ранее известными экспериментальными данными и модельными результатами. Таким образом, предложенная методика позволяет эффективно использовать информацию о полях плотности из экспериментов с синхротронной диагностикой для определения параметров уравнения состояния и может быть распространена на другие материалы.

Расчёты упругих и термодинамических свойств Mo , Ta и W при высоких давлениях и температурах

Смирнов Н.А.^{1,®}

¹ Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Васильева 13, Снежинск, Челябинская область, 456770, Россия

® deldavis@mail.ru

В этой работе с привлечением теории функционала электронной плотности исследовались некоторые упругие и термодинамические свойства тугоплавких металлов молибдена, тантала и вольфрама при высоких давлениях и температурах. Были рассчитаны тепловое расширение, изотермы, ударные адиабаты, упругие константы, скорости звука и кривые плавления исследованных металлов. Вычисления выполнены в рамках квазигармонического приближения, опирающегося на расчёты фононных спектров при нулевой температуре, а также по классической модели среднего потенциала, которая позволяет приближённо учесть ангармонические эффекты. Определено влияние ангармонизма на различные термодинамические характеристики Mo , Ta и W . Показано, что наибольшее влияние данные эффекты оказывают на свойства Mo и W , а их учёт позволяет добиться лучшего согласия результатов расчётов и эксперимента. В случае тантала квазигармоническое приближение адекватно описывает все исследованные в работе термодинамические характеристики. Модель среднего потенциала показала высокую эффективность при расчётах свойств Mo , Ta и W . При этом она является простой и наименее затратной по времени счёта даже по сравнению с вычислениями в квазигармоническом приближении, которое использовалось в данной работе.

Численное исследование механизма образования горячих точек в энергетическом материале

Помыкалов Е.В.^{1,®}, Аетпаева М.С.¹ и Яловец А.П.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

® pomykalovev@susu.ru

Исследование механизмов инициирования энергетических материалов при низкоскоростных механических воздействиях в численном эксперименте является актуальной задачей обеспечения безопасности хранения, транспортировки и применения взрывчатых веществ. В отличие от высокоскоростного удара, где доминирует ударно-волновое сжатие, при низких скоростях основную роль играют диссипативные процессы: внешнее и внутреннее трение, приводящие к образованию локальных очагов разогрева, так называемых горячих точек.

В работе представлены результаты численного изучения процессов зажигания энергетического материала при низкоскоростном ударе сферическим инертным ударником. Для этого разработана математическая модель поведения энергетического материала на основе системы уравнений механики сплошной среды в лагранжевых переменных, дополненная моделью упругопластических течений, уравнением состояния молекулярных кристаллов и моделью разогрева материала на контактной границе с ударником, которая учитывает работу силы сухого трения, перераспределение тепловых потоков между ударником и образцом, плавление тонкого слоя материала с переходом от сухого трения к вязкому при достижении теплоты плавления и охлаждение контактной поверхности после отскока ударника.

В результате вычислительных экспериментов установлены два критических фактора, необходимых для инициирования энергетического материала при низкоскоростном ударе.

Дефект массы и радиальное распределение плотности в гравитирующем газовом шаре

Маслов С.А.^{1,®} и Тригер С.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® sergm90@mail.ru

Исследуется дефект массы шара, состоящего из электрически нейтральных гравитирующих частиц. Для шара с однородной плотностью найдена зависимость Δ/M_0 от массы M_0 , где $\Delta = M_0 - M = 3\gamma M^2/(10Rc^2)$ — дефект массы, а M_0 , γ и R — масса бесконечно удаленных друг от друга (негравитирующих) частиц, гравитационная постоянная и радиус шара соответственно. В предположении сферической симметрии для неоднородного шара из невырожденного гравитирующего газа с постоянной температурой T_0 изучается зависимость его плотности ρ и химического потенциала μ от расстояния r до центра. Из уравнения Пуассона для гравитационного φ потенциала $\Delta\varphi(r) = 4\pi\gamma\rho(r)$ и условия термодинамического равновесия следует уравнение для химического потенциала μ :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\mu}{dr} \right) = -4\pi\gamma m \rho(r),$$

где в расчетах зависимость химического потенциала от плотности выбиралась соответствующей идеальному невырожденному неоднородному газу с массой частицы m , равной массе атома водорода. Получено численное решение дифференциальных уравнений, показывающее, что гравитационный потенциал φ непрерывен во всей области пространства, а функции $\rho(r)$ и $\mu(r)$ претерпевают разрыв на границе шара. Такое решение должно рассматриваться как квазистационарное. Поиск возможных решений с непрерывным на границе химическим потенциалом требует учета вырождения газа.

О влиянии затухания фонон-ротонных возбуждений на обобщенную формулу Фейнмана

Тригер С.А.^{1,®}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® satron@mail.ru

Исследование фонон-ротонного спектра вновь обрело актуальность в связи с попытками установить его существование в кулоновских системах, таких как частично ионизованная водородная плазма. В работах [1, 2], основанных соответственно на расчётах методом РИМС и на аналитическом подходе с использованием обобщённой формулы Фейнмана, было предсказано существование второго ротонного минимума в сильносвязанной невырожденной и умеренно вырожденной электронной жидкости — ОСР. Формула Фейнмана, модифицированная для описания жидкостей и неидеальной плазмы в работе [2], в данной работе обобщается с целью учёта конечного затухания возбуждений. Соотношение между энергией квазичастицы $E(p)$ и статическим структурным фактором $S(p)$ имеет вид:

$$S(p) = \frac{p^2}{\pi m E(p)} \coth \left(\frac{E(p)}{2T} \right) \left[1 - \frac{\gamma_0(p)}{\pi} \left(\ln(x_m - 1) - \frac{x_m}{x_m - 1} + \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (1)$$

где m , p , T и $x_m = x_m(p) = E_m/E_0(p)$ — соответственно масса частицы, импульс, температура и параметр обрезания, связанный с максимальной энергией E_m , а $E_0(p)$ — энергия квазичастицы в отсутствие затухания. Величина затухания определяется как $\gamma_0(p) = \Gamma(p)/E_0(p) \ll 1$, где $\Gamma(p)$ — мнимая часть полюса функции отклика плотность–плотность [2].

