

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Российской академии наук

Фундаментальные и прикладные аспекты энергетики будущего



Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) – ведущий научно-образовательный центр России в области изучения теплофизических свойств веществ, низкотемпературной плазмы и развития новой энергетики. Институт берет свое начало с 1960 года, когда была образована Лаборатория высоких температур АН СССР. Системообразующим проектом, вокруг которого в 60-е и 70-е годы развивался Институт, было создание крупных экспериментальных и первых в мире опытно-промышленных установок прямого преобразования тепловой энергии в электрическую с помощью магнито-гидродинамических (МГД) генераторов. В разные годы руководителями Института были академики и члены-корреспонденты АН СССР и РАН Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Батенин В.М., Лагарьков А.Н., Фортон В.Е. С 2018 года ОИВТ РАН возглавляет академик РАН Петров О.Ф.

Современный облик ОИВТ РАН приобрел в 2007 году. Областями научных исследований, проводимых Институтом в настоящее время, являются:

- физические свойства веществ и материалов в широком диапазоне параметров;
- физика низкотемпературной плазмы и плазмохимия;
- теплоэнергетика и энергобезопасность;
- безуглеродная энергетика и энерго-ресурсосбережение.

ОИВТ РАН сегодня – это более 900 сотрудников, в том числе 3 академика и 1 чл.-корр. РАН, более 70 докторов и 190 кандидатов наук. В структуру Института входят 43 лаборатории в г. Москве и в филиалах Института в г. Шатуре и г. Махачкале. На базе ОИВТ РАН функционируют центры коллективного пользования: Лазерный тераваттный фемтосекундный комплекс и Суперкомпьютерный центр ОИВТ РАН, а также уникальная научная установка – самая большая в стране взрывная камера «Сфера». Более 25 лет Институт является постановщиком уникальных космических экспериментов «Плазменный кристалл» и «Кулоновский кристалл» в условиях микрогравитации на орбитальных станциях «МИР» (до 2000 года) и МКС.

ОИВТ РАН является одним из мировых лидеров в следующих научных направлениях:

- суперкомпьютерное квантовое и многомасштабное моделирование веществ и материалов, в том числе с применением искусственного интеллекта;
- экспериментальное исследование теплофизических свойств веществ в экстремальных состояниях;
- микро- и наномоторы в коллоидной плазме и криогенном коллоиде;
- магнитоплазменная аэродинамика для перспективных летательных аппаратов.

Институт также является признанным центром компетенций в

- исследовании ударных волн, горения и детонации в газах, многофазных и реагирующих средах;
- разработке теоретических моделей и средств диагностики для мощных источников излучения и компактных ускорителей заряженных частиц;
- исследовании процессов тепломассообмена и их интенсификации в энергетике и различных отраслях промышленности;
- разработке термодинамических циклов преобразования энергии и энергоустановок перспективной централизованной, распределенной и автономной энергетики;
- разработке и испытании электрохимических устройств преобразования и накопления энергии, включая водородную энергетику;
- предиктивном моделировании и прогнозировании развития технологий возобновляемой энергетики (преобразование солнечной, ветровой, геотермальной энергии, конверсия биомассы);
- разработке ресурсосберегающих технологий переработки техногенных отходов и добычи полезных ископаемых.

Проводимые в ОИВТ РАН исследования и разработки соответствуют Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в части:

- перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышения эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирования новых источников энергии, способов ее передачи и хранения;
- перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта;





а также вносят существенный вклад в развитие сквозных и критических технологий Российской Федерации, а именно:

- технологий создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками;
- технологий производства малотоннажной химической продукции, включая особо чистые вещества, для фармацевтики, энергетики и микроэлектроники;
- технологий создания отечественных средств производства и научного приборостроения;
- природоподобных технологий;
- экологически чистых технологий эффективной добычи и глубокой переработки стратегических и дефицитных видов полезных ископаемых;
- технологий создания высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии (в том числе атомной);
- биомедицинских и когнитивных технологий здорового и активного долголетия.

ОИВТ РАН ведет совместную научно-образовательную деятельность с МФТИ, МЭИ, ВШЭ, МГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МИФИ, ДГУ (г. Махачкала) и НЦФМ (г. Саров). На базе ОИВТ РАН ведут подготовку высококвалифицированных научных кадров следующие кафедры:

- кафедра физики высоких плотностей энергии (МФТИ);
- кафедра физики высокотемпературных процессов (МФТИ);
- кафедра вычислительной физики конденсированного состояния и живых систем (МФТИ);
- кафедра инженерной теплофизики (МЭИ).

В ОИВТ РАН открыт набор в аспирантуру, работает два диссертационных совета по специальностям:

- физика плазмы, теплофизика и теоретическая теплотехника;
- электрофизика, электрические установки (совместно с ИТПЭ РАН).

Оглавление

1. СТАТИЧЕСКИЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ И ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ	9
1.1. Рекордные давления и температуры, создаваемые методом электровзрыва проводников, для изучения аварийных ситуаций на энергоустановках и физических свойств веществ в экстремальных состояниях	10
1.2. Экстремальное энергетическое воздействие на вещество для создания мощных источников излучения, компактных ускорителей заряженных частиц, а также для задач лабораторной астрофизики	11
1.3. Тераваттные фемтосекундные лазерные системы для энергетического воздействия на вещество	13
1.4. Сверхтугоплавкие материалы для ядерной энергетики, авиационной и космической техники	18
2. КЛАССИЧЕСКОЕ И КВАНТОВОЕ АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	19
2.1. Первопринципное квантовое моделирование теплофизических свойств веществ в условиях, недоступных для эксперимента	20
2.2. Суперкомпьютерное многомасштабное моделирование динамических процессов в рабочих телах и конструкционных материалах перспективных электрофизических и энергетических установок	21
3. БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ	23
3.1. Широкодиапазонные уравнения состояния вещества для моделирования процессов в существующих и перспективных энергоустановках	24
3.2. База данных теплофизических свойств веществ для широкого спектра приложений: от космической техники до утилизации бытовых отходов	25
4. ФИЗИКА СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМ	27
4.1. Химическая модель плазмы для расчетов термодинамических и транспортных свойств	28
4.2. Квантовые методы Монте-Карло для исследования неидеальной вырожденной плазмы	29
4.3. Стационарная ультрахолодная плазма	30
5. МИКРО- И НАНОМОТОРЫ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ	31
5.1. Коллоидная (пылевая) плазма в природе, технологических процессах и лабораторных условиях	32
5.2. Энергетика активных микро- и нанороботов в классических жидкостях	33
5.3. Квантовые эффекты в криогенных коллоидах активных броуновских моторов	34
5.4. Активные кулоновские системы в условиях микрогравитации	35





6. МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ АЭРОДИНАМИКА.....	37
6.1. Компьютерное моделирование в магнитоплазменной аэродинамике	38
6.2. Плазменные генераторы в магнитоплазменной аэродинамике и двигателестроении	39
6.3. Газоразрядная плазма в задачах аэродинамики и двигателестроения	40
7. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ, МЕДИЦИНЕ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	41
7.1. Плазменная обработка и синтез для улучшения эксплуатационных свойств материалов и создания новых химических веществ	42
7.2. Плазменная медицина в задачах антибактериальной терапии, ускорения регенерации биологических тканей, косметологии	44
7.3. Научные основы плазменной сепарации для создания технологий переработки отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов	45
8. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ И НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГАЗОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ	47
8.1. Физические процессы высокотемпературной и нестационарной газодинамики, горения и детонации	48
8.2. Управление горением в энергетических системах с помощью высокочастотных коронных разрядов	50
8.3. Кавитация и сопровождающие ее процессы	51
9. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОМАСООБМЕН	53
9.1. Перспективные добавки к традиционным топливам для снижения вредных выбросов в продуктах горения	54
9.2. Воздействие на процесс формирования распыла жидкостей	55
9.3. Прогнозирование развития переходных режимов горения для повышения КПД перспективных энергоустановок	56
9.4. МГД-теплообмен жидких металлов и расплавов солей для решения проблемы охлаждения первой стенки термоядерных устройств	57
9.5. Охлаждение элементов технических устройств со сверхвысокой плотностью тепловыделения посредством кипения недогретой жидкости	58
10. ГАЗОТУРБИННЫЕ ЦИКЛЫ И АГРЕГАТЫ	59
10.1. Газотурбинные технологии в области микрогазотурбостроения	60
10.2. Газотурбинные технологии для задач циклового вывода углекислоты	61
10.3. Моделирование смазочных материалов для подшипников высокого давления в газовых турбинах	62
10.4. Моделирование двухфазных и вихревых потоков с целью совершенствования рабочих процессов газотурбинных и парогазовых установок	63

11. БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	65
11.1. Научные основы взрывобезопасности и методы снижения взрывных нагрузок при авариях на промышленных объектах	66
11.2. Суперкомпьютерное многомасштабное моделирование для безопасного и эффективного использования энергетических установок	67
11.3. Распыл метастабильных перегретых жидкостей для теплозащиты энергоустановок, охлаждения и пожаротушения	68
11.4. Высокоинтенсивные тепломассообменные процессы при паровых взрывах	69
11.5. Энергобезопасность высоковольтного оборудования	70
11.6. Триггерное электромагнитное воздействие на деформационные процессы в земной коре для инициирования сейсмических событий и снижения сейсмической опасности	72
12. ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ И КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ	73
12.1. Энергоэффективное получение твердого биотоплива методом торрефикации ...	74
12.2. Утилизация CO ₂ с помощью микроводорослей	75
12.3. Получение биотоплива из микроводорослей	76
13. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	77
13.1. Водород-кислородная парогенерация	78
13.2. Металлогидридные системы очистки, хранения и компрессии водорода	79
13.3. Алюмоводная энергетика как источник автономного энергоснабжения	80
13.4. Компьютерный дизайн новых электрокатализаторов на основе графенов	81
13.5. Разработка нанокompозитных мембран для суперконденсаторов	82
13.6. Электровихревые течения проводящих сред	83
14. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ И НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	85
14.1. Геотермальная энергетика	86
14.2. Разработка методов термического разложения газообразных углеводородов для реализации углерод-нейтральных энерготехнологических циклов	87
14.3. Комбинированные солнечные энергетические системы	88
14.4. Прогнозирование и оценка ресурсов солнечной и ветровой энергии на территории РФ	89
15. ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ В ОИВТ РАН	91
15.1. Ресурсосбережение и переработка минерального и техногенного сырья	92
15.2. Газотурбостроение и теплоэнергетика	98
15.3. Возобновляемая энергетика	101





15.4. Водородная и алюмоводородная энергетика	108
15.5. Инновационная медицина	111
15.6. Электробезопасность	113
15.7. Обработка и синтез материалов	115
15.8. Фотоника	125
15.9. Информационные технологии	127

**1.
СТАТИЧЕСКИЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕПЛОФИЗИКИ И ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

1. СТАТИЧЕСКИЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ И ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

1.1. Рекордные давления и температуры, создаваемые методом электровзрыва проводников, для изучения аварийных ситуаций на энергоустановках и физических свойств веществ в экстремальных состояниях

Знание теплофизических свойств конструкционных материалов и рабочих тел при высоких температурах и давлениях необходимо для конструирования современных энергетических установок в атомной и космической промышленности. А для изучения развития различных сценариев при аварийных ситуациях в этих устройствах с целью исследования их безопасности важно знать свойства используемых материалов при температурах и давлениях, которые далеко выходят за пределы режимов их нормального функционирования.

Используя метод электрического взрыва фольг, в ОИВТ РАН была создана уникальная экспериментальная методика, которая позволяет на небольшой «настоольной» установке проводить измерения теплофизических свойств материалов (металлы, графит, некоторые карбиды и оксиды металлов) в области состояний, которая является промежуточной между твердым и газообразным состоянием. Эта область соответствует давлениям 0.3–10 ГПа (1 ГПа = 10^4 атм), температурам (0.1–4.0) 10^4 К и значениям плотности, которые в 1.1–10 раз ниже нормального значения плотности исследуемого материала в твердом состоянии. В этой области состояний жидкие металлы испытывают переход металл–неметалл, вызываемый тепловым расширением, здесь находятся критические точки металлов в том числе и тугоплавких (которые в настоящее время неизвестны), и в этой области вещество может существовать в состоянии сильно неидеальной плазмы.

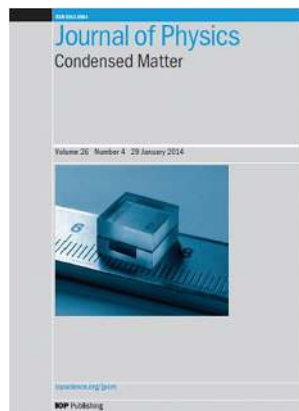
Используя методику электровзрыва, впервые удалось определить критическую плотность перехода металл–неметалл для жидкого металла пониженной плотности. Это было сделано пока только для двух металлов: свинца и эвтектического сплава свинец–висмут. Наша методика позволила также впервые определить критические точки для этих металлов, т.е. измерить значения критического давления, плотности и удельной энтальпии, а также оценить их погрешности. С помощью этой методики мы впервые получили достаточно полный набор данных вблизи линии плавления графита при давлениях 0.3–2.0 ГПа и определили его температуру плавления для этого интервала давлений, скачки плотности, энтальпии и электропроводности при плавлении.

В настоящее время мы проводим аналогичные измерения для других металлов (вольфрам, железо, цирконий), чтобы установить общие закономерности поведения веществ в этой области состояний и, в частности, ответить на поставленный Я.Б. Зельдовичем и Л.Д. Ландау вопрос о соотношении между переходом металл–неметалл и переходом жидкость–газ.

Чтобы отметить перспективность созданной нами методики измерений, ведущий журнал по физике конденсированного состояния (Journal of Physics: Condensed matter) поместил на титульную страницу фотографию нашей экспериментальной сборки: отрезок фольги исследуемого металла, зажатый (вклеенный) между двумя пластинами сапфира.



Установка для изучения электровзрыва проводников



Фотография образца

1.2. Экстремальное энергетическое воздействие на вещество для создания мощных источников излучения, компактных ускорителей заряженных частиц, а также для задач лабораторной астрофизики

Лазерно-плазменные ускорители электронов



Участники эксперимента на петаваттной лазерной установке PHELIX (Германия), на которой были реализованы режим прямого лазерного ускорения электронов и источники бетатронного и тормозного излучения с рекордными параметрами

Получение новых фундаментальных знаний о строении материи требует все больших энергетических воздействий на вещество. За последнее десятилетие в ведущих лабораториях мира стали доступны для исследований лазерные установки петаваттного и мульти-петаваттного класса мощности, которые позволяют получить экстремально высокую концентрацию энергии.

Изучение экстремальных состояний вещества при воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения является фундаментальной задачей многочисленных теоретических и экспериментальных исследований во всем мире. Эти исследования занимают обширную область от физики твердого тела до физики плазмы и физики высоких энергий, что определяет их значимость как для решения задач в физике элементарных частиц и лабораторной астрофизике, так и для научно-технических приложений, таких как создание новых источников энергии на основе инерциального управляемого термоядерного синтеза.

Высокоинтенсивные лазерные импульсы могут быть использованы для создания недостижимых другими способами источников ультрарелятивистских частиц и квантов излучения сверхвысокой энергии. Лазерные источники пучков релятивистских электронов и создаваемые на их основе яркие источники рентгеновского и гамма-излучения, а также нейтронов, являются эффективными инструментами во многих областях фундаментальных и прикладных исследований, таких как создание и диагностика вещества в экстремальных состояниях, ядерная физика и материаловедение, а также в медицинских и биофизических приложениях. Полученные в ОИВТ РАН пионерские результаты по моделированию генерации в режиме прямого лазерного ускорения сильноточных пучков ультрарелятивистских электронов привели к созданию высокоэффективных сверхъярких источников бетатронного и тормозного излучения.

ОИВТ РАН является одним из мировых лидеров в разработке теории новых лазерно-плазменных ускорителей электронов до сверхвысоких энергий с рекордными темпами ускорения, недостижимыми в классических радиочастотных ускорителях. Полученные результаты открывают путь для создания многокаскадного электрон-позитронного коллайдера для физики высоких энергий.

Доступные в настоящее время суперкомпьютерные технологии позволяют с все большей полнотой описывать процессы лазерно-плазменного взаимодействия, лежащие в основе разработки новых методов создания высокоэффективных источников излучения и частиц высоких энергий.



Лабораторная астрофизика

Одним из актуальных направлений в области физики высоких плотностей энергии является экспериментальная (т.н. лабораторная) астрофизика, которая стала активно развиваться с появлением в лабораториях по всему миру наносекундных лазерных систем суб/кДж энергетики.

Воздействие таких импульсов на вещество способно создавать высокие плотности энергии (более 10^{11} Дж/см³ и давления более 1 Мбар), что, в свою очередь, порождает целый комплекс сложных гидродинамических явлений (различные типы неустойчивостей,

плазменные струи, ударные волны). В рамках экспериментальной астрофизики в контролируемых лабораторных условиях моделируются и исследуются процессы, происходящие в реальных астрофизических объектах, например, звездах, сверхновых, планетах и их ядрах.

Традиционные методы, такие как численное моделирование и астрономические наблюдения, не всегда способны описать эволюцию астрофизических объектов (остатков сверхновых, звезд и планет, плазменных джетов и многих других). Для первых это часто связано со сложностью задействованных физических механизмов и, как следствие, ограниченностью вычислительных ресурсов, а также сложностью верификации на реальных астрофизических объектах, тогда как для вторых ограничивающим фактором является низкое пространственное и временное разрешение наблюдений (эволюция явлений может протекать на временных масштабах тысяч лет). Поэтому лабораторная астрофизика является уникальной областью исследования, позволяющей проводить эксперименты с масштабированием основных параметров космической системы или объекта, которые полезны для изучения микрофизики, связанной с астрофизическими системами дальнего действия.

Сотрудники ОИВТ РАН регулярно участвуют в международных экспериментах по лабораторной астрофизике. В частности, ими получены уникальные результаты по: динамике развития неустойчивостей типа Релея–Тейлора вплоть до стадии диссипации энергии в лазерно-индуцированных плазменных потоках, астрофизически подобных остаткам сверхновых; эволюции лазерно-нагруженных твердотельных материалов при давлениях в несколько миллионов атмосфер, достигаемых в ядрах планет; процессам, влияющим на скорости триггерного звездообразования, а также формирования аккреционных колонн в молодых звездах. Экспериментальные результаты позволяют дополнять недостающие данные астрофизических наблюдений, а также верифицировать и разрабатывать новые численные модели, описывающие явления в космосе.



Изучение магнито-гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме с астрофизическим подобием на лазерном комплексе PICO2000 (Франция)

1.3. Тераваттные фемтосекундные лазерные системы для энергетического воздействия на вещество

Взаимодействие интенсивного импульсного терагерцового излучения с веществом

Терагерцовые волны обладают особыми свойствами и возможностями, которые позволяют решать множество задач в различных научных дисциплинах, включая физику, химию, биологию, медицину и безопасность.

Диапазон частот терагерцового излучения охватывает широкий спектр низкоэнергетических мод и состояний в различных материалах и представляет собой деликатный и высокоизбирательный инструмент для исследования и манипулирования свойствами материи. Электрическое поле терагерцового импульса может напрямую воздействовать на параметр порядка в сегнетоэлектриках, индуцировать сверхбыстрые фазовые переходы в материалах.

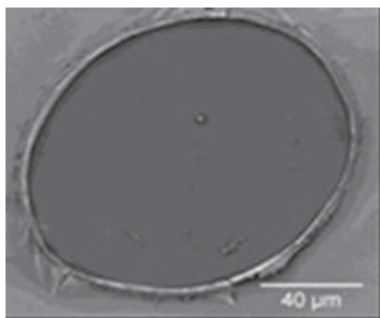
В последнее десятилетие благодаря созданию мощных и высокоэффективных источников излучения в терагерцовом диапазоне спектра стало возможным проведение широкого круга исследований в области взаимодействия света с веществом с напряженностью электрического поля, превышающей 10 МВ/см, которые являются неотъемлемой частью современной фундаментальной науки, востребованы в медицине и имеют важное прикладное значение. В большинстве случаев такие источники требуют передовых технологий и создаются на базе фемтосекундных лазерных систем тераваттного уровня мощности, а генерация интенсивного терагерцового излучения происходит методом оптического выпрямления лазерных импульсов в нелинейных органических кристаллах, либо в кристаллах ниобата лития.

В ОИВТ РАН на базе уникальной установки «Лазерный тераваттный фемтосекундный комплекс» создан универсальный перестраиваемый по частоте источник импульсного терагерцового излучения с характеристиками мирового уровня. Генерация терагерцовых импульсов осуществляется методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов тераваттной хром-форстеритовой лазерной системы в нелинейных органических кристаллах. В настоящее время достигнуты значения напряженности электрического поля в сфокусированном пучке более 20 МВ/см в спектральном диапазоне 0.5-5 ТГц с частотой повторения импульсов 10 Гц. Оптическая схема терагерцового источника при существующих энергетических параметрах лазерной системы позволяет получить в перспективе значения напряженности электрического поля около 100 МВ/см.

С помощью такого источника в ОИВТ РАН впервые были получены экспериментальные данные о разрушении тонких металлических пленок при различных режимах воздействия. Впервые обнаружены новые явления в полупроводниках и сегнетоэлектриках в экстремальных полях, которые открывают возможность разработки сверхбыстрых переключателей, модуляторов и новых запоминающих устройств под управлением терагерцовых импульсов.



Фото пресс-службы РНФ



Пленка алюминия, разрушенная терагерцовым импульсом



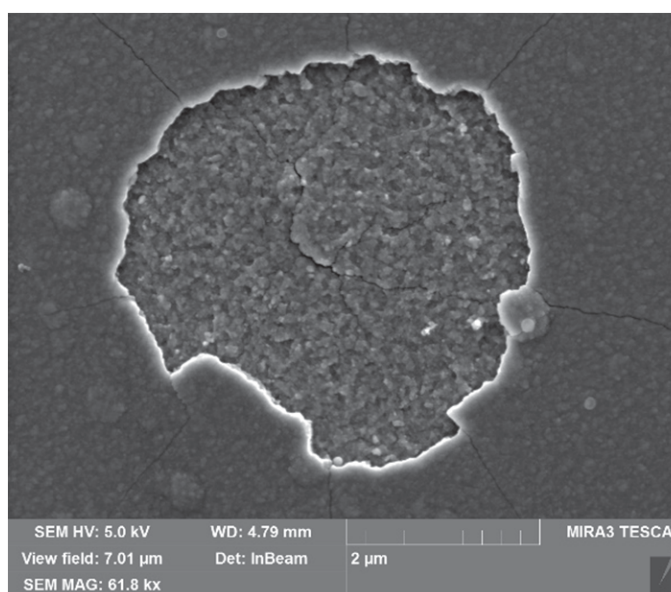
Исследование ударно-волновых явлений и измерение откольной прочности материалов

Известно, что сопротивление материалов разрушению (прочность материала) возрастает по мере увеличения скорости растяжения, причиной чего является ограниченность скоростей зарождения и роста несплошностей. Существует предельно возможное значение прочности – так называемая «идеальная» прочность, равная величине отрицательного давления, по достижении которого объемный модуль обращается в нуль. Состояния с нулевым объемным модулем соответствуют спинодали конденсированного вещества и, вообще говоря, должны быть недостижимы в реальных экспериментах.

Помимо предельной прочности на разрыв, существует ограничение на величину сдвиговых напряжений в твердом теле. Идеальная прочность на сдвиг определяется как величина сдвигового напряжения, необходимая для зарождения дислокаций и образования дефектов упаковки в совершенном кристалле без участия тепловых флуктуаций. Альтернативное определение идеальной сдвиговой прочности связывает последнюю с фоновой неустойчивостью кристаллической решетки. Представляется естественным и важным попытаться ответить на вопрос: в какой мере можно приблизиться к идеальной объемной и сдвиговой прочности твердого тела в физическом эксперименте?

С появлением мощных фемтосекундных лазеров стало возможным изучение поведения материалов при предельно высоких скоростях приложения механической нагрузки. Результаты проведенных в ОИВТ РАН экспериментальных исследований ударно-волновых явлений в пленочных образцах ряда конструкционных материалов, генерируемых мощными фемтосекундными лазерными импульсами и протекающих в пикосекундном временном диапазоне на субмикронной длине распространения, выявили возможность реализации в этих условиях сдвиговых и растягивающих напряжений, близких к предельно возможным («идеальным») значениям сдвиговой и объемной прочности.

Подобные сведения нужны для развития физической теории прочности и пластичности материалов, построения моделей и определяющих соотношений для расчетного прогнозирования интенсивных импульсных воздействий на материалы и конструкции в широком диапазоне параметров нагрузки, создания экспериментальной базы для тестирования результатов атомистического моделирования такого рода воздействий.



Откольное разрушение (кратер) глубиной 200 нм на тыльной поверхности пленочного образца ванадия толщиной 1 мкм, инициированное ультракороткой лазерной ударной волной

Создание и модификация наноматериалов с помощью сверхкоротких лазерных импульсов

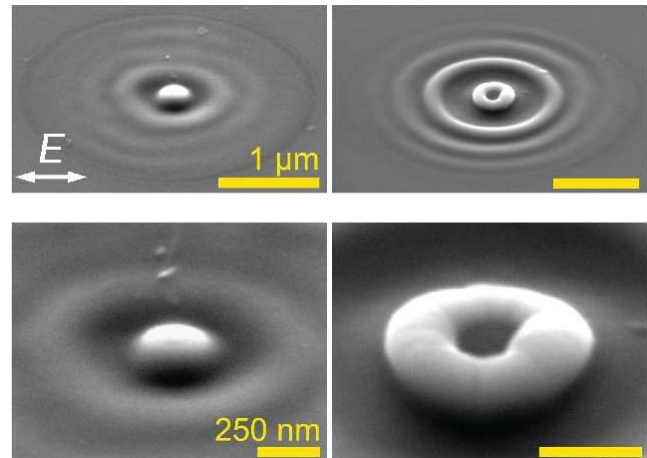
Прецизионная селективная модификация, включая микро- и наноструктурирование, поверхностных слоев различных твердотельных материалов, актуальна для солнечной энергетики (фотовольтаики), электронной промышленности и фотоники, а также для развития плазмоники, оптоэлектроники и биомедицинских технологий будущего.

В основе данного направления лежит исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с актуальными материалами (металлы и полупроводники), применяемыми в существующих технологиях, а также перспективными многослойными наноматериалами технологий будущего.

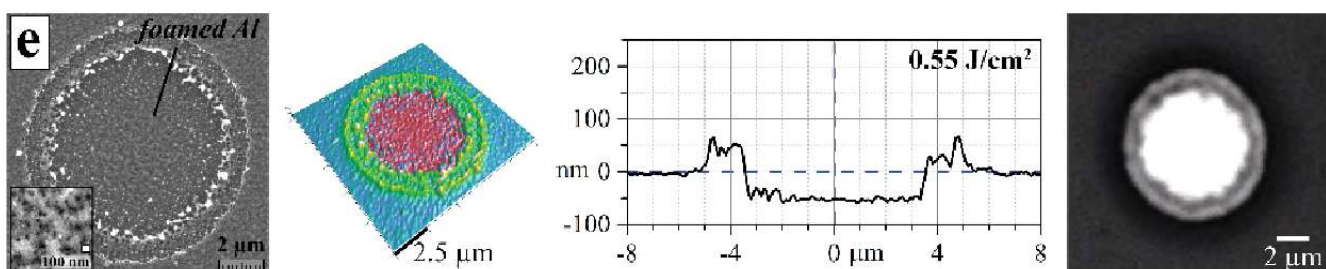
Современные технологии создания фотоэлектрических элементов (PV cells), органических светодиодов (OLEDs), микро- и нанoeлектромеханических (MEMS, NEMS) систем и сложных интегральных микросхем (ICs) основаны на использовании массивных (объемных) полупроводниковых материалов, нанопленок и многослойных тонкопленочных структур различных материалов – различных комбинаций металлов, полупроводников и диэлектриков, толщина слоев которых находится в диапазоне 1–100 нм.

В ОИВТ РАН ведутся разработки технологий наноструктурирования поверхности материалов и обработки многослойных тонкопленочных структур, включая селективное удаление заданного количества слоев мишени.

Полученные результаты исследований в области наноструктурирования поверхности могут быть использованы в целях создания принципиально новых материалов с новыми оптическими, тепловыми и механическими свойствами для развития энергетического сектора, оптоэлектронной промышленности, а также биомедицины будущего.



Формирование на поверхности монокристалла кремния структуры в виде дифракционной картины с контролируемым рисунком



Пример селективного удаления тонких пленок с помощью фемтосекундных лазерных импульсов



Сверхбыстрый нагрев и релаксация энергии в тонких металлических пленках

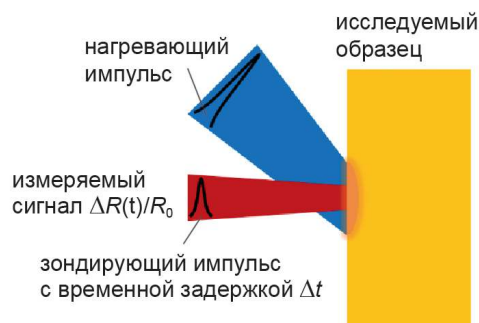


Схема эксперимента.
 $\Delta R(t)/R_0 = [R(t) - R_0]/R_0$, где $R(t)$ и R_0 – индуцированный и начальный коэффициенты отражения образца

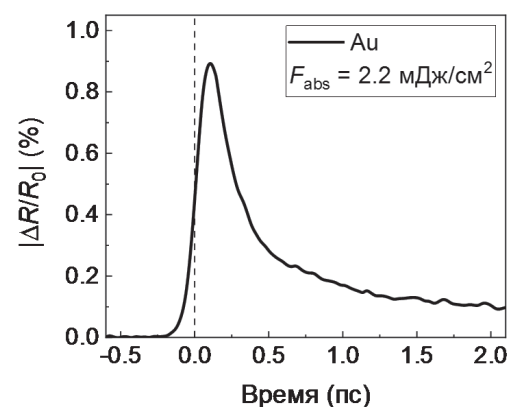
Сверхбыстрый нагрев и релаксация энергии (охлаждение) в тонких металлических пленках активно изучается с целью выяснения фундаментальных законов взаимодействия электронной и фононной подсистем, а также исследования переноса тепла на наномасштабах. Изучение переноса энергии в многослойных металлических нанослоях, инициированного сверхбыстрым нагревом электронной подсистемы фемтосекундным лазерным импульсом, сейчас особенно актуально для развития технологий тепловой магнитной записи и полностью оптического магнитного переключения, а также теплоотвода в наноразмерных элементах микро- и оптоэлектроники, фотоэлементах солнечной энергетики. Несмотря на колоссальный прогресс в этой области, практи-

чески отсутствуют исследования процессов теплопереноса в наноматериалах в сильно неравновесном состоянии электронной и фононной подсистем – т.е. в случае сверхбыстрого локального перегрева электронной подсистемы на тысячи и даже десятки тысяч градусов, что реализуется при воздействии субтераваттных фемтосекундных лазерных импульсов.

Другим важным аспектом сверхкороткого лазерного нагрева является генерация ультракоротких акустических волн – когерентных акустических фононов в гигагерцовом–терагерцовом частотных диапазонах. Сейчас в мире активно развивается методика 3D-визуализации скрытых структур через оптические непрозрачные материалы (металлы) с микронным латеральным разрешением и наномасштабным разрешением по глубине. В ее основе лежит полностью оптическая с временным разрешением методика регистрации акустического отклика или эха от скрытых интерфейсов – выходящей на поверхность акустической волны, первоначально инициированной воздействием сверхкороткого лазерного импульса.

Для исследования оптически прозрачных сред с помощью коротких акустических импульсов используют т.н. методику бриллюэновского рассеяния во временной области. В прозрачных материалах за счет рассеяния зондирующего излучения на когерентных фононах возможно получить данные о неоднородностях исследуемого образца. Изменяющийся во времени коэффициент отражения образца, регистрируемый зондирующим излучением по мере прохождения акустического импульса в пространстве, содержит информацию об акустических, оптических и акустооптических свойствах исследуемого образца. Именно исследование во временной области в методике, получившей название «терморефлектанса», позволяет получить необходимое наноразмерное пространственное разрешение для исследования наномасштабных структур. Такая методика развита в ОИВТ РАН.

Оптические методы визуализации актуальны для постоянно развивающейся полупроводниковой промышленности, где трехмерные наноструктуры, являющиеся основой современных запоминающих устройств (3D NAND memory), содержат оптически непрозрачные материалы. При этом необходимы методы, позволяющие быстро, информативно, неинвазивно, эффективно и относительно недорого осуществлять необходимый контроль за состоянием и расположением наноструктур в режиме реального времени.



Изменение дифференциального коэффициента отражения $\Delta R(t)/R_0$ для массивного образца золота на длине волны 793 нм после облучения нагревающим фемтосекундным импульсом с плотностью энергии F_{abs}

Фемтосекундные лазеры в биологии и медицине

Микрохирургия эмбрионов является рутинной практикой в центрах вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ), направленной на увеличение шансов наступления беременности и предотвращения передачи наследственных заболеваний. Для процедур вспомогательного лазерного хетчинга (ВЛХ) – нарушения целостности оболочки эмбриона для облегчения его вылупления и биопсии (для последующего предимплантационного генетического тестирования) – традиционно применяют компактные диодные миллисекундные лазерные диссекторы. Несмотря на то, что в большинстве исследований была продемонстрирована относительная безопасность используемых миллисекундных диссекторов, существует ряд работ, отмечающих потенциальные негативные эффекты, связанные с термическим воздействием при лазерном облучении. Температура в области фокусировки может достигать нескольких сотен градусов и наносить сильное термическое повреждение клеткам, приводящее к коагуляции белков и деградации нуклеиновых кислот.



Фемтосекундный лазерный скальпель-оптический пинцет

Возможность применения фемтосекундных (фс) лазерных импульсов во вспомогательных репродуктивных технологиях была продемонстрирована более десятилетия назад. За счет предельной локализации фемтосекундных импульсов во времени и пространстве достигается высокая точность проводимых микрохирургических процедур при минимальных тепловых нагрузках на прилегающие к области воздействия клетки. На практике это обеспечивает возможность выполнения надреза на защитной блестящей оболочке эмбриона на любой стадии предимплантационного развития без опасений его повреждения. А надрезы в виде тонких линий, шириной 1–1.5 мкм, в свою очередь, позволили разработать несколько уникальных технологий, не имеющих аналогов в мире, включая фемтосекундный ВЛХ и технологию маркировки эмбрионов на различных стадиях развития (от зиготы до бластоцисты).



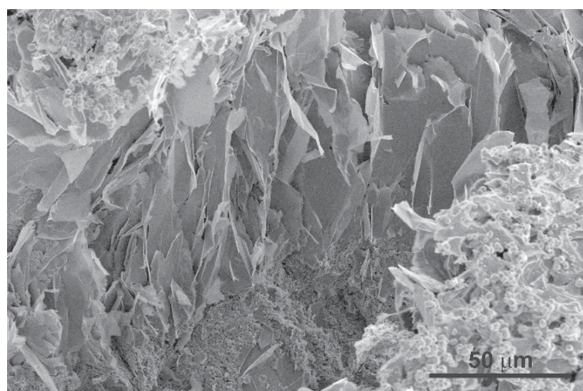
Пример маркировки эмбриона фемтосекундными импульсами

Уникальный комплекс «Фемтосекундный лазерный скальпель-оптический пинцет», разработанный сотрудниками ОИВТ РАН, предназначен для прецизионного выполнения сложных микрохирургических и микроманипуляционных процедур на тканевом, клеточном и субклеточном уровнях.

На базе комплекса разработан широкий спектр бесконтактных технологий. Помимо ВРТ, он включает технологии лазерной трансфекции и оптоперфорации для адресной доставки веществ в клетки и клеточного репрограммирования, технологии лазер-индуцированного слияния и инактивации клеток.



1.4. Сверхтугоплавкие материалы для ядерной энергетики, авиационной и космической техники



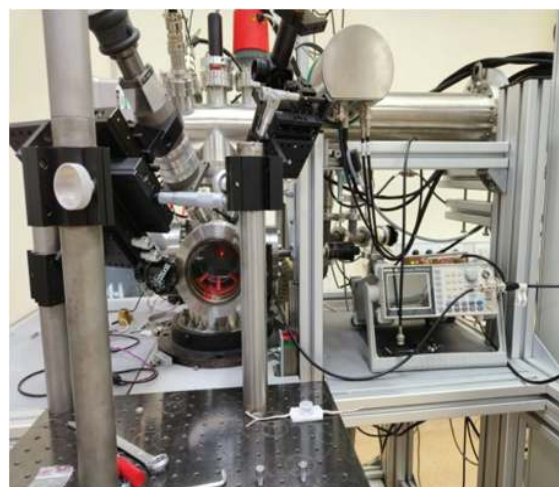
Внутренняя структура закристаллизованного жидкого углерода. Температура около 4900 К при давлении 1 кбар

В соответствии с одним из основных законов природы – вторым началом термодинамики – использовать энергию сжигания топлива или ядерную энергию более эффективно можно только поднимая рабочую температуру все выше и выше. Значит, нужны и материалы, способные устойчиво работать при экстремально высоких температурах. Это красноречиво иллюстрирует вся история развития науки и техники XX века. Сверхтугоплавкие материалы – это углерод (графит) и сверхтугоплавкие керамики (UHTC – Ultra High Temperature Ceramics) – особый класс веществ, представленный соединениями так называемых переходных металлов. Это такие соединения, как карбиды, нитриды и дибориды, которые обладают главным

замечательным свойством – их температуры плавления близки или даже на несколько сотен градусов превышают температуру плавления самого тугоплавкого металла – вольфрама. При этом, подобно металлам, они могут очень хорошо проводить тепло. Все это делает их незаменимыми для перспективных технических проектов ближайшего будущего – двигателей и аппаратов для межпланетных путешествий, осуществления быстрого межконтинентального сообщения и создания эффективных источников энергии.

Работы в области сверхтугоплавких материалов были развернуты в ОИВТ РАН более десятилетия назад и быстро сделали институт лидером в этом направлении. Только с использованием методов и аппаратуры, разработанных в ОИВТ, появилась возможность синтезировать сверхтугоплавкие материалы и, что особо важно, исследовать и испытывать их при предельно высоких температурах, превосходящих 4000 К. Достижение столь высоких температур потребовало применения лазерного нагрева и, в ряде случаев, одновременно с высоким газовым давлением до нескольких килобар. Само сочетание таких параметров для экспериментов длительностью до одной секунды является уникальным. Кроме этого, все измерения свойств и характеристик материалов проводятся с использованием уникальных методов и устройств, разработанных и созданных в ОИВТ РАН: высокоскоростной спектроскопии, видеосъемки с особыми способами обработки изображений, времяпролетной масс-спектрометрии и др.

