



НОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ, ЦИФРОВИЗАЦИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

ХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

ЭНЕРГЕТИКА И КЛИМАТ

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ

МАТЕРИАЛЫ ЭНЕРГОУСТАНОВОК



наука — 

И ТЕХНОЛОГИИ

Сибири

НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ СИБИРИ

Выпуск 6 — Новая энергетика.

Сентябрь 2022 г.

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Сибирское отделение Российской академии наук».
630090, Россия, Новосибирск, проспект Ак. Лаврентьева, 17.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Сибирское отделение Российской академии наук».
630090, Россия, Новосибирск, проспект Ак. Лаврентьева, 17.

Главный редактор:

академик Валентин Николаевич Пармон.

Редакционный совет:

академики РАН Михаил Воевода, Николай Колчанов, Василий Фомин, Дмитрий Маркович, генеральный директор АО «Академпарк» Дмитрий Верховод, заместитель полномочного представителя Президента России в СФО Вадим Головкин, председатель Совета ректоров СФО профессор Николай Пустовой, заместитель председателя СО РАН д.ф.-м.н. Сергей Сверчков (ответственный за выпуск).

Редакционная группа:

Заместитель главного редактора Сергей Сверчков, Лариса Деева, Владимир Ларин, Андрей Соболевский, Татьяна Урбах, Любовь Батраева, Юлия Андреева.

Фото

авторов представленных материалов и из открытых источников.

Дизайн:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова», ректор Багрова Наталья, арт-директор Чешева Татьяна, дизайнеры: Теряева Анна, Перегудова Вероника, Юнг Виктория, Кирпичникова Снежана.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-82311 от 03.12. 2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникациях (Роскомнадзор).

Адрес редакции: 630090, Россия, Новосибирск, проспект Лаврентьева, 17, каб. № 224, тел.: (383) 217-45-78, e-mail: l.batraeva@sb-ras.ru

Отпечатано в ООО «Новосибирский издательский дом» 630048, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 104 Тел.: (383) 299-29-80, e-mail: knigosibirsk@yandex.ru <http://книгосибирск.рф/>

Подписано в печать 09.09.2022
Бумага мелованная. Печать офсетная.

Тираж 1000 экз. Свободная цена.

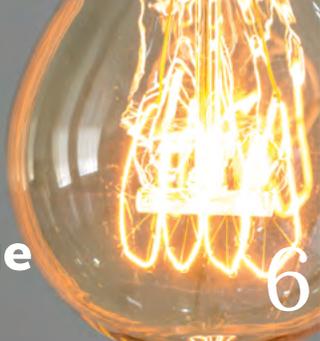
Перепечатка материалов только с письменного разрешения редакции.

Изданию присвоен номер ISSN: 2782-4969

© Сибирское отделение РАН, 2022





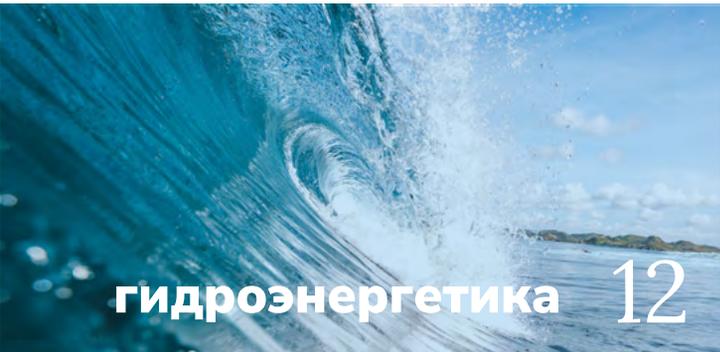


ЭКСПЕРТНЫЕ СТАТЬИ

6

В номере

- стр. 4** Приветствие главного редактора
стр. 6 Энергетика: приоритеты XXI века



гидроэнергетика

12

- стр. 14** Программный комплекс гидродинамических расчетов и оптимизации формы проточного тракта гидротурбин