[1] Chuna T M, Vorberger J, Tolias P *et al.* 2025 *Journal of Chemical Physics* **163** 034117

[2] Trigger S A 2026 *Journal of Low Temperature Physics* **222** 61

Двухканальная лазерная интерферометрия для реконструкции плотности электронов в лабораторных атмосферных разрядах

Батраков П.К.^{1,®}, Медведев М.А.¹ и Огинов А.В.¹

¹ Лебедев Физический институт Российской академии наук, Ленинский просп. 53, Москва, 119991, Россия

® p.batrakov@lebedev.ru

Исследование возникновения и эволюции атмосферных электрических разрядов в лабораторных условиях является важной задачей физики плазмы. Ключевую роль в развитии разряда играет пространственное распределение электронной плотности [1, 2]. В работе предложена двухканальная интерферометрическая диагностика, основанная на синхронном зондировании плазмы с двух взаимно перпендикулярных направлений импульсным лазером (~ 7 нс) [3]. Такой подход позволяет получать взаимодополняющие проекции электронной плотности и повышать надёжность реконструкции за счёт сравнения двух направлений. Таким образом, двухканальная схема существенно расширяет диагностические возможности и обеспечивает более полную информацию о пространственной структуре плазменных каналов в импульсных высоковольтных разрядах.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант No. 23-19-00524-II).

- [1] Dwyer J R, Saleh Z, Rassoul H K, Concha D, Rahman M, Cooray V, Jerauld J, Uman M A and Rakov V A 2008 *Journal of Geophysical Research* **113**
- [2] Petersen D, Bailey M, Beasley W H and Hallett J 2008 *Journal of Geophysical Research* **113**
- [3] Smaznova K T, Batrakov P K, Rodionov A A and Oginov A V 2026 *Phys. Rev. E* **113**(3) 035211

***6. Базы данных по
теплофизическим свойствам
веществ***

Некоторые методы применения современных баз данных в курсах «Техническая термодинамика» и «Теория теплофизических свойств веществ»

Очков В.Ф.¹, Устюжанин Е.Е.^{1,®}, Шацких Ю.В.¹,
Егорова Н.В.¹ и Абрамова Д.А.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», Красноказарменная 14, Москва, 111250, Россия

® evgust@gmail.com

Цель нашего исследования состоит в разработке методического подхода, с помощью которого можно решить ряд примеров, относящихся к вузовским курсам «Техническая термодинамика» и «Теория теплофизических свойств веществ». Указанный подход ориентирован на ИТ и предусматривает следующие условия: а) студент решает типичные примеры, входящие в указанные курсы, с помощью компьютера, который подключен к некоторой базе данных (БД) [1], б) БД опирается на программу SMath Studio, которая связана с известными сетевыми пакетами CoolProp Wrapper и WaterSteamPro [1]. Разработана методика, позволяющая выполнять теплофизические расчеты с использованием «размерных величин». Рассматриваются опции, с помощью которых в рамках данного примера студент: а) выбирает рабочее вещество, б) задает необходимые первичные данные, в) вводит теплофизические свойства вещества как аргументы и их значения, г) другие опции. Приводится ряд теплофизических расчетов, выполненных в среде SMath, при этом даются подробные комментарии. Обсуждаются решения, найденные в рамках поставленных задач.

[1] Ochkov V F 2025 *TThermodynamic: SMath calculanions* (S-Petersburg: Lanäuser)

Неструктурированные теплофизические данные и ИИ

Еркимбаев А.О.^{1,®}, Зицерман В.Ю.¹ и Кобзев Г.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® adilbek@jiht.ru

К настоящему времени по теплофизическим свойствам веществ и материалов накоплены обширные массивы плохо структурированных или неструктурированных данных [1, 2]. Как правило, они представляют собой различные текстовые и графические объекты. Все эти объекты обычно хранятся в "исходном" формате в стандартных базах данных (БД) как дополнительные архивные ресурсы с возможностью их выгрузки и отдельного изучения [2]. Однако, работа с ними (поиск, систематизация и т. п.) типовыми инструментами БД, практически нереализуема. Здесь предложено использовать для организации полноценной работы с неструктурированными данными методы Искусственного Интеллекта (ИИ) с применением больших языковых моделей (LLM) [3, 4] для выполнения запросов к БД на естественном языке (ЕЯ). Эти технологии снимают рутину программирования запросов на языках реляционных и NO SQL БД, активным привлечением возможностей ИИ. На основе появившихся новых возможностей был разработан и реализован проект организации запросов на ЕЯ с локальным использованием LLM технологий для поиска и анализа в массивах неструктурированных данных, дополняющих БД ТЕРМАЛЬ и другие теплофизические БД ОИВТ РАН.

- [1] Erkimbaev A O, Zitserman V Y and Kobzev G A 2023 *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* **57**(3) 178–192
- [2] Belov G V, Erkimbaev A O, Zitserman V Y, Kobzev G A and Morozov I V 2020 *High Temperature* **58**(4) 566–582
- [3] Erkimbaev A O, Zitserman V Y and Kobzev G A 2026 *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* **60**(1) S26–S36
- [4] Manning C D 2022 *Daedalus* **151**(2) 127–138

7. Техника теплофизических измерений

Методы и приборы для оптической диагностики температуры в быстропотекающем теплофизическом эксперименте

Сенченко В.Н.^{1,®}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® pyrolab@ihed.ras.ru

Известно, что современная экспериментальная теплофизика широко исследует различные процессы интенсивного импульсного теплового воздействия на вещество, и поэтому в теплофизическом эксперименте быстроедействие измерений температуры и других параметров выходит на первое место. К примеру, исследования теплофизических свойств методом электровзрыва проводников могут иметь продолжительность несколько единиц микросекунд и менее, а максимальная температура может достигать 20–30 кК. Поэтому разработка и создание быстрых многоканальных пирометров является востребованной задачей в экспериментальной физике. В настоящем докладе представлен обзор комплекса методов диагностики и аппаратуры для регистрации температуры в научных и промышленных применениях. В частности, представлены разработанные в ОИВТ РАН новые методы и аппаратура для оптической диагностики температуры в быстропотекающем теплофизическом эксперименте. Приведено описание конструкции и результатов испытаний пирометров для использования в экспериментальной физике быстрых процессов, в частности рассмотрены оригинальные приборы, позволяющие измерять экстремально высокие температуры при высоком быстром действии на уровне десятков наносекунд. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00944, <https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).

Применение световода для исследований жидкости в пузырьковой мини-камере

Старостин А.А.¹, Гурашкин А.Л.¹, Котов А.Н.¹,
Скрипов П.В.¹ и Поволоцкий И.И.^{1,®}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® iliyapov@rambler.ru

В измерениях на оптическом зонде используется зависимость интенсивности отраженного оптического излучения на торце световода от изменения температуры и свойств жидкости на поверхности раздела. На этой основе развиваются методики оптоволоконной денситометрии жидкости в быстропротекающих процессах. Отраженное излучение формируется в тонком слое на локальной площадке торца световода диаметром около 10 мкм. Локализация воздействия и считывания отклика позволяет исследовать малые образцы в экстремальных внешних условиях. Специфика применения для исследований вскипания жидкости в пузырьковой камере связана с возникновением условий интерференции Фабри-Перо в паровой пленке между торцом световода и отражающей поверхностью жидкости. Включение интерферометра в измерительную схему позволяет увеличить чувствительность к изменениям свойств образца за счет учета изменения фазы отраженного излучения. Применение метода доплеровской велосиметрии позволяет отслеживать динамику начальной стадии вскипания перегретой жидкости в пузырьковой камере. Показана возможность активации вскипания жидкости лазерными импульсами и определения скорости роста паровой пленки на торце оптоволоконного зонда в условиях чистой пузырьковой мини-камеры на примере н-пентана в широком интервале температур. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>.