В настоящее время работы нацелены на исследования смешанных и так называемых высокоэнтропийных карбидов; последние – это твердые растворы, образованные смесью четырех и более тугоплавких монокарбидов. Как ожидается, подобные вещества могут обладать уникальным набором свойств. Для этих материалов был впервые определен комплекс данных об их поведении и свойствах в недоступном ранее диапазоне температур, превышающих 4400 К: теплопроводность, температура плавления, теплоемкость и тепловое расширение. Впервые получены данные по молекулярному составу пара при испарении сложных карбидных систем при температуре до 4500 К.





2. КЛАССИЧЕСКОЕ И КВАНТОВОЕ АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



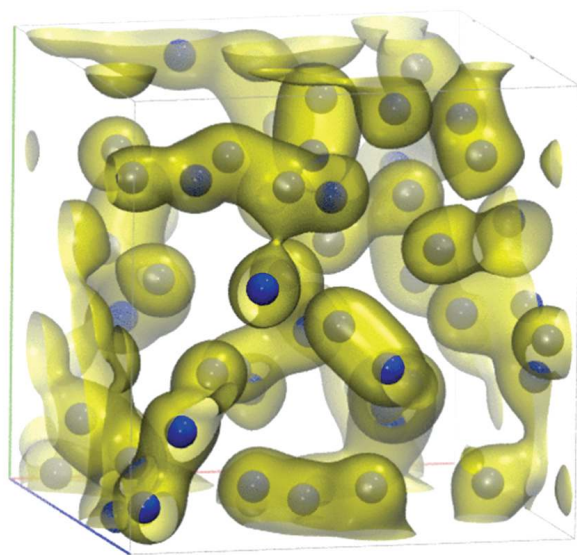
2. КЛАССИЧЕСКОЕ И КВАНТОВОЕ АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Первопринципное квантовое моделирование теплофизических свойств веществ в условиях, недоступных для эксперимента

Буквально все области деятельности человека – производство, строительство, военное дело, создание машин и механизмов для сельского хозяйства, бытовых услуг, транспорта, и многое-многое другое – невозможны без знания самых разнообразных свойств веществ. Традиционно, со времен античности, свойства веществ изучались экспериментально. И в наши дни это основной способ получения информации о свойствах. Однако во многих ситуациях поставить эксперимент сложно или даже невозможно, в первую очередь это касается состояний при высоких давлениях и температурах. Кроме того, с точки зрения фундаментальной науки чрезвычайно важно уметь рассчитывать свойства веществ без использования экспериментальных данных.

В последние десятилетия появилась возможность получения целого спектра свойств веществ с помощью квантового моделирования на суперкомпьютерах. Подобные расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и используют самые передовые достижения в области вычислительной математики и компьютерной техники.

ОИВТ РАН является одним из мировых лидеров в области квантового моделирования теплофизических свойств веществ, а его сотрудники получили ряд впечатляющих научных результатов. В частности, впервые с помощью сложных и трудоемких вычислений были рассчитаны свойства важных для практики жидких металлов и оценены параметры их критической точки.



Моделирование квантовой системы
Синие шарики – точечные ионы, желтые облака –
изоповерхности распределения электронной
плотности

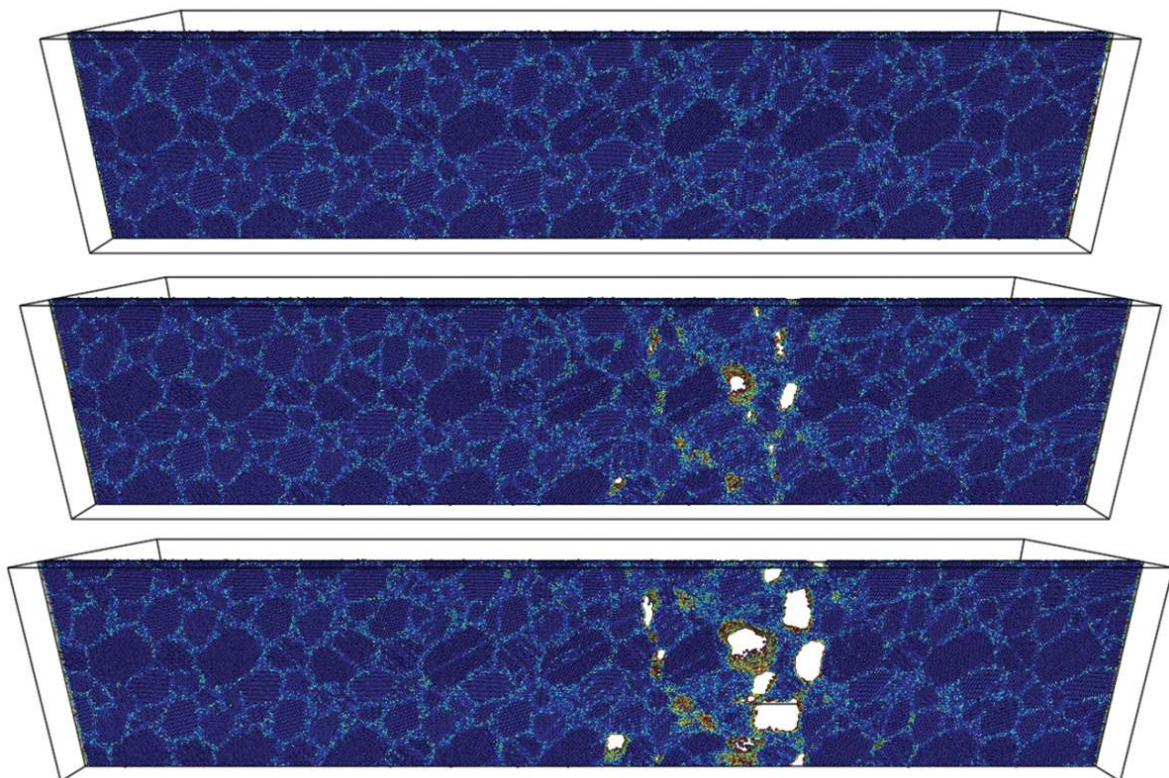
Современные суперкомпьютерные возможности позволяют моделировать механические, структурные, термодинамические, транспортные и оптические свойства веществ в широком диапазоне температур и плотностей, в том числе в области сильного межчастичного взаимодействия и вырождения электронов. Реальную структуру вещества, примеси, химические реакции можно учесть с помощью нейросетевых классических потенциалов взаимодействия, обученных на конфигурациях из квантово-механических и квантово-статистических расчетов. Сегодня наблюдается колоссальный прогресс в этой области, и в будущем можно ожидать высочайшей точности расчетных данных для свойств веществ, максимально возможно приближающимся к результатам эксперимента.

2.2. Суперкомпьютерное многомасштабное моделирование динамических процессов в рабочих телах и конструкционных материалах перспективных электрофизических и энергетических установок

Для реализации новых принципов преобразования энергии и новых разновидностей электрофизических и энергетических установок необходимо использование рабочих тел и конструкционных материалов в экстремальных условиях, сильно отличающихся от области, исследованной в рамках классического материаловедения. Отклик материала на подобные воздействия определяется процессами, проходящими на атомистическом уровне. Поэтому теория подобных явлений требует использования многомасштабных подходов.

Общность подходов для описания вещества на атомистическом уровне позволяет с единых позиций исследовать на первый взгляд различные явления:

- кинетику фазовых переходов и распада метастабильных состояний,
- ударные волны в твердых телах и неидеальной плазме,
- механизмы пластической деформации и разрушения металлов и полимерных материалов,
- поверхностную абляцию под действием ультракоротких лазерных импульсов,
- механизмы переноса заряда, энергии и информации в сильно-коррелированных материалах и системах с квантовой когерентностью.



Молекулярно-динамическая модель зарождения откольного разрушения в поликристаллической меди

3.

БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Number →

Name →

								5 B Boron 10.81
								13 Al Aluminium 26.9815385
24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938044	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933194	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	
42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	
74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.38	
106 Sg Seaborgium (269)	107 Bh Bohrium (270)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (278)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (282)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	
61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.259	
93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	

3. БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

3.1. Широкодиапазонные уравнения состояния вещества для моделирования процессов в существующих и перспективных энергоустановках

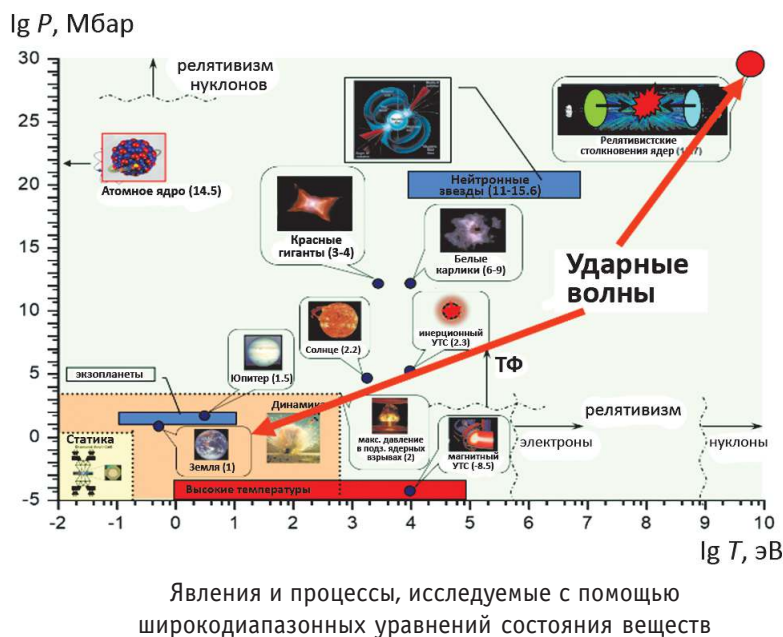
Термодинамические свойства веществ и взаимосвязи между ними исследуются со времен научной революции XVIII века, когда появились первые приборы для измерения давления и температуры.

Известные всем со школьной скамьи законы Бойля–Мариотта и Гей–Люссака сыграли ключевую роль в формулировке в середине XIX века первого уравнения состояния – уравнения идеального газа Менделеева–Клапейрона.

Статистическая механика заложила теоретическую основу для разработки уравнений состояния любого вещества, однако прямое применение законов статистической механики для случая сильного межчастичного взаимодействия наталкивается на непреодолимые трудности. Важно отметить, что уравнение состояния имеет большое практическое значение, так как уравнения механики сплошной среды или гидродинамики невозможно решить без так называемых замыкающих соотношений, одним из которых является уравнение состояния.

В ОИВТ РАН создана одна из наиболее сильных в России научных школ для разработки широкодиапазонных многофазных уравнений состояния различных веществ. За более чем 40 лет выведено несколько сотен уравнений состояния для металлов, сплавов, минералов, пластиков, горных пород и других важных для существующих и перспективных энергоустановок материалов. Все эти уравнения состояния являются полуэмпирическими, то есть они основаны на теоретических моделях, в которых неизвестные коэффициенты определяются из сравнения с экспериментальными и расчетными данными. Процедура построения уравнений состояния обеспечивает правильное асимптотическое поведение термодинамических функций в пределах высоких и низких температур. Наиболее совершенные уравнения состояния описывают твердое, жидкое и газообразное состояния и фазовые переходы между ними, метастабильные состояния при положительном и отрицательном давлении, а также учитывают эффекты ионизации.

В последние годы получили значительное развитие методы квантового моделирования термодинамических свойств веществ. Это позволяет получать дополнительную ценную информацию для построения полуэмпирических уравнений состояния в областях фазовой диаграммы, недоступных для экспериментального изучения. Кроме того, определение неизвестных коэффициентов в уравнениях состояния представляет собой задачу нелинейной оптимизации, которую в настоящее время можно эффективно решать с использованием методов машинного обучения. Эти факторы открывают широкие возможности для автоматизации построения высокоточных уравнений состояния широкого класса практически важных веществ.

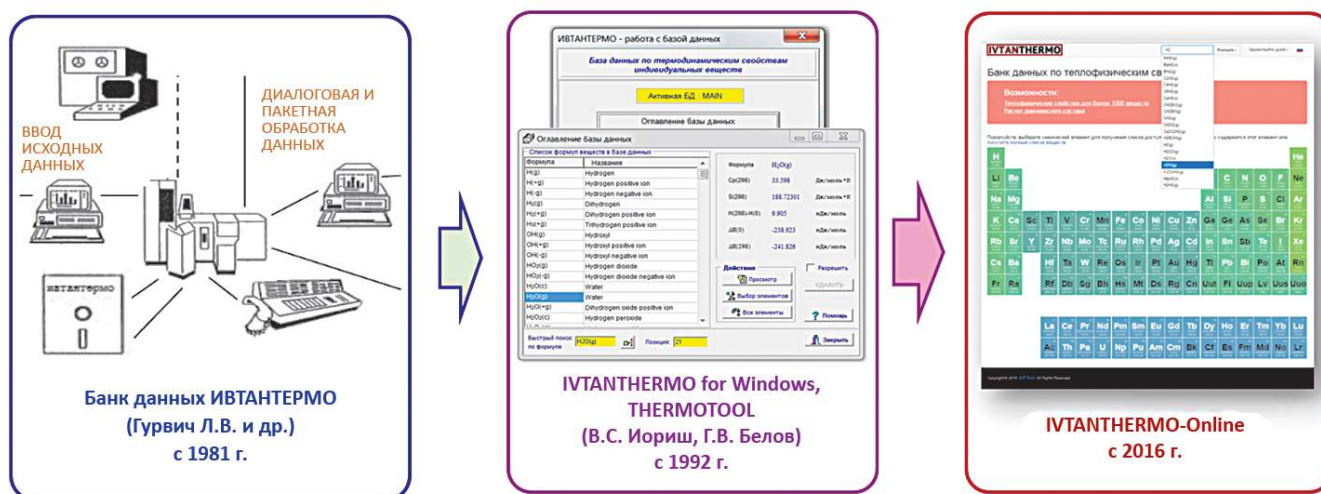


3.2. База данных теплофизических свойств веществ для широкого спектра приложений: от космической техники до утилизации бытовых отходов

Термодинамические базы данных играют ключевую роль в современном технологическом развитии, охватывая широкий спектр отраслей, включая энергетику, химическую технологию и экологию. Они предоставляют информацию о свойствах веществ и материалов, которая необходима для проведения точных и надежных исследований, проектирования и оптимизации технологических процессов. Важность термодинамических баз данных постоянно растет вместе с развитием технологий и увеличением потребности в точной и надежной информации для решения сложных научных и инженерных задач.

С момента основания ОИВТ РАН одним из ключевых направлений исследовательской деятельности является получение, анализ и систематизация информации о термодинамических и теплофизических характеристиках веществ. В результате этой работы созданы уникальные справочные материалы и базы данных, многие из которых приобрели мировую известность и пользуются высоким спросом. Примером такого признанного в мировом сообществе справочного издания является справочник «Термодинамические свойства индивидуальных веществ» в 4-х томах. Впоследствии с внедрением цифровых технологий в научную деятельность на базе этого справочника была создана информационная система «ИВТАНТЕРМО».

В настоящий момент ОИВТ РАН продолжает развивать созданные базы данных в нескольких направлениях. Одним из таких направлений является адаптация разработанных информационных систем под веб-архитектуру, что позволяет получать доступ к данным из любой точки мира. Другое направление – это совершенствование методов термодинамических расчетов, которые включают в себя методы современных квантово-химических расчетов. Эти расчеты позволяют получать дополнительную информацию о свойствах веществ без проведения прямых экспериментов. Также следует отметить, что при создании новых теплофизических баз данных в ОИВТ РАН применяются уникальные современные подходы к организации данных. Эти подходы ускоряют процесс поиска существующих данных и помогают обнаруживать неожиданные взаимосвязи между ними.



Развитие информационной системы «ИВТАНТЕРМО»

**4.
ФИЗИКА
СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМ**



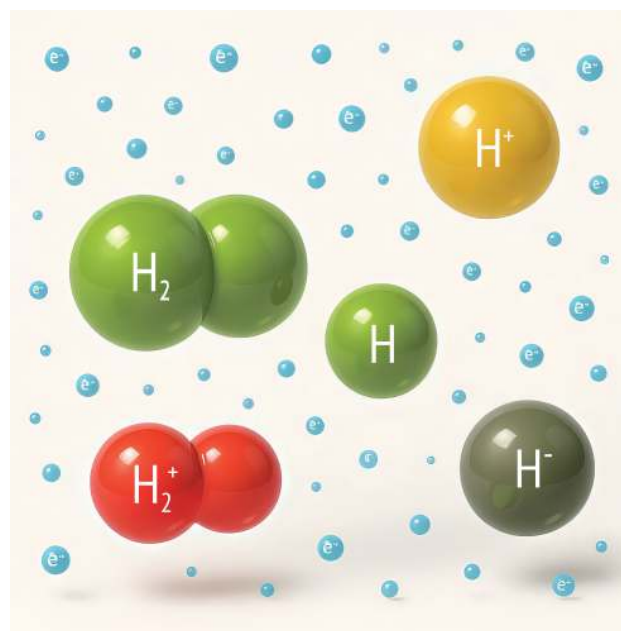
4. ФИЗИКА СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМ

4.1. Химическая модель плазмы для расчетов термодинамических и транспортных свойств

Плазма представляет собой особое состояние вещества, в котором присутствуют свободные заряды, поэтому для получения и изучения плазмы требуются специальные методы. Физика плазмы как научная дисциплина существует около 100 лет, и в настоящее время исследования плазмы проводятся во многих странах мира. Это объясняется как распространенностью плазмы во Вселенной, так и многочисленными практическими приложениями в области техники, обработки материалов, плазмохимии, энергетики. Для теоретического описания плазмы наиболее популярной является химическая модель, в которой плазму считают состоящей из множества комплексов – электронов, атомов и ионов различных кратностей, находящихся в динамическом равновесии друг с другом. Это означает, что одни комплексы могут превращаться в другие при изменении внешних условий. Химическая модель позволяет учесть процессы диссоциации и ионизации атомов, релятивистские и квантовые эффекты, а также взаимодействие между частицами.

В ОИВТ РАН исследования термодинамических и транспортных свойств плазмы являются одним из основных направлений деятельности, и химическая модель плазмы активно применяется для этой цели. Главное направление развития химической модели состоит в расширении области ее применимости для предсказания свойств плотной плазмы с сильным взаимодействием. Это требует привлечения как новых теоретических подходов, так и результатов атомистического моделирования, в частности, для расчетов сечений рассеяния при вычислении коэффициентов электропроводности, теплопроводности и других транспортных свойств. Кроме того, продвижение в область сильновзаимодействующей плазмы позволяет изучать как традиционные фазовые переходы, например, испарение металлов, так и предсказывать новые, еще не открытые. Так, большое внимание уделяется гипотетическим энтропийным фазовым переходам, которые сопровождаются появлением области аномальной термодинамики. В результате многолетней работы в ОИВТ РАН создано несколько компьютерных кодов, реализующих различные химические модели плазмы.

В настоящее время наиболее точное предсказание свойств плотной плазмы осуществляется с помощью квантовых многочастичных моделей. Однако эти подходы являются очень трудоемкими даже для современных суперкомпьютеров. Поэтому химические модели плазмы будут активно применяться и в будущем, при этом вклады от межчастичных взаимодействий и квантовых эффектов будут уточняться с помощью квантовых расчетов, обеспечивая химическим моделям высокую точность при сравнительно низких вычислительных затратах.



Схематичное изображение водородной плазмы для химической модели плазмы. В расчете учитываются свободные электроны, молекулы и атомы водорода, а также ионы H_2^+ , H^+ и H^-

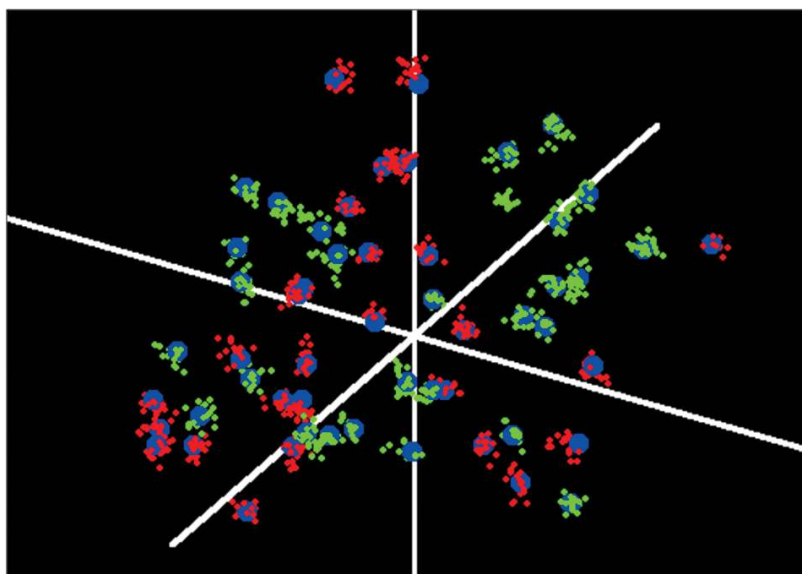
4.2. Квантовые методы Монте-Карло для исследования неидеальной вырожденной плазмы

Жидкие металлы, вещество при воздействии мощных лазерных импульсов, внутренности планет-гигантов, белые карлики представляют собой сильно взаимодействующую плазму, в которой электронная подсистема является вырожденной, то есть для ее описания необходимо использовать квантовые подходы. Такая плазма представляет наибольшие трудности для теоретического описания, а эксперименты необходимо проводить в условиях высоких давлений и температур, что сильно усложняет измерения.

В ОИВТ РАН в начале 70-х годов прошлого века первыми в мире были разработаны квантовые методы Монте-Карло для изучения подобных систем, основанные на фейнмановской формулировке квантовой механики. На сегодняшний день это единственный теоретически обоснованный и практически применяемый подход для расчетов термодинамических свойств неидеальной вырожденной плазмы. Квантовые частицы в этом подходе являются неточечными и представляются в виде замкнутых ломаных линий. Особенный интерес квантовые методы Монте-Карло с интегралами по траекториям представляют для исследования теплого плотного вещества, которое широко распространено в астрофизических объектах, но при этом о его свойствах нет практически никакой информации. Большое практическое значение также имеет моделирование свойств вырожденного электронного газа для разработки обменно-корреляционных функционалов, широко применяемых в методе функционала плотности для квантовохимических и материаловедческих расчетов.

ОИВТ РАН на сегодняшний день занимает передовые позиции в мире по развитию и применению квантовых методов Монте-Карло. Были выполнены расчеты термодинамических свойств плотной водородной и гелиевой плазмы, обнаружены условия, при которых плазма может распадаться на отдельные капли, а также образовывать кристалл, предсказано и изучено явление квантового плавления. Также проводилось моделирование электронно-дырочной плазмы в полупроводниках и кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах. Основную трудность при моделировании фермионов представляет так называемая «проблема знаков», для борьбы с которой было разработано множество эффективных подходов.

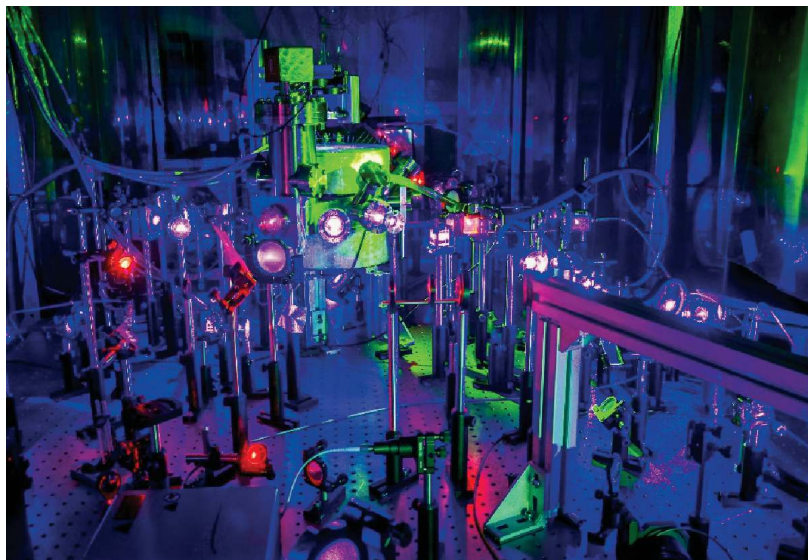
Квантовые методы Монте-Карло имеют большие перспективы для изучения плотных квантовых систем при конечных температурах. Так, разрабатываются подходы для моделирования транспортных свойств, для учета эффектов дальнего действия в кулоновских системах, для использования в расчетах элементов с большим числом электронов. Результаты подобных расчетов будут использоваться для калибровки приближенных подходов, широко применяемых в физике плазмы.



Моделирование водородной плазмы методом Монте-Карло с интегралами по траекториям. Синие круги – протоны, красные и зеленые облака точек – электроны с различными проекциями спина

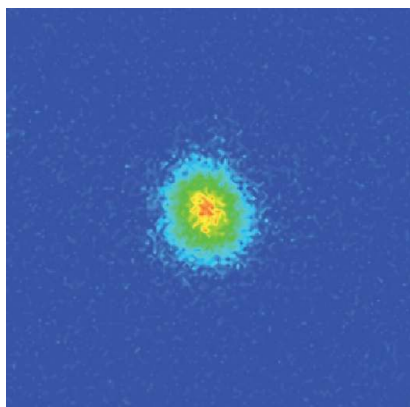
4.3. Стационарная ультрахолодная плазма

Обычная низкотемпературная плазма получается при ионизации атомов сильными электрическими полями или в результате столкновений атомов. Результирующая температура электронов обычно сравнима с потенциалом ионизации, что соответствует 10^4 К. Ультрахолодная плазма (УХП), созданная путем фотоионизации облака атомов, охлажденных лазером, имеет электронную температуру, близкую к 1 К. Сочетание низкой температуры и низкой плотности делает УХП уникальной плазменной системой, которая может обладать большим параметром неидеальности ионов плазмы (отношение средней потенциальной энергии ионов к их средней кинетической энергии). Аналитические оценки и численные расчеты показывают, что в условиях большого параметра неидеальности ионная составляющая ультрахолодной плазмы может иметь структуру с ближним или даже дальним порядком. Динамика обычной низкотемпературной плазмы высокой плотности имеет масштаб времени в диапазоне от аттосекунд до фемтосекунд. Это серьезно усложняет диагностику. Напротив, динамика УХП развивается во временном масштабе от пикосекунд до микросекунд.



Проведение эксперимента на установке по лазерному охлаждению

В ОИВТ РАН впервые в мире была создана стационарная ультрахолодная плазма (СУХП) Са-40, приготовленная путем непрерывного оптического возбуждения в непрерывно работающей магнито-оптической ловушке. Этот новый физический объект позволяет использовать превосходные методы диагностики с большим временным разрешением. Таким образом, СУХП может быть универсальной и экспериментально доступной модельной системой для изучения плазмы различной природы, в том числе плазмы токамаков в экспериментах по подавлению неустойчивостей и в астрофизических процессах, таких как перенос плазмы в магнитосфере Юпитера при помощи источника плазмы со спутника Ио. Кроме того, управляемые непрерывные ультрахолодные источники ионов могут быть использованы для сканирующей ионной микроскопии.



Фотография флуоресценции ионов СУХП

Планируется проведение экспериментов с СУХП при различных значениях градиента магнитного поля до 120 Гс/см. Предварительные расчеты показали существенное уменьшение дисбаланса заряда плазмы с увеличением градиента магнитного поля. Показано, что магнитное поле может препятствовать разогреву СУХП за счет трехчастичной рекомбинации и эффекта разогрева плазмы за счет беспорядка. В результате увеличения градиента магнитного поля предполагается возрастание плотности СУХП, которое приведет к росту параметра неидеальности. Эти исследования позволят существенно расширить диапазон параметров для моделирования плазмы при помощи СУХП.

**5.
МИКРО- И НАНОМОТОРЫ
В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ**



5. МИКРО- И НАНОМОТОРЫ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ

5.1. Коллоидная (пылевая) плазма в природе, технологических процессах и лабораторных условиях

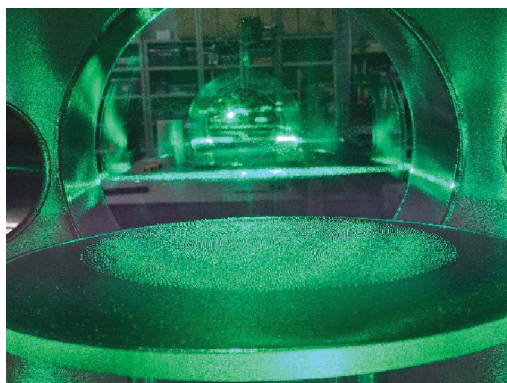
Коллоидная (пылевая или комплексная) плазма представляет собой ионизованный газ, содержащий заряженные макроскопические частицы вещества микронных размеров (пылевые частицы). Ключевой особенностью лабораторной коллоидной плазмы является возможность самоорганизации пылевых частиц в различные упорядоченные структуры.

Первые работы по созданию в лабораторной плазме упорядоченных структур из пылевых частиц – «пылевых кристаллов», были начаты в ОИВТ РАН в 1994 г. и продолжают по сей день. На стендах ОИВТ РАН с плазмой тлеющего разряда постоянного тока был получен целый ряд приоритетных результатов, в том числе: обнаружено формирование отдельных пылевых цепочек, включающих до нескольких десятков частиц; изучено формирование пылевых облаков в плазме при криогенных температурах вплоть до 1.7 К и при воздействии аксиального магнитного поля с индукцией до 2500 Гс; изучены динамические особенности пылевых структур, такие как нелинейные волны и вихри; исследовано эффективное нарушение симметрии сил взаимодействия между двумя пылевыми частицами. На стендах ОИВТ РАН с плазмой высокочастотного емкостного разряда была впервые измерена зависимость от межчастичного расстояния сил взаимодействия между частицами в плазменно-пылевом монослое; экспериментально обнаружен двустадийный характер плавления «кристалл–жидкость» квазидвумерной плазменно-пылевой структуры с образованием промежуточной гексатической фазы; исследована модификация поверхности пылевых частиц во время длительной левитации в приэлектродном слое.

За последнее десятилетие наблюдается более чем 10-кратный рост цитируемости публикаций по активной материи – особой форме «мягкого» конденсированного вещества, которая представляет собой дисперсионную среду, содержащую мелкодисперсные активные частицы. Несмотря на свою простую форму и отсутствие подвижных частей, такие частицы (также называемые нано- и микро-моторами) способны автономно преобразовывать доступную в окружающей среде энергию в собственное направленное движение. С 2020 года в ОИВТ РАН ведутся эксперименты с активными броуновскими частицами в газоразрядной плазме. Лабораторные эксперименты с активными частицами в слабоионизованной газоразрядной плазме имеют большой потенциал для фундаментального изучения свойств активной материи, поскольку позволяют контролировать диссипацию в очень широком диапазоне, недостижимом для активных коллоидных систем в жидкости. Это позволяет экспериментально осуществить плавный переход от гидродинамического режима к свободно-молекулярному.



Исследование коллоидной плазмы

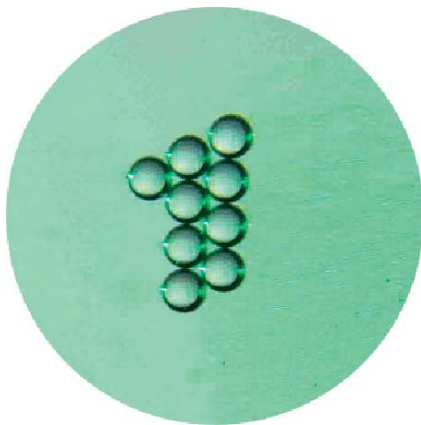


Квазидвумерная плазменно-пылевая структура в высокочастотном разряде

5.2. Энергетика активных микро- и нанороботов в классических жидкостях

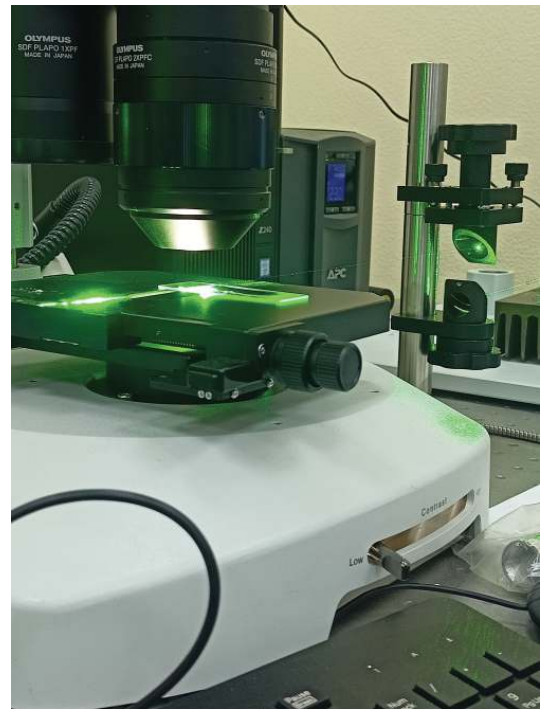
Микро- и наноразмерными роботами называют синтетические микрообъекты, обладающие уникальными свойствами – самодвижение, способность реагировать на сигналы окружающей среды, коллективное поведение и простота функционализации частиц. При варьировании внешнего воздействия становится возможным контролировать движение как одиночных микророботов, так и образованных ими систем. В таких жидкофазных коллоидных системах может реализовываться энерго- и массоперенос.

Микро- и нанороботы, применяемые в жидких средах, могут столкнуться со значительными трудностями в движении из-за низкого числа Рейнольдса. Чтобы приводить в действие и управлять крошечными роботами в режиме низких чисел Рейнольдса, где инерция пренебрежимо мала по сравнению с вязкой силой, должны быть разработаны специальные стратегии для передвижения. Природа снабдила живые клетки молекулярными моторами с приблизительным размером 10^{-8} м, способными двигаться и выполнять функциональную роль в управлении и выполнении широкого спектра биологических задач. Используя синтетический аналог молекулярного мотора – наночастицы, чувствительные к внешнему воздействию, можно реализовать механизм активности в таких системах. На стендах ОИВТ РАН с использованием технологии микрофлюидики были сконструированы капли эмульсии сложного состава, содержащие функциональные наночастицы. Показано, что такие сложные объекты являются активными броуновскими частицами. Были изучены динамические характеристики таких роботов при воздействии лазерного излучения, предложено объяснение механизма работы их мотора, оценена его энергоэффективность.



Самосборка в кластере из активных капель эмульсии сложного состава

Наряду с быстрым прогрессом, достигнутым в разработке и понимании активных коллоидных систем за последние два десятилетия, для этих частиц также было разработано несколько приложений в различных областях. Уникальные свойства активных коллоидов привели к их применению в самосборке, проектировании материалов, зондировании, терапии и восстановлении окружающей среды. С 2020 года в ОИВТ РАН ведутся эксперименты в суспензиях с роями анизотропных микророботов, способных к эффективному массопереносу. Экспериментально обнаружены коллективные явления в таких роях активных броуновских частиц при внешнем воздействии, обусловленные наличием межчастичного взаимодействия и функциональными свойствами поверхности частиц. Изучена динамика и структурные изменения, в том числе наблюдалось образование замкнутых вихрей и последующее их деление. Предложено описание возникновения и эволюции вихреобразного движения в подобных системах.

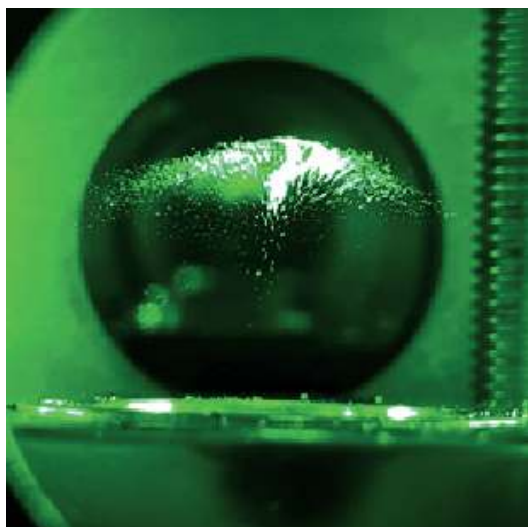


5.3. Квантовые эффекты в криогенных коллоидах активных броуновских моторов

Начало изучения криогенных коллоидов, образованных активными броуновскими частицами в сверхтекучем гелии, впервые в мире было положено в ОИВТ РАН в 2015 году. В первых экспериментах исследования велись для частиц пиролитического графита в неоднородных магнитных полях в жидком азоте. Уже в 2018 году сотрудниками ОИВТ РАН были проведены пионерские эксперименты по изучению самоорганизации активных броуновских микромоторов в сверхтекучем гелии в магнитной ловушке. Было показано, что воздействие интенсивного лазерного излучения на рой микромоторов способно не только инициировать их активное движение, обусловленное возникновением клубка квантовых вихрей на их поверхности, но и в конечном итоге приводит к формированию анизотропных структур, состоящих из таких микромоторов. Было показано, что ключевым механизмом движения и самоорганизации таких роев является именно квантовый механизм в сверхтекучем гелии, в то время как в классической жидкости воздействие лазерного излучения приводило к разрушению таких структур за счет конвективных потоков.



Эволюция и формирование сложного поведения проявляется в усложнении траектории движения таких микромоторов с ростом интенсивности лазерного излучения. Экспериментально обнаружен переход от направленно-хаотического движения микромоторов из сверхпроводящей керамики к направленному вихревому движению с запасанием энергии в результате аккумуляции квантовых вихрей на поверхности микромотора.



Самоорганизация коллоидных частиц в упорядоченные структуры при облучении лазерным излучением в сверхтекучем гелии

Совсем недавно сотрудники ОИВТ РАН представили новые результаты по активации одиночных частиц квантовыми вихрями – даже довольно крупная частица (кластер размером в сотни мкм, образованный из стеклянных микросфер), захваченная квантовым вихрем на поверхности сверхтекучего гелия, имеет высокую среднюю скорость перемещения, на 4 порядка превышающую тепловую.

В настоящее время в ОИВТ РАН продолжают исследования активных криогенных коллоидов в сверхтекучем гелии и готовятся новые эксперименты по исследованию броуновской динамики и эволюции роя активных броуновских микромоторов в криогенном коллоиде в криостате растворения при температурах ниже 0.8 К, когда доля нормальной компоненты в жидком гелии существенно ниже 0.1%, т.е. вязкость в изучаемой системе полностью отсутствует.

5.4. Активные кулоновские системы в условиях микрогравитации



Космонавт Геннадий Падалка проводит эксперимент «Кулоновский кристалл» (© Роскосмос)

Космическая пыль и пылевая плазма являются одним из наиболее распространенных проявлений материи в космосе. Частицы пыли присутствуют в межзвездных и межпланетных облаках, хвостах комет, планетных кольцах и верхних слоях атмосферы (в серебристых облаках). Пылевая плазма обнаружена вблизи поверхности Луны, а также других космических тел, лишенных атмосферы, в том числе вблизи искусственных спутников Земли. Пылевые частицы в лабораторных установках подвержены критическому влиянию силы тяжести. Для полноценного экспериментального исследования свойств пылевой плазмы необходимы условия невесомости.