- стр. 18** Повышение безопасности гидроэнергетического оборудования

- стр. 22** Малые ГЭС как альтернативный источник электроэнергии на территориях Крайнего Севера



автоматизация, цифровизация и моделирование

24

- стр. 26** Системная автоматика для создания локальных интеллектуальных энергосистем и управления их режимами

- стр. 29** Технология численного моделирования физико-химических процессов энергетического оборудования

- стр. 34** Метод полного обращения сейсмических волновых полей с целью реконструкции верхней части геологической среды

- стр. 38** АНАРЭС – программный продукт для моделирования режимов электроэнергетических систем



атомная энергетика

42

- стр. 44** Полимерные композиции для «сухой» дезактивации

- стр. 50** Системы автоматизации контроля качества при производстве ядерного топлива



ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

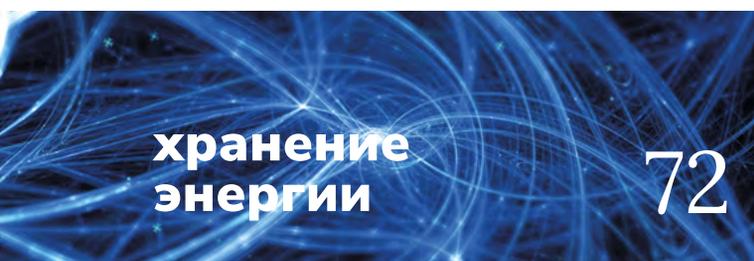
54

стр. 56 Высокоэффективный метод трехстадийного сжигания твердых биотоплив в двухкамерных циклонно-слоевых топках

стр. 60 Технология сжигания угля в виде водоугольной суспензии

стр. 65 Плазменный реактор для переработки отходов

стр. 68 Экспериментальный стенд для разработки технологий обезвреживания особо опасных органических отходов, включая стойкие органические загрязнители, с утилизацией получаемой тепловой энергии



хранение энергии

72

стр. 74 Механохимически стимулированный синтез катодных материалов для металл-ионных аккумуляторов



энергетика и климат

80

стр. 82 Разработка методов внедрения централизованного хладоснабжения на базе абсорбционных чиллеров в регионах России с резко континентальным климатом



безопасность энергетики

84

стр. 86 Новая методология оценки работоспособности и остаточного ресурса длительно работающих объектов топливно-энергетического комплекса



материалы энергоустановок

90

стр. 92 Воздушно-плазменное напыление защитных покрытий

стр. 98 Декарбонизация, «зеленая» металлургия: комплексные решения, создание новых видов технологического оборудования и технологий

Дорогие друзья!

У каждого выпуска журнала «Наука и технологии Сибири» не только своя отраслевая специализация, но и более глубинные особенности. Очередной, седьмой по счету номер посвящён первооснове экономики и, шире, всей человеческой жизни и деятельности — энергетике. Наши предки поняли это, когда начали использовать огонь. Затем закрутились жернова водяных и ветряных мельниц, запыхтели паровые машины, дали ток первые электростанции... Сегодня энергетика питает всё и вся, и первое, что мы делаем, осваивая новую территорию (а в будущем и планету), — ищем источники энергии и способы её извлечения.

Слово «новая» в заглавии номера — не дань конъюнктуре. Даже если абстрагироваться от небесспорной парадигмы декарбонизации, энергетика XXI века ищет новые пути развития, сообразные растущим требованиям к экологической чистоте и оптимизации затрат, как финансовых, так и собственно энергетических. Медленно, но неуклонно уходит в прошлое эпоха дымящих труб и гигантских отвалов золы и шлака: уголь и нефтепродукты остаются важными источниками энергии, но их сжигание переходит на инновационные рельсы — некоторые новые методики и разработки представлены в текущем выпуске журнала.