Средства повышения точности измерений термогравиметрического анализа

Каменских Ю.И.^{1,®}, Компан Т.А.¹, Кулагин В.И.¹,
Кондратьев С.В.¹, Пухов Н.Ф.¹ и Власова В.В.¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Московский пр-кт, 19, Санкт-Петербург г, Россия, Европа, 190005, Российская Федерация

® y.i.kamenskih@vniim.ru

Представлены результаты разработки средств поверки, калибровки и градуировки средств измерений термогравиметрического анализа. Разработанные средства (комплект многопараметрических мер) позволяют снизить временные затраты на анализ метрологических характеристик СИ с учетом их комплектации (модули измерений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), относительного удлинения, удельной теплоемкости, удельной энтальпии, массы) и оценить систематические составляющие методик измерений. Комплект многопараметрических мер обеспечивает диапазоны воспроизведения единиц: ТКЛР $(4.5-16) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температуры от 200 до 1600 К с абсолютной погрешностью в зависимости от температуры и ТКЛР материала $\pm 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; удельной теплоемкости (230–1200) Дж/(кг·К) в диапазоне температуры от 260 до 1000 К с относительной погрешностью $\pm 1.0 \%$; удельной энтальпии (260–1300) кДж/кг в диапазоне температуры от 260 до 1400 К с относительной погрешностью $\pm 1.0 \%$; а также измерение относительных удлинений $(60-5000) \cdot 10^{-6}$ в диапазоне температуры от 200 до 1600 К с относительной погрешностью $\pm (5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3})$ в абсолютных единицах и номинальных значений массы от 0.5 мг до 5 г с пределами допускаемой погрешности воспроизведения от 0.006 до 0.05 мг и расширенной неопределенностью от 0.002 до 0.017 мг.

Диагностика температуры пламени горелки и электрического разряда посредством оптической спектроскопии

Ливерко Е.А.^{1,®} и Шахатов В.А.¹

¹ Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия

® info@tsagi.ru

Цель работы состоит в определении газокинетической температуры частиц T (молекул, атомов и их ионов) в разряде постоянного тока в воздушном потоке при вводе в междуэлектродную область смеси этилена и кислорода. Объектами исследования являются спектры испускания разряда, создаваемого в модельной камере сгорания аэродинамической трубы (АДТ), и пламени коммерческой горелки. Электроды модуля (анод и катод) помещаются в воздушный поток на оси модельной камеры сгорания АДТ. Значения вращательной температуры T_{rot} , определенные по кантам полос секвенций соединений C_2 , N_2 и CN [1], лежат в диапазоне от 2000 К до 3000 К. Показано, что T_{rot} совпадает со значением газокинетической температуры T в области разряда. Разработанная в настоящей работе модель определения температуры T проверена на экспериментальной установке для исследования спектров испускания ламинарного диффузного пламени, состоящей из горелки Вольфхарда – Паркера и спектрального прибора (TRIAХ 550, Jobin Yvon) со спектральным разрешением 0.09 – 0.13 нм. Значения T пламени от 2100 К до 2400 К (с погрешностью 12%) находятся в согласии с результатами её определения посредством спектроскопии когерентного антистоксового рассеяния света 2100 ± 150 К [2].

[1] Pearse R and Gaydon A 1949 *Identification of molecular spectra* (M.: Publishing House of Foreign Literature)

[2] Liger V, Mironenko V, Kuritsyn Y and Bolshov M 2018 *Quantum electronics* 1055–1061

8. Компьютерное моделирование в теплофизике

Линеаризация и численное моделирование на точном решении полной системы уравнений Навье—Стокса

Крутова И.Ю.^{1,®} и Казачинский А.О.¹

¹ Снежинский физико-технический институт - филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"», Комсомольская ул. 8, Снежинск, Челябинская область, 456776, Россия

® iykrutova@mephi.ru

Природные восходящие закрученные потоки (торнадо, тропические циклоны, огненные вихри) представляют собой сложные и еще достаточно мало изученные явления с точки зрения их возникновения и продолжительного функционирования. Надежное теоретическое изучение этих потоков возможно только с использованием системы уравнений газовой динамики при учете действия сил тяжести и Кориолиса. В силу нелинейности системы уравнений газовой динамики построение ее решений является достаточно трудоемким. Это и послужило причиной линеаризации системы уравнений газовой динамики на ее точных решениях. При численном построении сложных неоднородных и нестационарных течений газа для увеличения устойчивости счета часто применяют различные алгоритмы, сглаживающие решения. Для того, чтобы подобная процедура имела обоснованный физический смысл, в работе рассматривается полная система уравнений Навье—Стокса, в которой учтены сжимаемость газа и диссипативные эффекты вязкости и теплопроводности так, что общие законы сохранения массы, импульса и энергии выполняются. А также выполняются законы термодинамики, благодаря учету уравнений состояния. Численное решение системы при соответствующих начальных и граничных условиях, проводилось в расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого соответствуют размерам разных по интенсивности восходящие закрученные потоки.

Поведение смешанных хлоридов на границе раздела системы н-додекан/вода

Смирнов О.М.^{1,®} и Писарев В.В.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

² Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Мясницкая 20, Москва, 101000, Россия

® smirnov.om@phystech.edu

Неполяризуемые модели водных растворов солей с масштабированными зарядами ионов успешно воспроизводят линейное увеличение избыточного межфазного натяжения с ростом молярности для растворов индивидуальных хлоридов. Однако большинство природных и технологических процессов включает сложные многокомпонентные рассолы. В данной работе методом молекулярной динамики с использованием силового поля Madrid-2019 [1] и модели TraPPE-UA [2] было исследовано влияние состава бинарной смеси NaCl–CaCl₂ на избыточное межфазное натяжение на границе раздела между н-додеканом и водным раствором. Целью работы является проверка аддитивности вкладов отдельных ионов и выявление специфических эффектов, обусловленных взаимодействием моделируемых ионов. Исследована адсорбция катионов и анионов на межфазной границе, а также её связь с избыточным межфазным натяжением.