ОИВТ РАН является пионером в экспериментах с пылевой плазмой на пилотируемых орбитальных станциях. В 1998 г. ОИВТ РАН совместно с РКК «Энергия» впервые были поставлены эксперименты на борту орбитального комплекса «Мир». С 2001 по 2012 год на Международной космической станции активно велись совместные российско-германские эксперименты «Плазменный кристалл» (ПК-3 Нефедов) и «Плазменный кристалл-3 Плюс» (ПК-3 Плюс). Свое название эксперименты получили благодаря важнейшей особенности лабораторной пылевой плазмы – возможности самоорганизации пылевых частиц в различные упорядоченные структуры (кристаллизации). С 2010 по 2016 год под руководством академика Петрова О.Ф. на борту МКС проводился эксперимент «Кулоновский кристалл» по формированию в магнитных ловушках кулоновских кластеров диамагнитных частиц, который стал важным этапом на пути создания технологии трехмерной биопечати в условиях микрогравитации.

С 2014 года и по настоящее время на борту МКС проводятся эксперименты с пылевой плазмой на российско-европейской установке нового поколения «Плазменный кристалл-4» (ПК-4). В 2024 году на установке ПК-4 впервые в мире были получены плазменно-пылевые кластеры со свободными границами, удерживаемые не электростатической ловушкой, а силой давления суммарного потока плазмы на поверхности микрочастиц.

Сейчас ведется наземная подготовка принципиально нового космического эксперимента – «Пыль-УФ», в рамках которого с помощью транспортного грузового корабля «Прогресс» планируется создание и изучение пылевой плазмы в открытом околоземном космическом пространстве. Также при участии ОИВТ РАН в рамках российской лунной программы создается аппаратура для исследования плазменно-пылевой экзосферы Луны, которая будет размещена на борту спускаемого аппарата автоматической станции «Луна-27».



Схематичное изображение космического эксперимента «Пыль-УФ»

**6.
МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ
АЭРОДИНАМИКА**

6. МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ АЭРОДИНАМИКА

6.1. Компьютерное моделирование в магнитоплазменной аэродинамике

Развитие и разработка новых аэрокосмических технологий с неизбежностью требуют поиска новых возможностей управления перспективными летательными аппаратами или в более широком смысле – управления высокоскоростными потоками. Среди множества способов управления высокоскоростными потоками вызывают большой интерес методы магнитно-плазменной аэродинамики (МПА). Привлекательность МПА ассоциируется с возможностью изменения характеристик течения с помощью электрических и магнитных полей. Исследование этих возможностей с необходимостью требует развития физических и вычислительных моделей, пригодных для анализа течений при наличии химического и термодинамического неравновесия в газе.

В ОИВТ РАН был выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований бортовых МГД-систем как средств быстрого и неинтрузивного управления характеристиками высокоскоростного летательного аппарата. Было установлено, что бортовые МГД-системы могут быть использованы для

- а) снижения пиковых тепловых нагрузок в окрестности критических точек на поверхности высокоскоростного летательного аппарата (в 2–3 раза);
- б) снижения аэродинамического сопротивления;
- в) преобразования части кинетической энергии движения летательного аппарата в электрическую.

Естественным развитием компьютерных моделей МПА стали дискретизация уравнений механики сплошной среды на произвольных неструктурированных сетках и разработка высокоэффективных методов решения задач дискретной нелинейной динамики на высокопроизводительных платформах.

Новым направлением компьютерного моделирования является разработка новых вычислительных моделей импульсных разрядов, включая модели сильноточных молниевых разрядов и наносекундных импульсно-периодических разрядов. Разработка физических и вычислительных моделей главной стадии разряда молнии может быть полезной при анализе результатов современной и перспективной диагностической аппаратуры, при анализе результатов наземных экспериментов по исследованию искровых разрядов, а также при анализе перспективных средств молниезащиты. Разработка вычислительных моделей наносекундных импульсно-периодических разрядов позволит анализировать физико-химические процессы в современных и перспективных двигательных установках.



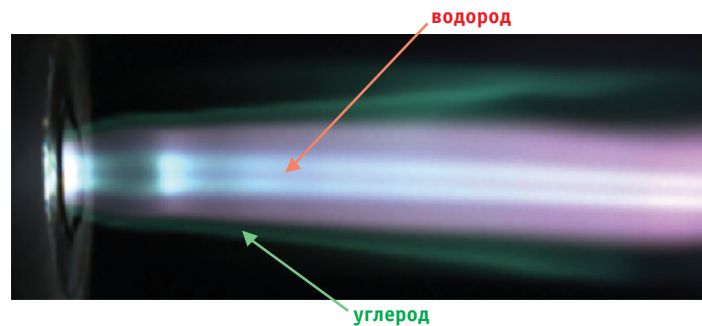
МГД-снижение тепловых нагрузок на поверхности летательного аппарата Stardust, предназначенного для исследования кометы Вильда 2. MC1 и MC2 – магнитная конфигурация 1 и 2, прямоугольник – схематическое изображение магнита

6.2. Плазменные генераторы в магнитоплазменной аэродинамике и двигателестроении

Создание плазменных генераторов входит в приоритетный круг проблем магнито-плазменной аэродинамики, направленных на улучшение летно-технических характеристик летательных аппаратов (снижение лобового сопротивления, безынерционное управление полетом за счет замены плазмой механических органов управления), управление заметностью и обеспечение бесперебойной радиосвязи, в том числе в условиях плазменного экранирования, улучшение характеристик

двигательных установок за счет повышения полноты сгорания топлива и др. Для получения плазмы применяются газовые разряды различных частотных диапазонов – от разрядов постоянного тока до ВЧ, СВЧ и оптического диапазона длин волн. Особое место занимают импульсные разряды, отличающиеся быстротой протекающих процессов и обеспечивающие получение плазмы в широком диапазоне давлений, температур и концентраций заряженных частиц, достаточном для решения названных задач. Широкие возможности в этом плане открывают импульсные разряды в капилляре, интерес к изучению которых не ослабевает и поддерживается на протяжении многих десятилетий ведущими научными коллективами российских и зарубежных исследователей благодаря широкой области их применения, которая, помимо названных задач, охватывает проблемы инерциального термоядерного синтеза, плазмохимии, литографии, создания мощных источников когерентного и некогерентного излучения, плазменных волноводов, компактных ускорителей электронов ГэВ-ных энергий и др. Такие разряды могут использоваться как самостоятельные источники плазменных потоков, так и в комбинации с другими видами разряда. Так, использование капиллярного разряда, выполняющего роль плазменного электрода, в комбинации с магнитоплазменным компрессором позволяет решить проблему токопереноса в замагниченной плазме и повысить скорость потока и степень сжатия в области плазменного фокуса.

Изучение импульсных потоков плазмы в большой степени зависит от разработки методов и средств скоростной диагностики, наиболее информативными среди которых являются методы оптической спектроскопии. Развитие спектральных методов плазменной диагностики высокого пространственного и временного разрешения является приоритетной задачей исследовательской группы ОИВТ РАН. Разработанные методы позволяют изучать быстропротекающие процессы в многокомпонентной плазме, в том числе, при наличии мелкомасштабных неоднородностей (ударные волны, приэлектродные слои) и отсутствии термодинамического равновесия. С помощью этих методов установлена детальная картина пространственно-временной эволюции параметров и выявлена сильная пространственная неоднородность компонентного состава капиллярной плазмы, соотношение концентраций химических элементов в которой может изменяться на два порядка при движении от центра к периферии разряда. Ключевым фактором, обеспечивающим наблюдаемую степень разделения химических элементов, является колоссальный градиент температуры вблизи стенки капилляра, недоступный для других типов разряда. Обнаруженное свойство открывает новые подходы к решению проблемы управления разделением и смешением компонентов плазмы сложного химического состава, что может быть использовано в научных и практических приложениях, связанных с получением высокоскоростных плазменных потоков с требуемыми свойствами, промышленными, медицинскими и другими технологиями.



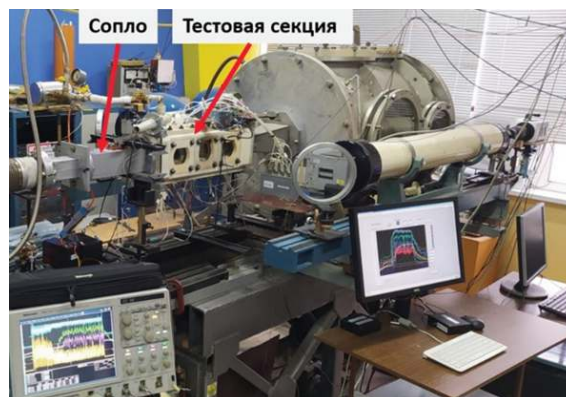
Разделение химических элементов в углерод-водородной плазме, создаваемой разрядом в капилляре с полимерной стенкой

6.3. Газоразрядная плазма в задачах аэродинамики и двигателестроения

Управление процессами течения воздуха и реагирующих сред в двигательных установках летательных аппаратов имеет первостепенное значение в авиации. Классические способы управления не годятся, когда речь идет об управлении очень мелкомасштабными или высокочастотными процессами, например турбулентными вихрями в пограничном слое на крыле самолета или когерентными структурами в струе двигателя. В этом случае для воздействия на течение могут использоваться плазменные актуаторы – газоразрядные устройства, в которых воздействие на поток оказывается в результате тепловыделения или действия объемных сил электрической природы непосредственно на среду, что обеспечивает отсутствие инерции и высокое быстроедействие таких устройств. Помимо потенциальных приложений, плазменные актуаторы находят свое применение в фундаментальных исследованиях турбулентных течений.

Процессы смешения и горения в двигателях различных типов связаны с устройствами, обеспечивающими смешение топлива с окислителем и воспламенение горючей смеси. В ряде случаев классическое искровое зажигание может не обеспечивать требуемый размер очага воспламенения. В разрядах различных типов с неравновесной низкотемпературной плазмой происходит нагрев электронов, энергия которых затем идет на создание активных частиц, участвующих в цепных реакциях горения. Это позволяет снизить время индукции воспламенения, либо обеспечить стабильную работу двигателя в области очень бедных смесей или очень высоких скоростей потока в камере сгорания.

Исследования в этих направлениях ведутся в ОИВТ РАН в сотрудничестве с ведущими аэродинамическими центрами как в России, так и за рубежом, такими как ЦАГИ и ИТПМ СО РАН. В ходе этой работы был получен ряд результатов, важных для понимания возможностей управления переходом к турбулентности на скользящем крыле, шумов обтекания различных объектов, процессов инжекции и горения топлива в прямоточных камерах сгорания и др.



Сверху – сверхзвуковая импульсная аэродинамическая труба ИАДТ-50 для исследования горения в высокоскоростном потоке. Снизу – малотурбулентная аэродинамическая труба Д-3 для исследования течения в пограничных слоях



Теневая визуализация горения этилена в модельной камере сгорания прямоточного двигателя, стимулированного разрядом постоянного тока

**7.
ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ,
МЕДИЦИНЕ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**



7. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ, МЕДИЦИНЕ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

7.1. Плазменная обработка и синтез для улучшения эксплуатационных свойств материалов и создания новых химических веществ

Высокопроизводительный синтез углеродных наноструктур в струе плазмы мощных плазматронов постоянного тока для энергетики

Нанотехнологии являются самым динамично развивающимся сегментом мирового рынка. Это связано с реализацией национальных программ развития нанотехнологий в более, чем 30 странах мира. Приоритет этих национальных программ обусловлен большим ожиданием от коммерческого использования нанотехнологий в различных направлениях энергетики, химической промышленности, индустрии конструкционных и строительных материалов, системах обеспечения безопасности, электроники, медицины. Уникальность синтетических углеродных наноструктур обусловлена размерным эффектом, благодаря которому увеличена удельная площадь поверхности и появляются новые квантовые эффекты. Среди этих наноструктур наиболее изучены и находят практическое применение углеродные нанотрубки, графен, фуллерены и наноалмазы.

ОИВТ РАН является разработчиком масштабируемого плазмохимического способа синтеза углеродных нанотрубок и графена, а также композитов на их основе. В созданной технологии применяется плазматрон постоянного тока с вихревой стабилизацией дуги, позволяющий проводить одностадийные химические процессы без применения подложек, катализаторов, растворителей или кислот, что обеспечивает высокий выход целевого продукта. Другим преимуществом синтеза в объеме плазменных струй является получение наночастиц с более узким распределением по размеру, при этом используется широкий спектр веществ в качестве углеродных прекурсоров и плазмообразующих газов.

Среди синтезированных наноструктур в плазмохимическом реакторе наиболее актуальной является композит из частиц меди (Cu) и графена. Крупнейшими потребителями композита Cu/графен являются электротехническая и строительная промышленности, электроника и транспорт. Данный материал может использоваться в качестве скользящих/вращающихся электрических контактов, таких как электрические щетки в генераторах и двигателях, и подвергаться сухому трению и высокому напряжению или высокой плотности тока.



Универсальный радиатор. Термопрокладка на основе композитных частиц Cu/графен для эффективного рассеивания тепла для охлаждения мобильного телефона, ноутбука или настольного компьютера

Кроме того, превосходная прочность, жесткость, низкий коэффициент теплового расширения и плотность в сочетании с хорошей электро- и теплопроводностью делают композиты Cu/графен идеальными конструкционными материалами для теплоотвода в микроэлектронных устройствах или электрических контактах.

Электродуговая обработка покрытий и синтез материалов

Плазменная обработка, в силу своих неоспоримых преимуществ, уже много лет применяется в производстве материалов и покрытий. Этому способствуют такие уникальные достоинства, как возможность регулирования глубины воздействия, способность обрабатывать объекты любой формы, низкая себестоимость обработки, экологичность и, что самое главное, возможность охватывать большие площади. Наиболее широко в настоящее время при синтезе новых материалов и покрытий используется низкотемпературная плазма, что позволяет модифицировать поверхность, ее пористость, химический состав, адсорбционные и каталитические характеристики. Температура до 10 кК позволяет создавать активную газовую фазу за короткий промежуток времени, а последующие химические превращения и конденсация позволяют синтезировать нано- и микропорошки. За счет длительности плазменной обработки и изменения состава плазмы можно управлять свойствами покрытий различной формы и морфологии в процессе перекристаллизации поверхностных слоев. В целом, с учетом возможности управления текстурой и механическими напряжениями в процессе перекристаллизации, открываются широкие возможности для модификации морфологии и свойств поверхностей.

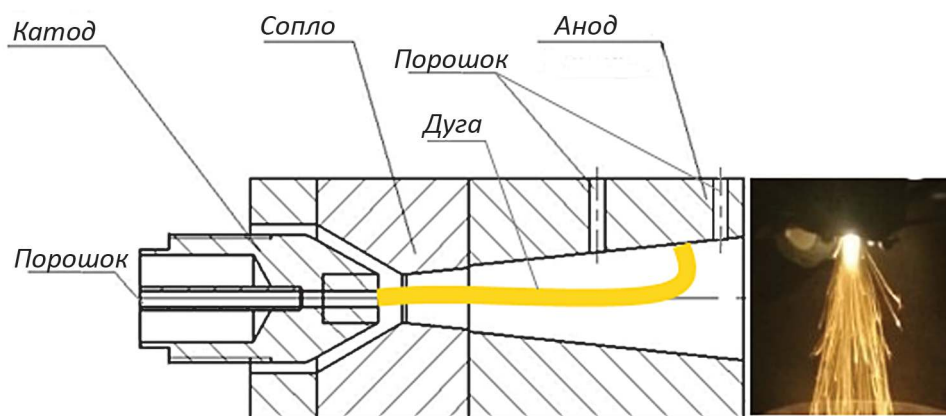
На примере многофункционального материала гексаферрита бария впервые продемонстрирована перспективность обработки низкотемпературной плазмой в открытой атмосфере с образованием супергидрофобных магнитных покрытий (контактный угол 170°) с выраженной кристаллической и магнитной анизотропией.

Получен гетерокомпозиционный микроразмерный фотокатализатор на основе TiO_2/ZnO , отличающийся от традиционных высокой эффективностью разложения трудноокисляемых органических загрязнителей (антибиотики, фенолы) при облучении солнечным светом.

Также впервые показаны перспективы обработки низкотемпературной азотной плазмой при формировании сверхтвердых, супергидрофобных TiN/TiO_2 композиционных покрытий с ярко выраженными комбинационными свойствами.

Предложен эффективный метод электродугового синтеза композитных микрочастиц металл–полупроводник–диэлектрик на основе титана, нитрида титана и рутила $\text{Ti}/\text{TiN}/\text{TiON}/\text{TiO}_2$ и синтез фотоактивных композиционных микрочастиц $\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{Nb}_2\text{O}_5$.

Разработан метод плазменного синтеза со скоростью до 2 мкм/с плотной керамики оксида галлия. Синтезированная керамика обладает ярко-выраженными люминесцентными и детекторными свойствами. Отдельно следует отметить ее высокую чувствительность к H_2 , NH_3 , CH_4 при температурах до 750°C , что делает керамику оксида галлия весьма перспективным материалом для использования в качестве высокотемпературного газового сенсора.



Плазмотрон для обработки порошков и покрытий



7.2. Плазменная медицина в задачах антибактериальной терапии, ускорения регенерации биологических тканей, косметологии

Лечение с помощью низкотемпературной плазмы (НТП) – это перспективный инновационный метод терапии, эффективной как для уничтожения устойчивых к антибиотикам микроорганизмов, так и для стимуляции процессов регенерации. Согласно современным оценкам, до 2–3% всех затрат на здравоохранение в развитых странах идет на лечение длительно не заживающих ран. Причины неэффективности лечения:

- антибиотикоустойчивость (многие бактерии не чувствительны почти ко всем, даже к самым современным антибиотикам);
- образование бактериями биопленок на поверхности ран (в них микроорганизмы в 100–1000 раз более устойчивы к антибиотикам).

Для медицинских целей создается поток низкотемпературной плазмы с температурой окружающей среды, активные компоненты которого включают в себя заряженные частицы, ультрафиолетовое излучение, электромагнитные поля, продукты плазмохимических реакций NO, O₃, OH и др.

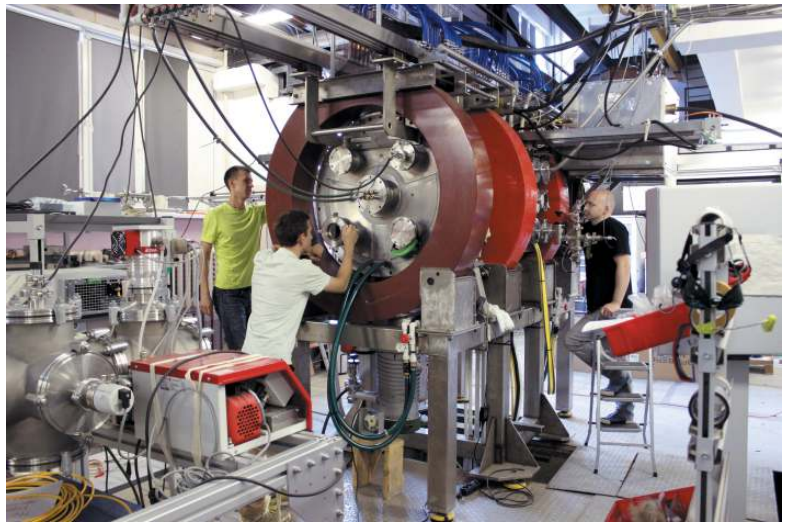
В ОИВТ РАН совместно с ФНИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи и ЗАО «Руднев-Шиляев» разработан медицинский генератор низкотемпературной аргонной плазмы «Плазма 200», который прошел успешную сертификацию.

Показана высокая эффективность плазменной обработки против патогенов с множественной антибиотикоустойчивостью. Плазменное воздействие стимулирует ускоренное заживление инфицированных ран. При этом отсутствует токсический эффект для клеток, формирующих раневую поверхность и участвующих в закрытии раневой поверхности.



7.3. Научные основы плазменной сепарации для создания технологий переработки отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов

Одним из ключевых направлений развития атомной отрасли является замыкание ядерного топливного цикла, включающее разработку новых эффективных технологий переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). К перспективным подходам, позволяющим продвинуться в этом направлении, относится метод плазменной сепарации (ПС) компонентов ОЯТ, разрабатываемый в настоящее время в ОИВТ РАН в тесном взаимодействии с предприятиями ГК «Росатом» в рамках проектного направления «Прорыв». Конкурентными преимуществами плазменного метода переработки являются минимальное количество дополнительно нарабатываемых отходов, возможность масштабирования и настройка под разные типы ОЯТ. Кроме того, особенности метода открывают перспективы для гражданского коммерческого использования технологии, создаваемой на его основе.



Экспериментальная модель плазменного сепаратора

В основе метода ПС лежит идея преобразования смеси веществ в плазменный поток и последующее его разделение в пространстве в специальной конфигурации электрического и магнитного полей на несколько составляющих в соответствии с массами присутствующих ионов. В ходе разработки метода ПС в ОИВТ РАН в последние годы получен ряд результатов, опережающих мировой уровень. К ним относится создание контролируемого пространственного распределения стационарного электрического потенциала в большом объеме ($\sim 1 \text{ м}^3$) замагниченной плазмы. При этом характерный диапазон изменения потенциала составляет от -800 В до 0 В , при величине электрического поля до 20 В/см .

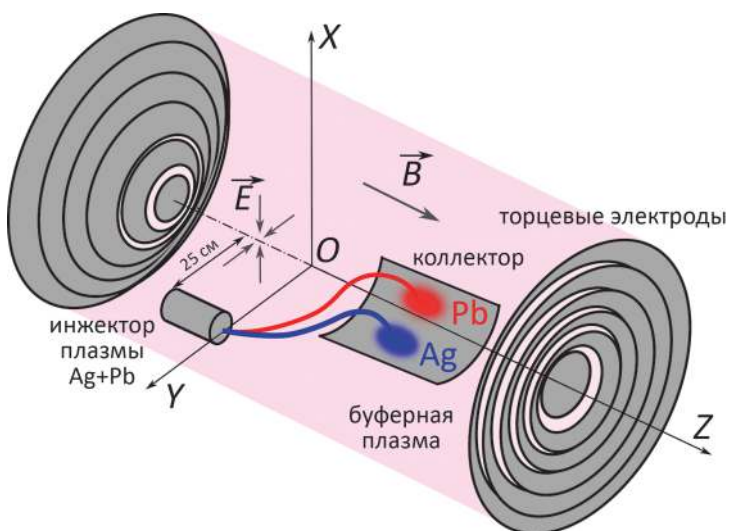


Схема эксперимента по ПС веществ, моделирующих ОЯТ

Создан уникальный источник плазмы веществ, в том числе керамических, моделирующих ОЯТ (гадолиний, свинец, диоксид церия). В его основе – вакуумный дуговой разряд с подогреваемым катодом, позволяющий генерировать плазменный поток со степенью ионизации, близкой к 100%, и содержащий преимущественно однозарядные ионы. На веществах, моделирующих компоненты ОЯТ, экспериментально была доказана работоспособность метода ПС: смесь свинца ($m = 207 \text{ а.е.м.}$) и серебра ($m = 108 \text{ а.е.м.}$) была успешно разделена и собрана на коллекторе в виде разнесенных на расстояние $\sim 10 \text{ см}$ областей осаждения.



8. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ И НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГАЗОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ

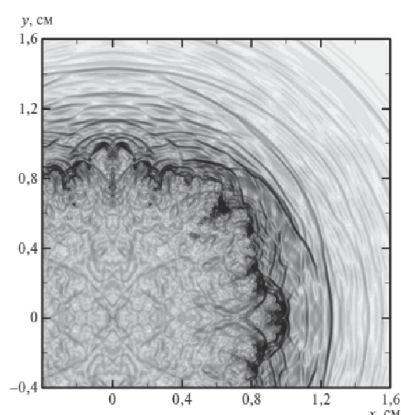
8. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ И НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГАЗОДИНАМИКА, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ

8.1. Физические процессы высокотемпературной и нестационарной газодинамики, горения и детонации

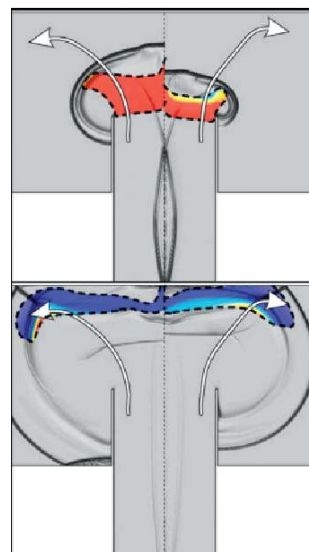
Численное моделирование

Воздействие на газовую среду различными источниками энергии механической или химической природы, является одним из способов получения новых материалов с уникальными свойствами. Эффективность и ограничения данных методик определяются особенностями динамических процессов, сопровождающих выделение энергии. Динамические процессы в газах и аэрозолях характеризуются сложными пространственно-временными зависимостями параметров потока. Для их корректного воспроизведения и прогнозирования в условиях экспериментальных стендов и реальных технических систем требуется всестороннее исследование с применением современных диагностических методов и расчетно-теоретических подходов.

В ОИВТ РАН, наравне с богатым заделом экспериментальных исследований высокотемпературной газодинамики, на протяжении многих лет ведутся работы по созданию эффективных вычислительных методик, позволяющих проводить предсказательное моделирование динамических процессов с помощью современных суперкомпьютерных систем. Высокая точность численного моделирования, подтверждаемая сравнением с данными натурных экспериментов, достигается за счет использования современных вычислительных алгоритмов и детализированных математических моделей, подробно описывающих динамику среды с учетом физических и химических процессов, таких как фазовые переходы, процессы молекулярного переноса, химические реакции горения и другие. Наиболее яркими примерами задач нестационарной высокотемпературной газодинамики являются задачи горения и детонации. С одной стороны, изучение особенностей развития этих процессов необходимо для разработки и модификации систем пожаро- и взрывобезопасности, с другой стороны востребовано для создания новых технологий, таких как новые энергетические установки, реакторы для утилизации отходов или реакторы для синтеза новых материалов.



Структура течения в окрестности пламени, расходящегося от очага воспламенения



Структура течения и температура микрочастиц при их напылении в детонационной волне

В качестве наглядной иллюстрации приведем результаты сотрудников ОИВТ РАН, представленные в цикле работ, посвященных подробному изучению особенностей развития газодинамических течений при развитии горения в газовых и дисперсных смесях различного состава. В ходе проведенных исследований были установлены важнейшие физические механизмы, определяющие развитие горения в различных режимах от изобарических пламен до детонации, и критические условия перехода между этими режимами. Отметим также цикл работ, посвященных изучению газодинамических особенностей использования высокоскоростных режимов горения для генерации направленных потоков микрочастиц с целью покрытия ими рабочих поверхностей методами газотермического напыления. Накопленный опыт и разработанные методики позволяют решать широкий класс фундаментальных и прикладных задач.

Эксперимент

Во всех системах, подчиняющихся законам движения сплошной среды, возможны физические процессы газодинамики горения и детонации. Процессы высокотемпературной и нестационарной газодинамики наблюдаются в масштабах от долей миллиметра до световых лет.

ОИВТ РАН является лидером в экспериментальных и численных исследованиях физики ударных волн, горения и детонации газовых смесей, а также диффузионного самовоспламенения горючих газов при истечении в атмосферу окислителя.

В 2001 г. в ОИВТ РАН впервые были поставлены эксперименты по изучению формирования детонации в турбулентном потоке смешивающихся горючего и окислителя, что открыло целое направление компактных высокоэффективных детонационных устройств.

В 2005 г. обоснована, а после подтверждена численно и экспериментально возможность самовоспламенения горючих газов под давлением при выбросе в атмосферу окислителя. На сегодняшний день различными группами ежегодно публикуется от 100 работ в ведущих журналах по этой тематике.

В 2006 г. начат ряд работ по ингибированию взрывного саморазложения ацетилена без окислителя. Определены требуемые концентрации углеводородов, которые, не ухудшая характеристик ацетилена как топлива, позволяют хранить его в сжатом состоянии без помещения в пористую среду, заполненную ацетоном.

В 2012 г. в ОИВТ РАН были поставлены эксперименты по распространению пламени в объеме, частично заполненном пористыми материалами. Показана возможность предотвращения развития опасных режимов горения при верном выборе покрытий. В дальнейшем работа получила развитие, и были обнаружены условия, приводящие как к полному гашению пламени и существенному ослаблению параметров взрыва, с одной стороны, так и к ускорению пламени вплоть до перехода в детонацию, с другой стороны.

В 2015 г. поставлены крупномасштабные эксперименты по исследованию распространения очагов пламени в ультрабедных водородно-воздушных смесях вблизи нижнего предела воспламенения. Показана возможность распространения подобных очагов на большие расстояния, а также представлена самоорганизация течения вблизи очага и способность высокоэнергетического зажигания более горючих смесей.

С 2022 г. в ОИВТ РАН началось исследование распространения пламени в узких зазорах и зазорах со структурированными стенками. Результаты востребованы в организации рабочего процесса микрогорелочных устройств и обеспечении безопасности в сильно загроможденных пространствах, например, современных аккумуляторных батареях, воздушных фильтрах.

Эти работы проводятся на шести действующих экспериментальных установках, оснащенных самым современным оборудованием, средствами диагностики и автоматизации эксперимента.

Полученные результаты востребованы при оптимизации производственных процессов и обеспечении безопасности объектов атомной энергетики и промышленности, нефте-газохимических и биохимических производств. Планы будущих исследований связаны с продолжением сотрудничества с организациями, занимающимися проектированием и эксплуатацией таких объектов.



Ударная труба УТ-3 с системой диагностики

8.2. Управление горением в энергетических системах с помощью высокочастотного коронного разряда

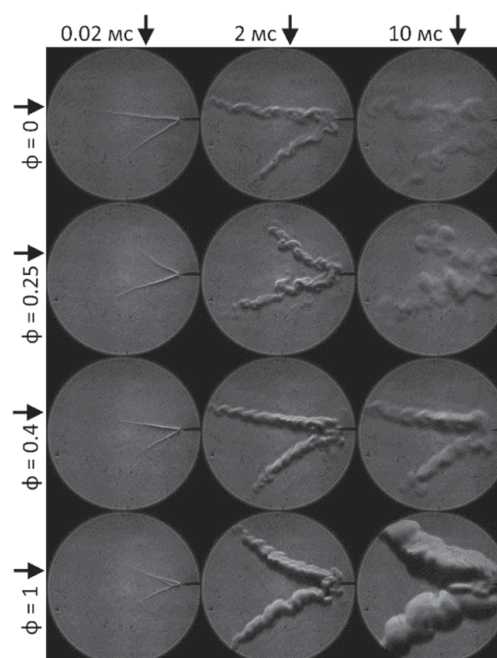
Для развития перспективных энергетических систем, таких как гибридный компрессионный двигатель внутреннего сгорания с гомогенной смесью и двухкамерные газовые турбины, работающих на основе сжигания традиционных и альтернативных видов топлива, необходимы новые методы эффективного управления процессами горения.

Одним из распространенных подходов для удовлетворения экологическим требованиям является использование обедненных составов топливно-воздушных смесей, позволяющее избежать образования сажи и снизить выработку NO_x . Характерной особенностью обедненных смесей является высокое значение пороговой энергии воспламенения и неустойчивость фронта горения. Для преодоления этих проблем предлагается придерживаться современной стратегии низкотемпературного горения (LTC strategies – low temperature combustion strategies), которая предполагает использование химических свойств самой топливно-воздушной смеси, проявляющей многостадийное воспламенение. Среди известных методов оптимизации процесса горения следует выделить использование газовых разрядов для активации смеси. В первую очередь, интерес представляют объемные разряды, формирующие в пространстве неоднородное распределение температуры и наработанных разрядом активных частиц, определяющее структуру очага воспламенения, в том числе разряды наносекундного и высокочастотного диапазонов. Разряд позволит расширить диапазон устойчивой работы энергетической системы путем регулирования протекания химических реакций и тепловыделения на низкотемпературной стадии окисления смеси.

Сотрудниками ОИВТ РАН ранее в результате моделирования впервые было показано существенное влияние неравновесной плазмы разряда на многостадийное воспламенение, в том числе в компрессионном двигателе с гомогенной смесью, где оно отвечает за спонтанное воспламенение смеси перед волной горения. Однако экспериментального подтверждения этого вывода ранее не было получено.

Пределы применимости разряда для воспламенения смеси ограничены рядом физико-химических факторов. Смесью может быть малочувствительна на стадии воспламенения к изменению концентраций активных частиц, наработанных разрядом. Многоимпульсный и многоканальный характер разряда может приводить к разным режимам распространения волны горения. Сам разряд, создающий неравновесную плазму, при определенных условиях дает значительные концентрации NO_x в продуктах сгорания.

Несмотря на быстрое развитие технологии высокочастотного плазменного зажигания, рост публикаций в высокорейтинговых журналах, фундаментальные вопросы, связанные с влиянием импульсной плазмы на развитие горения или конверсии углеводородной смеси на различных стадиях при повышенных давлениях, остаются нерешенными. Необходимо восполнить пробел в области изучения влияния плазмы на протекание низкотемпературной стадии горения для условий, близких к условиям в компрессионном двигателе. Плазменное воздействие обеспечивает контролируемый подвод энергии и активных компонентов для изменения условий инициирования и распространения волны горения с целью детального изучения физических закономерностей.



Динамика теплового следа от филамента разряда при различном содержании метана в смеси (коэффициента избытка топлива). Давление 1 атм. Напряжение 15 кВ, длительность радиоимпульса 500 мс. Задержки показаны относительно начала радиоимпульса

8.3. Кавитация и сопровождающие ее процессы

Кавитация – это комплекс нестационарных явлений, связанных с динамикой паровой полости, которая возникает при понижении давления в жидкости. В целом, кавитация носит разрушающий и потому нежелательный характер, поэтому диагностика и своевременное обнаружение кавитации позволяют снизить амортизационные расходы и увеличить эффективность и надежность работы оборудования.

Вместе с тем, существуют и полезные практические применения этого явления – например, использование кавитации для очистки воды или переработки сырья нефтехимической промышленности. Явление кавитации также внедряется в медицинских приложениях для терапевтического воздействия.

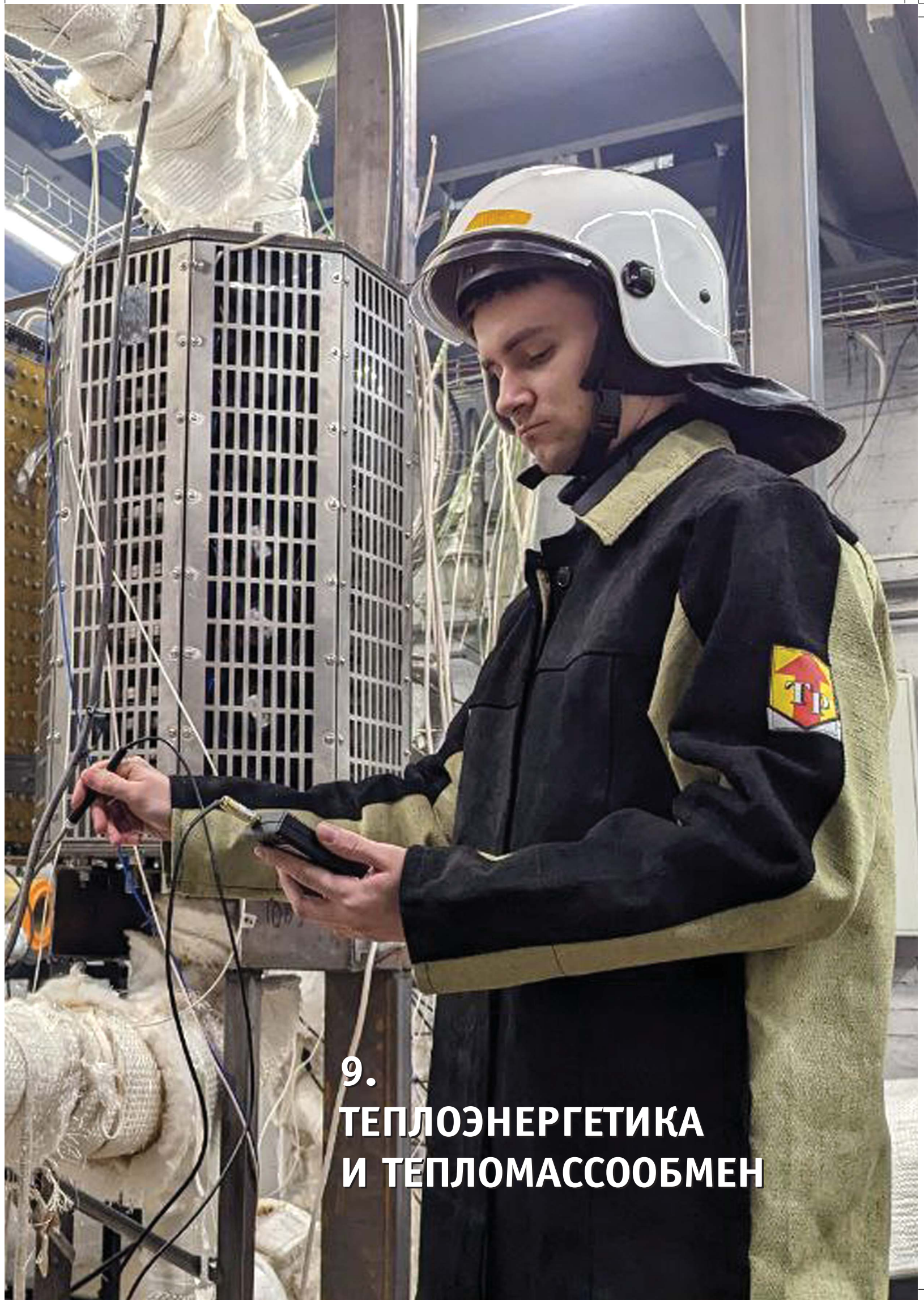
В ОИВТ РАН проводится экспериментальное исследование кавитации – это трудоемкий процесс из-за малых размеров кавитирующих полостей и высокой скорости их схлопывания. Собранные стенды предназначены для комплексного исследования как акустической, так и гидродинамической кавитации. Получаемые данные позволяют определить ключевые параметры наблюдаемого явления для различных жидкостей и рабочих параметров.

Специалисты ОИВТ РАН обладают компетенциями для экспериментального воспроизведения особой формы кавитации – однопузырьковой сонолюминесценции. В различных растворах и жидкостях это позволяет с высокой точностью отследить динамику и кинетические параметры движения схлопывающейся полости. Это, в свою очередь, позволяет определить наиболее точные значения температуры и давления, характерные для процесса, и определить возможность управления параметрами химических реакций.

В ОИВТ РАН предложена и опробована акустическая методика диагностики кавитации для жидкометаллических гидравлических систем. Разработана и проходит натурные испытания лабораторная установка для стерилизации воды и водных растворов с производительностью 5 л/мин. За счет фазового перехода и отсутствия токоподводящих электродов в ней обеспечена надежность и полнота стерилизации.