Впрочем, не буду далее рассуждать о трендах развития энергетике. Вы прочтёте об этом в экспертной статье академика Дмитрия Марковича — выдающегося учёного, физика-энциклопедиста, лауреата Государственной и правительственной премий

России, директора Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН — коллектива, результаты которого также нашли место на страницах этого номера. Замечу, что ряд разработок создан в коллаборациях «академический институт — университет» и «академический институт — инновационная компания». Это показывает, что в Сибири под эгидой СО РАН налаживается продуктивное взаимодействие различных субъектов научно-образовательного и научно-технологического процесса, а высокотехнологичные заделы и разработки, пусть и с немалым трудом, находят пути к практическому применению.

Сложнейшая геополитическая обстановка, условия жесткой технологической блокады актуализируют важность развития именно отечественных технологий. В контексте импортозамещения сфера энергетики выглядит не самой критичной, но, тем не менее, особо приоритетной. Будем помнить, что и энергоносители, и сама энергия являются основой российского экспорта, а теплоснабжение — базовым условием жизни практически на всей территории Российской Федерации. В этом контексте внедрение новейших отечественных разработок в сфере генерации, доставки, распределения, регулирования и рационального потребления энергии видится задачей первой необходимости. Будем надеяться, что ее решению будут способствовать и материалы номера журнала «Наука и технологии Сибири», который вы держите в руках.

Сердечно желаю читателям успеха во всех начинаниях, мира, здоровья и благополучия!



**С уважением,
академик Валентин Пармон**

главный редактор издания
«Наука и технологии Сибири»,
Председатель Сибирского отделения РАН,
вице-президент РАН

*С искренним уважением,
В.Пармон*

ЭНЕРГЕТИКА: ПРИОРИТЕТЫ XXI ВЕКА



Маркович Дмитрий Маркович
Академик РАН

Лавинообразное развитие событий последних лет показало, что энергетика — кровь экономики и объективное основание конкурентоспособности отраслей и регионов. Россия, если ориентироваться на эпитеты в западных СМИ, в короткий срок преодолела путь от «страны-бензоколонки» до «энергетической сверхдержавы».

Стране действительно повезло с природными источниками энергии. Но чтобы оставаться конкурентоспособными в долгосрочной перспективе, необходимо постоянно повышать эффективность и добычи, и транспортировки, и использования энергии.

Специальная научная сессия, посвященная вопросам изменения климата, декарбонизации и энергетического перехода, прошла на Общем собрании СО РАН в декабре 2021 года. Крупнейшие сибирские ученые из разных отраслей научного знания в результате открытой и острой дискуссии пришли к следующим выводам:

- При любых реальных сценариях развития энергетики глобальное потепление продолжится, и уровень в +1,5 °C будет достигнут в середине столетия.