[1] Zerón I M, Abascal J L F and Vega C 2019 *The Journal of Chemical Physics* **151** 134504

[2] Martin M G and Siepmann J I 1998 *The Journal of Physical Chemistry B* **102** 2569–2577

Моделирование нагрева и испарения капли методом *diffuse interface*

Губин А.А.^{1,2,@} и Антонов Д.В.³

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 21, Екатеринбург, 620000, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, просп. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

@ artyom.gubin@vk.com

В современной энергетике и химической промышленности процессы вторичного измельчения разнородных жидкостей рассматриваются как ключевые механизмы интенсификации горения и глубокой переработки нефтяного и синтетического сырья. Динамика таких процессов определяется тепломассопереносом и локальной гидродинамикой на межфазных границах. Широкое применение при прогнозировании этих процессов нашло численное моделирование с помощью подхода *interface-capturing*, который включает в себя методы *Volume of Fluid*, *level-set* и *diffuse interface*. Несмотря на широкие возможности первых двух методов, их применение имеет ряд ограничений. В частности, при использовании модели *Continuum Surface Force (CSF)* для описания межфазного натяжения необходимо вычисление вектора нормали и кривизны поверхности, что повышает чувствительность результатов к пространственному разрешению и качеству расчётной сетки. Этого недостатка лишен метод *diffuse interface*, поскольку капиллярные силы естественным образом входят в тензор напряжений. В данной работе разработана модель динамики нагрева капли с целью уточнения механизмов её испарения. Численное моделирование выполнено методом *diffuse interface*. Капиллярные силы описаны с помощью силы Кортевега. В качестве уравнения состояния вещества использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса. Показано, что на интенсивность испарения существенно влияет температура нагрева и начальное распределение плотности вещества.

Применение непрерывной формулы Кубо-Гринвуда для расчёта электропроводности жидкого алюминия

Князев Д.В.^{1,®} и Левашов П.Р.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

[®] d.v.knyazev@yandex.ru

Важным способом получения переносных и оптических свойств вещества являются квантовые расчёты, основанные на квантовом молекулярно-динамическом моделировании, методе функционала плотности и формуле Кубо-Гринвуда. В рамках этого общего подхода мы развиваем собственную численную реализацию формулы Кубо-Гринвуда: так называемую непрерывную формулу [1].

В непрерывной формуле Кубо-Гринвуда электропроводность σ_{1DC} представляется в виде интеграла от произведения гладких кривых:

$$\sigma_{1DC} = \frac{2\pi e^2 \hbar^3}{m_e^2 \Omega} \int D(\varepsilon, \varepsilon) g^2(\varepsilon) \left(-\frac{\partial f}{\partial \varepsilon}(\varepsilon) \right) d\varepsilon. \quad (1)$$

Анализ кривых $D(\varepsilon, \varepsilon)$, $D(\varepsilon, \varepsilon)g^2(\varepsilon)$, входящих в непрерывную формулу (1), позволяет лучше диагностировать такие внутренние источники погрешностей, как: недостаточную густоту электронных уровней, недостаточное число $\mathbf{k}$ -точек и атомов.

В этой работе мы рассчитываем электропроводность жидкого алюминия при $T = 3000$ К и плотности $\rho = 2.70$ г/см³. Расчёты по непрерывной формуле Кубо-Гринвуда производятся с помощью программы ConGrUbo, разрабатываемой Д.В. Князевым.

[1] Demyanov G S, Knyazev D V and Levashov P R 2022 *Phys. Rev. E* **105**(3) 035307

Ab initio моделирование энергии растворения водорода в неупорядоченных ГЦК сплавах Ti-V

Мирзоев А.А.^{1,®} и Верховых А.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

® mirzoevaa@susu.ru

Сплавы Ti-V являются базовыми материалами для хранения водорода, но их характеристики, важные для практического применения, сильно зависят от состава. Поиск оптимального состава с заданными характеристиками требует глубокого понимания влияния состава на поведение атомов растворенного водорода, что требует проведения теоретических расчетов электронной структуры сплавов и их гидридов. В данной работе в рамках теории функционала плотности были рассчитаны энтальпии растворения водорода в тетраэдрических порах различного состава $Ti_{4-n}V_n$ ($n=0,1,2,3,4$). Проводится сравнение с результатами других квантово-статистических подходов и имеющимися данными экспериментов. Вероятность нахождения атомов водорода в тетрапорах различного состава определялась с помощью функции Ферми-Дирака [1]. На основании этих данных получена зависимость средней энергии растворения водорода в гидриде бинарного сплава $Ti_{1-x}V_x$ от содержания ванадия. Показано, что наличие упорядочения в сплавах с гранецентрированной кубической решеткой с параметром ближнего порядка Каули, равным 0.25 очень слабо влияет на данную зависимость. Этот результат резко отличается от случая ОЦК гидридов Ti-V [2]. Работа поддержана грантом РНФ (проект No. 25-22-20062).

[1] ОО Bavrina М 2018 *International Journal of Hydrogen Energy* **43**(36) 17338–17345

[2] Brouwer R C and Griessen R 1989 *Phys.Rev.B* **40**(3) 1481–1494

Температуры плавления *n*-алканов в силовых полях семейства OPLS-AA

Писарев В.В.^{1,®} и Вараксин И.М.¹

¹ Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Таллинская 34, Москва, 123458, Россия

® vpisarev@hse.ru

В данной работе анализируется температура плавления *n*-алканов в диапазоне C₁₂–C₂₄ в моделях семейства OPLS-AA [1–3], с целью оценки потенциальных улучшений в описании фазовой диаграммы последних модификаций силового поля.

Для расчёта температуры плавления углеводород в жидком состоянии сначала подвергается закалке и кристаллизации, после чего полученная кристаллическая конфигурация нагревается до момента плавления. Фазовое состояние характеризовалось параметрами порядка, такими как локальный параметр порядка P_2 , определяющий соосность молекулы с соседними и отношение транс- к гаус-конформациям, которые претерпевают резкий скачок при плавлении системы.

Результаты показывают, что стандартная параметризация OPLS-AA завышает температуры плавления на десятки градусов, что соответствует известным из литературы данным [4], тогда как более новые параметризации приближают расчётные значения к экспериментальным данным. Комбинация изменённых Л-Дж параметров и модификации атомных зарядов даёт сверхкомпенсацию, и температура плавления в такой модели оказывается ниже экспериментальных значений.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (HSE-BR-2025-002).