Многопузырьковая сонолюминесценция глицерина (слева) и гидродинамическая люминесценция воды (сверху) – удобный инструмент для исследования параметров кавитирующих полостей спектральными методами



9. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОМАСООБМЕН



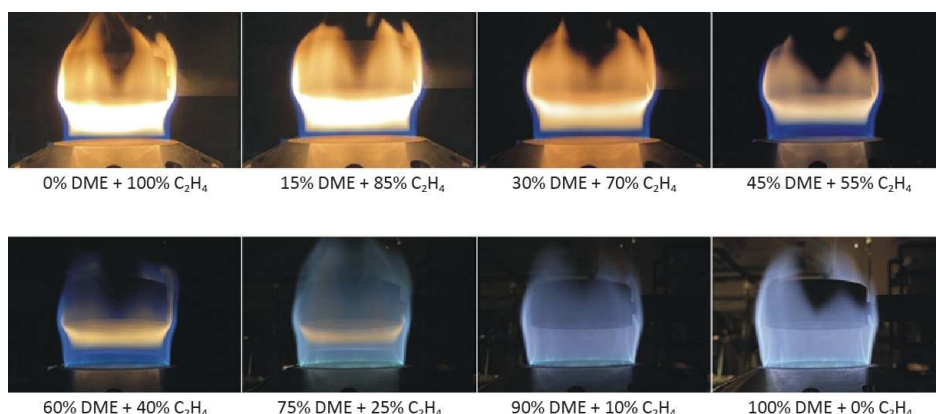
9. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОМАСООБМЕН

9.1. Перспективные добавки к традиционным топливам для снижения вредных выбросов в продуктах горения

Текущие темпы роста населения и стремительное социально-экономическое мировое развитие приводят к неуклонному глобальному росту спроса на энергию. Доля энергии, получаемая от ископаемых топлив, стабильно составляет более 80% от общемирового энергетического потребления и будет сохраняться. При этом ~65% мировых вредных выбросов образуется от сжигания ископаемых углеводородов, бесконтрольное использование которых уже привело к множеству климатических и экологических проблем. Ожидается, что альтернативной энергетике потребуется еще несколько десятилетий, чтобы заменить традиционные углеводороды, поэтому сейчас от них нельзя отказаться, но можно реализовать процессы их сжигания чище и эффективнее. Внедрение окисгенированных биотоплив в мировую энергетическую инфраструктуру рассматривается как один из наиболее перспективных вариантов реализации всеобщей декарбонизированной энергетической системы.

В ОИВТ РАН ведутся передовые исследования кинетики горения, окисления и пиролиза различных классов перспективных кислородсодержащих биотоплив, включающих спирты, эфиры, фурановые соединения и различные циклические углеводороды. Научными сотрудниками института ведутся комплексные междисциплинарные работы на стыке физики, химии и энергетики с использованием современных экспериментальных и численных методов, большинство из которых были развиты в РФ впервые. Получены новые данные о влиянии добавок широкого класса биотоплив на образование сажи при пиролизе различных углеводородов; исследованы механизмы формирования и свойства полициклических ароматических углеводородов и сажи, образующихся при пиролизе и горении различных углеводородов; получены новые фундаментальные данные об оптических и термодинамических свойствах углеродных наночастиц; изучены особенности процессов нуклеации и окисления частиц сажи при использовании оксигенатных биотоплив в составе многокомпонентных топливных смесей. Изучены реакционные пути и выявлены ключевые реакции, определяющие динамику горения и окисления биотоплив, в особенности ведущие к образованию вредных альдегидов; измерены концентрации сложно-детектируемых радикалов при окислении биотоплив; уточнены и развиты кинетические механизмы воспламенения и горения углеводородных и оксигенатных топлив; предложены новые методы кинетических исследований окисления биотоплив на возбужденных атомах и молекулах.

Полученные результаты необходимы для разработки новых технологий использования перспективных полусинтетических топливных смесей с меньшими и, в перспективе, околонулевыми уровнями вредной эмиссии при их сжигании в различных энергопреобразующих установках.



Пример уменьшения выхода сажи (цвет пламени от оранжевого к синему) в углеводородном пламени (этилена) по мере добавления биотоплива (диметилэфира)

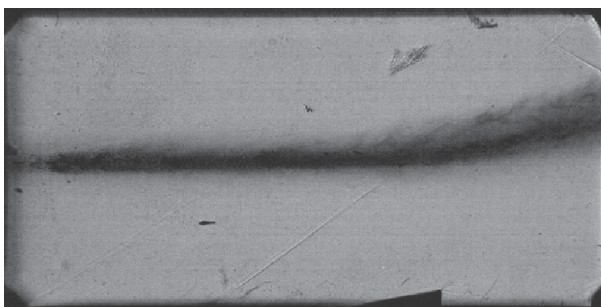
Фундаментальное значение полученных данных особенно важно для понимания и, соответственно, управления процессами образования вредной эмиссии, а их прикладное значение может быть использовано для развития технологий мониторинга загрязнений окружающей среды и климатического моделирования.

9.2. Воздействие на процесс формирования распыла жидкостей

Аэрозоли жидкостей широко используются в различных технических устройствах, таких как химические реакторы, двигатели, а также для дезинфекции поверхностей для нужд сельского хозяйства и т.д. Эффективность того или иного процесса (горение, испарение) определяется в значительной степени удельной площадью жидкой фазы, т.е. отношением площади капли к ее объему: чем больше данный параметр, тем интенсивнее происходят указанные процессы. Как правило, распыление жидкостей для получения аэрозоля происходит с применением специальных устройств – форсунок, – а сам процесс происходит в газовой среде. Взаимодействие газового потока с поверхностью жидкости (капли) определяет, насколько «тонким» будет распыл и, таким образом, насколько эффективным будет процесс. В настоящее время в двигателестроении идет борьба за энергоэффективность, компактность, скорость газового потока. Характеристики распыла жидкого топлива существенно определяют данные параметры устройства. Численное моделирование конкретных технических устройств затруднено в силу большой разницы в пространственных и временных масштабах происходящих в них физических процессов.

Для диагностики параметров распыла жидкостей в ОИВТ РАН развивается прямой оптический метод измерения с помощью теневого микрофотографирования капель. Используются оптический микроскоп большого рабочего расстояния и малой глубиной резкости, некогерентная импульсная подсветка с применением двойного лазера или сверхъярких светодиодов, программное обеспечение для распознавания формы, размера капель, их скорости, а также для построения статистики данных параметров и вычисления усредненных величин.

В настоящее время в ОИВТ РАН ведутся работы по исследованию формирования распыла модельной жидкости при различных способах воздействия на данный процесс: газодинамический, с помощью электрического поля и плазмы электрического разряда, а также нагрева несущей газовой фазы. Рассматриваются случаи до- и сверхзвукового потока несущей газовой фазы, в которой присутствуют области больших градиентов скорости, а также области нестационарного течения. В частности показано, что при наличии поверхности разрыва параметров (косого скачка уплотнения) набегающего сверхзвукового потока воздуха с различными числами Маха усредненные характеристики распыла модельной жидкости уменьшаются на десятки процентов в сравнении со случаем без скачка.



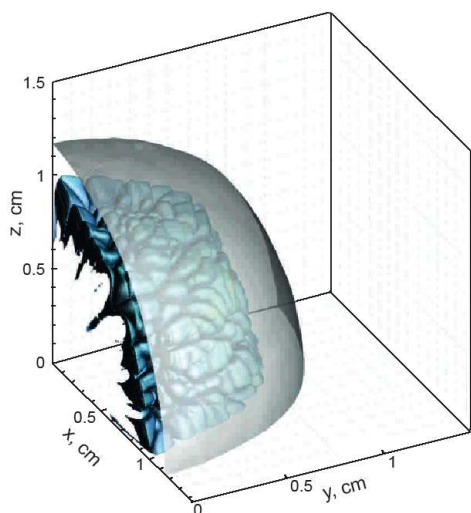
Теневая фотография формирования распыла в сверхзвуковом потоке воздуха при наличии скачка уплотнения



Мгновенная теневая фотография распыла жидкости с помощью вихревой форсунки в неподвижном воздухе

В институте исследуется процесс формирования аэрозоля в присутствии сильного электрического поля и плазмы электрического разряда. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании плазмохимических реакторов, устройств плазменной очистки или активации воды, для дезинфекции, сельскохозяйственных нужд. Было установлено, что воздействие переменного электрического поля барьерного разряда на водную пленку ускоряет ее распад. В результате этого процесса образуются капли, средний диаметр которых становится меньше.

9.3. Прогнозирование развития переходных режимов горения для повышения КПД перспективных энергоустановок



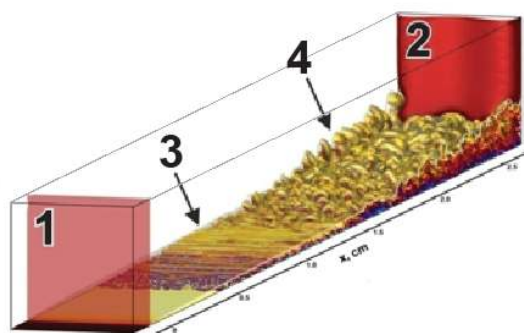
Трехмерная визуализация поверхности пламени, расходящегося от точечного источника

Процесс горения по-прежнему является основным методом преобразования химической энергии органического топлива в тепловую и электрическую энергию. Помимо этого, перспективы использования биотоплив и водорода также связывают с их сжиганием в камерах сгорания энергоустановок. Эффективность использования того или иного топлива для выработки энергии, равно как и его экологичность, определяется конкретными режимами горения, реализуемыми в камере сгорания заданной конструкции. При этом, повышение эффективности процесса сжигания, как правило, достигается с помощью оптимизации систем подачи топлива, его перемешивания с окислителем, сжатия и зажигания. Основной целью такой оптимизации является обеспечение устойчивого процесса горения и снижение вероятности нештатных режимов горения, включая переходные режимы, такие как стук в двигателе (или переход горения в детонацию), преждевременное самовоспламенение, обратные вспышки. Прогнозирование сценариев развития различных режимов

горения с использованием экспериментальных и расчетно-теоретических методов является неотъемлемой частью процесса повышения эффективности и безопасности процессов горения.

Научным коллективом ОИВТ РАН накоплен огромный опыт экспериментального и расчетно-теоретического анализа процессов горения, а также проектирования и разработки энергетических циклов и энергетических систем на основе сжигания различных типов топлив, включая перспективные на сегодняшний день биотоплива, композитные топлива и водород. В частности, в ОИВТ РАН получены фундаментальные результаты в области нестационарного горения и перехода в детонацию, очагового воспламенения горючих составов в ударных трубах, распространения волн горения в газообразных смесях и газовзвесьях с включениями микрочастиц и капель. Отдельно следует отметить проводимые в институте работы по всестороннему анализу эволюции газодинамических течений в процессе горения.

Полученные фундаментальные результаты нашли применение при решении широкого круга прикладных задач, включая горение в газопоршневых двигателях и горелочных устройствах. На основе систематизации экспериментальных и расчетно-теоретических данных о развитии процессов горения в различных топливных смесях в заданных условиях были созданы методики прогнозирования реализации различных режимов горения, включая переходные, широко используемые для повышения энергетической эффективности и экологичности перспективных энергоустановок, работающих на традиционных и перспективных видах топлива.



Структура пограничного слоя за ударной волной в канале. 1 – ударная волна, 2 – контактный разрыв, 3 – роликовые вихри, 4 – взаимодействие вихрей

9.4. МГД-теплообмен жидких металлов и расплавов солей для решения проблемы охлаждения первой стенки термоядерных устройств

В качестве теплоносителя в ряде проектов термоядерных установок и гибридных реакторов (термоядерного источника нейтронов) рассматривается расплав лития либо эвтектика свинец–литий, которые являются как теплоносителем, так и средой наработки трития.

Жидкие металлы и расплавы солей – электропроводные среды. В случае термоядерных устройств с магнитным и магнитно-инерциальным удержанием плазмы работа этих сред будет происходить при наличии сильных магнитных полей, что требует изучения теплогидравлики в конфигурациях, максимально приближенных по своей геометрии к реальным устройствам.

В ОИВТ РАН ведутся исследования путем изучения характеристик базовых геометрий – вынужденного течения в прямоугольных и круглых трубах струйных течений, обтекания препятствий, течений в комбинированных канальных системах и свободной конвекции в условиях совместного влияния как сильных магнитных полей, так и больших тепловых потоков. В распоряжении исследовательской группы находятся магниты, способные создавать стационарные магнитные поля величиной до 2.7 Тл.

Исследования теплогидравлики жидких металлов и расплавов солей являются актуальными как для перспективных проектов ядерной и термоядерной отрасли, так и в более традиционных областях энергетики и химической промышленности.

Исследования структуры течений ведутся сканирующими погружными зондами, позволяющими восстанавливать трехмерные поля осредненной и пульсационной температуры и поля осредненной продольной скорости.



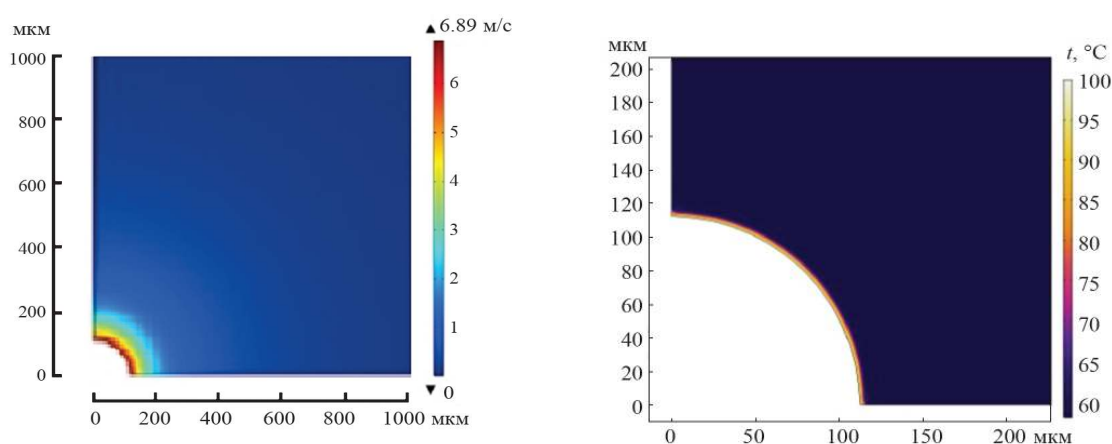
Экспериментальная установка РК-3 по изучению теплогидравлики жидких металлов и расплавов солей в условиях сильного магнитного поля



9.5. Охлаждение элементов технических устройств со сверхвысокой плотностью тепловыделения посредством кипения недогретой жидкости

Кипение недогретой жидкости представляет собой тип кипения, при котором жидкость с температурой ниже температуры насыщения контактирует с поверхностью достаточно горячей, чтобы вызвать кипение. При этом в тонких слоях жидкости у поверхности толщиной несколько мкм (микрослоях), которые прогреваются выше температуры насыщения, происходит формирование паровых пузырей. В процессе роста границы пузыря попадают в область недогретой жидкости. Таким образом, в основании парового пузыря происходит испарение микрослоя жидкости, а у его купола – конденсация образовавшегося пара с передачей тепла обтекающему пузырь потоку жидкости. При этом сами паровые пузыри в процессе их жизненного цикла локализованы у греющей поверхности. Сочетание таких высокоинтенсивных процессов теплопереноса, как испарение и конденсация, позволяет достигать при кипении недогретой жидкости рекордных значений эффективности теплоотдачи и отводимых плотностей тепловых потоков. Ввиду этого данный способ теплоотвода применяется для охлаждения элементов технических устройств со сверхвысокой плотностью тепловыделения, таких как импульсные МГД-генераторы, термоядерные реакторы, ракетные сопла, силовая электроника и т.д. Отсутствие в потоке крупных объемов паровой фазы при кипении недогретой жидкости дает дополнительное преимущество по сравнению с кипением насыщенной жидкости ввиду слабого роста гидравлического сопротивления канала по сравнению с однофазным течением жидкости.

В ОИВТ РАН были получены пионерские результаты по гидравлическому сопротивлению при кипении недогретой воды в каналах, обобщены данные по критическим тепловым потокам. В последнее десятилетие с использованием современной экспериментальной техники и оригинальных авторских методик были получены результаты мирового уровня по характеристикам пузырей при кипении недогретой воды. Полученные данные позволили модифицировать феноменологическую модель процесса. Были определены и детализированы последовательность процессов и механизмы, ведущие к наступлению кризиса кипения недогретой жидкости в канале. В настоящее время проводятся исследования по кипению недогретых диэлектрических жидкостей с низкой температурой насыщения для задач отвода высоких тепловых потоков и поддержания требуемой температуры в современной электронной технике (процессоров суперкомпьютеров, силовой электронике, мощных светодиодах и т.д.).



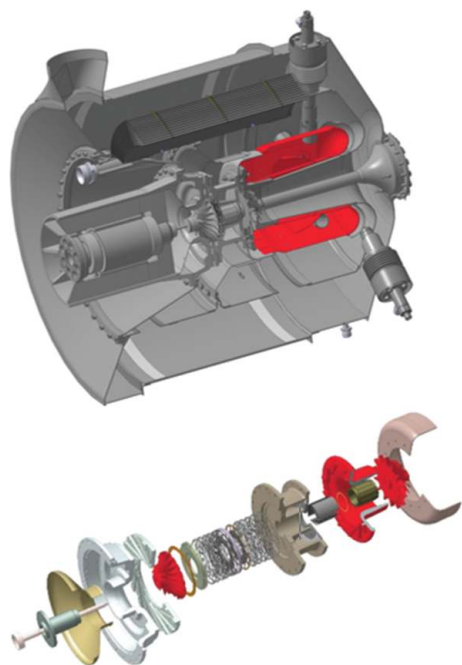
Момент роста парового пузыря при кипении недогретой воды: давление 0.1 МПа, плотность теплового потока 1.4 МВт/м², недогрев до температуры насыщения 42°C; время от момента зарождения пузыря 15 мкс: слева – поле скорости жидкости в окрестности поверхности пузыря; справа – поле температур в жидкости вблизи пузыря.

A detailed, close-up photograph of the compressor section of a gas turbine engine. The image shows multiple rows of highly polished, curved compressor blades. The blades are arranged in a precise, repeating pattern, creating a strong sense of depth and perspective. The lighting is dramatic, highlighting the metallic sheen and the aerodynamic contours of the blades. The background is blurred, emphasizing the intricate details of the foreground blades.

10. ГАЗОТУРБИННЫЕ ЦИКЛЫ И АГРЕГАТЫ

10. ГАЗОТУРБИННЫЕ ЦИКЛЫ И АГРЕГАТЫ

10.1. Газотурбинные технологии в области микрогазотурбостроения



3D-модель микро-ГТУ

Проблема электрификации и теплофикации населенных пунктов, объектов стратегического назначения и др. на территории Российской Федерации до сих пор в значительной степени не нашла решения. Значительные потери при передаче энергии по протяженным электрическим и тепловым сетям, а порой и невозможность подключения к таковым до сих пор не позволяет обеспечить энергией огромное количество жизненно важных для страны объектов.

Для решения этой проблемы в России эксплуатируется более тысячи зарубежных энергетических микрогазотурбинных установок (микро-ГТУ) на объектах как крупных корпораций, так и средних и мелких потребителей различного профиля – в муниципальных образованиях, торговых и развлекательных центрах, в офисах, на социальных объектах и промышленных предприятиях из самых разнообразных отраслей экономики.

Сфера применения микро-ГТУ интенсивно расширяется – транспорт, мини-ТЭЦ распределенных энергосистем (умные сети), энергетические системы спецобъектов – робототехнических комплексов и обзорных радиолокаторов (РЛС). Важнейшей задачей для страны является масштабное развитие инфраструктуры в Арктике, которая позволит защищать национальные интересы России. Здесь планируется развертывание сети РЛС с длительной автономной работой. Дизельные электроагрегаты не обеспечивают необходимые условия из-за малого ресурса и периодичности технического обслуживания.

Более эффективный вариант – электростанции или гибридные установки на базе микротурбин совместно с современными накопителями энергии. В ОИВТ РАН в рамках работы над созданием мощного (от 3 до 250 кВт) ряда микро-ГТУ были разработаны методики проектирования лепестковых газодинамических опор и лопаточных машин, подкрепленные экспериментальными исследованиями на стендах. Созданы уникальные конструкции элементов микротурбины, позволяющие увеличить КПД данных установок выше зарубежных аналогов.

В настоящее время ведутся работы по «переносу» полученных результатов в основу инженерных методик проектирования центробежных компрессоров и газодинамических подшипников.



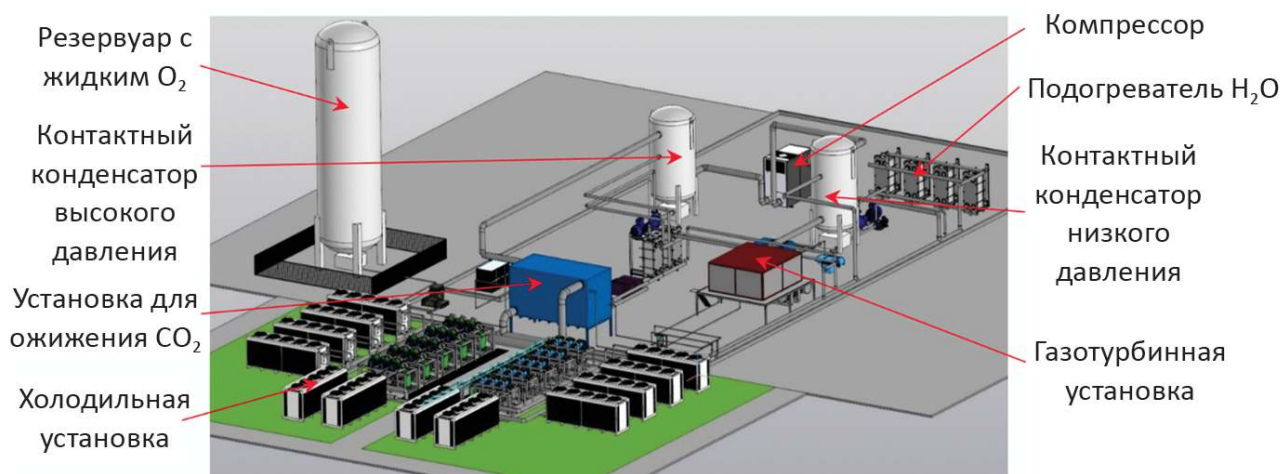
Опытный образец микро-ГТУ мощностью 30 кВт

10.2. Газотурбинные технологии для задач циклового вывода углекислоты

Преобладающее использование ископаемых органических топлив еще многие десятилетия будет оставаться ключевым в энергетическом балансе России, располагающей большими запасами углеводородного сырья. При этом с учетом нарастающих требований по декарбонизации мировой экономики крайне актуальным становится разработка новых научно-технических решений, обеспечивающих сокращение выбросов CO_2 в атмосферу электростанциями, работающими на органическом топливе. Стремление уменьшить вредное воздействие на окружающую среду при производстве электроэнергии привело к новым термодинамическим циклам, в которых кислород выделяют из воздуха и подают в камеру сгорания для окисления топлива в чистом виде: E-Matiant, Nevel O_2/CO_2 , NetPower (Allam), Graz, CES, SCOC-CC и др. Сотрудники ОИВТ РАН предложили для энергетики на органическом топливе термодинамический цикл ОИВТ РАН, обеспечивающий практически полное предотвращение выбросов CO_2 в атмосферу с продуктами сгорания и выводом углекислого газа из цикла электростанции в жидком виде, удобном для транспортировки, дальнейшего захоронения или использования.

Принципиальным отличием схем электростанции на основе цикла ОИВТ РАН является ориентация на совместное производство электрической и тепловой энергии, что крайне важно для климатических условий России. Ключевой особенностью цикла ОИВТ РАН является также практически полное исключение использования в ней компрессорного оборудования: в предложенном цикле все компоненты рабочего тела (топливо, кислород, балластирующие продукты сгорания CO_2 и H_2O) в исходном состоянии находятся в жидкой фазе, и их давление повышается насосным оборудованием, что обеспечивает существенное повышение энергетической эффективности цикла. Важным свойством таких установок является также способность компенсировать пиковые провалы и забросы потребления электроэнергии в сети, при высокоэффективном аккумулировании энергии.

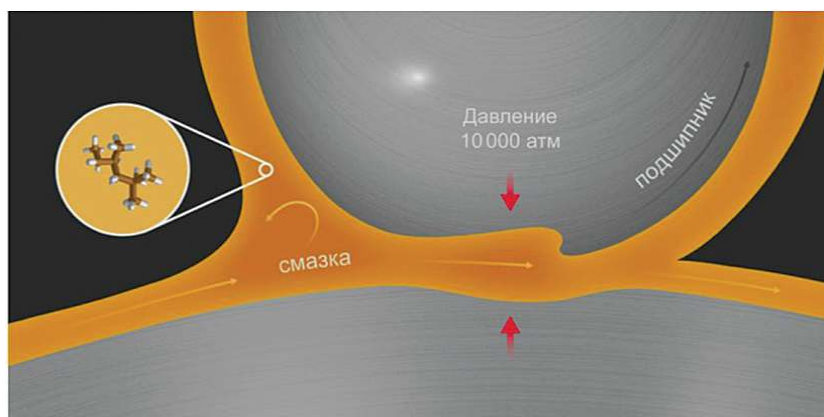
В настоящее время для практической реализации принципиально новой схемы энергетической установки по циклу ОИВТ РАН осуществляется поиск оптимальных параметров расчетных режимов установок различных мощностей, определяется характер изменения параметров установок при изменении режимов работы. На самых ранних стадиях проектирования необходимо знать требуемые диапазоны рабочих режимов компонентов установки для корректной формулировки технических заданий на их подбор или проектирование. Кроме того, с целью определения предварительных характеристик, когда еще не выбраны/разработаны основные составляющие компоненты, разрабатывается математическая модель установки.



Облик ПГУ по циклу ОИВТ РАН мощностью 60 МВт

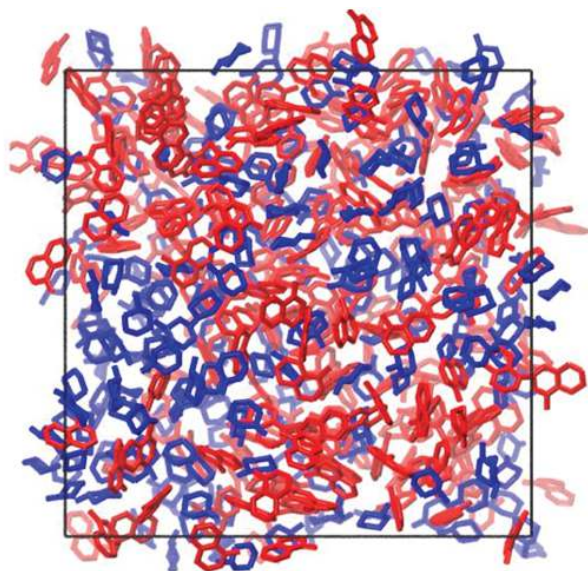
10.3. Моделирование смазочных материалов для подшипников высокого давления в газовых турбинах

Высоконагруженные узлы механических установок, такие как подшипники газовых турбин или зубчатые колеса трансмиссионных установок, могут находиться в условиях давлений до десятков тысяч атмосфер. Для разработки смазочных материалов, работающих в этих условиях, важно знать, как их реологические свойства меняются с давлением. В связи со сложностью изучения реологии при высоких давлениях в условиях контролируемого эксперимента, высокую ценность представляют достоверные теоретические и расчетные методы.



Зона высоких давлений в подшипниковых узлах

В ОИВТ РАН совместно с МФТИ и МИЭМ НИУ ВШЭ развиваются методы, позволяющие предсказывать вязкость жидкостей при давлениях в тысячи атмосфер методами молекулярного моделирования. Коллектив из ОИВТ РАН участвовал в международных научных конкурсах по предсказанию свойств промышленных жидкостей, заняв II место в 2018 и I место в 2019 году с работами по предсказанию вязкости модельных смазочных материалов при давлениях до 10 тыс. атмосфер. Для углеводородных жидкостей и смесей получены параметры точек перехода к сверхэкспоненциальному росту вязкости с давлением.



Пример молекулярной модели, используемой в расчетах

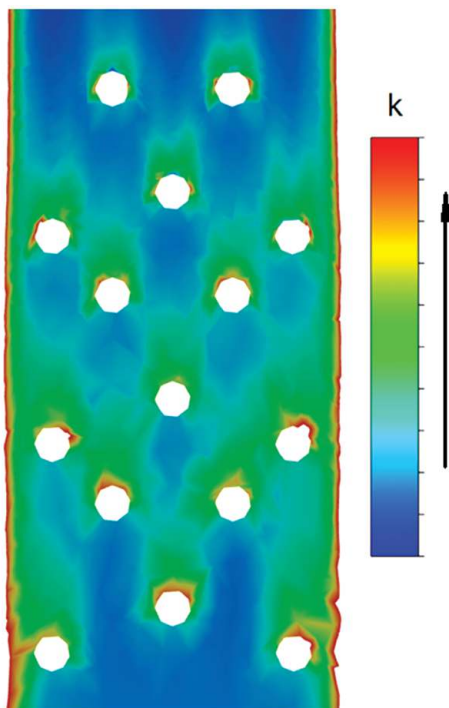
В настоящее время ведутся работы по развитию методов прогноза вязкости для сложных смесей, в том числе оптимизации моделей межатомного взаимодействия для таких задач. Также разрабатываются методы предсказания коэффициентов переноса на основе набора термодинамических параметров с помощью подходов машинного обучения, что в перспективе позволяет строить модели уравнения состояния веществ с включенной моделью поведения транспортных свойств.

10.4. Моделирование двухфазных и вихревых потоков с целью совершенствования рабочих процессов газотурбинных и парогазовых установок

Актуальность проблемы определяется тем обстоятельством, что дисперсная примесь в виде твердых частиц (или капель) присутствует, как правило, по всему газозвоздушному тракту, как газотурбинных энергетических установок, так и воздушно-реактивных двигателей. Попадание в двигатель инородных частиц и предметов с взлетно-посадочной полосы, наличие дождевых капель или градин во входящем атмосферном воздухе, впрыск воды в компрессор и камеру сгорания, сжигание керосина в авиационных газотурбинных двигателях, наличие частиц несгоревшего топлива в продуктах сгорания – вот далеко не полный перечень процессов и явлений, обуславливающих «двухфазность» рабочего тела в воздушно-реактивных двигателях и газотурбинных энергетических установках.

В ОИВТ РАН получен целый ряд пионерских результатов, среди которых:

- установление влияния частиц на начало ламинарно-турбулентного перехода;
- определение величин дополнительной генерации и диссипации энергии турбулентности частицами;
- объяснение эффекта снижения относительного сопротивления тупых тел по сравнению с более острыми в потоках с дисперсной примесью;
- выявление безразмерных критериев, определяющих наличие и интенсивность различных столкновительных процессов в двухфазных потоках;
- решение проблемы генерации, устойчивости и управления свободными концентрированными вихрями и др.



Поле кинетической энергии турбулентности k в двухфазном потоке с крупными частицами. Стрелка направлена в сторону более высоких значений

Результаты фундаментальных исследований находят свое применение при прогнозировании воздействия частиц пыли на лопатки компрессоров, несгоревших частиц топлива на охлаждаемые рабочие лопатки высокотемпературных турбин, оптимизации процессов гетерогенного горения в камерах сгорания газотурбинных и парогазовых установок, а также при оценках теплоэрозионного и загрязняющего воздействия дисперсной фазы на теплообменные поверхности парогенераторов, работающих на твердом топливе.

A photograph of a large, blue, cylindrical industrial tank, likely a storage vessel for fuel or chemicals, situated within a facility. The tank is supported by a metal frame and has several access points or valves. To the left, a metal staircase and walkway with railings are visible, leading up to a higher level. The ceiling of the facility is made of corrugated metal. The overall scene suggests a power plant or industrial complex.

**11.
БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА**



11. БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

11.1. Научные основы взрывобезопасности и методы снижения взрывных нагрузок при авариях на промышленных объектах

Мировой опыт в области промышленной безопасности указывает на необходимость проведения исследований на экспериментальных стендах, позволяющих изучать особенности развития и подавления взрыва водородных и других газовых смесей в больших пространственных масштабах, характерных для атомных электростанций, при утечках водорода из баллонов высокого давления, хранилищ и трубопроводов. Уникальная научная установка ОИВТ РАН «Сфера» со взрывной камерой 13ЯЗ позволяет проводить такие исследования в объеме до 900 кубических метров.

В последние годы был получен ряд важных научных результатов. Обнаружено возникновение очагов воспламенения перед фронтом сферических пламен в водородно-воздушных смесях при инициировании их энергией 2.3 кДж, что составляет всего 15% от минимальной энергии прямого инициирования детонации. Ранее возникновение очагов воспламенения наблюдалось при сжатии смеси (ударном или адиабатическом). При увеличении начального объема водородно-воздушной смеси происходит уменьшение энергии инициирования, при которой возникают очаги воспламенения. По результатам изучения границ возникновения сферической детонации при прямом инициировании показано, что критическая точка (минимальная энергия инициирования детонации) для водородно-воздушных смесей в больших объемах составляет менее 4.6 кДж, что значительно меньше величины 7.8 кДж, полученной ранее в ударных трубах. Проведены крупномасштабные опыты по снижению взрывных нагрузок при детонации газовых смесей в объеме 7 м³. Показано, что использование экрана толщиной 30 см из водно-механической пены с кратностью 20, с пропаном в качестве несущего газа, ослабляет амплитуду ударной волны на 15%. Получены новые данные о распространении пламени в смесях метана с воздухом с добавками CO₂ и N₂. Результаты показали, что в присутствии углекислого газа скорость распространения фронта пламени по метано-воздушной смеси снижается практически в два раза – с 2 до 1.3 м/с.

Полученные экспериментальные данные создают научную основу для разработки методик снижения и подавления взрывных нагрузок при утечках горючих газов в промышленности и при авариях на объектах атомной энергетики.

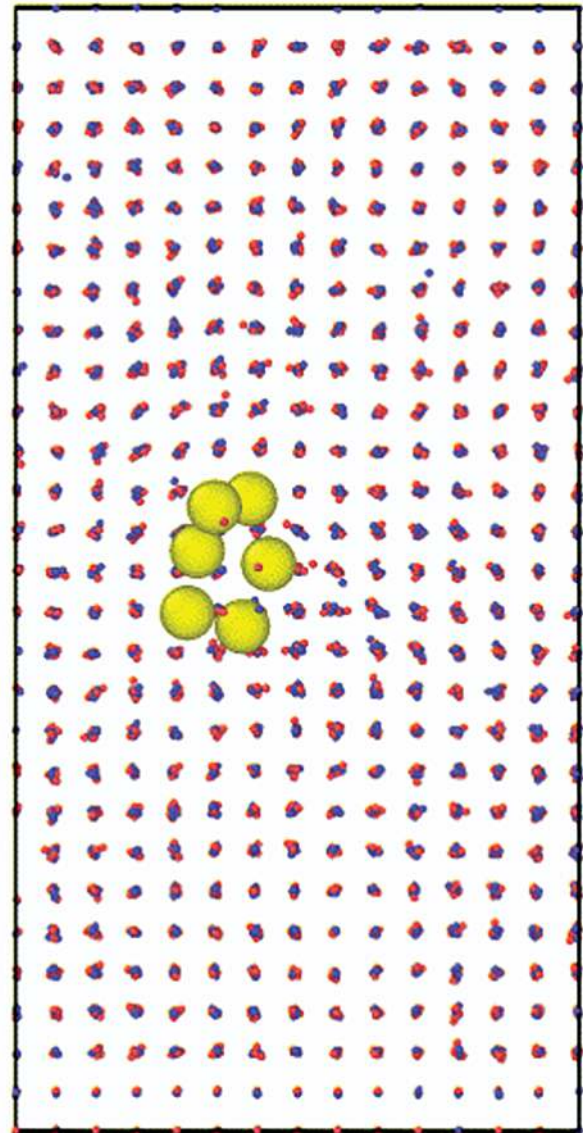


11.2. Суперкомпьютерное многомасштабное моделирование для безопасного и эффективного использования энергетических установок

Задачи обоснования безопасной и эффективной эксплуатации энергетических установок требуют разработки математических моделей и кодов, описывающих изменения свойств материалов со временем. Особенно актуальны подобные задачи в ядерной энергетике.

Математическое моделирование выхода продуктов деления из материала ядерного топлива требует разработки многомасштабных моделей, основанных на атомистическом описании кристаллической решетки и динамики дефектов в ней. Разнообразие вариантов механизмов диффузии и условий эксплуатации требует глубокого всестороннего анализа взаимосвязи структуры материала с проходящими в нем физико-химическими процессами.

Многомасштабные подходы к математическому описанию коррозионных процессов также крайне актуальны для безопасного и эффективного использования энергетических установок. Математическое описание процесса роста оксидной пленки на стальной поверхности тепловыделяющих элементов реактора требует сопряжения математических моделей электронной структуры сильно-коррелированных материалов с кинетическими моделями электрохимической диффузии и моделями течения теплоносителя в пристеночном слое.



Визуализация модели диффузии нанопузырька атомов ксенона в матрице нитрида урана



11.3. Распыл метастабильных перегретых жидкостей для теплозащиты энергоустановок, охлаждения и пожаротушения

Основной целью исследований является определение условий получения высокодисперсных (с контролируемым в микронном и субмикронном диапазоне размером капель) факелов распыла перегретой воды и других жидкостей для использования в различных новых технологиях. Такие распылы весьма перспективны для теплозащиты в высокофорсированных воздушно-реактивных двигателях, в энергетических газотурбинных и парогазотурбинных установках (ГТУ и ПГУ), в том числе в области микрогазотурбиностроения, а также в технологиях spray-cooling и пожаротушении.

В энергетических ПГУ и ГТУ высокодисперсный распыл воды при ее впрыске в компрессор радикально интенсифицирует испарение капель и приводит к относительно большому снижению температуры компримируемого воздуха, и, одновременно, к повышению эффективности и ресурса указанных энергоустановок. Весьма вероятно, что повышение эффективности энергоблоков мощных линейных ПГУ в США до 70%, указанное в недавних публикациях, достигнуто с применением таких впрысков воды в тракт газотурбинных установок.

Следует отметить, что при впрысках более мелких на порядок капель перегретой воды эрозия лопаток компрессоров ГТУ в сравнении с обычными распылами воды снижается на порядок и более. Последнее является решающим аргументом для применения именно таких впрысков воды при длительной работе энергоблоков. Следует отметить еще одно важное приложение, а именно, при выборе соответствующей модельной жидкости (и использовании методов обобщенного анализа) данные исследования могут быть применимы и к проблемам распыла топлив, широко изучаемым во всем мире.