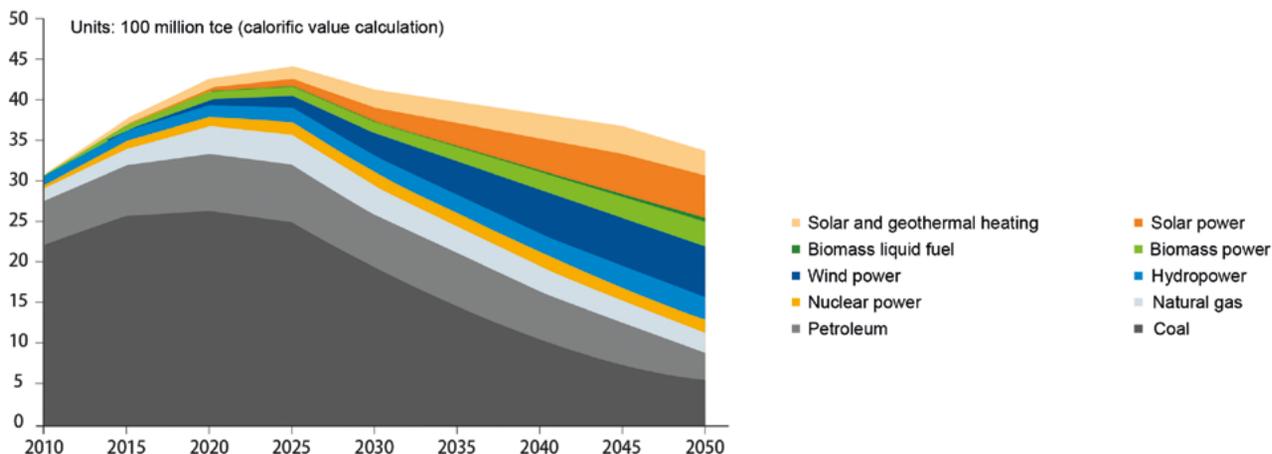


Figure 3 China's Primary Energy Consumption

Рис. 1 Структура потребления первичных источников энергии в Китае до 2050 года.
Источник: China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study, 2015 г.

- Парижские соглашения не могут быть реализованы в полной мере, но глобальная декарбонизация энергетики неизбежна.
- В России нужно последовательно осуществлять декарбонизацию энергетики со скоростями, не превосходящими экономические возможности страны.
- Необходимо дальнейшее развитие климатических моделей Земли с использованием бенчмаркинга.
- В силу неизбежности изменений климата следует разрабатывать адекватные меры по адаптации человеческого общества к существованию в новых условиях. Необходимо создание двух проектов: «Парниковые газы Сибири: экосистемы», посвященный моделированию и мониторингу, и «Углеродная нейтральность Сибири: экономика и технологии», посвященные технологиям адаптации, в том числе замыканию экономических циклов по материалам и по энергетике.
- Целесообразно инициировать разработку интеграционной программы «Структурно-технологическая трансформация систем энергетики в рамках топливно-энергетического комплекса Сибири на период до 2035 года с перспективой до 2060 года в аспекте пространственной и межгосударственной интеграции и возрастающих требований по охране окружающей среды и углеродной нейтральности».
- Перспективное развитие угольной энергетики невозможно без разработки технологий и организации глубокой переработки угля как на месторождении, так и переработки отходов и выбросов на электростанциях. Наиболее уязвимыми регионами по экологическим условиям и углеродной нейтральности являются Сибирский и Дальневосточный регионы, в структуре энергоснабжения которых превалирует уголь.
- Повышенное внимание в условиях энергоперехода и углеродной нейтральности должно быть уделено системам теплоснабжения. Необходимы стратегия и программа развития теплоснабжения страны с дальнейшей их реализацией.

Глобальные тренды

Мир решает задачу энергоперехода: перебалансировки первичных источников и повыше-

ния энергоэффективности промышленности. На данный момент мы наблюдаем последствия несогласованности политик, недооценки сложности и комплексности задачи и переоценки необходимых усилий, ресурсов и времени для перехода. Но общий процесс, нацеленный на снижение антропогенного следа, продолжится после восстановления экономик.

Китай, один из основных потребителей российской энергии, тоже планирует изменить структуру потребления (рис. 1). Так, общее потребление планируется к 2050 году снизить за счет повышения энергоэффективности примерно на 20 % от максимальных значений, потребление газа – на 40 %, а потребление угля – на 70 %. При этом солнечная генерация увеличится примерно в 5 раз от сегодняшнего уровня.

При всем этом ретроспективный анализ показывает, что в течение всех предыдущих технологических укладов человечество удваивало количество энергии в расчете на одного человека. Этого требовало развитие экономики и технологический прогресс. Остается нерешенным теоретический вопрос, возможно ли развитие экономики при сохранении или снижении общего потребления энергии, которое прогнозируется в следующие десятилетия.

Изменения во всем жизненном цикле энергии всех типов

Углеводороды:

лучшие показатели КПД паросиловой установки, которых в стране порядка 1000 единиц (работают на газе, угле и мазуте), на суперсверхкритических параметрах пара – в среднем 45 % с теоретической возможностью повышения до 50 %. Парогазовый цикл использует дополнительно энергию продуктов сгорания топлива, его КПД лежит в пределах от 51 до 60 %, что позволяет сократить потребление топлива на 30–40 %. По экологическим параметрам ПГУ пока также вне конкуренции. Но в самой наукоемкой части – горячем тракте – отечественные технологии отстают, поэтому практически все установки импортные. Наиболее приоритетное направление – получение жаростойких материалов для покрытий камер сгорания и лопаток турбин, что

позволит сначала импортозаместить технологии, а затем и повысить КПД за счет наращивания рабочих температур с 1300 °С до, в перспективе, 1800 °С.