- [1] Jorgensen W L and Tirado-Rives J *PNAS* **102** 6665–6670
- [2] Dodda L S, Vilseck J Z, Tirado-Rives J and Jorgensen W L *J. Phys. Chem. B* **121** 3864–3870
- [3] Ghahremanpour M M, Tirado-Rives J and Jorgensen W L *J. Phys. Chem. B* **126** 5896–5907
- [4] Glova A D, Volgin I V, Nazarychev V M, Larin S V, Lyulin S V and Gurtovenko A A 2019 *RSC Adv.* **9** 38834–38847

Моделирование стримеров и анализ излучаемого поля с использованием метода Монте-Карло

Гасратов Ф.К.^{1,®}, Байдин И.С.¹, Батраков П.К.¹ и
Огинов А.В.¹

¹ Лебедев Физический институт Российской академии наук, Ленинский
просп. 53, Москва, 119991, Россия

® f.gasratov@lebedev.ru

Приведены результаты генерации стримеров в воздухе на дециметровом масштабе. Моделирование осуществляется с помощью кода Afivo-streamer [1]. Фотоионизация учитывается с подходом Монте-Карло [2]. Внешнее напряжение меняется нелинейно. Начальные условия не меняются, за исключением мест поглощения фотонов. Распределения электронной плотности показывают, что при разных запусках моделирования наблюдаются как различия в морфологии, так и общие черты. В частности, слияние стримеров в прианодной области и образование каналов, направленных в сторону катода. Внешнее напряжение влияет на скорость стримеров. Распределение силы тока отражает неоднородность проводимости в плазменных каналах. Скалограммы показывают, что излучение лежит в диапазоне высоких частот радиоволн.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант No. 23-19-00524-П).

- [1] Teunissen J and Ebert U 2017 *Journal of Physics D: Applied Physics* **50**(47) 474001
- [2] Bagheri B and Teunissen J 2019 *Plasma Sources Science and Technology* **28**(4) 045013

9. Теплофизические свойства материалов атомной энергетики

Национальная база данных по физическим, термодинамическим и транспортным свойствам жидкометаллических теплоносителей в области использования атомной энергии

Чусов И.А.^{1,®}, Новиков Г.Е.¹, Бабаева Ю.А.¹ и Брежнев А.И.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Студгородок 1, Обнинск, Калужская область, 249020, Россия

® igrch@mail.ru

В докладе представлены материалы по свойствам жидкометаллических теплоносителей собранные и обработанные центром данных термодинамических свойств материалов ядерной техники ГК «Росатом» (ЦДТС) за период 2017 — 2026 гг. На настоящий момент времени ЦДТС располагает сведениями о шестнадцати используемых и перспективных теплоносителях, включая данные об их компонентах. Основой настоящей работы является критический анализ многочисленных экспериментальных данных опубликованных в открытой литературе за период с 1885 по 2026 гг. В докладе приводятся сведения о полученных полуэмпирических соотношениях для расчета плотности, теплоемкости, теплопроводности, коэффициента динамической вязкости, коэффициента поверхностного натяжения, удельного электрического сопротивления и скорости звука. В основе предлагаемых зависимостей лежат результаты обработки оригинальных экспериментальных данных, отличающихся сравнительно высокой степенью точности. Выполненный анализ экспериментальных данных позволил выполнить оценку погрешностей рекомендованных регрессионных соотношений для всех упомянутых выше свойств жидкометаллических теплоносителей.

Физические, термодинамические и транспортные свойства жидкого натрия как теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах

Чусов И.А.^{1,®} и Бабаева Ю.А.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Студгородок 1, Обнинск, Калужская область, 249020, Россия

® igrch@mail.ru

Использование натрия в качестве теплоносителя имеет долгую историю, но основные научно-технические достижения в этой области были достигнуты в процессе разработки атомных электростанций с быстрыми реакторами в 60-х – 70-х годах прошлого столетия. Более чем 65-летний опыт по эксплуатации экспериментальных установок и действующих реакторов свидетельствует о том, что технология использования натрия как теплоносителя позволяет обеспечить их долгосрочную безопасную эксплуатацию даже при возникновении отклонений от номинальных параметров. В работе приведены результаты анализа экспериментальных данных опубликованных в открытых литературных источниках за 1906–2024 гг. о физических, термодинамических и транспортных свойствах жидкого натрия. Предложены новые расчетные соотношения для оценки основных физических, термодинамических и транспортных свойств натрия в конденсированном состоянии, таких как: плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент теплоемкости, коэффициент теплопроводности, коэффициент поверхностного натяжения, удельное электрическое сопротивление и скорость звука. Также приведены значения погрешностей предложенных соотношений и диапазон их применимости. Методика построения регрессионных соотношений основана на выборе степени регрессионной функции с помощью критерия Фишера и применении метода Левенберга-

Марквардта. В работе были использованы результаты, представленные в 177 экспериментальных и расчетных работах.

Теплоотдача в теплоноситель на основе водного раствора борной кислоты и антикоррозионных добавок

Ситдыков А.А.¹ и Волосников Д.В.^{1,®}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® dima_volosnikov@mail.ru

Как наиболее распространенные и проверенные временем водяные энергетические реакторы (ВВЭР) играют особую роль в отечественной ядерной энергетике. Для повышения точности расчетов возможных аварийных процессов на АЭС с ВВЭР, а также при проектировании систем безопасности необходимо знание теплофизических свойств теплоносителя в широком диапазоне изменения параметров. Состав теплоносителя первого контура ВВЭР регулируется водно-химическим режимом (ВХР): помимо воды в его состав теплоносителя входят борная кислота (H_3BO_3), гидроксид калия (КОН), аммиак (NH_3) и гидразин-гидрат ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

В рамках данного исследования для моделирования теплоотдачи в теплоноситель был выбран метод изотермического воздействия. Метод позволяет проводить сравнительный анализ коэффициента теплоотдачи K_T при изменении содержания в растворе второго компонента, основываясь на измерении электрической мощности $P(t)$, необходимой для поддержания заданной температуры зонда $T_{st}(t) = \text{const}$.

Наблюдается регистрируемое в опыте снижение значения коэффициента теплоотдачи раствора K_T при увеличении концентрации добавок ВХР относительно основного компонента (воды). Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006/>

*10. Теплофизические
свойства материалов
авиационной и
ракетно-космической
техники*

Методика определения теплопроводности металлических материалов при воздействии низкочастотных механических колебаний

Лепешкин А.Р.^{1,®}

¹ Московский авиационный институт, Волоколамское Шоссе 4, Москва, 125993, Россия

[®] lepeshkin.ar@gmail.com

В данной работе приведена методика определения теплопроводности разных металлических материалов в поле действия низкочастотных механических колебаний с учетом гипотезы автора о поступательно-вихревом движении свободных электронов в металле. Методика исследований на виброустановке предусматривала закрепление на конце балки образцов из тонких хромелевого и медного проводов, небольшого электронагревателя и термомпар. Из анализа результатов экспериментальных исследований нестационарного теплового состояния образцов следует, что теплопроводность хромелевого теплопроводника (образца) при виброускорении 120 g возрастает в 2 раза по сравнению со статическим состоянием и для медного – в 1,3 раза. Данный рост теплопроводности связан с увеличением электронной проводимости в металле за счет перемещения теплоносителей (имеющих массу) - свободных электронов при воздействии низкочастотных механических колебаний. Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния лопаток авиационных двигателей и других энергетических турбомашин, работающих при значительных низкочастотных механических колебаний и других эксплуатационных нагрузках.