Наличие в ОИВТ РАН уникальной экспериментальной установки «Распыл» (практически единственной на сегодня в мире по методикам обработки экспериментальных данных), позволяющей количественно и детально определять фракционный состав факела распыла в микронном и субмикронном диапазоне (на основе анализа индикатрис рассеяния лазерного излучения), позволяет продолжить экспериментальные исследования, превосходящие мировой уровень. При этом опыты сравнительно небольшой серии могут быть проведены в направлениях, определенных расчетно-теоретическим анализом уже проведенных опытов. К настоящему времени имеется определенный объем экспериментальных данных, не сопоставленных с разработанными в настоящее время моделями, что также является предметом дальнейших расчетно-теоретических оценок.

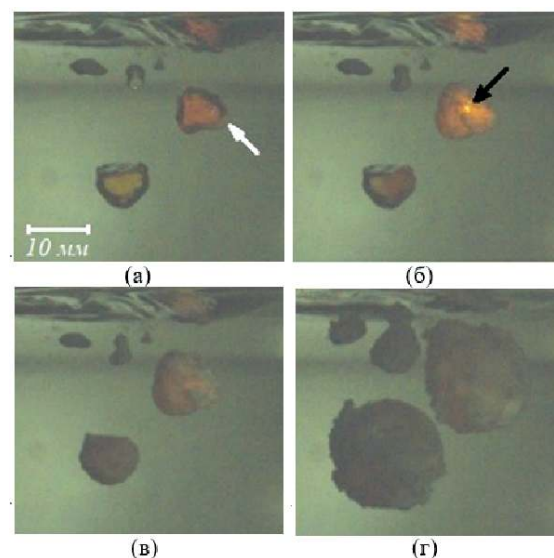
Одной из главных тем (и новой в научном плане) является успешно проводимое в настоящее время построение адекватной модели гетерогенного вскипания в диффузоре при выделении растворенного газа при падении давления.

Кроме того, может быть рассмотрена возможность применения полученных результатов к взрывному вскипанию в иных условиях, например, при сопоставлении разрабатываемой модели скорости гетерогенной нуклеации в метастабильной жидкости с экспериментом в условиях не резкого падения давления, как в диффузоре сопла при вскипании, а в условиях быстрого нагрева на высокотемпературной поверхности. Это позволит отказаться от модели, используемой для описания возникновения импульса давления на поверхности расплавленной металлической капли при ее контакте с водой, предполагающей гомогенное вскипание. При этом может быть получено адекватное расчетное описание экспериментальных результатов по исследованию триггера парового взрыва.

11.4. Высокоинтенсивные тепломассообменные процессы при паровых взрывах

Паровой взрыв – грозное по своим разрушительным последствиям и еще недостаточно изученное теплофизическое явление, которое наблюдается в условиях непосредственного контакта и интенсивного взаимодействия горячего расплава с холодной низкокипящей жидкостью, например, с водой. Паровые взрывы распространены в целлюлозной промышленности, наблюдались в металлургии, технологических операциях, связанных с производством и транспортировкой сжиженного газа, при извержении подводных вулканов. Применительно к проблемам безопасности атомной энергетики предполагается, что паровые взрывы могут иметь место при тяжелых авариях на АЭС вследствие попадания расплава материала активной зоны (кориума) в воду. Паровые взрывы характеризуются значительными по амплитуде (сотни – тысячи атмосфер) импульсами давления, которые обусловлены ударным ростом парообразования, вызванного резким увлечением площади контакта горячей и холодной жидкостей в условиях тонкодисперсной фрагментации кориума.

В последние десятилетия с целью предотвращения паровых взрывов во всем мире ведутся активные работы по созданию численных кодов, предназначенных для описания процессов тепломассообмена и фрагментации, сопутствующих этому явлению. Подобные программы основываются на ряде оригинальных физических гипотез, причем достоверность некоторых из них недостаточно обоснована вследствие отсутствия в литературе надежного экспериментального материала для их подтверждения. ОИВТ РАН является, по-видимому, единственной отечественной организацией, в которой проводятся систематические экспериментальные исследования по детальному изучению особенностей протекания паровых взрывов на маломасштабных установках с жидкометаллическими теплоносителями. Основное внимание при проведении работ сосредоточено на наиболее сложных и, соответственно, наименее изученных этапах парового взрыва – стадиях инициирования (триггеринга) и тонкой фрагментации капель горячего расплава. С использованием современной экспериментальной техники получен ряд результатов мирового уровня. В частности, впервые в лабораторных условиях воспроизведено и зафиксировано распространение парового взрыва между отдельными каплями расплава, а также на два крупных фрагмента распада струи вследствие самопроизвольного триггеринга процесса на мелкой капле-сателлите. Показаны возможность и механизм возникновения парового взрыва еще на начальном этапе первой стадии грубого дробления и перемешивания струи расплава. Подтвержден оригинальный способ получения аморфных материалов методом маломасштабного парового взрыва. Результаты проводимых в настоящее время исследований свидетельствуют о существенном различии в механизмах фрагментации и структуре осколков дробления разных материалов. Это обстоятельство не позволяет корректно использовать опытные данные, полученные на легкоплавких металлах (именно они применяются, в основном, при физическом моделировании отдельных стадий паровых взрывов) для анализа процессов, сопутствующих фрагментации кориума. Выявление причины этого различия – одна из основных задач дальнейших исследований.



Распространение парового взрыва между каплями расплава после самопроизвольного триггеринга. Время от кадра (а) – триггеринга на первой капле: (б) – 60 мкс; (в) – 100 мкс; (г) – 380 мкс. Белой стрелкой отмечено место начала триггеринга, черной стрелкой – кратковременная световая вспышка.



11.5. Энергобезопасность высоковольтного оборудования

Разработка токоограничителей большой мощности на основе ВТСП ленты второго поколения

Проблема ограничения токов короткого замыкания (КЗ) является одной из ключевых в области распределения, передачи и производства электроэнергии. Это связано, прежде всего, с тем, что в большинстве областей науки, техники и гражданского сектора растет уровень потребления электрической энергии при ее значительной нехватке. В результате, значительно повышается загруженность защитного оборудования, что приводит к КЗ. Одним из решений является замена перегруженного защитного оборудования на более мощные и быстродействующие устройства без снижения параметров резервирования и надежности. Поиск таких надежных устройств ведется с 70-х годов. Традиционная защита от токов КЗ в энергосистемах осуществляется с помощью электромеханических автоматических выключателей, которым обычно требуется более одного периода тока для размыкания цепи. Эта технология может разорвать цепь после КЗ, однако она не может предотвратить повреждений, если ток КЗ превышает пределы параметров подстанции. Когда автоматические выключатели не в состоянии прервать короткое замыкание, в дело вступают устройства другого типа – ограничители токов КЗ (ОТКЗ).

Благодаря резкому скачку в области создания нового класса материалов, способных пропускать высокие значения тока, стало возможным решение проблемы ограничения тока КЗ в сетях различного класса. Такими типами материалов являются высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленты второго поколения, представляющие из себя тонкий слой ВТСП проводника толщиной порядка 2 мкм, нанесенного через буферные слои (толщина несколько сотен нм) на металлическую ленту-подложку из сплава Хастеллой толщиной порядка 40–50 мкм. Для защиты от внешних воздействий сверхпроводник покрывается сверху тонким слоем серебра толщиной порядка 2 мкм. В качестве сверхпроводящего слоя в ВТСП-лентах 2-го поколения используется так называемый сверхпроводник 2-го рода, который обладает нелинейным сопротивлением, зависящим от соотношения между плотностью вводимого транспортного тока (J) и плотностью критического тока (J_c) и сильным скачком электрического сопротивления при переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние. Этот скачок сопротивления при сверхпроводящем переходе вызывает внезапное выделение тепла, которое приводит к переходу сверхпроводящих областей в нормальное состояние, из-за чего сопротивление увеличивается за несколько миллисекунд. Это поведение лежит в основе работы сверхпроводящего ОТКЗ.

На сегодняшний день на основе ВТСП лент 2-го поколения созданы ОТКЗ на разные классы напряжения. Наиболее современными проектами ОТКЗ в мире являются проект российской компании СуперОкс с 3-х фазным ОТКЗ на номинальное напряжение 220 кВ и ток 1200 А, а также ОТКЗ постоянного тока китайской компании NANAOMMC-MTDC на номинальное напряжение 360 кВ и ток 1200 А.

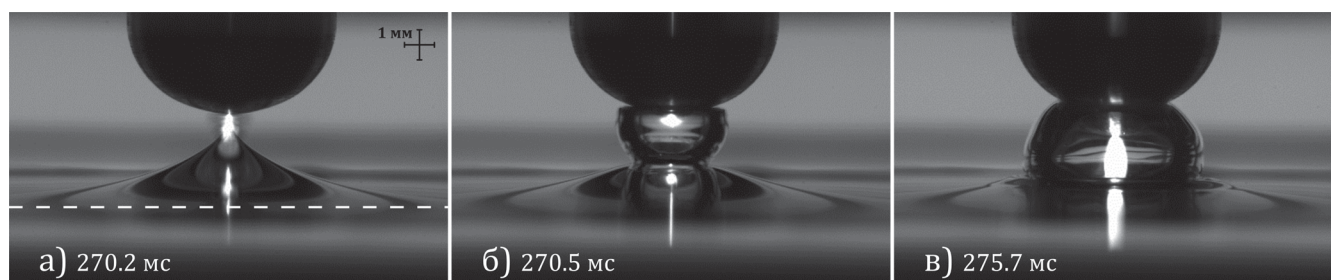
В ОИВТ РАН работы в этом направлении ведутся с 2010 года. Проведены расчеты различных токоограничивающих устройств индуктивного типа. Выполнено сравнение токоограничителей трансформаторного и автотрансформаторного типов. Предложен токоограничитель, состоящий из одной секционированной обмотки с выключателями. Другим направлением является разработка и создание модели численного расчета эффективности ограничения токов КЗ с помощью ВТСП-предохранителя в электрической сети, содержащей сверхпроводящую линию электропередач, включая расчеты для ВТСП-кабелей различного типа. Представлены основные преимущества и недостатки ВТСП-предохранителя в сравнении с ОТКЗ на основе ВТСП. Планируется дальнейшее исследование в этой области с целью создания универсального ОТКЗ с высокой эффективностью на любые классы напряжений.

Физико-технические проблемы пробоя жидких диэлектриков

Проблема повышения эффективности генерации и передачи электроэнергии при высоком классе напряжения делает актуальными задачи поиска и разработки новых электроизоляционных материалов. Они должны, в первую очередь, отвечать требованиям по химической устойчивости и электрической прочности. Электрическая прочность определяется в зависимости от вида напряжения: постоянного, переменного, импульсного или иного рода. Подобные исследования для энергетической отрасли широко ведутся ОИВТ РАН со времен его основания. Работы в данном направлении представлены как экспериментальными, так и расчетно-теоретическими исследованиями. Созданы экспериментальные стенды промышленных масштабов, разработаны оригинальные расчетные программы по моделированию электроразрывных процессов. Подробно исследованы импульсные электрические разряды различных длительностей.

Одним из актуальных направлений на сегодняшний день является развитие электрического разряда в «гибридном» режиме, когда на пробой влияет не только электрическая прочность самой среды, но и ее возникающее движение, и движение ее межфазной границы с газом или другой жидкостью. В такой ситуации даже высокая электрическая прочность материала может быть несущественной, а наступление электрического пробоя произойдет уже при низких напряжениях из-за взаимного движения соседствующих жидкостей. Примером такой ситуации может быть водный конденсат, скопившийся внутри корпуса высоковольтного маслонаполненного оборудования и образовавший систему двух жидкостей «вода-трансформаторное масло», поведение и электрическая прочность которой будет существенным образом зависеть от взаимного расположения и движения жидкостей.

В настоящий момент ведутся активные исследования в области пробоя жидких диэлектриков и их различных систем и комбинаций. Данные исследования объединяют в себе электрофизику, гидродинамику и физику плазмы. Проводятся экспериментальные и расчетно-теоретические работы с применением собственных вычислительных программ, а также осваиваются и адаптируются под конкретные задачи сторонние программы и комплексы. В частности, исследования, проведенные для системы «вода-трансформаторное масло», позволили установить характерные времена развития пробоя по такому «гибридному» механизму и напряжения, смоделировать данное явление и установить области действия сил, приводящих межфазную границу и жидкости в движение, а также их характерные значения. Возможность формирования неоднородных полей проводимости в таких системах ставит в данной области новые исследовательские задачи.



Развитие электрического пробоя в системе «вода-трансформаторное масло» при деформации межфазной границы. Вода находится ниже видимой границы, трансформаторное масло – над границей.

11.6. Триггерное электромагнитное воздействие на деформационные процессы в земной коре для инициирования сейсмических событий и снижения сейсмической опасности

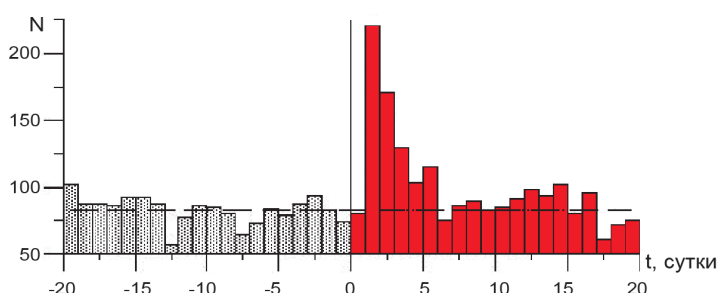


Импульсный МГД-генератор «Памир» на полигоне «ИВТАН-2» (Научная станция РАН, Киргизия, Северный Тянь-Шань) для электромагнитного мониторинга земной коры

Землетрясения представляют собой один из основных вызовов природы человечеству и являются одной из самых смертоносных природных катастроф. С 1900 года вследствие 2234 землетрясений на земном шаре погибло свыше 2 млн. 320 тыс. человек, при этом прямые и косвенные экономические потери, по оценкам ЮНЕСКО, ежегодно составляют миллиарды долларов. Около 20% территории Российской Федерации, где проживает почти 20 млн. человек, являются сейсмоопасными. При этом проблема краткосрочного прогноза землетрясений до сих пор не решена. В связи с этим весьма актуальными являются исследования поведения очага землетрясения и его отклик на внешние триггерные воздействия на заключительной стадии подготовки сейсмического события с целью разработки методов краткосрочного прогноза.

В последние тридцать лет в России ведутся активные пионерские исследования электромагнитного воздействия на очаговую зону землетрясения с целью безопасного выделения накопленных тектонических напряжений в виде большого количества слабых сейсмических толчков. В рамках этих работ в ОИВТ РАН получены принципиально новые экспериментальные результаты лабораторного физического моделирования поведения разлома земной коры при воздействии на него электрическим и электромагнитным полем. Кроме того, в ОИВТ РАН впервые в мире получены результаты по отклику сейсмичности на сильные вариации космической погоды, обусловленные солнечными вспышками и геомагнитными бурями, которые указывают на возможность использования электромагнитных триггерных эффектов в алгоритмах краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений.

Современная экспериментальная база ОИВТ РАН, программное обеспечение и накопленные базы данных по электромагнитной триггерной сейсмичности в различных регионах земного шара позволяют понять и изучить физический механизм данного явления, выявить зоны земного шара с наибольшей чувствительностью к природному электромагнитному воздействию и создать физически обоснованную модель инициирования землетрясения электромагнитным воздействием на его очаг. Такая модель позволит создать алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений, основанный на триггерных эффектах. Данный алгоритм в комбинации с существующими методами прогноза, основанными на предвестниках, позволит повысить вероятность предсказания сильного сейсмического удара, а с учетом наблюдаемой задержки отклика сейсмичности в несколько суток после электромагнитного воздействия на зону подготовки землетрясения принять соответствующие меры для снижения человеческих и экономических потерь после катастрофического землетрясения.



Отклик сейсмичности Северного Тянь-Шаня после подачи импульса тока от МГД-генератора «Памир» в земную кору.

N – суточное количество землетрясений, 0 на шкале времени – момент подачи импульса тока в земную кору



12. ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ И КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОДОВ

12. ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ И КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОДОВ

12.1. Энергоэффективное получение твердого биотоплива методом торрефикации



Комплекс для торрефикации гранулированной биомассы

Торрефикация – процесс нагрева биомассы без доступа кислорода (пиролиз), протекающий в температурном диапазоне 250-300°C и атмосферном давлении. В процессе торрефикации из биомассы извлекаются влага и летучие вещества, как продукты разложения длинных полимерных цепочек гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина из состава сырья. Это приводит к уменьшению массы сырья на 20-30 %. Большая потеря массы по сравнению с потерей энергии приводит к увеличению удельной теплоты сгорания конечного продукта по сравнению с исходным сырьем. Основными преимуществами торрефикации являются: увеличение теплоты сгорания (до 40 %); снижение предела гигроскопичности (материал не набирает влагу из атмосферы); увеличение насыпной плотности; обеззараживание материала (температура процесса позволяет убить всю патогенную микрофлору); более низкая способность к самовоспламенению. В результате торрефикации получают твердое топливо – торрефикат – с теплотой сгорания до 25 МДж/кг, близкое по характеристикам к углям, сыпучее, прочное, не пылящее при перевозке, гидрофобное. Оно может быть раздроблено в пыль на том же оборудовании, которое применяют в котельных для дробления угля. Высокая плотность при

высокой теплотворной способности обуславливает экономическую целесообразность доставки торрефиката на большие расстояния. Его можно сжигать вместе с каменным углем. В качестве сырья для торрефикации может быть использована различная биомасса: древесные отходы, сельскохозяйственные отходы (солома, шелуха подсолнечника, и т.д.), отходы животноводства и птицеводства (навоз, пометно-подстилочная масса). Существуют исследования, показывающие, что торрефицированный куриный помет может быть использован в качестве удобрения.

Отработанная в ОИВТ РАН концепция использования газопоршневой электростанции в качестве «поставщика» инертной среды для осуществления процесса торрефикации показала высокую эффективность организации работы комплекса, функционирующего в режиме тригенерации – с производством тепловой и электрической энергии, а также твердого углеводородного углерод-нейтрального топлива. В настоящее время на базе ОИВТ РАН создан экспериментальный образец производительностью до 100 кг/ч по исходному сырью (древесные пеллеты). В перспективе возможна доработка образца с точки зрения автоматизации и оптимизации процесса.



12.2. Утилизация CO₂ с помощью микроводорослей

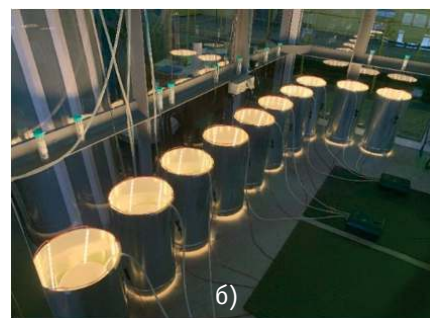
В ОИВТ РАН совместно с ПАО «Лукойл» разработана экспериментальная установка для исследования культивирования микроводорослей в газовых смесях заданного и контролируемого состава. Данная установка, в частности, позволяет напрямую определять эффективность улавливания CO₂ микроводорослями путем измерения концентрации CO₂ в газовом пространстве герметичной камеры, внутри которой располагаются фотобиореакторы. Таким образом была определена эффективность поглощения CO₂ фотобиореактором объемом 90 л с микроводорослями.

Изучена возможность культивирования микроводорослей при повышенных концентрациях CO₂ (3, 6 и 9 об.%). С использованием тех же штаммов микроводорослей исследовано влияние интенсивности света на скорость роста биомассы и содержание в ней белков, липидов и углеводов. Определены характеристики роста микроводорослей в реальных дымовых газах.

Культивирование микроводорослей проводится с использованием экспериментальной установки, включающей герметичную газовую камеру, фотобиореакторы и газовое оборудование. Могут использоваться фотобиореакторы объемом от 4 до 500 л со светодиодной системой освещения.

Фотобиореакторы располагаются внутри замкнутого герметичного объема (газовой камеры), куда подаются CO₂ или дымовые газы. Есть возможность подачи в камеру других газов. Газовая камера оборудована нагревателем и кондиционером для поддержания заданной температуры. Газовое оборудование включает CO₂ рампу и двигатель внутреннего сгорания (на газообразном углеводородном топливе).

Температура внутри газовой камеры и в фотобиореакторах, а также состав газа внутри газовой камеры регулируются и контролируются с помощью автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) экспериментальной установки. С помощью АСКУ в реальном времени осуществляется контроль концентрации следующих газов: диоксид углерода, кислород, монооксид углерода, аммиак, метан, диоксид серы, диоксид азота. По скорости уменьшения концентрации CO₂ в газовой камере определяется эффективность биофиксации CO₂ микроводорослями.



Экспериментальная установка для культивирования микроводорослей в атмосфере газов контролируемого состава. а) газовая камера с размещенными в ней фотобиореакторами; б) цилиндрические фотобиореакторы со светодиодной системой освещения; в) газовое оборудование для подачи газов в газовую камеру с размещенными в ней фотобиореакторами.

12.3. Получение биотоплива из микроводорослей

За последние несколько веков произошло бурное увеличение численности мирового населения и многократный рост производственных мощностей, что привело к значительному увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере Земли. Культивирование микроводорослей в газовой среде CO_2 или дымовых газов является многообещающим методом утилизации парниковых газов. Ресурсы ископаемого топлива не бесконечны, поэтому необходимо развивать альтернативные методы получения энергии. Одним из них является получение биотоплива из микроводорослей. Данный метод позволяет внести вклад в решение двух вышеперечисленных актуальных задач.

Методов получения биотоплива из микроводорослей много. В предлагаемой технологии получение биотоплива осуществляется многообещающим методом гидротермального сжижения (ГТС). В данном методе конверсия биомассы микроводорослей в биотопливо осуществляется при $250-370^\circ\text{C}$, а физико-химические характеристики биотоплива сравнимы с ископаемой нефтью. Также при сравнении различных методов получения биотоплива из микроводорослей метод ГТС примечателен высокой энергоэффективностью; возможностью переработки как всей биомассы микроводорослей, так и ее частей; отсутствием необходимости сушки микроводорослей.

К настоящему времени в ОИВТ РАН создан ряд лабораторных установок по ГТС микроводорослей, которые были испытаны в широком диапазоне основных параметров. Последняя из них примечательна следующим: произведена из общедоступных материалов, что упрощает масштабирование производства установок; имеет низкую стоимость создания (в 10 раз и более дешевле ряда аналогов); долговечна (значительно превосходит ряд аналогов по продолжительности бесперебойной работы).





13.
**ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

13. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

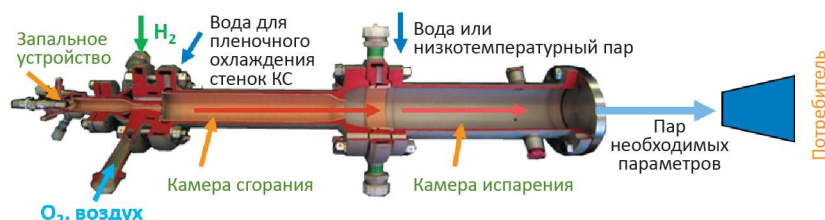
13.1. Водород-кислородная парогенерация

В качестве одной из приоритетных целей развития мировой экономики рассматривается замедление процесса глобального потепления, а также развитие отраслей экономики при низком уровне выбросов парниковых газов (низкоуглеродная экономика). Водород может быть использован в качестве универсального вторичного энергоносителя для накопления, хранения и доставки энергии и решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат.

Начиная с 1975 г., когда ИВТАН стал базовым институтом Рабочей группы АН СССР по водородной энергетике, в ОИВТ РАН накоплен многолетний опыт развития водородных технологий. Сегодня основные направления исследований ОИВТ РАН в этом направлении включают: производство водорода с использованием электролиза воды, в том числе за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ); биологическое производство водорода с использованием метаболизма различных микроорганизмов; металлгидридные системы безопасного хранения водорода в твердофазном связанном состоянии; высокоэффективную металлгидридную очистку водорода, в том числе выделение водорода из энергетических смесей с метаном (природным газом); термосорбционную компрессию водорода.

Создана линейка надежных металлгидридных реакторов для хранения водорода емкостью до $15 \text{ м}^3 \text{ H}_2$, а также экспериментальные системы очистки водорода, способные эффективно его выделять из смесей с низким содержанием H_2 (менее 10%).

Разработаны и испытаны экспериментальные образцы водородно-кислородных парогенераторов тепловой мощностью от 100 кВт до 25 МВт, предназначенные для получения перегретого пара с температурой 800–1400 К. Огневые испытания продемонстрировали надежность конструкции, которая не разрушается даже при отказе системы водяного охлаждения.



Конструкция водородно-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт



Водородно-кислородная энергоустановка
5 МВт. Время запуска: 7 сек.
Удельная мощность: до 500 кВт/кг



Испытания в качестве автономного источника
энергоснабжения для системы пожаротушения

13.2. Металлогидридные системы очистки, хранения и компрессии водорода

Металлогидриды образуются при соединении водорода с металлами, электроотрицательность которых сопоставима с водородом, включая переходные металлы, лантаноиды и актиноиды. Они позволяют селективно поглощать и безопасно хранить водород в твердом связанном состоянии при температурах и давлениях, близких к нормальным условиям, а также эффективно сжимать и очищать водород.

В ОИВТ РАН создана линейка надежных металлогидридных реакторов для хранения водорода емкостью до $15 \text{ м}^3 \text{ H}_2$, работающих при давлениях ниже 1 МПа, разработаны методы расчета и конструирования высокоэффективных металлогидридных устройств, обеспечивающих отличные динамические характеристики при зарядке и разрядке.

Важной научно-технической задачей является развитие технологий компрессии водорода. Сжатие водорода до 350–750 бар требует до 6.4 кВтч/кг, что составляет порядка 20% от теплоты сгорания водорода (33.3 кВтч/кг). Поршневые компрессоры используют механическую энергию для сжатия водорода, и их применение приводит к существенным затратам, кроме того, современные водородные компрессоры высокого давления практически недоступны на российском рынке. При этом затраты на реакцию гидрирования многих интерметаллических соединений лежат в диапазоне 4–5 кВтч/кг H_2 , и энергия может быть подведена к металлогидридному компрессору в виде низкопотенциального тепла.

Одним из направлений использования металлогидридного компрессора может стать повышение экономической эффективности алюмоводной технологии получения водорода с низким углеродным следом. Получаемое в технологии гидротермального окисления алюминия большое количество низкопотенциального тепла применяется для термосорбционной компрессии водорода до рабочих параметров (40–70 МПа). Это позволяет более чем на порядок уменьшить эксплуатационные расходы на сжатие водорода по сравнению с традиционными механическими компрессорами и одновременно повысить эффективность гидротермального окисления алюминия.

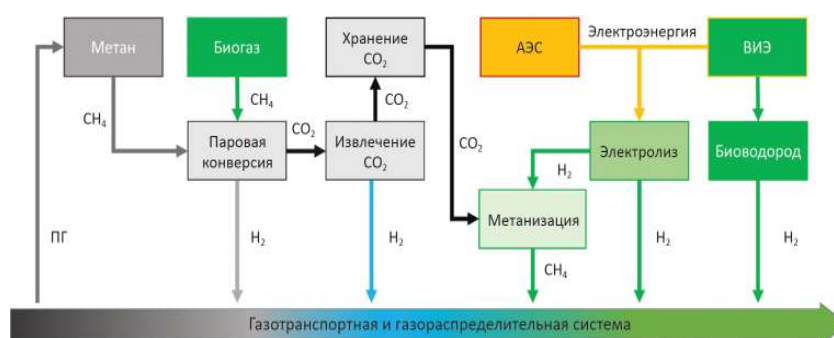
Современные коммерческие технологии очистки водорода слабо приспособлены для извлечения водорода из бедных (менее 10–20% H_2) смесей. Металлогидриды прекрасно подходят для безопасного и длительного хранения водорода для энергоустановок киловаттного класса, очистки и компрессии водорода. КПД металлогидридной очистки имеет максимум в области малых содержания

водорода (5–20%), в чем состоит преимущество металлогидридного метода перед традиционными методами очистки водорода. Металлогидридные системы могут быть использованы для извлечения водорода, подмешанного в трубопроводы природного газа, и биоводорода. Существует возможность получения биоводорода при повышенных гидростатических давлениях.

В ОИВТ РАН разработаны методы исследований, подготовлено экспериментальное оборудование, способное эффективно выделять H_2 из смесей с его низким содержанием (менее 10%), проведены тестовые исследования по металлогидридной очистке водорода с использованием электролиза воды, в том числе за счет ВИЭ, и получению водорода биологическим путем с использованием метаболизма различных микроорганизмов.



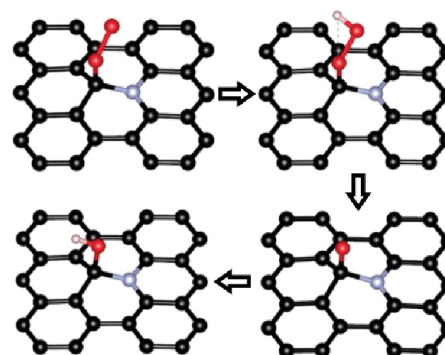
Водородные системы бесперебойного энергоснабжения мощностью свыше 1 кВт





13.4. Компьютерный дизайн новых электрокатализаторов на основе графенов

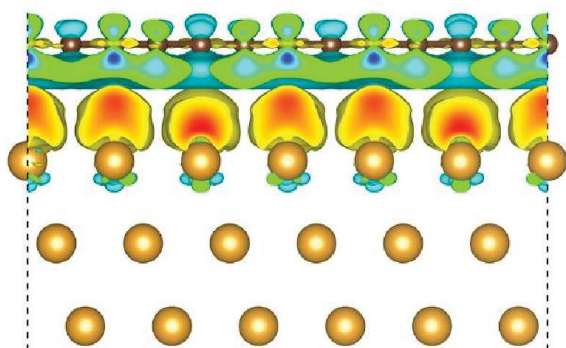
Электрокатализаторы – вещества, ускоряющие электрохимические реакции. Различные химические источники тока и электрохимические устройства требуют использования электрокатализаторов для повышения эффективности. К ним относятся водородные топливные элементы, электролизеры, металл-воздушные батареи, редокс-батареи. Традиционными и наиболее эффективными электрокатализаторами являются благородные металлы. Однако, в силу дороговизны и проблем деградации в процессе эксплуатации, существует большая потребность в разработке новых эффективных, более дешевых и долговечных электрокатализаторов. Перспективными в данном направлении являются графеноподобные материалы. Уникальность графена состоит в практически безграничном наборе возможных химических модификаций (аналогично органическим веществам), что позволяет изменять физико-химические свойства графена в широких пределах.



Моделирование электрохимической реакции восстановления кислорода на поверхности графена, допированного азотом

Большое разнообразие модификаций графена делает экспериментальный поиск перебором оптимальной каталитической системы малоэффективным. Это создает предпосылки для разработки теоретических подходов поиска оптимального дизайна новых электрокатализаторов. В ОИВТ РАН за последние 5 лет на основе квантового суперкомпьютерного моделирования разработаны модели для предсказания каталитической активности двумерных материалов в приложении к широкому классу электрохимических реакций. Их особенностью и уникальностью является многофакторность и реалистичность описания процессов. С помощью разработанных подходов получены уникальные

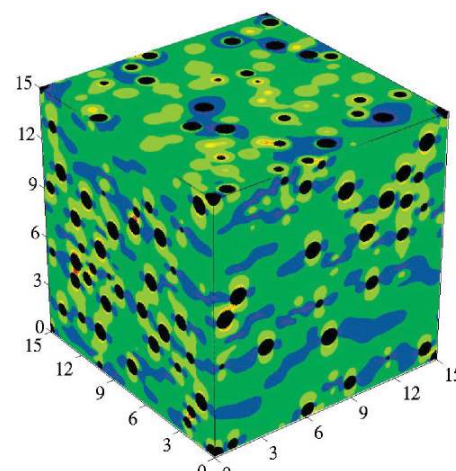
данные, описывающие электрокаталитическую активность гетероатомов, а также точечных и протяженных дефектов в графене. Получены новые данные о возможности управления кинетикой электрохимических реакций на поверхности графена за счет изменения типа металлической подложки под графеном. На основе этих результатов в настоящий момент ведется разработка электрокатализаторов со структурой ядро-оболочка, где в качестве ядра используется наночастица из неблагородных металлов и сплавов, в качестве оболочки рассматривается графеновое покрытие.



Перераспределение заряда между графеном и металлической подложкой

13.5. Разработка нанокompозитных мембран для суперконденсаторов

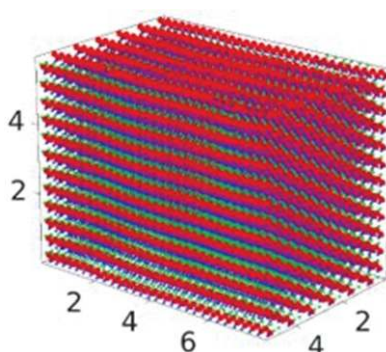
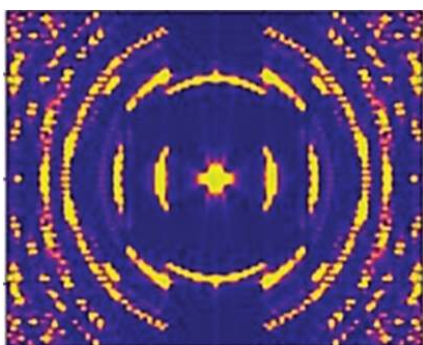
Современные портативные электронные устройства, гибкие дисплеи и носимые мультимедийные системы требуют гибких энергоемких решений для хранения энергии. Исследования и разработки гибких полимерных мембран для суперконденсаторов требуют глубокого понимания фундаментальных физических процессов, связанных с увеличением плотности электрического поля в материале. Это во многом зависит как от инновационных материалов с высокими электрическими и механическими свойствами для мембраны, так и от морфологии распределения включений, внедренных в ее структуру. Эти включения, усиленные дипольными группами, под воздействием внешних полей вызывают поляризацию мембраны, что превращает их в гибридные нанокompозитные накопители. Такие нанокompозиты могут использоваться не только в суперконденсаторах, но и в качестве искусственных мышц для человека или роботов благодаря механическим деформациям, вызванным управляемой электрострикцией.



Распределение электрического поля в нанокompозите

ОИВТ РАН совместно с факультетом физики Дюссельдорфского университета (Германия) и отделением физики Университета Кейз в Кливленде (США) ведет теоретические и экспериментальные исследования новых нанокompозитов на основе различных модификаций поливинилиденфторида и дипольных полимеров. Впервые было показано, что накопление заряда в суперконденсаторе, помимо проницаемости, дипольных свойств и морфологии распределения включений, значительно зависит от молекулярной ориентации и дипольных корреляций в мембране. Атомистические симуляции подтвердили, что бета-фаза с увеличенным межмолекулярным расстоянием в полимерной мембране вносит более 50% вклада в диэлектрическую проницаемость нанокompозита.

В настоящее время научные усилия сотрудников ОИВТ РАН сосредоточены на оптимизации нанокompозита с точки зрения морфологии распределения включений и молекулярной структуры мембраны для достижения максимальной емкости. ОИВТ РАН является пионером в создании симуляционной модели для деконволюции рентгенограмм нанокompозитов, что позволяет определить молекулярную ориентацию кристаллов полимера и распределение аморфной фазы вокруг дипольных включений. Эти данные необходимы для управления процессом синтеза нанокompозита и построения более точных аналитических моделей.



Симулированная (слева) рентгенограмма нанокompозитной мембраны в бета фазе (справа)



13.6. Электровихревые течения проводящих сред

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают в проводящих средах – жидких металлах, электролитах, плазме. При прохождении через такую среду неоднородного электрического тока, в результате его взаимодействия с магнитным полем (как собственным, так и внешним) возникает сила, приводящая среду в движение. Подобные явления имеют большое значение в различных технологических и природных процессах. Прежде всего это различные электрометаллургические процессы: электродуговой, электрошлаковый, индукционный переплав металлов, а также сварка. К основным задачам электрометаллургии, где необходимо исследовать ЭВТ, относится получение особо чистых металлов (в частности титана), увеличение эффективности перемешивания жидкой стали, повышение качества металла при помощи воздействия импульсного поля.

Интересным новым направлением является разработка жидкометаллических батарей (ЖМБ). По сравнению с традиционными аккумуляторами ЖМБ имеют гораздо больший срок службы и хорошо подходят в качестве стационарных накопителей энергии. При этом, если до недавнего времени были разработаны батареи, требующие относительно высоких рабочих температур (250–400°C), то в последнее время появились разработки, позволяющие эксплуатировать батареи при комнатных температурах. В природе ЭВТ имеют место в процессах, связанных с атмосферным электричеством, например, в каналах молний, также существуют электромагнитные модели торнадо.

В ОИВТ РАН ведутся экспериментальные и расчетно-аналитические работы по исследованию ЭВТ. В частности, был решен вопрос о спонтанной закрутке течения, волновавший научную общественность с 80-х годов. Экспериментально и расчетным путем было установлено, что именно влияние магнитного поля Земли является важнейшим фактором закрутки и вихреобразования. Другой важный результат относится к возможности подавления ЭВТ внешним магнитным полем. При этом действует несколько механизмов: при умеренных значениях поля действует гидродинамический механизм, связанный с взаимодействием разнонаправленных вихрей, а при сильных полях подавление течения вызывается индуцированными токами. Также интересным направлением является исследование явлений, связанных с деформацией и устойчивостью поверхности жидкости под влиянием электромагнитной силы. Исследования гидродинамики ЭВТ проводятся при помощи уникального, разработанного в ОИВТ РАН прибора – волоконно-оптического преобразователя скорости. Прибор является единственным в мире, позволяющим измерять как средние, так и пульсационные значения скорости в чистых жидких металлах.

В настоящее время перспективными являются следующие направления: исследование устойчивости многослойных проводящих жидкостей (применительно к созданию жидкометаллических батарей); управление вихреобразованием в ЭВТ при помощи внешних магнитных полей (постоянных и импульсных); экспериментальное исследование турбулентных характеристик течения. Одно из последних направлений исследований – изучение процессов нагрева и испарения металла в контексте создания космического двигателя, использующего космический мусор в качестве рабочего тела.