Для целей снижения негативного экологического эффекта энергетики и снижения выбросов вредных веществ, в том числе парниковых газов, наиболее перспективны следующие группы технологий: прямой захват CO₂ из выбросов энергетических установок, каталитический дожиг, сжигание с водяным паром, низкотемпературное каталитическое сжигание в кипящем слое, газификация угля.

Производство кокса для нужд металлургии методом частичной газификации угля также даст значительные экономические и экологические эффекты. Такие технологии существуют, их надо доводить до промышленного применения и массово внедрять в промышленность.

Атомная энергетика:

СО РАН имеет серьезный опыт сотрудничества с предприятиями отрасли: и по вопросам создания новых технологий в различных нишах этой индустрии, и по задачам обеспечения безопасности. Активная работа ведется по научному обоснованию и заделу для технологий нового поколения, основанных на замкнутом ядерном топливном цикле. В Северске Томской области реализуется проект строительства реактора на быстрых нейтронах Брест-ОД-300 программы «Прорыв». Развиваемые в программе технологии выходят на финальный этап разработки и тестирования, предстоит стадия сертификации. Есть надежда, что это будет действительно прорыв – и по эффективности использования ядерного топлива, и по безопасности эксплуатации новых станций, и по экологическому эффекту всего цикла. Поэтому СО РАН, выступая научным экспертом корпорации «Росатом», максимально способствовало инициативе внесения международными регуляторами атомной энергии в список «зеленых» источников энергии.

Поскольку ни один другой традиционный источник энергии не позволяет кратное масштабирование добычи и генерации, атомная энергетика с повышенной в десятки раз эффективностью использования природного топлива видится наи-