*11. Теплофизические
свойства нефтей, газовых
конденсатов, газогидратов и
природного газа*

Перспективы использования метода светорассеяния в изучении фазового поведения пластовых флюидов

Поднек В.Э.^{1,®}, Кияченко Ю.Ф.¹, Юдин И.К.¹,
Дешабо В.А.¹ и Григорьев Б.А.¹

¹ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, ул. Губкина, д. 3, Москва, 119333, Россия

® v_podnek@ipng.ru

Разработка современного инструментального оптического метода изучения фазового поведения околокритических пластовых флюидов и, в частности, надежного определения их критических параметров (КП) является одной из актуальных задач нефтегазовой науки. За последнее время в этом направлении нами были получены результаты, свидетельствующие, что в области своей применимости инструментальный оптический метод, основанный на измерении интенсивности релеевского рассеяния света в окрестности критической точки (КТ) жидкость – газ, предоставляет уникальные возможности в идентификации околокритического состояния пластового флюида, построении его пограничной кривой вблизи КТ, надежном определении КП и проведении научно обоснованной "лабораторной" типизации однофазных залежей переходного (околокритического) типа по относительной интенсивности критической опалесценции, фиксируемой при переходе пластового флюида в двухфазное состояние.

На примере ряда многокомпонентных модельных и пластовых систем проведено сопоставление возможностей инструментального оптического метода с традиционными для нефтегазовой науки экспериментальными методами изучения фазового поведения околокритических пластовых систем, такими как адиабатическая калориметрия и PVT установки фазового равновесия. Обсуждаются перспективы внедрения указанного метода в практику исследовательских лабораторий нефтегазовой отрасли.

Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных научных исследований в РФ, НИР No. 125020501404-4.

Кристаллизация газонасыщенных слоев аморфного льда с зародышевыми кристаллами

Файзуллин М.З.¹, Виноградов А.В.^{1,®} и Томин А.С.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия

® vinni@itpuran.ru

В настоящей работе исследовано формирование гидратов этана и пропана в газонасыщенных конденсатах аморфного льда в присутствии зародышевых кристаллов. Аморфные газонасыщенные слои получали конденсацией сверхзвуковых потоков разреженного пара и газа на охлажденную жидким азотом подложку. Приготовление образцов выполняли с применением как параллельных потоков с ориентацией по нормали к подложке, так и под углом к ней навстречу друг другу. Образование нанокристаллов льда при адиабатическом расширении потока пара на выходе из сверхзвукового сопла обеспечивало их присутствие в неравновесных конденсатах. При нагревании конденсатов наблюдали их стеклование и последующую кристаллизацию. В условиях глубокой метастабильности реализуется спонтанный режим кристаллизации с захватом адсорбированных молекул газа и образованием газового гидрата. Содержание газа в закристаллизованных конденсатах превышало его значение для газового гидрата в равновесном состоянии за счет присутствия газа в межкристаллитном пространстве и пористой среде образца. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 23-29-00116, <https://rscf.ru/project/23-29-00116/>

*12. Теплофизические
свойства материалов в
системах возобновляемой
энергетики*

Контактное электрическое сопротивление поверхности медь–графит и мельхиор–графит

Костановский А.В.^{1,®}, Зеодинов М.Г.¹,
Костановская М.Е.¹ и Пронкин А.А.¹

¹ Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

® kostanovskiy@gmail.com

Приведены результаты экспериментального изучения контактного электрического сопротивления одной неподвижной поверхности медь–графит и мельхиор–графит, на основе которых проводится анализ работоспособности оценки контактного сопротивления, предложенной в работе Хольма. Приведено краткое описание эксперимента и результатов определения контактного удельного электрического сопротивления для поверхности медь–графит и мельхиор–графит (относятся к сильноточным контактам) в зависимости от силы электрического тока и температуры. Для контактной поверхности медь–графит диапазон изученных параметров составляет: температура $T = 290\text{--}430$ К, сила тока $I = 0\text{--}45$ А, давление внешней нагрузки на поверхности контакта $P = 100\text{--}220$ кПа; для поверхности мельхиор–графит: $T = 300\text{--}480$ К, $I = 0.5\text{--}60$ А, $P = 100\text{--}230$ кПа. Показано, что при малых токах и температурах отличие в величине контактного удельного электрического сопротивления оказывается незначимым, однако при $I > 30$ А и $T > 450$ К наблюдается отличие указанных величин. На основе анализа формулы Хольма, показано, что для поверхностей медь–графит и мельхиор–графит отличие в величине контактного сопротивления не должно иметь место, так как контактное сопротивление определяется только свойствами графита. Сделан вывод о необходимости расширения круга материалов при экспериментальных исследованиях контактного сопротивления и использования большего количества параметров при теоретическом описании изучаемого явления.

СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ

- ГАИШ МГУ* — Астрономический институт Штернберга, Московский государственный университет имени Ломоносова, Университетский просп. 13, Москва, 119992, Россия
- ДГУ* — Дагестанский государственный университет, Магомеда Гаджиева 43а, Махачкала, Республика Дагестан, 367000, Россия
- ИАТЭ НИЯУ МИФИ* — Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Студгородок 1, Обнинск, Калужская область, 249020, Россия
- ИГиЛ СО РАН* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия
- ИМЕТ УрО РАН* — Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Амундсена 101, Екатеринбург, Свердловская область, 620016, Россия
- ИНХ СО РАН* — Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, Акад. Лаврентьев просп. 3, Новосибирск, 630090, Россия
- ИПГВЭ ОИВТ РАН* — Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, Шамиля 39а, Махачкала, Республика Дагестан, 367030, Россия
- ИПНГ РАН* — Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, ул. Губкина, д. 3, Москва, 119333, Россия
- ИТ СО РАН* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Акад. Лаврентьев просп. 1, Новосибирск-90, 630090, Россия
- ИТМО* — Университет ИТМО, Кронвергский 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия
- ИТФ УрО РАН* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отде-