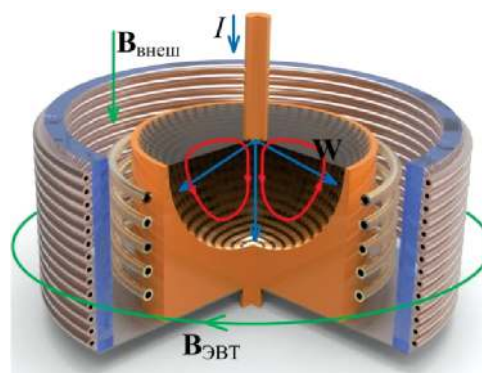
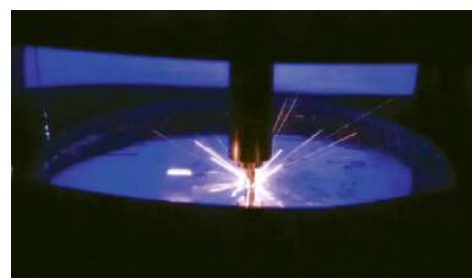


Схема экспериментальной установки. Полусферическая емкость, заполненная жидким металлом с подведенным электродом и окруженная соленоидом для создания внешнего магнитного поля



Электрический разряд над жидкометаллической поверхностью

14. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ И НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



14. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ И НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

14.1. Геотермальная энергетика

Экономический потенциал геотермальных ресурсов России составляет 115 млн у.т./год, использование которых может составить до 10 % в общем балансе энергоснабжения страны. Основные ресурсы сосредоточены в трех крупных регионах – Западно-Сибирском, Предкавказском и Дальневосточном. В этих же регионах сосредоточено практически и все геотермальное производство России. Разработка новых комплексных технологических решений приведет к повышению эффективности использования геотермальных энергоресурсов и введению в эксплуатацию многих простаивающих гидротермальных месторождений. В ОИВТ РАН в течение многих лет проводятся исследования по разработке технологических решений эффективного освоения гидрогеотермальных ресурсов разного энергетического потенциала. Проведены многолетние экспедиционные исследования по оценке ресурсов и состояния добычи термальных вод Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ), изучению режимных гидрогеолого-геотермических и термогидродинамических параметров геотермальных скважин. Обследовано более 300 артезианских скважин на низкопотенциальные воды, изучен химический состав этих вод и установлены загрязнители. Разработаны технологии очистки низкопотенциальных вод с доведением их качества до кондиций питьевой воды. Разработаны технологии комплексного освоения низкопотенциальных вод на основе теплонасосных технологий. Разработаны двухконтурные технологии освоения геотермальных ресурсов разного энергетического потенциала со сбросом на поверхности или закачкой обратно в пласт отработанной термальной воды с максимальным использованием ресурсного потенциала скважины (тепло, растворенные газ и химические компоненты, вода). Предложена концепция эффективного освоения гидрогеотермальных ресурсов среднего энергетического потенциала для выработки электроэнергии на основе геотермально-парогазовой технологии. Проведены исследования по комплексному освоению высокотемпературных гидрогеотермальных рассолов с получением электроэнергии в бинарной геотермальной электростанции (ГеоЭС) и извлечением из охлажденного рассола растворенных химических компонентов.

В настоящее время сотрудниками ОИВТ РАН в г. Махачкале проводятся исследования по оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов и разработке технологических решений освоения геотермальной и других видов возобновляемой энергии. Изучаются пути повышения эффективности использования геотермальных вод с утилизацией попутного метана и защитой оборудования от солеотложения. Разрабатываются технологии использования гидрогеотермальных ресурсов для интенсификации добычи нефти. Ведутся исследования по определению оптимального давления в паросиловом контуре бинарной ГеоЭС со сверхкритическим термодинамическим циклом. Проводятся исследования по разработке технологии извлечения тепла из высокотемпературных рассолов глубокого залегания без их подъема на поверхность. Продолжаются теоретические исследования про-

цессов фильтрации и тепломассопереноса в глубоководных горизонтах по комплексу фильтрационных, емкостных и теплофизических параметров при работе подземных циркуляционных систем, оценке основных геологических показателей, выбору основных технологических решений и оценке экономической эффективности.

Масштабное освоение гидрогеотермальных ресурсов ВПАБ с использованием комплексных энергетических технологий позволит решить проблемы энергоснабжения региона и значительно улучшить эколого-экономическую ситуацию и социальные условия жизни значительного количества населения.



Тепловой насос ТН-300

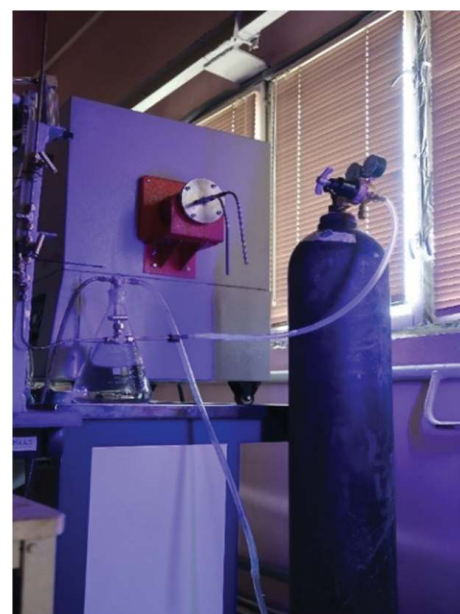
14.2. Разработка методов термического разложения газообразных углеводородов для реализации углерод-нейтральных энерготехнологических циклов

В последние годы одним из основных трендов в энергетике, все более определяющих ее новый технологический уклад, становится стремление к существенно более высоким стандартам экологической безопасности. Поэтому представляется целесообразным поиск таких вариантов использования традиционных углеводородных топлив, которые позволят кардинально снизить выбросы парниковых газов в атмосферу. Пиролиз природного газа является одним из способов получения водорода и технического углерода без выбросов углекислого газа в атмосферу и имеет следующее уравнение реакции: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} \downarrow + 2\text{H}_2 \uparrow$.

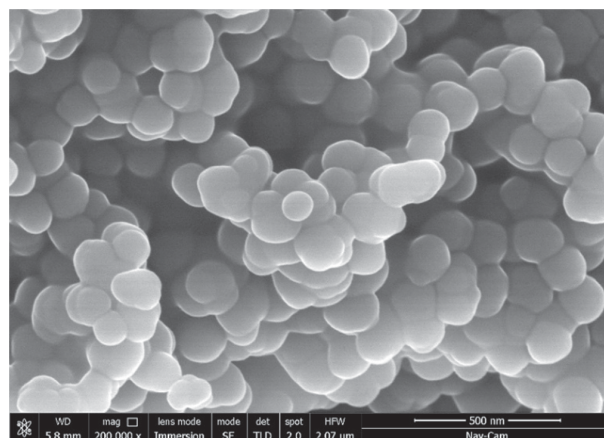
Интерес к термическому разложению природного газа растет, что связано с возможностью производства с помощью данного способа как CO_2 -нейтральной полезной энергии и водорода, так и технического углерода с высокой добавленной стоимостью. Термическое разложение газа на технический углерод и водород может производиться не только с использованием метана, но и попутного нефтяного газа, который на сегодняшний день при добыче нефти в основном сжигается, загрязняя атмосферу и растрачивая природный ресурс. Основной сложностью при реализации процесса термического разложения является необходимость поддержания высоких температур (выше 1100 °С без использования катализаторов). Поэтому для реализации данного процесса сегодня предлагаются либо плазмохимические способы, либо гетерогенные катализаторы, понижающие температуру разложения. Однако до сих пор данные разработки не вышли из масштаба лабораторных установок.

Для изучения процесса пиролиза и разработки технических решений проблемы термического разложения газообразных углеводородов в ОИВТ РАН была создана экспериментальная установка пиролиза с производительностью до 1 $\text{м}^3/\text{ч}$. Основным элементом установки является трубчатая печь с корундовой трубой диаметром 50 мм. Исследования процесса пиролиза проводили на метане и синтетической газовой смеси, состав которой эквивалентен составу попутного нефтяного газа (ПНГ).

В результате проведенной серии экспериментов были определены количественные значения выхода водорода и степени разложения метана и ПНГ в реакторе пиролиза на трубчатой печи при температурах в интервале от 1000 до 1400 °С и различных расходах (до 1 $\text{м}^3/\text{час}$). Максимальное содержание водорода в продуктах пиролиза составило 78.18% при 1400 °С. Полученный при этом углерод может быть использован в промышленности: для производства резинотехнических изделий, красок, литий-ионных батарей, композитных материалов, графитовых электродов электродуговых печей и др.



Экспериментальная установка
пиролиза



Сажа, образуемая при пиролизе метана, ПНГ



14.3. Комбинированные солнечные энергетические системы



Солнечная комбинированная установка

Приоритетными направлениями развития возобновляемой энергетики являются исследования и разработки, нацеленные на использование солнечной энергии. В результате этих исследований разрабатываются энергоустановки, позволяющие эффективно преобразовывать солнечную энергию в электрическую или тепловую.

Плоские коллекторы являются основным элементом систем солнечного теплоснабжения. В настоящее время по всему миру разработано и производится большое разнообразие коллекторов. Они различаются как конструкцией, так и используемыми материалами, отличаются тепловой и экономической эффективностью.

Необходимо максимально повысить тепловую эффективность коллектора при минимальных затратах на его производство за счет применения полимерных/селективных материалов, а также повышения их дневной производительности. Количество солнечной суммарной радиации, поступающей на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам, в 1.5 раза больше, чем на фиксированную поверхность. Обеспечение слежения коллектора за перемещением солнца в течение светового дня приводит к увеличению дневной тепловой производительности коллектора до 30%.

ОИВТ РАН ставит следующие задачи: выбор дешевых современных конструкционных полимерных материалов без ущерба для эффективности; разработку оптимальной формы солнечного коллектора, позволяющей без больших затрат обеспечивать его слежение за Солнцем; разработку недорогого селективного покрытия, которое может повысить тепловую эффективность до уровня лучших мировых аналогов. Селективное покрытие должно иметь следующие свойства: большой коэффициент поглощения и небольшой коэффициент излучения; надежность и долговечность покрытия; простоту, безопасность и низкую стоимость процесса нанесения. Разработанное селективное покрытие приведет к значительному повышению тепловой эффективности солнечных плоских коллекторов и в перспективе может быть широко использовано в процессе их серийного производства.

Солнечные установки находят применение не только в системах отопления и горячего водоснабжения, но и в системах для сушки практически любого влажного исходного материала, подогрева воды в бассейнах и прудах, опреснения и дистилляции воды, подогрева реакторов в биогазовых установках и др. Особенно востребованы комбинированные гелиотермальные системы с использованием тепловых аккумуляторов, что позволяет эффективно решать проблему нерегулярного поступления солнечной энергии.

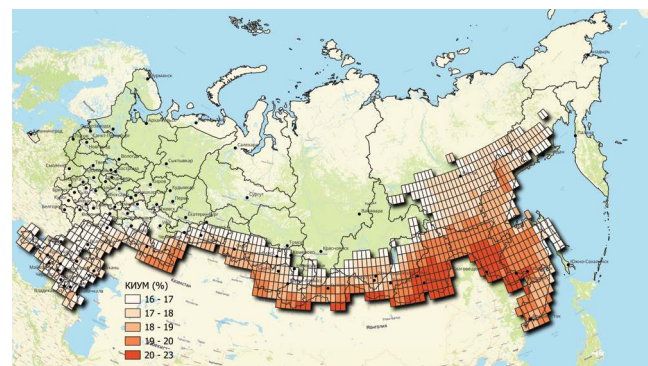
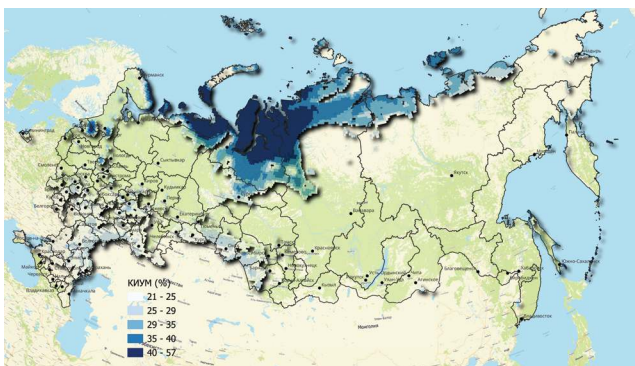
В ОИВТ РАН проводятся исследования, посвященные разработке теплоаккумулирующих материалов для солнечных энергетических систем и гелиотермальных установок с применением различного вида тепловых аккумуляторов с их натурными испытаниями. За последние годы были разработаны принципиально новые гелиотермальные системы с использованием теплового аккумулятора. Созданы экспериментальные образцы солнечного воздухонагревателя с фазопереходным тепловым аккумулятором и на его базе солнечной сушильной и биогазовой установки. Разрабатывается опытный образец солнечной биогазовой установки с теплоемкостным тепловым аккумулятором. Продолжаются расчетно-теоретические исследования по разработке энергоэффективных схем гелиотермальных установок с тепловыми аккумуляторами и методик расчета параметров их основных узлов.

14.4. Прогнозирование и оценка ресурсов солнечной и ветровой энергии на территории РФ

Случайный характер выработки энергии солнечными (СЭС) и ветровыми (ВЭС) электростанциями является существенным фактором, который необходимо учитывать при их проектировании. Для обоих ВИЭ характерны часовые, суточные и сезонные неоднородности выдачи мощности, которые необходимо компенсировать. Рост доли возобновляемой генерации в составе энергосистем усложняет поддержание в них баланса мощности и энергии. Географическая привязка данных о ресурсах солнечной и ветровой энергии позволяет выбирать оптимальные места расположения СЭС и ВЭС и реализовывать системы поддержки решений по пространственному планированию энергоснабжения с использованием ВИЭ. Важным инструментом разработки подходов к использованию СЭС и ВЭС в энергетике страны являются статистические методы оценки величины и регулярности генерации ими энергии, а также повторяемости генерации в часы пикового потребления электроэнергии. Адекватное резервирование мощностей позволяет избежать в эти часы серьезных проблем в энергосистеме. Требуемая системным оператором определенность выдачи СЭС и ВЭС электрической мощности в заданное время делает актуальной разработку методов краткосрочного прогнозирования производительности этих станций, ошибки в прогнозировании могут приводить к значительным финансовым потерям.

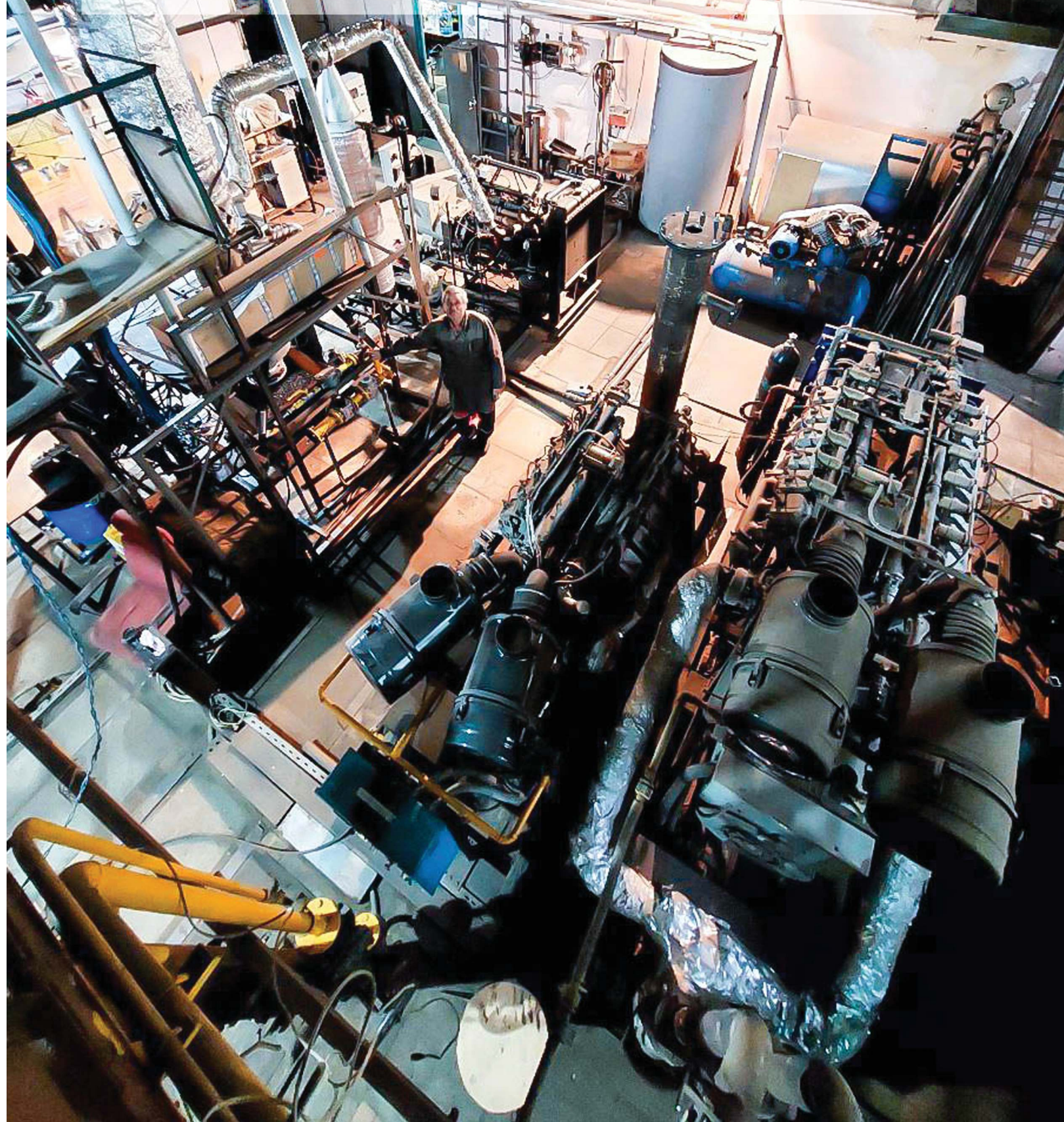


В рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» выполнены оценки технических потенциалов солнечной и ветровой энергии с детализацией по субъектам РФ, объединенным и технологически изолированным территориальным энергосистемам. В сотрудничестве с НИЛ ВИЭ МГУ им. М.В. Ломоносова создана и поддерживается геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России». Она представляет собой комплекс впервые построенных интерактивных карт и баз данных по потенциалам ВИЭ на территории России с высоким уровнем временного (1 час) и пространственного разрешения (до 0.3 град. по широте и долготе) и содержит расчетные инструменты, позволяющие для заданной географической точки оценить коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ) и выработку электрической энергии СЭС и ВЭС. С использованием многолетних рядов (более 20 лет) часовых последовательностей поступления солнечной энергии на поверхность земли и скоростей ветра на различных высотах разрабатываются методы статистического анализа, долгосрочного и краткосрочного прогноза выработки энергии на сутки вперед, позволяющие путем использования высокоуровневых нейросетевых инструментов современного прогнозирования повторяемости выработки электроэнергии СЭС и ВЭС, в том числе перерывов в генерации, уменьшить финансовые потери эксплуатирующих их компаний из-за несоблюдения диспетчерского графика.



Прогнозируемые значения КИУМ ВЭС (слева) и СЭС (справа) в перспективных районах их строительства на территории России

15. ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ В ОИВТ РАН





15. ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ В ОИВТ РАН

15.1. Ресурсосбережение и переработка минерального и техногенного сырья

Технология производства карбоната лития из природного литиевого минерала



В современном, постоянно развивающемся мире трудно переоценить роль лития как компонента высокотехнологичных продуктов. Помимо традиционных сфер использования лития с середины XX-го века (электролиз алюминия, производство стекла и керамики, органический синтез, смазочные материалы и др.), наиболее динамично развивающейся областью применения лития является производство накопителей энергии – перезаряжаемых литий-ионных батарей, широко применяемых в портативной электронике и электрическом транспорте. Литий-ионные аккумуляторы становятся основным сегментом использования лития, превысив 60% от его мирового потребления в 2020 году. В этой связи растущий интерес к добыче лития подчеркивает необходимость для России решения технических, экономических и экологических проблем, связанных с этой областью.

К настоящему времени в ОИВТ РАН выполнен ряд лабораторных экспериментов по практической реализации ацетатного способа извлечения лития из сподуменовой руды. Лабораторная методика позволяет достичь 96% степени извлечения лития с чистотой карбоната лития 96.4%. Отрабатывается способ получения гидроксида лития (являющегося прекурсором для производства литий-ионных накопителей) из карбоната лития. Разрабатываются технологические схемы и реактор непрерывного действия для планируемых пилотных испытаний.



Технология производства фторида лития из природного литиевого минерала



Литий является важным стратегическим ресурсом, определяющим научно-технический прогресс и экономическую безопасность страны. Несбалансированный спрос и предложение на литий из-за ускоренного роста производства аккумуляторов и электромобилей привели к росту его стоимости и потребности в его добыче. Россия при значительных запасах литиевого сырья на сегодняшний день не имеет собственного его производства. Основные рудные запасы лития в России оцениваются в 8 млн. т, в том числе ~7.0 млн. т в пегматитовых месторождениях Кольского полуострова и ~1 млн. т в Восточно-Саянском регионе. Запасы литиевой руды Кольского полуострова представлены преимущественно сподуменовыми рудами. Таким образом, современные реалии, связанные с необходимостью обеспечения экономической и национальной безопасности России собственным литиевым сырьем и снятием зависимости от импорта, заставляют разрабатывать эффективные отечественные технологии получения соединений лития из собственного сырья.

К настоящему времени в ОИВТ РАН осуществляется систематическая исследовательская работа по ликвационной плавке системы сподумена с солями натрия ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{NaF}$) с получением солевого расплава – концентратора LiF. Водным выщелачиванием солевого расплава выделяется в качестве конечного продукта чистый фторид лития. Разрабатываются технологические схемы для планируемых пилотных испытаний.





Технология производства стеклокристаллических материалов из отходов переработки природного литиевого минерала



Основными промышленными источниками лития служат рассолы термальных вод рапа солевых озер и сподумен.

Основным промышленным методом извлечения лития из сподумена является сернокислотный и щелочной метод. Тем не менее продолжаются поиски альтернативных методов извлечения лития из сподумена. Несмотря на большое разнообразие методов извлечения лития из сподумена, мало уделяется внимания утилизации отходов его переработки, которые могут быть использованы в качестве основного сырья в стекольной и керамической промышленности благодаря алюмосиликатному составу, что поспособствует расширению сырьевой базы отрасли, ликвидации дефицита в строительных материалах, повышению эффективности работы горно-перерабатывающей промышленности и охране окружающей среды.

Коллективом ОИВТ РАН совместно с РХТУ им Д.И. Менделеева выполнены исследования по каталитической кристаллизации алюмосиликатных отходов переработки сподуменового концентрата. Были получены ситаллы с объемной мелкокристаллической структурой и высокими показателями физико-механических свойств (плотность 2620–2660 кг/м³, микротвердость 6.2–7.3 ГПа, истираемость 0.017–0.145 г/см²).



Стеклокристаллические материалы, полученные из отходов переработки сподумена

**Технология получения карбоната лития высокого качества
из низкопотенциальных геотермальных вод**

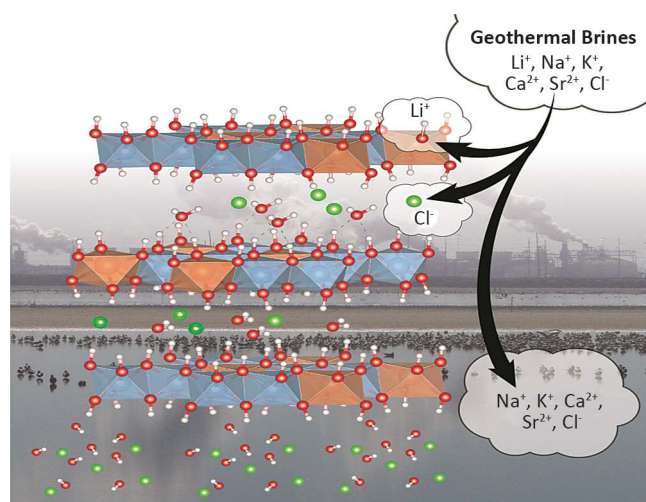


Литий является одним из редких и рассеянных металлов, имеющих множество применений, спрос на который будет расти с постоянно растущим использованием электрических и электронных устройств, гибридных электромобилей. В мире несколько устоявшихся технологий для получения лития в желаемой форме из его первичных ресурсов, таких как минералы и рассолы. Извлечение лития из его минералов сопряжено с высокими затратами на добычу и требует больших затрат энергии.

Для получения соединений лития из хлоридного рассола натриевого типа с высоким содержанием лития и низким содержанием магния, кальция и других щелочноземельных металлов требуются аридный климат, огромные площади для создания испарительных бассейнов и длительное время для выпаривания. Следовательно, эти процессы не могут быть использованы эффективно и с большой экономической отдачей при извлечении лития из природных хлоридных рассолов магниевого, кальциевого и натриевого-магниевого-кальциевого типов, т.е. при извлечении лития из нетрадиционного гидроминерального сырья.

Все предлагаемые технологии получения солей лития из низкосортного гидроминерального сырья основаны на предварительном выделении лития из макрокомпонентов и концентрировании. Для селективного извлечения лития из низкопотенциальных геотермальных вод и технологических растворов используют гранулированный сорбент - двойной гидроксид алюминия и лития в хлоридной форме (ДГАЛ-Cl). Однако его структура чувствительна и склонна к повреждению в процессе десорбции. Так при чрезмерной десорбции лития (более 35%) ДГАЛ-Cl разлагается с образованием кристаллического гидроксида алюминия, который не проявляет сорбционную активность по отношению к литию. В связи с этим ДГАЛ-Cl имеет низкую рабочую емкость 2–3 мг/г и предназначен для извлечения лития из крепких хлоридных рассолов с общим солесодержанием более 400 г/дм³ и высоким содержанием LiCl (более 3 г/дм³).

В ОИВТ РАН разработана эффективная технология получения карбоната лития из литийсодержащих природных вод на основе использования в качестве сорбента свежесозданного гидроксида алюминия для отделения лития от макроколичеств натрия, кальция и его концентрирования. В настоящее время ведутся исследования по синтезу стабильных наносорбентов на основе гидроксида алюминия, легированного гидроксидом железа для наиболее эффективной сорбции лития из низкопотенциальных геотермальных вод с целью получения карбоната лития высокого качества.



Интеркаляция ионов лития и хлора в слоистую структуру гидроксида алюминия

В ОИВТ РАН разработана технология получения высокочистого корунда. Технология основана на гидротермальном окислении порошкообразного алюминия с последующей термической прокалкой оксида алюминия, в том числе в вакууме. Технология позволяет получать оксид алюминия с химической чистотой на уровне пяти девяток (99,999%). Такой оксид алюминия может использоваться для производства монокристаллического лейкосапфира.

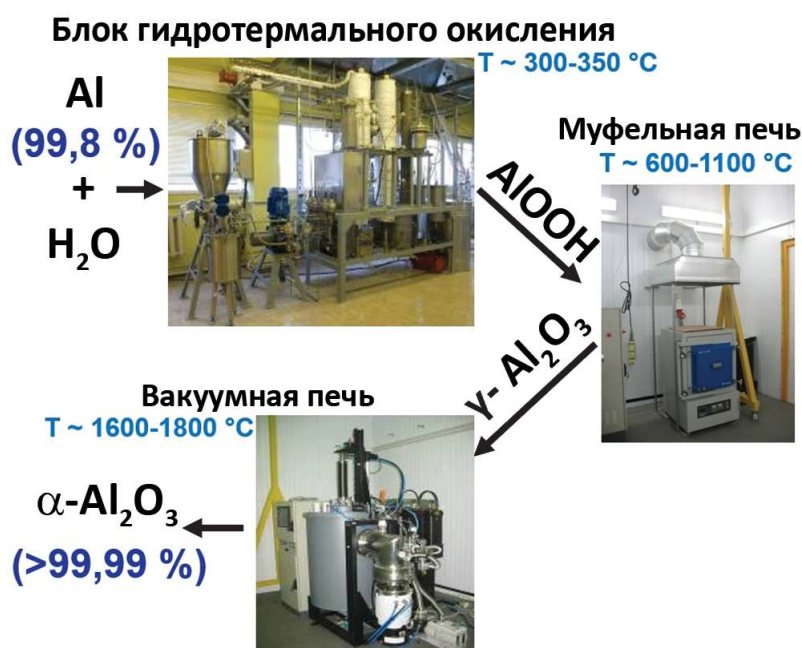


Таблица с результатами химического анализа полученного оксида алюминия:

Примесь	Ед. изм.	ПО*	Измеренное значение
K	ppm	1	<ПО
Na	ppm	2	<ПО
Fe	ppm	4	<ПО
Ni	ppm	0,6	<ПО
Cr	ppm	5	<ПО
Ca	ppm	2	<ПО
Mg	ppm	1	<ПО
Ti	ppm	4	<ПО
V	ppm	0,1	4,3
Cu	ppm	1	<ПО
Zn	ppm	0	<ПО
Zr	ppm	1	<ПО
Y	ppm	0,02	0,033
Mn	ppm	0,1	<ПО
Ga	ppm	0,2	<ПО

* ПО – предел определения метода

Технология глубокой переработки золошлаковых отходов угольных электростанций в промышленную продукцию



Угольная энергетика России генерирует ежегодно 20–22 млн т золошлаковых отходов (ЗШО). Общее количество ЗШО на территории РФ оценивается в 2 млрд т и занимает площадь ≈ 28 тыс. га. В то же время промышленное применение находит не более 10% образующихся ЗШО. В западных странах использование золы составляет 60–90%. Складирование в отвалах образующихся на ТЭС золы и шлака порождает, помимо отчуждения земель, ряд экологических проблем не только в зоне их расположения, но и далеко за их пределами вследствие пыления и загрязнения токсичными микропримесями грунтовых вод. Сложившаяся ситуация требует радикальных мер по ликвидации золоотвалов. В программе развития угольной промышленности на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р, определены цель, задачи и мероприятия государственной политики в угольной отрасли. В подпрограмме предусмотрены: внедрение экологически чистых, безотходных и малоотходных технологий и оборудования; рекультивация нарушенных земель, породных отвалов и ликвидация шламоотстойников.

Специалистами ОИВТ РАН разработана технология комплексной переработки ЗШО в ценные промышленные продукты. К ним относятся углерод (недожог угля), магнетит, алюмосиликатный продукт, алюмосиликатные полые и сплошные микросферы, глинозем и белитовый шлам. Методом пенной флотации из золы получен углеродный концентрат, содержащий более 65% углерода, по своей калорийности удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к каменным углям. Очищенный от углерода алюмосиликатный продукт может быть использован как замещающая до 20% цемента добавка в бетон, для получения пористых строительных материалов или направлен на извлечение глинозема и белитового шлама. Полученный вспененный кирпич сочетает легкость, малую теплопроводность и достаточную конструкционную прочность и делает его наиболее перспективным материалом для строительства зданий и сооружений в условиях Арктики и Крайнего Севера. Из-за устойчивости к солям возможно использование вспененного алюмосиликата при строительстве морских портов и причалов.

Из золы, богатой оксидом алюминия, физико-химическими методами выделен глинозем с содержанием $Al_2O_3 > 98\%$, который после дополнительного обескремнивания будет соответствовать качеству металлургического глинозема. Извлечение глинозема по предложенной технологии составило 88–90 %, что сопоставимо с другими технологиями. Планируется монтаж пилотной флотационной установки колонного типа с производительностью 25 т/год по золе. Полученные на пилотной установке данные могут быть использованы при проектировании промышленной линии комплексной переработки ЗШО. При учете получения в качестве дополнительной продукции белитового шлама, используемого в строительной индустрии, данная технология становится более обоснованной.



Основные продукты переработки золы



15.2. Газотурбостроение и теплоэнергетика

Микротурбины нового поколения



Электростанции децентрализованной энергетики широко востребованы на территориях Российской Федерации для нужд как гражданских (малые населенные пункты), так и военных (например, радиолокационные комплексы) объектов.

Частая периодичность технического обслуживания дизельных электроагрегатов, связанная с наличием маслосистемы, и невозможность дальнейшего использования микротурбин зарубежного производства вследствие отсутствия в РФ запасных частей данных установок и организаций, способных выполнять их ремонт, заставляет создавать отечественные микротурбинные установки мощностью от 3 до 250 кВт.

В ОИВТ РАН созданы экспериментальные стенды и разработаны методики проектирования ключевых компонентов микро-ГТУ (воздушные подшипники, компрессорные и турбинные ступени, теплообменные аппараты), обладающих характеристиками, соответствующими современному уровню развития техники.

В ОИВТ РАН совместно с ПАО «НПО «Алмаз» разработан опытный образец системы автономного энергоснабжения мощностью 60 кВт на базе двух микротурбин, который подготовлен к проведению испытаний совместно с радиолокационной станцией.



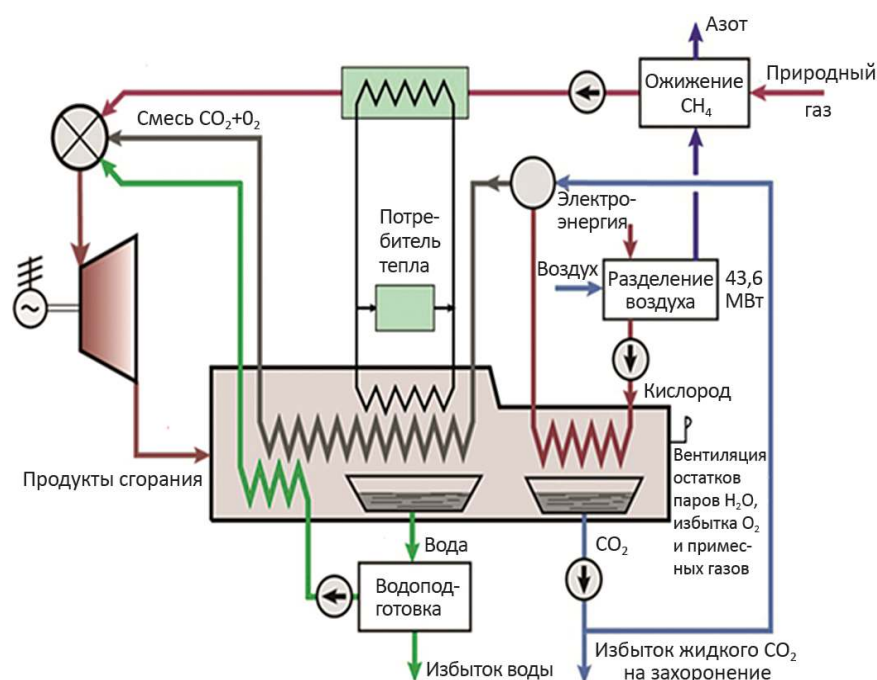
Высокоэффективные парогазовые установки на органическом топливе с полным удалением парниковых газов выхлопа, включая диоксид углерода



Сокращение выбросов углекислого газа в атмосферу, в том числе и от энергогенерирующего (вырабатывающего электроэнергию и тепло) оборудования, является одной из приоритетных задач ближайшего времени.

Существующие разработки, направленные на решение этой задачи в области установок, работающих на органическом топливе, основаны на технологии кислородного сжигания топлива. В качестве примера можно привести цикл Аллама, который используется в экспериментальной ТЭС мощностью 50 МВт, запущенной в Техасе, США. Однако данные циклы были ориентированы только на генерацию электроэнергии.

В ОИВТ РАН разработан цикл с одноименным названием, который позволит создавать экологически нейтральные ПГУ мощностью от 60 МВт, в которых соотношение вырабатываемого тепла к электроэнергии может достигать 4 к 1. При этом топливная экономичность и экологичность достигаются за счет использования цикловых компонентов в жидком виде.



С помощью математического моделирования определены параметры основных компонентов ПГУ с циклом ОИВТ РАН и проведена многофакторная оптимизация



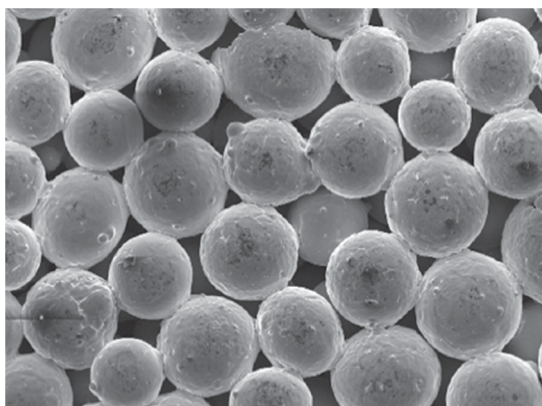
Технология нанесения пористых покрытий из спеченных металлических микросфер для интенсификации процессов кипения



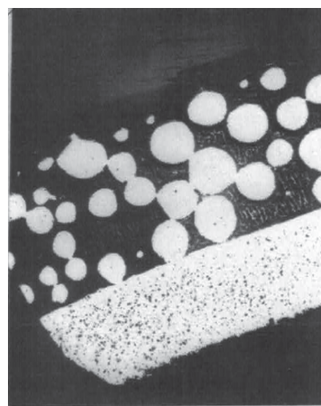
Процессы кипения играют важную роль в теплообменных аппаратах химического и нефте-химического применения, криогенной технике, парогенераторах ТЭС и АЭС, биологических и космических технологиях, других отраслях промышленности. Интенсификация процессов теплоотдачи при кипении позволяет снизить массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов. Также интенсификация процессов кипения теплоносителя в холодильной технике позволяет уменьшить потребляемую аппаратами электрическую мощность. В результате с помощью интенсификации теплообмена при кипении можно достичь существенных экономических выгод.

В ОИВТ РАН разработана технология интенсификации процессов кипения с помощью нанесения на поверхность теплообмена пористых покрытий толщиной 0.15–2.00 мм из металлических микросфер средними размерами от 40 до 160 мкм методом спекания в вакууме или атмосфере аргона или водорода. Спекание производится при температуре примерно на 20% ниже температуры плавления материала сфер, при этом за счет диффузии между частицами формируются прочные перемычки размерами от нескольких до десятков мкм. Открытая пористость таких покрытий составляет 40–70% с преобладающими размерами пор от 10 до 100 мкм. Разработанная методика позволяет наносить обладающие достаточной прочностью и надежностью покрытия как на внешнюю, так и на внутреннюю поверхность труб теплообменных аппаратов и испарителей. Материалы покрытий: порошки углеродистой и коррозионностойкой стали, алюминия, меди, никеля, оловянистой бронзы, титана со сферической и неправильной формой частиц.

Помимо классического для пористых поверхностей увеличения площади поверхности теплообмена и интенсивности подсоса жидкости за счет капиллярных сил подбор оптимальных параметров (диаметров сфер, температуры и времени спекания) позволяет получить большое количество дополнительных центров парообразования и улучшить гидродинамику удаления пара. Данные эффекты позволяют увеличить до 5–6 раз коэффициенты теплоотдачи и в 3–4 раза критические плотности тепловых потоков.