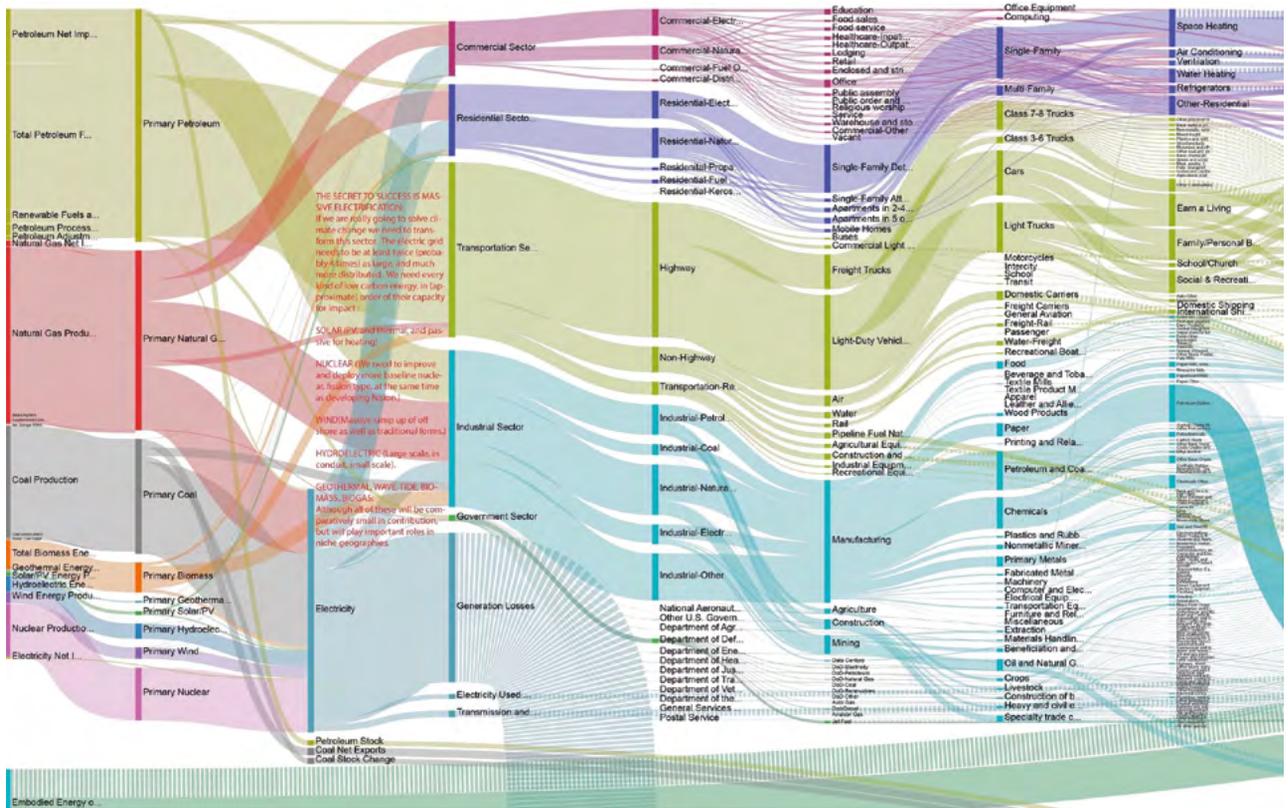


Рис. 2. Диаграмма потоков энергии по данным Департамента энергетики США (USDepartmentofenergy). Интерактивная версия <http://www.departmentof.energy/>

более перспективной в горизонте десятков лет.

Электроэнергия:

Вторичная энергия, используемая для транспортировки и доставки энергии к массовому потребителю с высокими экологическими требованиями. Ключевое направление – оптимизация потребления, снижение потерь. Необходимо развивать материалы с магнитными и сверхпроводящими свойствами для повышения эффективности электродвигателей и генераторов

Увеличение обращения вторичной энергии потребует масштабирования технологий хранения излишков энергии и «умной» балансировки в сетях. Химические аккумуляторы столкнутся с ограничением на скорость добычи элементов, например лития, и ростом их рыночной цены при остром дефиците. Поэтому поиск и сравнение других способов аккумуляции

продолжается: гидроаккумулирующие и твердотельные потенциальные системы, нагрев расплавленных солей, химические преобразования, окисление и восстановление алюминия и т. д.

ВИЭ:

Несмотря на локальное смещение фокуса внимания на традиционные источники, в долгосрочной перспективе, скорее, дефицит энергии вернет внимание на альтернативы, такие как солнце, ветер, тепло Земли, энергия морей и океанов. Практика показывает, что весомая составляющая стоимости энергии из таких источников – обеспечение системы компенсации нестабильности генерации. Опять необходимы технологии запасания, хранения и балансировки.

Решение задачи замыкания экономических и производственных процессов по материалам

и энергии находится в разработке большого количества технологий повышения энергоэффективности и генерации энергии из промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов. Потенциал повышения энергоэффективности в России — до 40 % от общих затрат энергии на промышленность и частный сектор.

Полезно помнить, что коллектив Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН под руководством лауреата премии «Глобальная энергия» академика РАН Сергея Владимировича Алексеенко оценил перспективы петротермальной энергетики. Запас доступной энергии в этом источнике — несколько тысяч лет с сегодняшними темпами потребления. При этом технологии гидроразрыва пласта применимы в этой задаче и могут перевести направление в практическую стадию. Применение технологий тепловых трансформаторов, в том числе тепловых насосов, также требует массового масштабирования. Наиболее успешный пилотный проект — отопление Байкальского музея СО РАН теплом холодного Байкала.