- ления Российской академии наук, ул. Амундсена, 107а, Екатеринбург, Свердловская область, 620110, Россия
- ИЭЭ РАН* — Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Дворцовая Набережная 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия
- КГТУ* — ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Советский проспект, 1, Калининград, 236022, Россия
- КНИТУ-КАИ* — Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, ул. Карла Маркса 10, Казань, Республика Татарстан, 420111, Россия
- МАИ* — Московский авиационный институт, Волоколамское Шоссе 4, Москва, 125993, Россия
- МИЭМ НИУ ВШЭ* — Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Таллинская 34, Москва, 123458, Россия
- ОИВТ РАН* — Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия
- СПбГУПТД* — Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Большая Морская 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия
- СФТИ НИЯУ МИФИ* — Снежинский физико-технический институт - филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"», Комсомольская ул. 8, Снежинск, Челябинская область, 456776, Россия
- УдмФИЦ УрО РАН* — Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. Татьяны Барамзиной, 34, Ижевск, Удмуртская Республика, 426067, Россия
- УрГПУ* — Уральский государственный педагогический университет, пр-т. Космонавтов, 26, Екатеринбург, Свердловская область, 620091, Россия
- УрФУ* — Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 21, Екатеринбург, 620000, Россия
- ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"»* — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего обра-

зования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», Красноказарменная 14, Москва, 111250, Россия

ФГБОУ ВО «УГГУ» — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», ул. Куйбышева, 30, Екатеринбург, Свердловская обл., 620144, Россия

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» — Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Московский пр., 19, Санкт-Петербург, 190005, Россия

ФГУП «РФЯЦ - ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» — Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Васильева 13, Снежинск, Челябинская область, 456770, Россия

ФИАН — Лебедев Физический институт Российской академии наук, Ленинский просп. 53, Москва, 119991, Россия

ФИЦ ХФ РАН — Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, ул. Косыгина 4 корп. 1, Москва, 119991, Россия

ЦАГИ — Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия

ЮУрГУ — Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия

СПИСОК УЧАСТНИКОВ

1. Абдуллаев Р.Н., ИТ СО РАН, abdullaev.rasul88@gmail.com
2. Александров И.С., КГТУ, alexandrov_kgrd@mail.ru
3. Андбаева В.Н., ИТФ УрО РАН, andbaeva@mail.ru
4. Батраков П.К., ФИАН, p.batrakov@lebedev.ru
5. Беспятов М.А., ИНХ СО РАН, bespyatov@niic.nsc.ru
6. Богатищева Н.С., ИТФ УрО РАН, Bogatishcheva@mail.ru
7. Боярских К.А., ОИВТ РАН, shagom55@gmail.com
8. Булава А.С., ОИВТ РАН, bulava.as@phystech.edu
9. Виноградов А.В., ИТФ УрО РАН, vinni@itpuran.ru
10. Волосников Д.В., ИТФ УрО РАН, dima_volosnikov@mail.com
11. Волосников Д.В., ИТФ УрО РАН, dima_volosnikov@mail.ru
12. Гаврильев А.Ч., ОИВТ РАН, gavrilev.ach@phystech.su
13. Гасратов Ф.К., ФИАН, f.gasratov@lebedev.ru
14. Горбатов А.И., ФГБОУ ВО «УГТУ», ad_i48@mail.ru
15. Губин А.А., ИТФ УрО РАН, artyom.gubin@vk.com
16. Дороватовский А.В., ОИВТ РАН, a.dorovatovskiy@gmail.com
17. Думин Ю.В., ГАИШ МГУ, dumin@yahoo.com
18. Еркимбаев А.О., ОИВТ РАН, adilbek@jiht.ru
19. Ивлиев А.Д., УрГПУ, ad_i48@mail.ru
20. Иосилевский И.Л., ОИВТ РАН, iosilevskiy@gmail.com
21. Каменских Ю.И., ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», y.i.kamenskih@vniim.ru
22. Каюмов Р.Р., КНИТУ-КАИ, rushan_250189033@mail.ru
23. Князев Д.В., ОИВТ РАН, d.v.knyazev@yandex.ru
24. Костановский А.В., ОИВТ РАН, kostanovskiy@gmail.com
25. Крутова И.Ю., СФТИ НИЯУ МИФИ, iykrutova@mephi.ru
26. Кудрявцева И.В., ИТМО, togg1@yandex.ru
27. Ларичев М.Н., ФИЦ ХФ РАН, mlarichev@chph.ras.ru
28. Левашов П.Р., ОИВТ РАН, pasha@jiht.ru

29. Лепешкин А.Р., МАИ, lepeskhin.ar@gmail.com
30. Ливерко Е.А., ЦАГИ, info@tsagi.ru
31. Маевский К.К., ИГиЛ СО РАН, konstantinm@hydro.nsc.ru
32. Макарова С.В., ИЭЭ РАН, makarovasvetlana98@mail.ru
33. Маслов С.А., ОИВТ РАН, sergm90@mail.ru
34. Мельников С.А., ОИВТ РАН, melnikov.sa@phystech.edu
35. Мирзоев А.А., ЮУрГУ, mirzoevaa@susu.ru
36. Мурлиева Ж.Х., ДГУ, zhariyat@mail.ru
37. Обручкова Л.Р., ОИВТ РАН, o_liliya@ihed.ras.ru
38. Олянина Н.В., УдмФИЦ УрО РАН, oljanina@udman.ru
39. Османова Б.К., ИПГВЭ ОИВТ РАН, badji@mail.ru
40. Палчаев Д.К., ДГУ, dairpalchev@mail.ru
41. Перевошиков Е.Е., ОИВТ РАН, perevoshchiky@jiht.ru
42. Писарев В.В., МИЭМ НИУ ВШЭ, vprisarev@hse.ru
43. Поволоцкий И.И., ИТФ УрО РАН, iliyapov@rambler.ru
44. Поднек В.Э., ИПНГ РАН, v_podnek@ipng.ru
45. Помыкалов Е.В., ЮУрГУ, pomykalovev@susu.ru
46. Попов А.А., УрФУ, aa.popov@urfu.ru
47. Пухов Н.Ф., ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», V.V.Vlasova@vniim.ru
48. Русанов Б.А., УрГПУ, rusanov@uspu.ru
49. Русанова А.И., ИМЕТ УрО РАН, nastmoroz97@yandex.ru
50. Рыков С.В., СПбГУПТД, togg1@yandex.ru
51. Рыков В.А., ИТМО, rykov-vladimir@rambler.ru
52. Сенченко В.Н., ОИВТ РАН, pyrolab@ihed.ras.ru
53. Середкин Н.Н., ОИВТ РАН, nikser12@yandex.ru
54. Скрипов П.В., ИТФ УрО РАН, pavel-skripov@bk.ru
55. Смирнов Н.А., ФГУП «РФЯЦ - ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», deldavis@mail.ru
56. Смирнов О.М., ОИВТ РАН, smirnov.om@phystech.edu
57. Смирнова А.Р., ОИВТ РАН, anya4113@gmail.com
58. Станкус С.В., ИТ СО РАН, stankus@itp.nsc.ru
59. Тригер С.А., ОИВТ РАН, satron@mail.ru
60. Устюжанин Е.Е., ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"», evgust@gmail.com