Фотография спеченного покрытия из микросфер



Шлиф покрытия из титановых микросфер, нанесенного на внешнюю поверхность трубы из титана

15.3. Возобновляемая энергетика

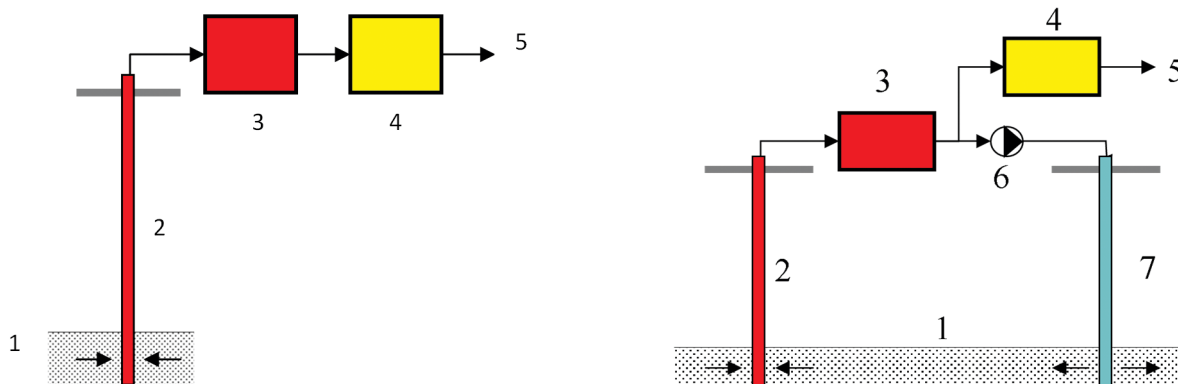
Высокоэффективная технология комплексной переработки высокотемпературных геотермальных рассолов с утилизацией тепловой энергии в бинарной ГеоЭС и последующим извлечением растворенных химических соединений



В Северо-Кавказском регионе в пределах Восточно-Предкавказского артезианского бассейна на больших глубинах залегают огромные ресурсы высокотемпературных (130–220°C) рассолов, которые в настоящее время не осваиваются. В этих рассолах в промышленных концентрациях содержатся до восьми химических соединений, которые можно извлекать на различные народнохозяйственные цели. В ОИВТ РАН разработана технология утилизации тепла рассолов в бинарной ГеоЭС с последующим извлечением из охлажденного рассола карбоната лития, карбоната кальция, магнезии жженной и пищевой соли. Ресурсы региона достаточны для обеспечения потребностей России в литии и пищевой соли на длительную перспективу. В настоящее время в лабораторных условиях получены представительные партии перечисленных химических компонентов.

Продолжаются исследования по усовершенствованию существующей технологии с дополнительным извлечением рубидия, цезия и стронция, а также по оптимизации термодинамического цикла Ренкина, реализуемого в контуре бинарной ГеоЭС, и подбору наиболее перспективного низкокипящего рабочего тела.

Получен ряд патентов на извлечение карбоната лития из геотермального рассола и на комплексное освоение высокопараметрических гидротермальных ресурсов.



Освоение высокотемпературных рассолов.

1 – эксплуатируемый пласт; 2 – добычная скважина; 3 – бинарная ГеоЭС; 4 – завод по извлечению химкомпонентов; 5 – опресненная вода; 6 – насосная станция; 7 – нагнетательная скважина





Теплоаккумулирующие солевые смеси



Одним из важнейших направлений современного материаловедения является создание функциональных материалов с целью разработки и внедрения систем генерации, распределения и хранения энергии, поэтому разработка теплоаккумулирующих материалов является одной из приоритетных задач современной науки. Концепция создания таких материалов базируется на применении приемов и методов изучения многокомпонентных систем.

В ОИВТ РАН проводятся работы по развитию теории и практики физико-химического анализа многокомпонентных систем. Развивается направление моделирования фазовых равновесий в многокомпонентных солевых системах, позволяющее разрабатывать солевые смеси, используемые в качестве теплоаккумулирующих материалов, которые применяются в теплоэнергетике, теплотехнике для аккумулирования тепловой энергии и сглаживания пиковых нагрузок.

В настоящее время выявлены и реализованы в виде алгоритмов общие подходы к разработке перспективных функциональных материалов, реализуемых для решения конкретной технологической задачи. Разработаны материалы на основе неорганических солей, способные запасать и высвобождать тепловую энергию в широком диапазоне температур. Ведутся работы по выявлению подходов, позволяющих создавать композиции с большими значениями энтальпий фазовых переходов и с заданным диапазоном температур. В перспективе планируется продолжить изучение многокомпонентных солевых систем большей компонентности, что позволит расширить спектр получаемых составов. В качестве примера приведены характеристики разработанных в 2024 году функциональных материалов.

Теплофизические характеристики разработанных составов

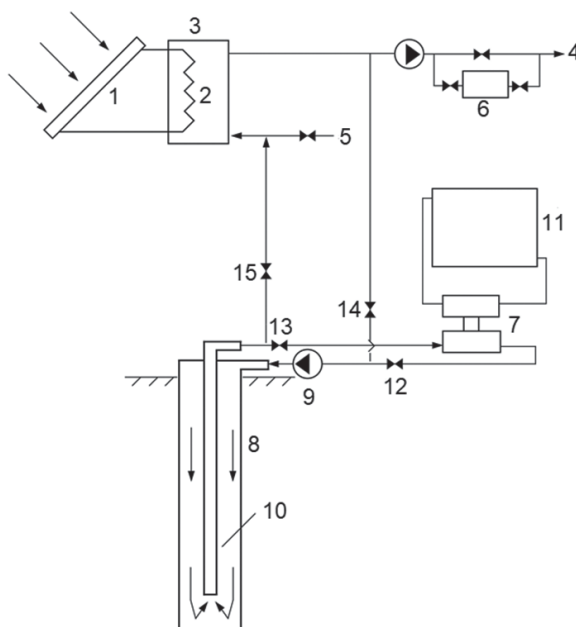
№	Патент РФ № 2817998			$t_{пл}$, °C	$\Delta H_{пл}$, Дж/г
1	Сост. масс. %			602– 606	766–771.4
	LiF	NaF	NaCl		
	25.30 –27.30	37.70 –38.07	35.00 –36.00		
2	Патент РФ № 2819041			$t_{пл}$, °C	$\Delta H_{пл}$, Дж/г
	Сост. масс. %			670–675	624–630
	LiF	NaCl	CaF ₂		
	22.60–23.10	72.00–72.60	4.73–4.90		
3	Патент РФ №2827703			$t_{пл}$, °C	$\Delta H_{пл}$, Дж/г
	Сост. масс. %			675–680	646–652
	LiF	NaCl			
	23.00–24.00	76.00–77.00			

Разработанные материалы позволяют расширить температурный диапазон аккумулирования тепловой энергии и обладают высокими значениями энтальпии фазовых переходов, что подтверждено патентами РФ на изобретения.

Гелио-геотермальная система теплоснабжения и горячего водоснабжения

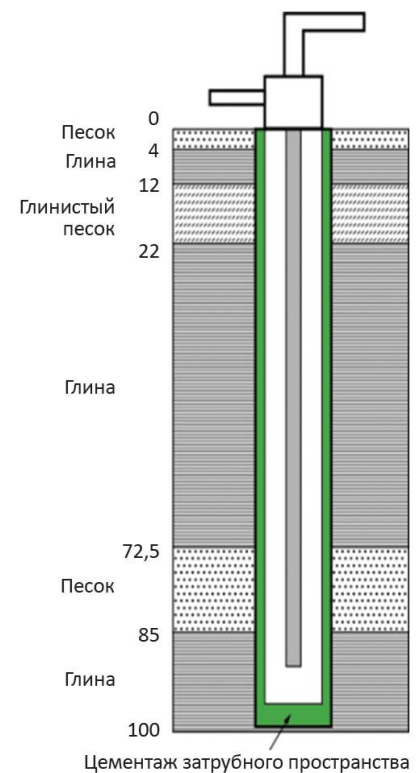


Разработана и реализована демонстрационная гелио-геотермальная система для отопления и горячего водоснабжения индивидуального дома. Система включает скважинный теплообменник глубиной 100 м для отбора тепла от горной породы, солнечные коллекторы общей площадью 20 м², бак-аккумулятор горячей воды и энергоблок низкотемпературного отопления с тепловым насосом (15 кВт) и насосом для прокачки промежуточного теплоносителя. В межотопительный период часть горячей воды из бака прокачивается в скважину для восстановления теплового поля в горной породе вокруг скважины. Результаты эксплуатации показали высокую эффективность такой системы.



Гелио-геотермальная система тепло- и горячего водоснабжения

- 1 – солнечные коллекторы; 2 – теплообменник;
- 3 – бак-аккумулятор горячей воды; 4 – линия горячего водоснабжения; 5 – подпитка из водопровода; 6 – электронагреватель;
- 7 – тепловой насос; 8 – скважина-теплообменник;
- 9 – циркуляционный насос;
- 10 – теплоизолированная лифтовая колонна;
- 11 – блок низкотемпературного отопления



Разрез скважины



Солнечные коллекторы



Оголовок скважины



Обвязка теплового насоса

Портативные фотоэлектрические источники питания (совместно с ООО «МТД-Прайм»)

TRL 4

В условиях удаленных территорий Крайнего Севера и Дальнего Востока представляется актуальной задачей автономное энергообеспечение групп туристов, геологов, работников сельского хозяйства и силовых ведомств. При этом применение бензоагрегатов, дизельных генераторов и аккумуляторных источников питания для этих целей может быть затруднено прежде всего в связи с большим расходом топлива тепловыми двигателями в диапазонах мощностей менее 1 кВт, а также из-за невозможности зарядки большинства типов аккумуляторов в условиях отрицательных температур.

Автономный фотоэлектрический источник питания ФИП 5-12, разработанный в ОИВТ РАН совместно с ООО «МТД-Прайм», позволяет обеспечивать автономное энергоснабжение потребителей с рабочим напряжением 12 и 5 В в условиях пониженных температур и отсутствия централизованной сети. Он включает в себя батарею из двух отечественных фотоэлектрических модулей по 100 Вт каждый, аккумуляторную батарею энергоемкостью 1.2 кВтч и рабочим напряжением 12–16 В, включающую в себя высокоэнергоемкие литий-ионные аккумуляторы типоразмера 18650. В батарею встроен электрический нагреватель для обеспечения положительных температур аккумулятора при заряде. В его состав включен также оригинальный контроллер заряда, содержащий экстремальный регулятор мощности солнечной батареи и встроенную систему выравнивания напряжений на аккумуляторах. Контроллер содержит датчик температуры аккумуляторной батареи, выход для подключения нагревателя, а также схему питания собственных нужд от солнечной батареи. Программное обеспечение позволяет задавать диапазон рабочих температур и напряжений на аккумуляторах в батарее в процессе сборки и отладки портативного источника питания.



Аккумуляторная батарея и контроллер заряда размещены в теплоизолированном корпусе энергомодуля с герметичными разъемами для подключения солнечных батарей и нагрузки. Для удобства транспортировки изделия энергомодуль, складная солнечная батарея, опорная конструкция и комплект проводов для подключения нагрузки размещаются в рюкзаке.



В ОИВТ РАН выполнены комплексные испытания ФИП 5-12 с использованием климатической камеры. В ходе испытаний продемонстрирована способность источника обеспечивать энергоснабжение потребителей в широком диапазоне рабочих температур и выдерживать жесткие условия окружающей среды.

Устройство оптимального управления для систем солнечного горячего водоснабжения, кондиционирования, бесперебойного электропитания, а также гибридных энергетических систем (совместно с ООО «Яростанмаш»)



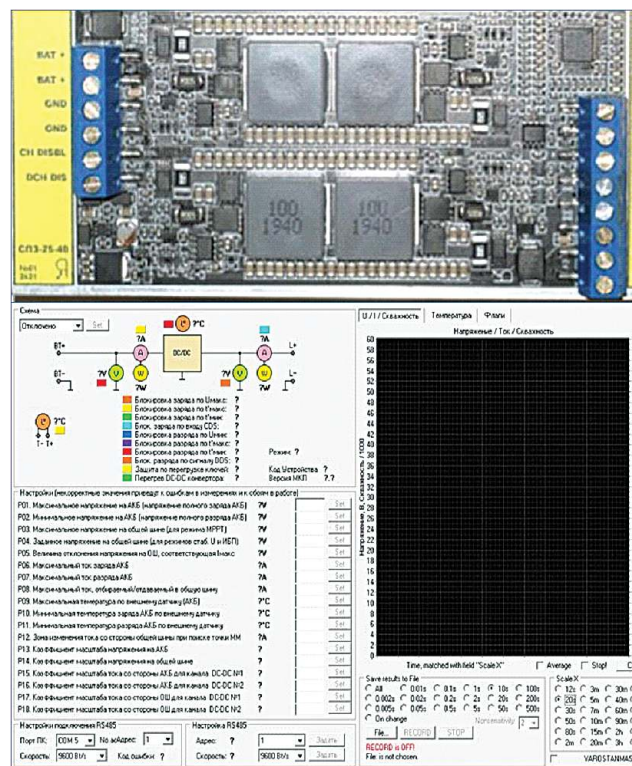
Превращение избыточной выработки ВИЭ в полезную тепловую энергию, холод, водород или другие полезные продукты является важной задачей при создании энергоустановок на основе таких источников энергии. Стохастическая выдача мощности солнечными и ветровыми энергоустановками является одним из ключевых ограничивающих факторов для расширения их применения. В этой связи в мире ведется активная разработка и создание технических средств, обеспечивающих возможность аккумулирования избытков производимой электрической энергии и/или их потребления путем преобразования в другие полезные формы энергии (тепло, холод и др.).

В ОИВТ РАН разработано устройство оптимального управления, представляющее собой дву-направленный согласующий преобразователь постоянного тока, предназначенный для групповой работы генераторов и потребителей на общей, объединяющей их в единую систему, шине постоянного тока. Порядок их ввода в работу и мощность определяются уставками, заранее заданными программным обеспечением преобразователя. Разработанные преобразователи могут управлять системой, состоящей из солнечных батарей, ветроэлектрогенераторов, накопителей электрической энергии, электролизеров, опреснительных систем или теплоэлектронагревателей суммарной мощностью до 10 кВт.

Подбор уставок позволяет обеспечить как гарантированное электропитание потребителя, сопряженного с сетью переменного тока через инвертор, так и утилизировать излишки выработки ВИЭ с получением полезных продуктов.

Возможность питания собственных нужд преобразователя как с выходных, так и с входных клемм позволяет использовать его для получения тепловой энергии/водорода/опресненной воды/холода напрямую от солнечной батареи или ветроэлектрогенератора без использования накопителя электрической энергии, что существенно удешевляет схему в таком случае.

Серия разработанных преобразователей проходит испытания в составе стенда «Атон» в ОИВТ РАН, установочная партия преобразователей поставлена индустриальному партнеру для создания гибридных систем на основе топливных элементов и накопителей электрической энергии.





Производство углерод-углеродного композита и технического водорода из биомассы и углеводородных газов (совместно с ПАО «Татнефть»)

TRL 4



Пироуглерод

Данная технология основана на процессе пиролиза в углеродосодержащей среде углеводородных газов, таких как природный и попутный нефтяной газы. В слой углеродной матрицы, представляющей из себя древесный уголь в виде пеллет, нагретой до температуры 1000°C, подается смесь углеводородов. В результате реакций разложения образуется водородосодержащая смесь газов (содержание водорода – до 60 об. %) и пироуглерод.

Пироуглерод, содержащий более 97 масс.% углерода и не более 1 масс. % золы, предполагается использовать в качестве углеродистого восстановителя в металлургических процессах, например, при производстве ферросплавов. К таким восстановителям предъявляются более жесткие требования по содержанию углерода, минеральных примесей, прочности и др. параметров.

Кроме того, данная технология позволяет утилизировать избытки попутного природного и попутного нефтяного газов на месторождении, сокращая количество сжигаемых углеводородных газов. Преимуществом данной технологии является возможность получать сразу два ценных, востребованных на рынке продукта – водород и углеродосодержащий восстановитель. В зависимости от режимов подачи углеводородных газов в реактор процесс их разложения можно сместить в сторону либо большего содержания водорода в выходящей смеси газов, либо в сторону улучшения свойств пироуглерода.

В настоящий момент создан лабораторный стенд периодического действия для получения пироуглерода и водород-содержащей смеси, проведены экспериментальные исследования на данном стенде, получены образцы пироуглерода при различных режимах пиролиза углеводородных газов. В планах на ближайшие 5 лет исследовать металлургические свойства пироуглерода (реакционная способность, состав золы, удельное электросопротивление и др.) для определения конкретной области металлургии, в которой пироуглерод будет максимально востребован, разработать конструкцию, изготовить и провести экспериментальные исследования на реакторе получения пироуглерода непрерывного действия производительностью 3–4 кг/ч.

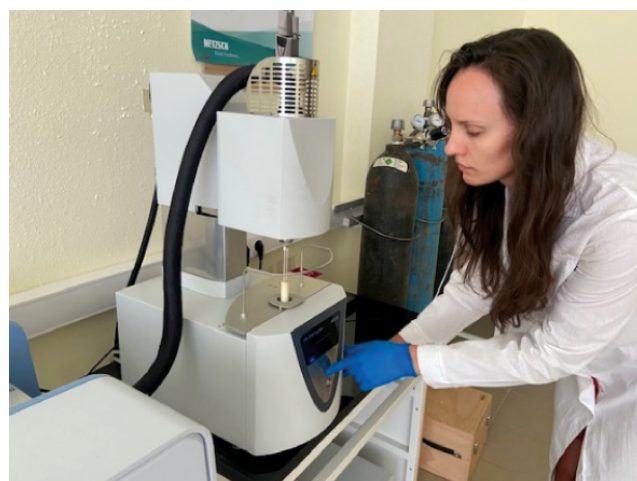
Технология термической переработки промышленных и сельскохозяйственных отходов в «зелёный» метанол и электроэнергию (совместно с ПАО «Татнефть»)



Современный тренд на постепенный переход к малоуглеродной энергетике заставляет искать пути использования возобновляемого углеводородного сырья, прежде всего, промышленных и сельскохозяйственных отходов, в энергетике. Эффективные технологии переработки органического сырья в кондиционные энергетические и моторные топлива и ценные химические продукты направлены на решение задач снижения экологической нагрузки на окружающую среду и переходу к углерод-нейтральным энергетическим технологиям.

В основе этих технологий лежат сложные тепло-массообменные процессы, для описания которых в ОИВТ РАН ведутся экспериментальные исследования с использованием современных методов и средств измерений и разрабатываются адекватные математические модели и программные комплексы.

Впервые в мире на стендовой установке реализован процесс двухстадийной пиролизической переработки биомассы в синтез-газ. Разработан эффективный метод очистки синтез-газа от микропримесей, подобраны катализаторы и разработаны методика и принципиальная технологическая схема паровой конверсии оксида углерода для корректировки состава синтез-газа. Определены оптимальные условия проведения процессов в изотермических термохимических реакторах на тепловых трубах.



Исследования процесса термической деструкции биомассы на термоанализаторе, совмещенном с ИК-Фурье спектрометром



Монтаж пилотной установки на промышленной площадке ООО «ТН-Биотех» (ПГТ Актюбинский, Татарстан)

В настоящее время на промышленной площадке ООО «ТН-Биотех» (ПАО «Татнефть») ведутся опытно-промышленные испытания пилотной установки по переработке углеродсодержащего сырья в двухстадийном процессе получения синтез-газа с последующей его конверсией в метанол. Совместно с ПАО «Татнефть» и ЦНИИчермет им. И.П. Бардина планируется проведение исследований процессов получения углеродного композита и водородсодержащего газа при пиролизе попутного нефтяного газа на матрицах из карбонизированного биосырья. В сотрудничестве с ЦИАМ им. П.И. Баранова на основе результатов исследований ОИВТ РАН реализуется проект разработки технологии производства компонентов биотоплив с высокой плотностью энергии – экологически чистого авиационного био-керосина SAF (Sustainable Aviation Fuel).



15.4. Водородная и алюмоводородная энергетика

Автономный гибридный энергомодуль мощностью до 20 кВт на основе газопоршневого двигателя и ВИЭ с применением водородных технологий аккумулирования энергии (совместно с АНО «Водородные технологические решения»)



Автономный гибридный энергомодуль предназначен для энергоснабжения потребителей, не имеющих доступа к централизованным энергетическим сетям. Пиковая электрическая мощность энергомодуля составляет 20 кВт. Первичными источниками энергии служат энергия солнечного излучения (фотоэлектрическое преобразование), энергия ветра и химическая энергия метана (органического топлива).

Стохастический характер выдачи мощности возобновляемыми источниками энергии обуславливает необходимость накопления энергии в периоды избыточной (относительно мощности потребителя) выработки ВИЭ и ее выдачи в периоды недостаточной выработки. Краткосрочное (до суток) аккумулирование электрической энергии осуществляется аккумуляторной батареей (АКБ).

Гарантийным источником электропитания, обеспечивающим энергоснабжение потребителя и собственные нужды энергоустановки во время длительных периодов недостаточной мощности ВИЭ (от нескольких суток), является газопоршневой двигатель (ГПД). В этом случае АКБ используется для сглаживания пиков потребления и обеспечения более комфортного с точки зрения эффективности, экологии и срока службы режима работы ГПД.

Для снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и расхода органического топлива ГПД использует в качестве топлива метано-водородную смесь в отличие от стандартных решений на основе дизель-генераторов.

Наработка водорода ведется через электролиз воды с использованием избытков электрической энергии, не поглощенной АКБ.

Мощность солнечной батареи и ветроэлектрогенераторов, энергоемкость АКБ и производительность электролизера определяются для конкретного графика нагрузки потребителя и места расположения установки на основе инженерного расчета, учитывающего технический потенциал ВИЭ в заданной точке.



Энергоустановка на алюминиевом топливе для автономного энергоснабжения

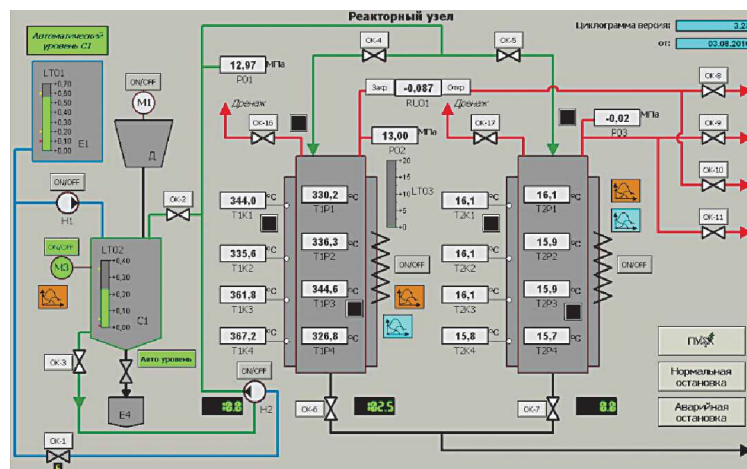


В ОИВТ РАН создана первая в мире энергоустановка, работающая на алюминиевом топливе. В экспериментальной когенерационной энергетической установке КЭУ-10, предназначенной, в первую очередь, для энергообеспечения автономных потребителей, реализована энергоэффективная многоцелевая технология гидротермального окисления алюминия.

Установка способна работать в автономном, не зависящем от внешнего электроснабжения, непрерывном режиме, вырабатывая при этом водород, полезную электрическую и тепловую энергию, а также наноразмерный порошок гидроксида алюминия. Полезная электрическая мощность экспериментальной установки составляет около 15 кВт, электрический КПД и коэффициент использования топлива по отношению к теплоте сгорания алюминия – 14% и 72% соответственно.



Реакторный блок КЭУ-10



Автоматизированная система контроля и управления

Технические характеристики:

Параметр	Значение
Расход алюминия, кг	9.4
Производство гидроксида алюминия (бемита), кг	19
Тепловая мощность, кВт	40
Производство водорода, нм ³ /час	10
Потребление собственных нужд КЭУ-10, кВт	4
Электрическая мощность, кВт	15
Электрический КПД, %	14
Коэффициент использования топлива (алюминия), %	72



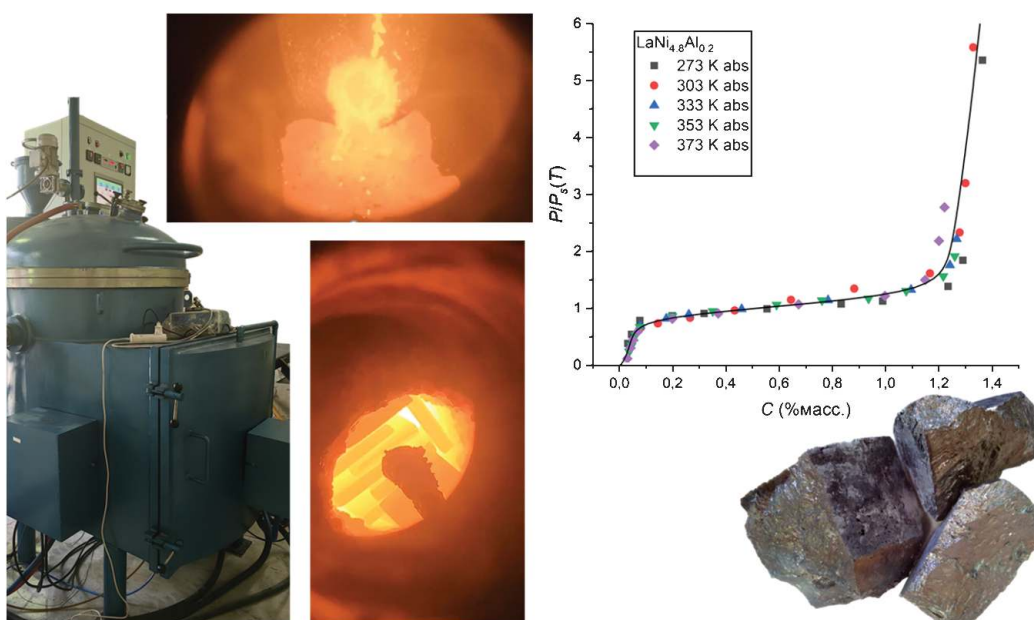
Создание интерметаллических соединений и сплавов для нужд водородной энергетики

TRL 4

Металлогидриды образуются при взаимодействии водорода с металлами, электроотрицательность которых сопоставима с водородом, включая переходные металлы, лантаноиды и актиноиды, а также интерметаллическими соединениями и сплавами на их основе. Области применения металлогидридов включают создание химических источников тока, также они используются для селективного поглощения и безопасного хранения водорода в твердофазном связанном состоянии при температурах и давлениях, близких к нормальным условиям, для эффективного сжатия и очистки водорода.

В ОИВТ РАН разработаны методы создания и исследования свойств различных интерметаллических соединений и сплавов для нужд водородной энергетики. Лабораторный комплекс позволяет разрабатывать составы и выплавлять образцы массой до 50 г и исследовать их свойства, включая измерение изотерм сорбции/десорбции методом Сиверта, исследование электрохимических свойств, изучение циклической стойкости (свыше 1000 циклов наводороживания).

Выплавка партий материалов массой до 10–15 кг осуществляется с использованием вакуумной индукционной плавильной печи ВПИ-10. Помимо создания металлогидридов, печь позволяет осуществлять плавку легированных, высоколегированных и прецизионных сталей сложного химического состава, содержащих склонные к окислению элементы, при остаточном давлении в вакууме или среде инертного газа. Температура перегрева металла в вакуумной плавильной печи достигает 1800°C.



Вакуумная индукционная печь ВПИ-10 (слева), выплавка интерметаллида $\text{LaNi}_{4.8}\text{Al}_{0.2}$ и его изотерма абсорбции (справа)

15.5. Инновационная медицина

Медицинский генератор низкотемпературной плазмы



Лечение с помощью низкотемпературной плазмы (НТП) – это перспективный инновационный метод терапии, эффективной как для уничтожения устойчивых к антибиотикам микроорганизмов, так и для стимуляции процессов регенерации. Согласно современным оценкам до 2–3% всех затрат на здравоохранение в развитых странах – лечение длительно не заживающих ран. Причины неэффективности лечения:

- Антибиотикоустойчивость (многие бактерии не чувствительны почти ко всем, даже к самым современным антибиотикам);
- Образование бактериями биопленок на поверхности ран (в них микроорганизмы в 100–1000 раз более устойчивы к антибиотикам).

Для медицинских целей создается поток низкотемпературной плазмы с температурой окружающей среды, активные компоненты которого включают в себя заряженные частицы, ультрафиолетовое излучение, электромагнитные поля, продукты плазмохимических реакций NO, O₃, OH и др.

В ОИВТ РАН совместно с ФНИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи и ЗАО «Руднев-Шиляев» разработан медицинский генератор низкотемпературной аргонной плазмы «Плазма 200», который прошел успешную сертификацию.

Показана высокая эффективность плазменной обработки против патогенов с множественной антибиотикоустойчивостью. Плазменное воздействие стимулирует ускоренное заживление инфицированных ран. При этом отсутствует токсический эффект для клеток, формирующих раневую поверхность и участвующих в закрытии раневой поверхности.





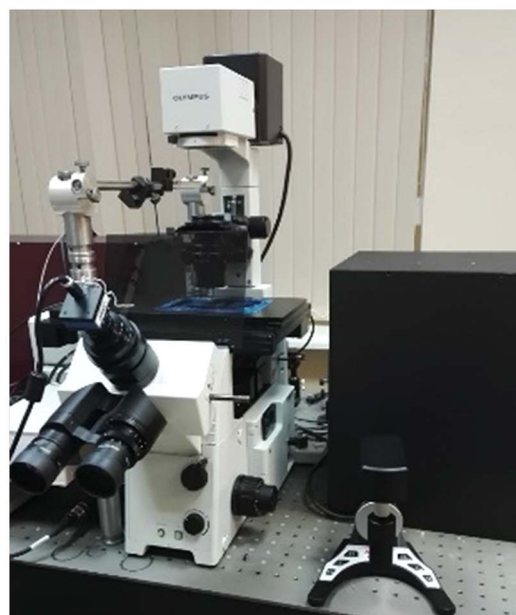
Фемтосекундный лазерный скальпель и пинцет для репродуктивных технологий



Микрохирургия эмбрионов является рутинной практикой в центрах вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ), направленной на увеличение шансов наступления беременности и предотвращения передачи наследственных заболеваний. Для процедур вспомогательного хетчинга (нарушение целостности оболочки эмбриона для облегчения его «вылупления») и биопсии (для последующего предимплантационного генетического тестирования) традиционно применяют компактные диодные миллисекундные лазерные диссекторы. Потенциальные негативные эффекты указанных диссекторов связаны с термическим воздействием – температура в области фокусировки может достигать нескольких сотен градусов.

Микрохирургия с использованием фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) – это инновационный подход к решению задач в области ВРТ. Энергия ФЛИ, необходимая для диссекции блестящей оболочки эмбриона на два порядка меньше по сравнению с энергией импульса миллисекундной длительности, что минимизирует термическое воздействие. При этом нелинейные механизмы поглощения импульсов позволяют локализовать зону воздействия в области перетяжки лазерного пучка (область максимальной концентрации фотонов), что обеспечивает лучшую точность при микрохирургии – ширина формируемого надреза от 1 мкм.

Технология оптического пинцета позволяет осуществлять захват и манипуляции с объектами микронного размера, таких как сперматозоид, полярное тельце эмбриона или биоптат в бесконтактном режиме.



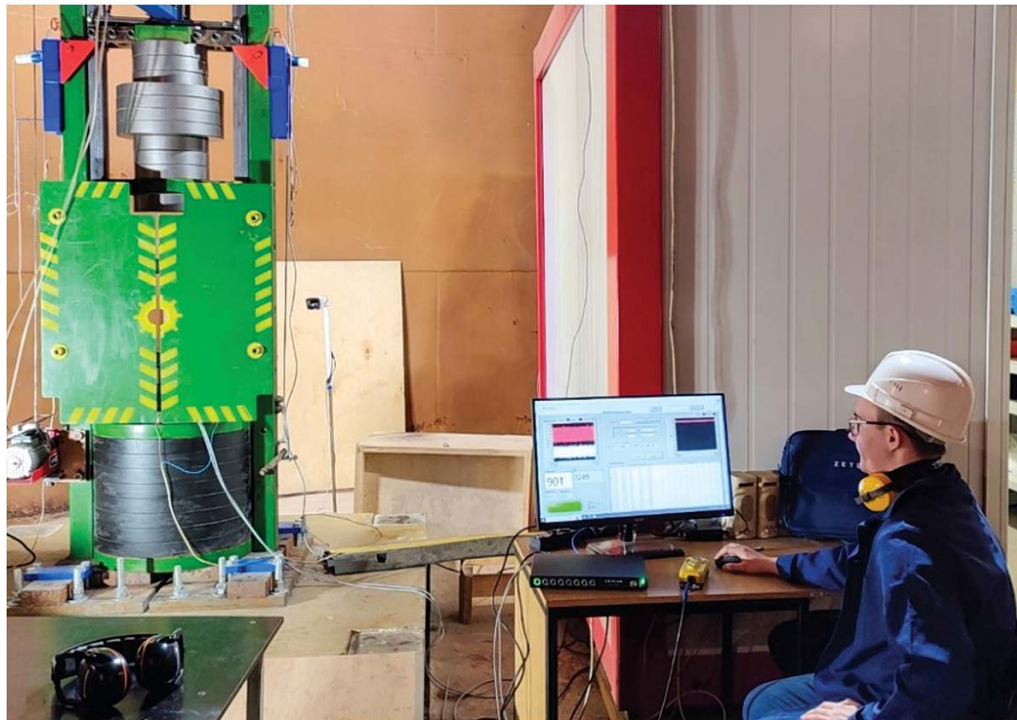
Бластоциста после диссекции оболочки (слева), макет установки (справа)

15.6. Электробезопасность

Ударные испытания электроизоляционных покрытий

Исследование ударных испытаний электроизоляционных покрытий крайне актуально для обеспечения надежности и безопасности оборудования современной энергетики. Ударные испытания позволяют оценить устойчивость покрытий к экстремальным механическим воздействиям, что особенно важно для предотвращения аварий и продления срока службы оборудования.

Проводятся ударные испытания для подтверждения стойкости электроизолирующих покрытий под действием циклических ударных нагрузок. Оснастка для динамических испытаний (ОДИ) смонтирована на виброизолированном фундаменте. Регистрация параметров удара осуществляется первичным преобразователем – тензометрическим силоизмерителем (ТС), изготовленным АО «НИКИЭТ». В ходе ударных испытаний достигаются силы до 500 кН длительностью в несколько микросекунд. Автоматическая система регистрации фиксирует ускорения бойка и приемной массы, усилия, создаваемые на образце.



Оснастка динамических испытаний



Изготовление электроизоляторов для особых условий эксплуатации



В современных энергетических системах и электротехническом оборудовании особое внимание уделяется разработке электроизоляционных материалов, способных обеспечить надежную работу в экстремальных условиях эксплуатации. В этом контексте талькохлорит и асбестоцементные электроизоляционные детали (АЦЭИД) представляют особый интерес благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств и их относительно невысокой стоимости. Создание изоляторов уникальных форм и размеров, устойчивых к агрессивным средам, высоким температурам и механическим нагрузкам, необходимо для развития энергетической инфраструктуры.

В ОИВТ РАН разрабатываются и изготавливаются электроизоляционные элементы, производимые из паронита, АЦЭИДа и талькохлорита в интересах оснащения экспериментальных стендов, работающих при высоких давлениях (до 150 атм и температурах до 350°C). Электроизоляционные элементы проходят испытания на механическую прочность и электрический пробой напряжением до 500 В.



Примеры изготовленных электроизоляторов из АЭИДа слева и талькохлорита справа

15.7. Обработка и синтез материалов

Производство пластин из корунда



Разработан технологический регламент производства высокоактивных порошков оксидов/гидроксидов алюминия. Чистота оксида 99.98–99.99%, средний размер частиц 0.8–1.3 мкм, в зависимости от режима помола.

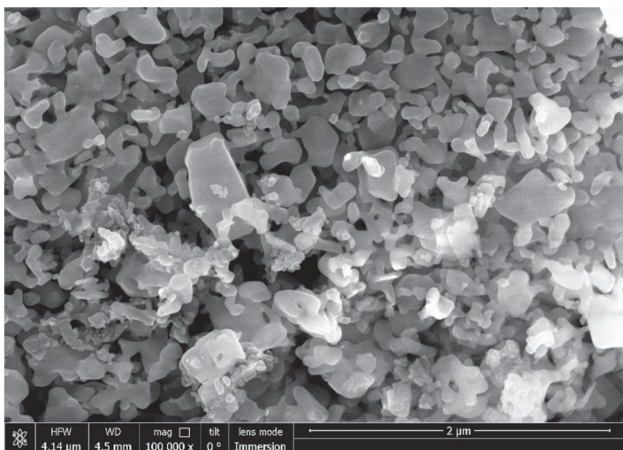
Высокая активность полученных порошков позволяет изготавливать корундовые пластины толщиной 4–7 мм. Механические свойства пластин представлены в таблице:

Плотность, г/см ³	Микротвердость, ГПа	Предел прочности на изгиб, МПа	Скорость звука, км/с
3.85–3.90	19–22	300–350	10–10.5

Технологический регламент производства пластин из порошка включает две основные стадии: одноосное прессование и последующее свободное спекание. Высокая активность порошков позволяет получать указанные выше механические характеристики пластин при весьма умеренных параметрах процессов обработки исходного материала (время измельчения 15–20 мин., давление одноосного прессования –150 МПа). Температура спекания 1550–1600°C. Снижение времени помола, давления прессования, а также умеренные температуры спекания позволяют снизить себестоимость производства изделий при сохранении их высокого качества.

По данной технологии также можно получать корундовые пластины с различной заданной пористостью – от 70 до 2%.

Все исходные материалы и основное оборудование производятся в Российской Федерации.



Исходный порошок оксида алюминия



Готовая пластина



Эффективные защитные проводящие покрытия для компонентов суперконденсатора и топливного элемента



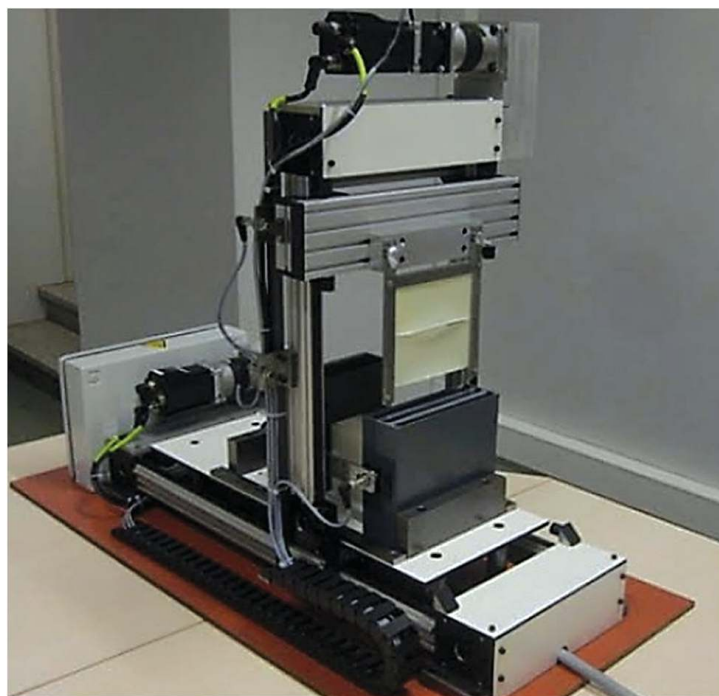
Топливный элемент – это эффективная и экологически чистая система производства электроэнергии, которая напрямую и непрерывно преобразует химическую энергию в электрическую. В настоящее время коэффициент преобразования энергии достигает 80%, а при определенных условиях может быть выше. Огромные перспективы водородной энергетики связывают с возможностью объединения топливных элементов в целые батареи, превращая их в электрогенераторы с большой мощностью. Уже сейчас электрогенераторы, работающие на водородных топливных элементах, имеют мощность до нескольких сотен киловатт и используются как источники питания транспортных средств.