Водород:

Поскольку источников водорода в природе нет, то необходимо рассматривать водород только как вторичную энергию с функциями транспортировки и хранения. При этом свойства водорода осложняют его использование в чистом виде в энергетике. Скорее, более перспективны технологии связанного водорода, например, муравьиная кислота, аммиак, металлы и металлоорганические каркасные структуры.

Цифровизация:

Диаграмма потоков энергии, пример которой приведен на рисунке 2, позволяет получить общую картину об эффективности использования энергии, принимать информированные решения о внедрении технологий и прогнозировать их эффект. Так, например, диаграмма позволяет опровергнуть распространенный тезис, что перевод производств с углеводородных источников на электроэнергию — один из главных приоритетов в вопросах экологии и защиты климата. На деле, учитывая низкий КПД преобразования первичной энергии

в электрическую, такие усилия только увеличат выбросы энергии в атмосферу. И наоборот, технологии, повышающие указанный КПД, дадут максимальный положительный системный эффект.

Но получить такую диаграмму можно, только внедрив систему, собирающую фактические данные в автоматическом режиме. Поэтому правильнее говорить не о цифровизации энергетики, а о цифровизации промышленности в терминах подхода «Industry 4.0».

К данной теме можно отнести задачу энергетики электронных систем. Это не задача экономики энергии, но один из технологических барьеров, сдерживающих развитие компьютерных и суперкомпьютерных технологий. Современные процессоры должны или становиться энергоэффективнее, или научиться отводить тепло при повышении своей мощности.

Организационные инициативы

Сибирское отделение РАН инициировало и участвует во многих проектах, связанных с созданием новых технологий по запросу реального сектора экономики. Кратко перечислю некоторые из них.

Центр компетенций Национальной технологической инициативы (ЦК НТИ) по водородной энергетике, инициатор Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН»: 33 организации науки, образования и индустрии, полный жизненный цикл — от создания технологий эффективной генерации, транспортировки, использования до развития рынка применения водорода.

ЦК НТИ по новым материалам, инициатор НГУ — материалы для отечественного двигателя- и турбостроения.

Три центра трансфера технологий в Новосибирской области: проекты энергоэффективных технологий переработки отходов в энергию, экологического и каталитического сжигания «плохих» топлив, производства синтез-газа, улавливания CO₂ и многие другие.

Комплексная научно-техническая программа (КНТП) «Чистый уголь — зеленый Кузбасс»: 28 вузов, институтов и заказчиков, добыча и глубокая переработка угля, газификация,

микроугольное топливо, углеродное волокно, цифровые и экологические технологии.

КНТП «Энергетика больших мощностей», инициатор Московский энергетический институт и ПАО «Силовые машины» — новые жаропрочные материалы, газовые турбины и парогазовые установки большой мощности, гидромашины повышенной мощности и технологии для ГЭС-ГАЭС, технологии передачи и распределения энергии.

КНТП «Создание экологически безопасных промышленных производств базовых высокотехнологических химических продуктов для автомобильной, строительной, медицинской и пищевой промышленности из углеводородного сырья на основе инновационных отечественных научных разработок», инициатор ФИЦ ИК СО РАН и группа компаний «Титан» — технологии глубокой переработки углеводородов, каталитические технологии.

Взгляд сверху

Таким образом, энергетика не только является основой всех производственных отраслей экономики, но и ставит задачи и определяет вектор развития для большинства научно-технических дисциплин. Необходимо планомерное поступательное развитие отраслей с учетом запросов и вызовов, доступных ресурсов, возможностей и достижений науки. Планы развития необходимо синхронизировать и с программами исследований, и с инвестиционными циклами и трендами, и с отраслевыми политиками, и с инициативами в сфере образования и переподготовки кадров. Но и ждать такой полной синхронизации нельзя, необходимо уже сегодня прилагать большие усилия по всесторонним горизонтальным взаимодействиям, по согласованию взглядов, приоритетов и знаний в совместных практических проектах на злобу дня. Повторюсь, от этого зависит конкурентоспособность всей экономики России на мировой арене сегодня, завтра и послезавтра ■