61. *Филанович А.Н.*, УрФУ, a.n.filanovich@urfu.ru
62. *Фокин В.Б.*, ОИВТ РАН, Vladimir.fokin@phystech.edu
63. *Хищенко К.В.*, ОИВТ РАН, konst@ihed.ras.ru
64. *Хотиенкова М.Н.*, ИТФ УрО РАН, mary-anton@bk.ru
65. *Чусов И.А.*, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, igrch@mail.ru
66. *Шестаков М.А.*, ЮУрГУ, shestakovma@susu.ru
67. *Шестаковская Е.С.*, ЮУрГУ, shestakovskaiaes@susu.ru
68. *Шумихин А.С.*, ОИВТ РАН, shum_ac@mail.ru

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абдуллаев Р.Н., 50, 55
Абдуллин И.Ш., 68
Абрамова Д.А., 81
Агажанов А.Ш., 50, 55
Аетпаева М.С., 76
Александров И.С., 32
Андбаева В.Н., 25, 47
Андриенко Д.С., 63
Антонов Д.В., 91
Бабаева Ю.А., 97, 98
Базаев А.Р., 26
Базаев Э.А., 26
Базлов А.И., 48
Байдин И.С., 95
Батраков П.К., 79, 95
Белов О.В., 73
Бельтюков А.Л., 60
Беляев Г.Е., 73
Беспятов М.А., 52
Богатищева Н.С., 39
Боярских К.А., 17, 18, 20
Брежнев А.И., 97
Брыкин М.В., 30
Булава А.С., 30
Вараксин И.М., 94
Вервикишко Д.Е., 30
Вервикишко П.С., 30
Верховых А.В., 93
Виноградов А.В., 105
Власова В.В., 51, 86
Волосников Д.В., 22, 23, 100
Гаврильев А.Ч., 59, 64, 67
Гаджимагомедов С.Х., 45
Гасратов Ф.К., 95
Гельфонд Н.В., 52
Герасимов А.А., 32
Горбатов А.И., 40
Горбатов В.И., 61
Григорьев Б.А., 32, 104
Гроховский В.И., 53
Грязнов В.К., 12
Губин А.А., 91
Гурашкин А.Л., 85
Демьянов Г.С., 38
Дешабо В.А., 104
Джаппаров Т. А.-Г., 26
Дороватовский А.В., 65
Думин Ю.В., 36
Егорова Н.В., 81
Еркимбаев А.О., 82
Жуховицкий Д.И., 24
Зеодинов М.Г., 107
Зицерман В.Ю., 82
Ивлиев А.Д., 40, 61
Иосилевский И.Л., 12
Исмагилов Д.М., 68
Казаков Е.Д., 72
Казачинский А.О., 89
Каменских Ю.И., 86
Каюмов Р.Р., 68
Кияченко Ю.Ф., 104
Клиначева Н.Л., 74
Князев Д.В., 92
Кобзев Г.А., 82
Кокорин А.Ф., 53
Компан Т.А., 51, 86
Кондратьев С.В., 86
Костановская М.Е., 107
Костановский А.В., 107
Котов А.Н., 23, 85

- Крутова И.Ю., 89
 Кудрявцева И.В., 28, 29, 31
 Кузин Т.М., 52
 Куклина А.А., 61
 Кулагин В.И., 86
 Ладыанов В.И., 48, 60
 Ларичев М.Н., 73
 Левашов П.Р., 13, 16, 92
 Лепешкин А.Р., 102
 Ливерко Е.А., 87
 Лукоянов А.В., 42
 Маевский К.К., 21
 Макарова С.В., 34
 Маслов С.А., 77
 Медведев М.А., 79
 Мелких А.В., 57
 Мельников С.А., 64
 Мельников С.А., 59, 67
 Минаков Д.В., 13, 38, 65
 Мирзоев А.А., 93
 Мосунова Н.А., 55
 Мурлиева Ж.Х., 44, 45
 Мухаметзянов Т.А., 49
 Назарова А.А., 52
 Никитин Е.Д., 39
 Новиков Г.Е., 97
 Обручкова Л.Р., 20
 Огинов А.В., 79, 95
 Олянина Н.В., 60
 Онегин А.С., 16
 Османова Б.К., 26
 Очков В.Ф., 81
 Палчаев Д.К., 44, 45
 Парамонов М.А., 38
 Перевошников Е.Е., 24
 Петрова Е.В., 53
 Петрова С.А., 63
 Писарев В.В., 90, 94
 Повзнер А.А., 42
 Поволоцкий И.И., 23, 85
 Поднек В.Э., 32, 104
 Помыкалов Е.В., 76
 Попов А.П., 39
 Попов А.А., 53
 Пронкин А.А., 107
 Пухов Н.Ф., 51, 86
 Рабаданов М.Х., 44
 Русанов Б.А., 48, 49, 63, 66
 Русанова А.И., 48, 66
 Рыков В.А., 17, 28, 29
 Рыков С.В., 17, 28, 29, 31
 Рютин С.Б., 57
 Самошкин Д.А., 55
 Сапегина И.В., 60
 Свирская Л.М., 36
 Сенченко В.Н., 59, 64, 67, 84
 Середкин Н.Н., 19, 20
 Сидоров В.Е., 48, 66
 Симонов Д.К., 63
 Ситдыков А.А., 100
 Скрипов П.В., 23, 56, 57, 85
 Смирнов А.Л., 61
 Смирнов Н.А., 75
 Смирнов О.М., 90
 Смирнова А.Р., 72
 Снетов В.Н., 34
 Сон Л.Д., 66
 Станкус С.В., 50, 55
 Стариков Я.Е., 74
 Старостин А.А., 23, 85
 Субботин Д.И., 34
 Талуц С.Г., 61
 Ткаченко С.И., 72
 Томин А.С., 105
 Тригер С.А., 77, 78
 Трифонов В.А., 52
 Устюжанин Е.Е., 17, 81
 Файзуллин М.З., 39, 105

Филанович А.Н., 42	Шацких Ю.В., 81
Фокин В.Б., 38	Шевелев Д.С., 52
Фролов А.М., 30	Шейндлин М.А., 30, 65
Хайрулин А.Р., 50, 55	Шестаков М.А., 70
Хайрулин Р.А., 50, 55	Шестаковская Е.С., 74
Хищенко К.В., 15, 17–20, 70	Шумихин А.С., 71
Хотиенкова М.Н., 25, 47	Шутов А.В., 12
Чусов И.А., 97, 98	Щелкачев Н.М., 16
Шангин В.В., 23	Юдин И.К. , 104
Шахатов В.А., 87	Яловец А.П., 74, 76