Биполярная пластина является одним из основных компонентов топливного элемента с протонообменной мембраной, который определяет качество и большую часть стоимости аккумуляторной батареи, а также отвечает за функции равномерного распределения реакционного газа, проводимости тока и последовательности отдельных элементов. Чтобы соответствовать этим функциональным требованиям, идеальная биполярная пластина должна обладать такими характеристиками, как высокая тепло/электрическая проводимость, коррозионная стойкость, низкая плотность, хорошие механические свойства, низкая стоимость и простота обработки. В большинстве случаев биполярные пластины изготавливаются из коррозионностойких нержавеющей сталей AISI 316L и AISI 304 толщиной 0.1–0.25 мм методом штамповки. Но при контакте с водородосодержащими соединениями, CO, CO₂, кислотами, пероксидом водорода и другими пероксидными соединениями на их поверхности возникают явления адсорбции и коррозии.

В ОИВТ РАН разработан углерод-полимерный композит для защиты металлических пластин с использованием графена, который получен с помощью плазменных технологий и обладающий высокой чистотой. Разработанный композит продемонстрировал низкое сопротивление (на уровне

графита) и устойчивость в концентрированной серной и метафосфорной кислотах. Этот же композит может использоваться в виде пленки как токосъемник в суперконденсаторе и как покрытие для антикоррозионной защиты металлических электродов.

Предлагаемая технология нанесения композита обеспечивается относительно простой технологической схемой, основанной на применении валика или трафарета с последующей сушкой при атмосферном давлении.



Автоматическое устройство для нанесения композита с программируемым погружением подложек в ванны для покрытия

Технология синтеза высокоэффективных активированных углей из отходов древесины для суперконденсаторов с водным и органическим электролитами



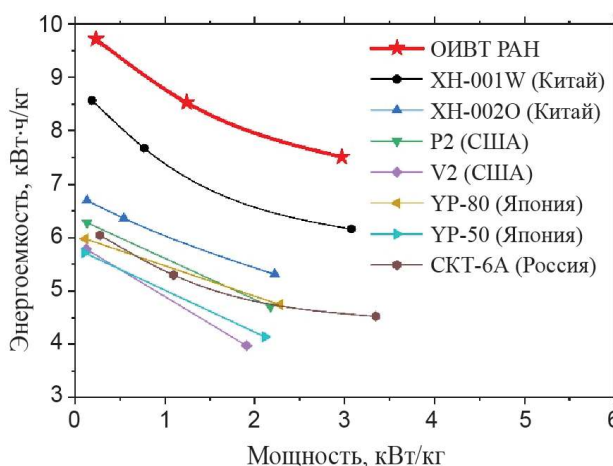
В ОИВТ РАН разработан активированный уголь (АУ) из дешевого промышленного древесного угля (карбонизат) для изготовления электродов суперконденсаторов и катодов воздушно-алюминиевых электрохимических генераторов, обладающий высокими удельными электрохимическими характеристиками и ресурсной стабильностью. Метод получения АУ – термохимическая активация с использованием щелочи NaOH в качестве активатора. Смесь сухой щелочи или ее раствора с карбонизатом подвергается пиролизу при температуре 600–850°C продолжительностью 1.5–3 часа. Затем уголь деминерализуется раствором кислоты и отмывается до pH более 5-ти.

Достигнуты весьма высокие значения электрической емкости на уровне 160 Ф/г в составе суперконденсаторов с апротонным органическим электролитом и более 300 Ф/г с водным электролитом. Продемонстрирован ресурс более 1 100 000 циклов заряда–разряда суперконденсатора на основе данного угля.

Достичь таких показателей стало возможным благодаря управляемому синтезу данных углеродных материалов и дополнительному термическому воздействию после активации. По результатам цикла работ определены режимы синтеза активированных углей для суперконденсаторов с водным и органическим электролитами и необходимые дальнейшие технологические преобразования.



Установка для синтеза АУ



Сравнение характеристик АУ ОИВТ РАН с коммерческими аналогами



*Высокопроизводительный синтез углеродных наноструктур
в струе плазмы мощных плазмотронов постоянного тока
для энергетики*

TRL 3

Важнейшей составной частью современных нанотехнологий являются наноматериалы, то есть материалы, необычные функциональные свойства которых определяются упорядоченной структурой их нанофрагментов размером от 1 до 100 нм. Среди наноматериалов наиболее изучены и находят практическое применение углеродные нанотрубки, графен, фуллерены и наноалмазы.

ОИВТ РАН является разработчиком масштабируемого плазмохимического способа синтеза графена и материалов на его основе. Технология основана на применении плазмотрона постоянного тока с вихревой стабилизацией струи, позволяющего проводить одностадийные химические процессы без применения подложек, катализаторов, растворителей или кислот, что обеспечивает высокий выход целевого продукта. При использовании азота в качестве плазмообразующего газа были синтезированы графеновые структуры, модифицированные атомами азота (N-графен) с высокой удельной поверхностью, которые находят применение в устройствах для хранения энергии, таких как суперконденсаторы и литий-ионные аккумуляторы.

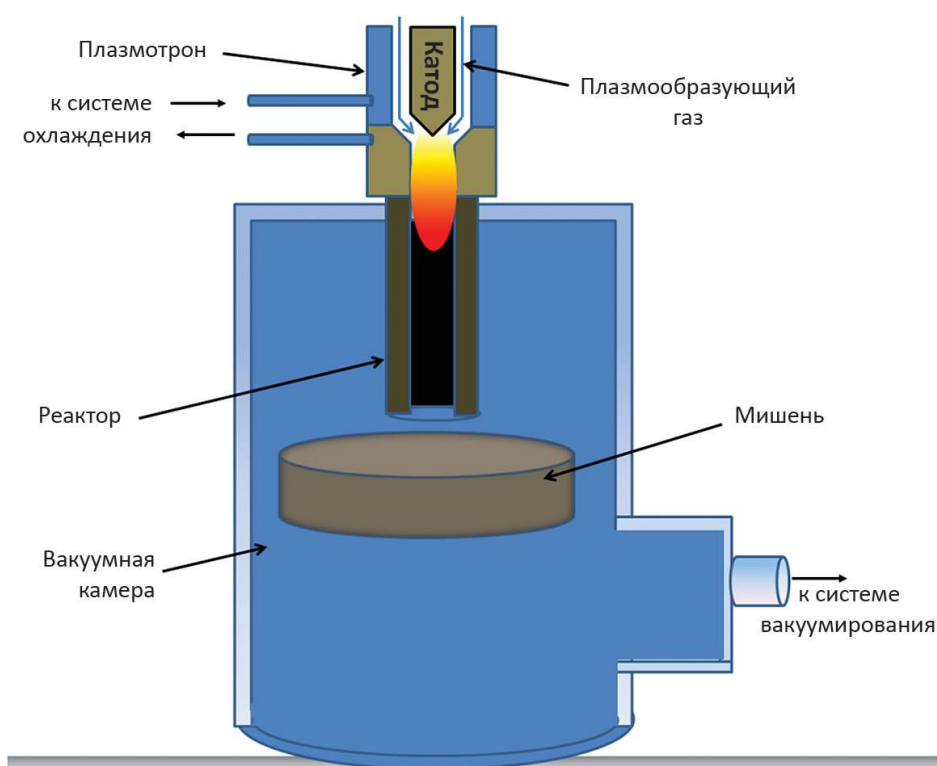
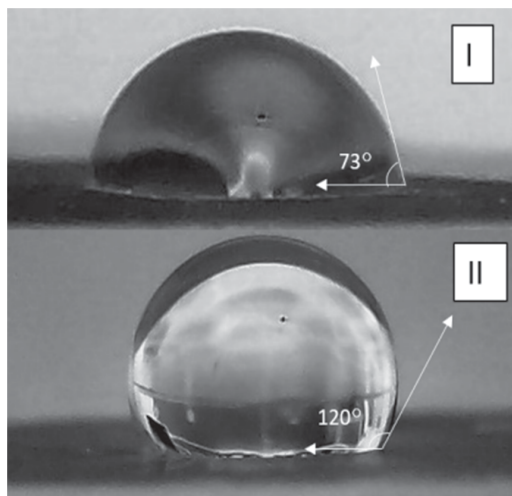


Схема установки для получения N-графена

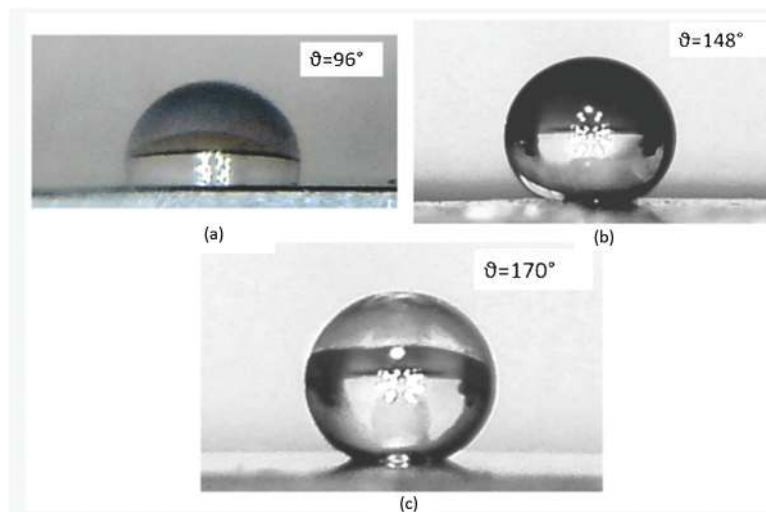
Плазменный синтез супергидрофобных покрытий

С развитием современных технологий существенно выросла потребность в оксидных материалах с повышенной функциональностью и эксплуатационной стойкостью. К примеру, оксинитрид титана обладает высоким коэффициентом отражения и радиационной стойкостью (защита космических аппаратов от солнечного излучения), высокоэффективными свойствами фотокатализатора (получение водорода), биосовместимостью (импланты), раман-активными свойствами для спектроскопии и уникальными оптическими свойствами для фотонных приложений. Магнитный гексаферрит бария используется в трансформаторах, магнитных индукторах, технологии высокоплотной магнитной записи, сенсорах и датчиках, в радиоэлектронной технике при производстве принимающих антенн с селективным радиопоглощением в субтерагерцовом диапазоне.

В ОИВТ РАН совместно с ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН разработана методика получения гидрофильных и гидрофобных (супергидрофобных) покрытий оксинитрида титана и гексаферрита бария с возможностью нитридации приповерхностных слоев, увеличивающей прочность и коррозионную стойкость поверхности. Предлагаемый метод основывается на кратковременной обработке поверхности потоком плазмы азота со среднемассовой температурой 4–9 кК, генерируемой плазмотроном постоянного тока. По сравнению с традиционными химико-техническими способами предложенная технология позволяет за короткий промежуток времени (до 1 мин), регулируя состав и среднемассовую температуру плазмы, получить поверхность с гидрофильными, гидрофобными (супергидрофобными) свойствами без нанесения гидрофобизирующих агентов.



Гидрофильные I и гидрофобные II свойства пленок оксинитрида титана



Гидрофобные и супергидрофобные свойства гексаферрита бария на С-сапфире: (а) – до плазменного обдува, (б) – после обдува плазмой 4–5 кК, (с) – после обдува плазмой 8–10 кК.



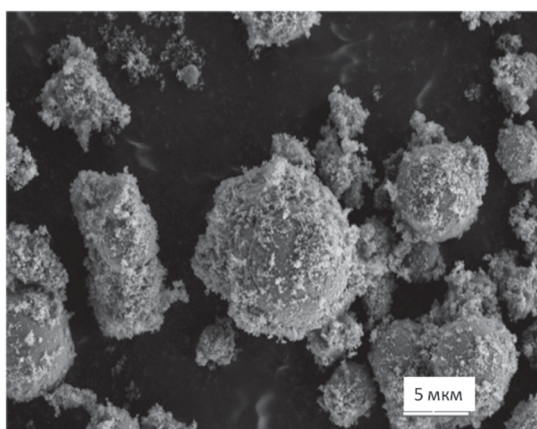


Электродуговой синтез гетерокомпозиционного микроразмерного фотокатализатора, эффективного при воздействии солнечного излучения

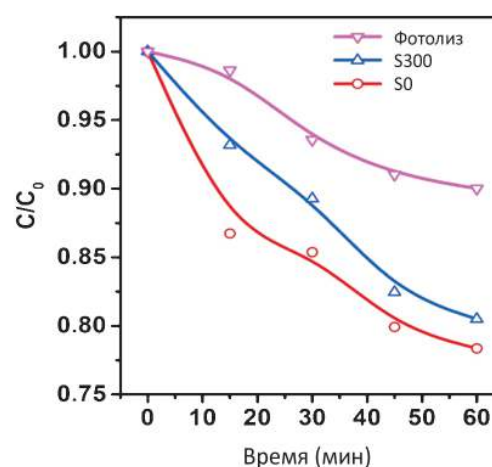


Бурное развитие промышленности сопровождается загрязнением окружающей среды и водных ресурсов. Если методы фильтрования крупномасштабных загрязнений отработаны, и используются на очистных сооружениях, то минерализация токсичных молекулярных загрязнителей возможна только с применением фотокатализаторов. Существует две основные проблемы: поиск экологичного и масштабируемого метода синтеза микроразмерного фотокатализатора и повышение его эффективности (особенно при воздействии солнечного излучения). В отличие от традиционных методов получения композиционных микрочастиц для фотокатализаторов, уникальность плазменной технологии состоит в возможности реактивного синтеза новых фаз в приповерхностных слоях порошков с контролируемым химизмом высокотемпературных реакций, морфологией, структурой, управлением физико-химическими свойствами и масштабированием при низкой себестоимости, высокой эффективности и экологичности.

В ОИВТ РАН совместно с НИЦ «Курчатовский институт» разработан метод плазменно-ассистированного синтеза гетерокомпозиционных микрочастиц TiO_2/ZnO с высоким содержанием фазы анатаза. Предлагаемый метод основывается на обработке смеси порошков микрочастиц титана и цинка в плазме азота, генерируемого плазмотроном постоянного тока с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом со среднетемпературной температурой плазмы в зоне подачи порошка до 3–4 кК. Полученный гетерокомпозиционный микроразмерный фотокатализатор на основе TiO_2/ZnO отличается от традиционных высокой эффективностью разложения трудноокисляемых органических загрязнителей (антибиотиков, фенолов) при облучении солнечным светом.



Микроскопическое изображение гетерокомпозиционного микроразмерного фотокатализатора на основе TiO_2/ZnO



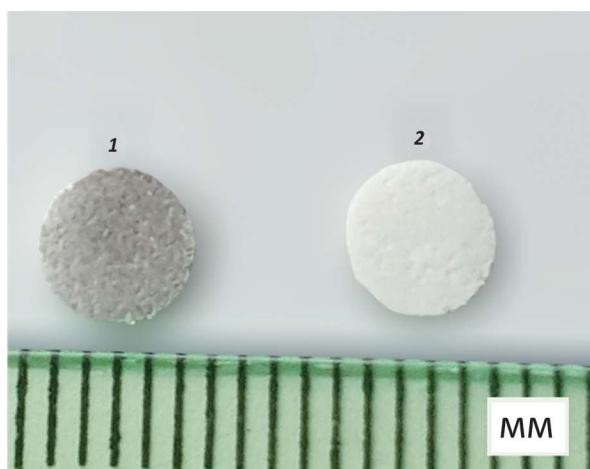
Фотокаталитическая деградация метронидазола под действием солнечного света при использовании гетерокомпозиционного микроразмерного фотокатализатора на основе TiO_2/ZnO (S0 – синтезированный образец; S300 – постобработка при 300°C). Для сравнения приведена кривая фотолитизации

Плазменный синтез плотной керамики оксида галлия

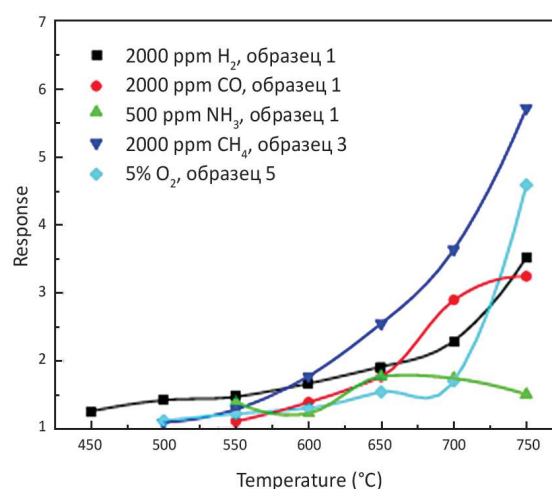


Оксид галлия относится к критически важным материалам со сверхширокой запрещенной зоной, что позволяет создавать высоковольтную электронику, высокотемпературные газовые сенсоры, термолюминесцентные детекторы и другие передовые устройства современной электроники. На сегодняшний день не существует экономически доступной технологии синтеза крупногабаритных кристаллов оксида галлия.

В ОИВТ РАН совместно с НИЦ «Курчатовский институт» разработан новый метод плазменного синтеза со скоростью до 2 мкм/с плотной керамики оксида галлия. Источником плазмы служит электродуговой генератор постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги и расширяющимся каналом выходного электрода. Исходный материал состоит из полидисперсного порошка монокристаллического $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с размерами частиц от 5 до 50 мкм. Результаты исследований показывают, что синтезированная керамика обладает ярко выраженными люминесцентными и детекторными свойствами. Отдельно следует отметить ее высокую чувствительность к H_2 , NH_3 , CH_4 при температурах до 750°C , что делает керамику оксида галлия весьма перспективным материалом для использования в качестве высокотемпературного газового сенсора.



Образцы плотной керамики оксида галлия (1 – синтезированный образец, 2 – после термообработки)



Термическая зависимость газочувствительности различных образцов плотной керамики оксида галлия





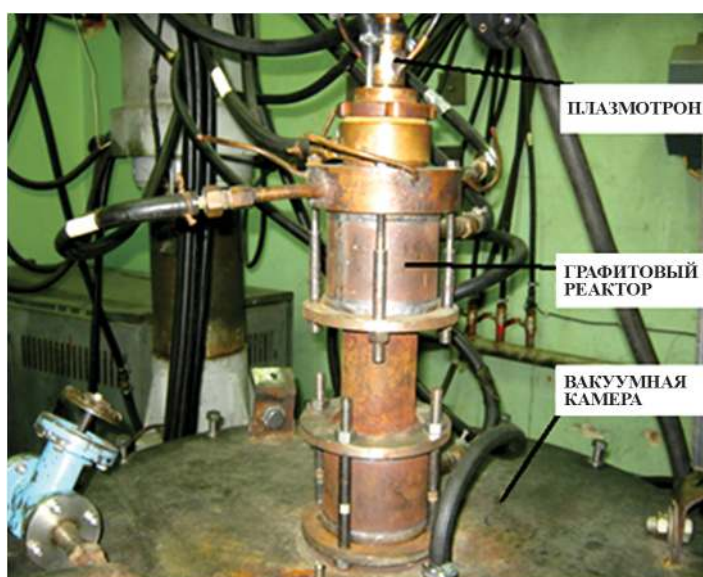
Плазменный синтез композитных микрочастиц



В современном мире происходит бурный рост применения композитных порошков как компонента высокотехнологичных продуктов. По сравнению с металлическими материалами керамические обладают комплексом уникальных свойств и имеют ряд преимуществ, когда речь идет о высоких температурах, механических нагрузках, коррозионной, эрозионной, радиационной стойкости. Общие тенденции развития высокотемпературного материаловедения показывают, что наиболее перспективны композиционные материалы на керамической матрице из бескислородных тугоплавких соединений – бориды, карбиды, нитриды, силициды переходных металлов. Большое влияние на свойства керамических матриц оказывают различные добавки, которые способствуют лучшему соединению частиц в процессе прессования и спекания материала.

Предлагаемая технология получения композиционного материала на основе микропорошка кубического нитрида бора с покрытием из углерода основана на применении электродугового плазмотрона, что обеспечивает более высокую производительность и чистоту материала по сравнению с традиционными методами.

К настоящему времени в ОИВТ РАН разработан плазмохимический реактор для синтеза композитных микрочастиц при пониженном давлении, преимуществом которого является одностадийный процесс, низкие требования к качеству исходных материалов и высокие скорости реакций.



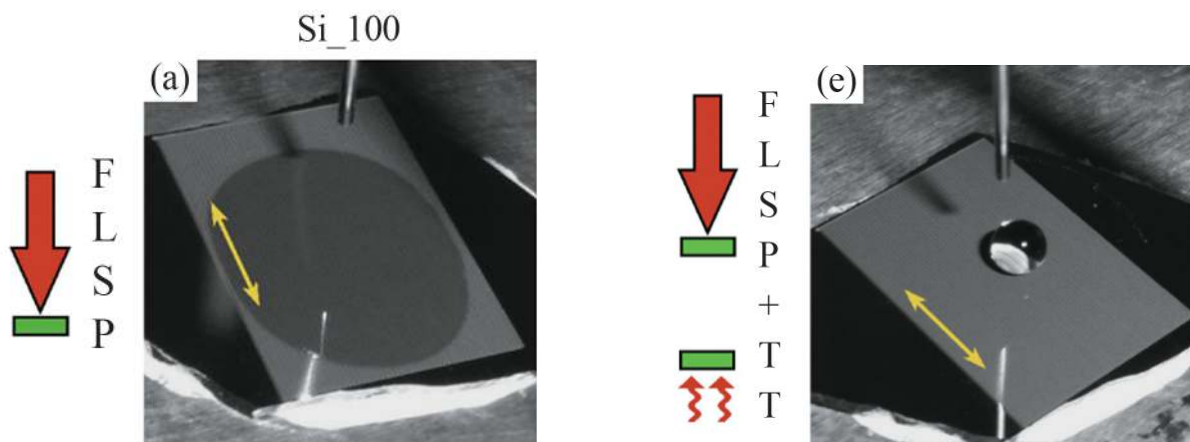
Плазмохимический реактор для получения композиционного материала на основе кубического нитрида бора и углерода

Прецизионная лазерная обработка и наномодификация поверхности



В последние годы большой научный и практический интерес вызывают функциональные энергетические поверхности, модифицированные под определенные технологические задачи. Особенно такой интерес имеется при решении задач, связанных с разработкой энергоэффективных теплообменных поверхностей в тепловой и атомной энергетике.

В ОИВТ РАН на примере полированного монокристаллического кремния с помощью воздействия фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) получена функциональная кремниевая поверхность с иерархической архитектурой в виде параллельных микроканалов, покрытых хлопьеобразными наноструктурами. Подобные функциональные поверхности могут быть использованы в технологии капельного охлаждения нагреваемых тел.



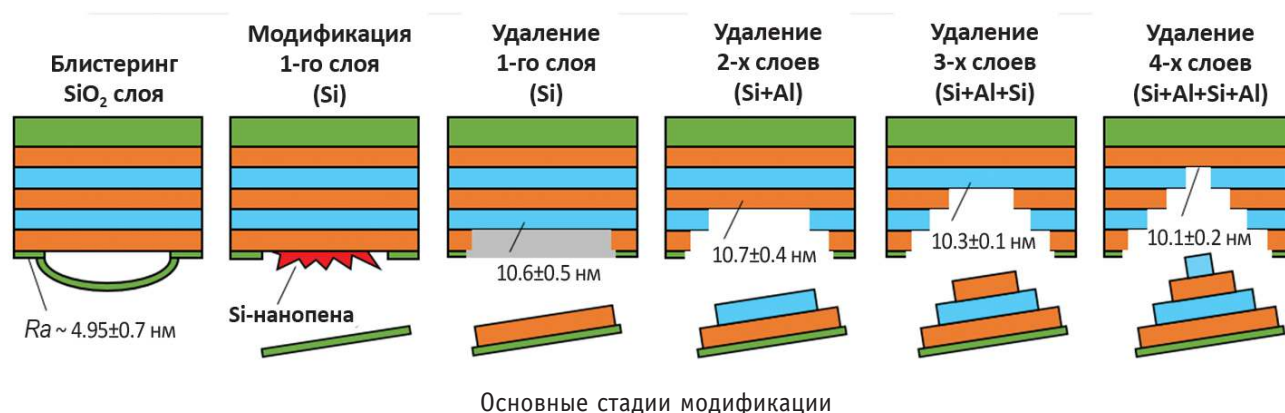
Управление смачиваемостью, Si. Слева – обработка ФЛИ, справа – ФЛИ+отжиг

Данная функциональная поверхность (рис. слева) обладает супергидрофильными свойствами (угол смачивания 0°) и демонстрирует увеличение скорости испарения капель воды от 2 до 6 раз в зависимости от температуры нагрева поверхности. Обнаружено, что после термического тренинга подобной поверхности она необратимо приобретает практически супергидрофобные свойства (угол смачивания 150°), что приводит к уменьшению скорости испарения и сдвигу температуры Лейден-фроста в область более низких температур по отношению к значениям для полированного кремния.

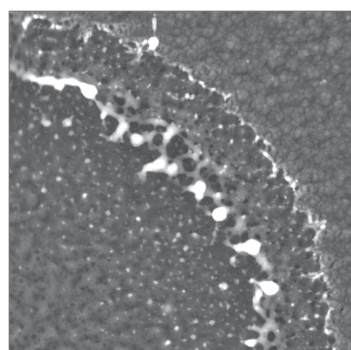
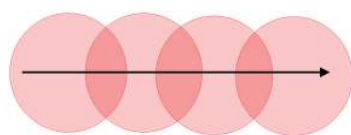


Все современные технологии изготовления фотоэлектрических элементов, органических светодиодов и плоских экранов основаны на использовании многослойных структур различных материалов: металлов, полупроводников и диэлектриков, толщина слоев которых находится в диапазоне 10–1000 нм. В солнечной энергетике существует ряд специализированных задач, включающих лазерную обработку, скрайбирование (профилирование) тонкопленочных материалов (laser scribing of thin film materials), удаление пленок с целью их изоляции (laser edge isolation), сверление отверстий и легирование материалов.

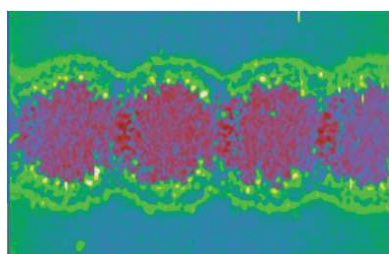
Применение фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) имеет высокий потенциал для решения перечисленных выше задач в силу особенностей их взаимодействия с веществом. При воздействии ФЛИ длительностью ~100 фс глубина прогрева материала составляет всего 10–100 нм, а минимальная толщина удаляемого слоя – примерно половину от этой величины.



В ОИВТ РАН разработана технология модификации и удаления наноразмерных слоев многослойных структур при воздействии ФЛИ. Данная технология имеет следующие возможности: селективная модификация как поверхностного оксидного слоя (блистеринг, удаление слоя), так и нижележащих слоев Al и Si; эффект удаления нескольких слоев за один лазерный импульс (от одного до четырех).



Снятие слоя
при сканировании



АСМ

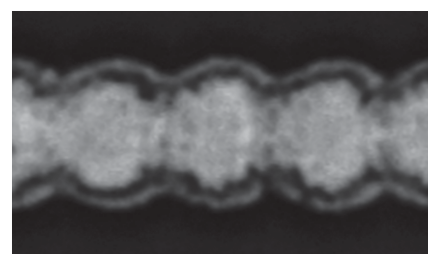


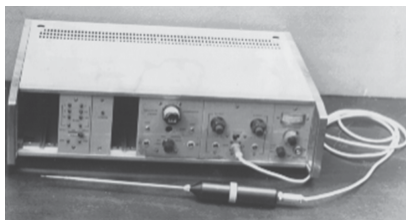
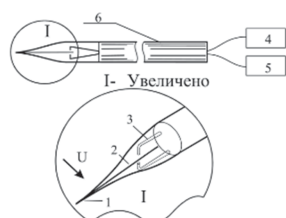
Фото на просвет

15.8. Фотоника

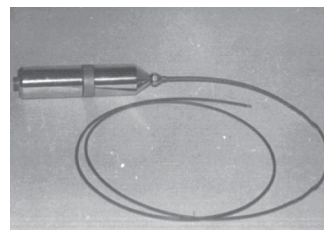
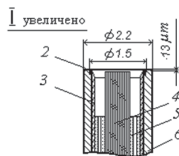
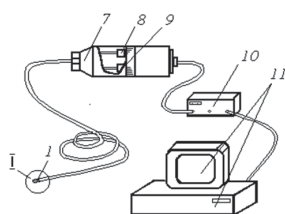
Разработка измерительных датчиков физических величин на основе волоконной оптики

Прогресс в естественно-научных исследованиях в существенной степени определяется развитием измерительной техники, важнейшей частью которой являются первичные преобразователи (датчики) различных физических величин и типов. Для измерений в особых условиях эксплуатации, например, в токонесущих жидкостях (энергетика, электрометаллургия) и повышенной взрывоопасности (химическая и горнодобывающая промышленность), наиболее пригодны датчики на основе волоконной оптики. В них световой поток от источника излучения по световодам подводится к чувствительному элементу датчика, где световые параметры (например, интенсивность) трансформируются под действием различных измеряемых величин, в том числе давления, температуры и скорости. Далее световой поток по второму световоду поступает в фотоприемник, преобразуется в электрический сигнал и обрабатывается на компьютере или другой специализированной аппаратуре. По сравнению с датчиками других традиционных типов волоконно-оптические преобразователи имеют относительно малые размеры, улучшенные динамические характеристики и пригодны для измерений в сильных электромагнитных полях как постоянного, так и переменного тока.

К настоящему времени в ОИВТ РАН разработано несколько типов волоконно-оптических датчиков, в том числе скорости (на рисунке слева) и давления (на рисунке справа). Отлажена лабораторная технология и изготовлены образцы датчиков. Подтверждена их пригодность для работы в различных средах, включая жидкие металлы (ртуть, галлий при комнатных температурах) и двухфазные потоки (вода – водяной пар). В целях повышения их конкурентоспособности планируется повысить верхнюю рабочую температуру преобразователей до $\sim 300^\circ\text{C}$ (датчики скорости) и $\sim 1000^\circ\text{C}$ (датчики давления).



(а) Схема принципа действия датчика скорости жидких металлов: 1 – стеклянный конус (чувствительный элемент), 2 – указатель, 3 – световод, 4 – излучатель, 5 – фотоприемник, 6 – корпус.
(б) Фотография зонда совместно с разработанным вторичным прибором.



(а) Схема датчика давления с вторичной аппаратурой: 1 – датчик, 2 – мембрана, 3 – корпус датчика, 4 – волоконно-оптический жгут, 5 – капилляр для компенсации давления, 6 – клей, 7 – зонд, 8 – светодиод, 9 – фотодиод, 10 – блок формирования сигнала, 11 – компьютер. (б) Фотография датчика.

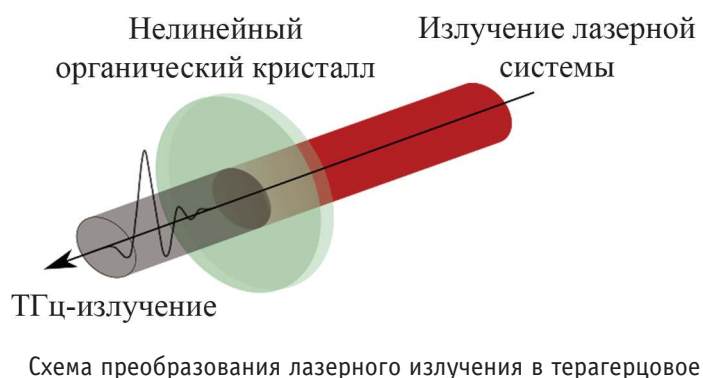
Источники мощного импульсного терагерцового излучения



Источники мощного импульсного терагерцового (ТГц) излучения представляют собой устройства, генерирующие электромагнитные волны в диапазоне частот от 0.1 до 10 ТГц. ТГц-излучение обладает уникальными свойствами, такими как высокая проникающая способность через многие материалы, малая ионизационная активность и возможность взаимодействия с колебательными и вращательными состояниями молекул, что делает его перспективным для применения в науке, медицине, безопасности и телекоммуникациях.

Актуальность исследования и разработки источников мощного ТГц-излучения обусловлена растущим спросом на передовые технологии в области науки, медицины, промышленности и безопасности. В частности, ТГц-технология может использоваться для создания новых методов диагностики материалов, включая неразрушающий контроль качества продукции, а также для разработки новых видов систем связи.

В ОИВТ РАН на базе уникальной тераваттной фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы разработан инновационный высокоэффективный источник мощного ТГц-излучения с характеристиками мирового уровня, позволяющими достичь напряженности электрического поля более 20 МВ/см в диапазоне 0.5–5 ТГц. Параметры лазерной системы позволяют в будущем достичь напряженности поля до 100 МВ/см.



15.9. Информационные технологии

База данных «ИВТАНТЕРМО»

TRL 4

IVTANTHERMO

База данных по термодинамическим свойствам веществ

Доступные разделы:

[Термодинамические свойства более 3000 веществ](#)[Расчет равновесного состава](#)[Список библиографических карточек](#)

Выберите химический элемент для просмотра списка содержащих его веществ или просмотрите полный список доступных веществ

H																	He
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Правообладатель © 2018 Госкорпорация РОСАТОМ. Разработчик ОИВТ РАН.

С развитием технологий и усложнением производственных процессов возрастает необходимость в точных данных о свойствах веществ для обеспечения надежности проектирования.

Термодинамические базы данных становятся незаменимым инструментом для сокращения затрат на исследования и ускорения разработки технологий, заменяя или дополняя экспериментальные методы. Особенно это актуально для отраслей, таких как энергетика и химия, где точность данных имеет решающее значение для эффективности процессов.

В ОИВТ РАН была разработана база данных «ИВТАНТЕРМО» (thermo.jiht.ru), которая представляет собой информационную систему, предоставляющую проверенные данные о термодинамических свойствах веществ. Она находит применение в научных исследованиях и промышленности для моделирования и проектирования, позволяя снизить затраты на исследования, заменяя или дополняя экспериментальные

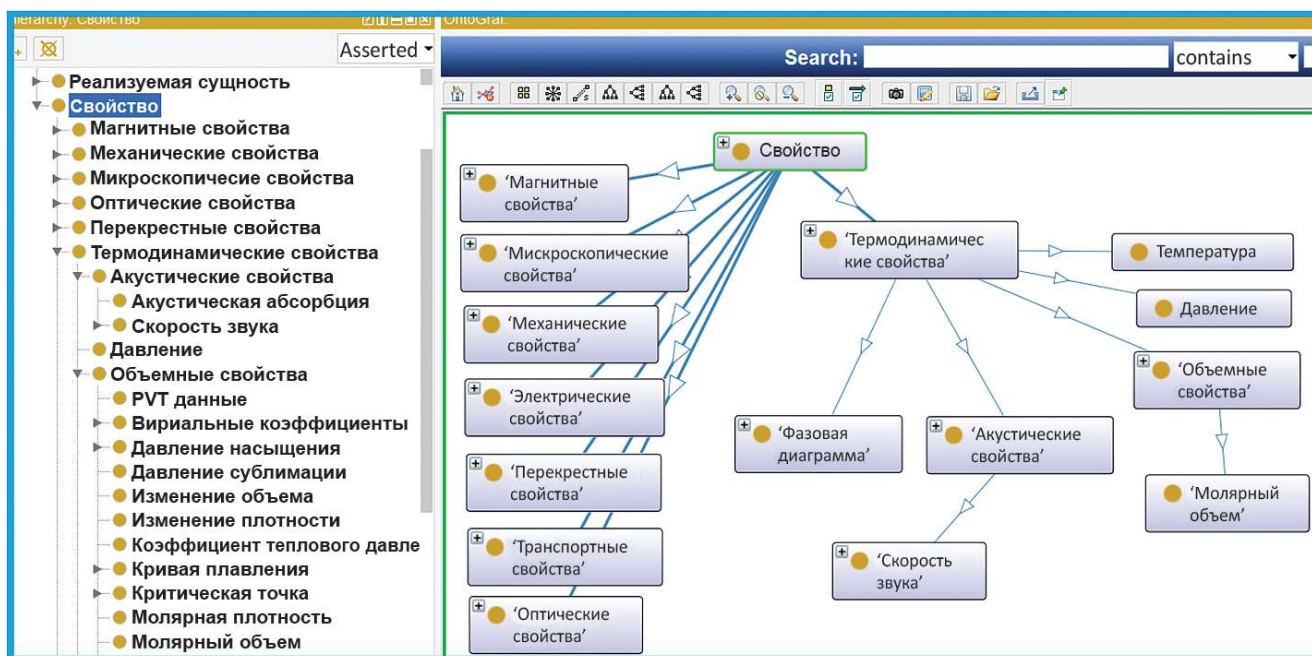
методы. Система обеспечивает веб-доступ, гарантирует высокую надежность данных и включает в себя набор вычислительных модулей для проведения термодинамического моделирования.

ОИВТ РАН планирует дальнейшую адаптацию термодинамических баз данных под веб-архитектуру, что расширит доступ к данным. Также будет продолжено развитие методов квантово-химических расчетов, чтобы повысить точность и полноту данных о веществах без необходимости проведения экспериментов.

Доступность всевозможных данных по свойствам веществ является обязательным условием для исследований и проектирования в любой отрасли – от энергетики и машиностроения вплоть до фармакологии и наноматериалов. Проблема современного этапа – исключительный объем и многообразие данных при наличии факторов, влияющих на их полноту и достоверность: влияние среды, геометрии и чистоты образца, технологии изготовления и проч.

Разработано универсальное решение для организации и объединения большого количества источников информации на основе онтологии. Это решение было создано на основе массива данных о теплофизических свойствах, взятых из базы данных ТЕРМАЛЬ, которая была разработана в ОИВТ РАН.

Предлагаемый метод существенно превосходит традиционные базы научных данных, поскольку он не использует жесткие схемы и структуры для описания информации. Это достигается благодаря применению онтологии в сочетании с гибким форматом данных, который позволяет хранить документы любого типа и структуры, а также использовать различные типы ссылок на внешние источники.



Фрагмент онтологии по свойствам веществ на основе базы данных ТЕРМАЛЬ