1

гидроэнергетика

14

Программный комплекс гидродинамических расчетов и оптимизации формы проточного тракта гидротурбин

18

Повышение безопасности гидроэнергетического оборудования

22

Малые ГЭС как альтернативный источник электроэнергии на территориях Крайнего Севера

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГИДРОТУРБИН



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики
им. С.Л. Соболева Сибирского
отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Коптюга, 4



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики
им. С. С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Лаврентьева, 1

Скорospelов Владимир Анатольевич

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
тел.: (383) 329-76-94, vskrsp@math.nsc.ru

Турук Полина Александровна

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
тел.: (383) 329-76-94, turuk@math.nsc.ru

Воронова Любовь Григорьевна

ведущий программист,
тел.: (383) 329-76-94, vskrsp@math.nsc.ru

В Институте математики им. С. Л. Соболева СО РАН и Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН разработан программный комплекс CADRUN, предназначенный для расчета пространственных течений жидкости, а также оптимизации формы проточного тракта турбомашин: гидротурбин и насосов. Программный комплекс позволяет оперативно рассчитывать коэффициент полезного действия (КПД) в широком диапазоне режимов работы, прогнозировать кавитационные явления и их влияние на КПД, рассчитывать частоту и амплитуду пульсации давления в точках проточного тракта.

Чирков Денис Владимирович

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
тел.: +7-913-897-77-52, chirkov.itp@gmail.com

Черный Сергей Григорьевич

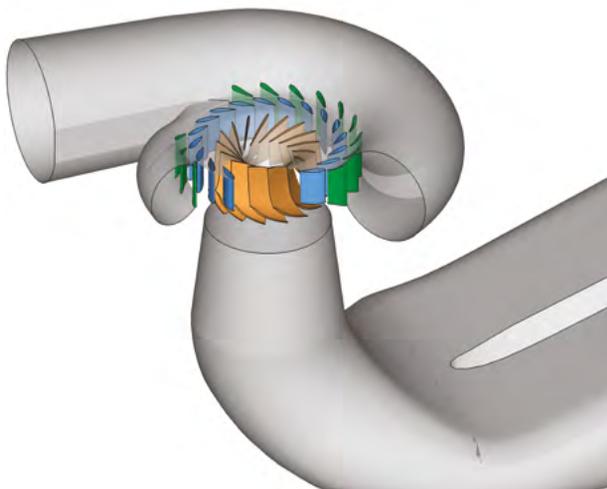
главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук,
sgcherny@ngs.ru

Движение жидкости или двухфазной среды «жидкость-пар» в проточном тракте установки описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса, замкнутыми различными моделями турбулентности. Для численного решения этих уравнений используются оригинальные высокоточные алгоритмы геометрического и численного моделирования. Достоверность получаемых результатов подтверждена многочисленными сравнениями с экспериментальными данными.

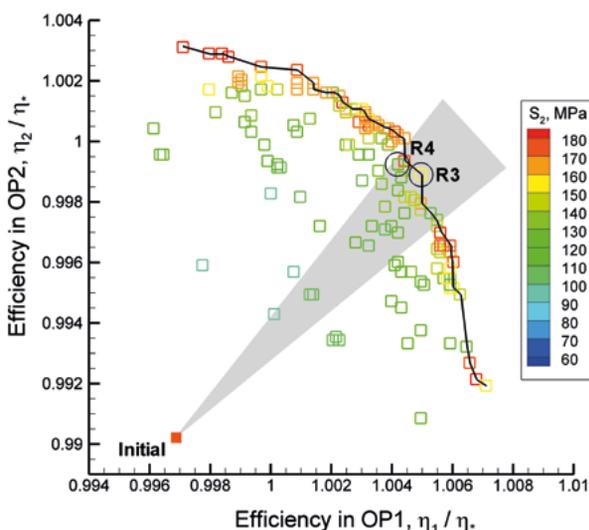
Основной элемент любой гидротурбины – рабочее колесо, форма лопастей которого опре-



1



2



3

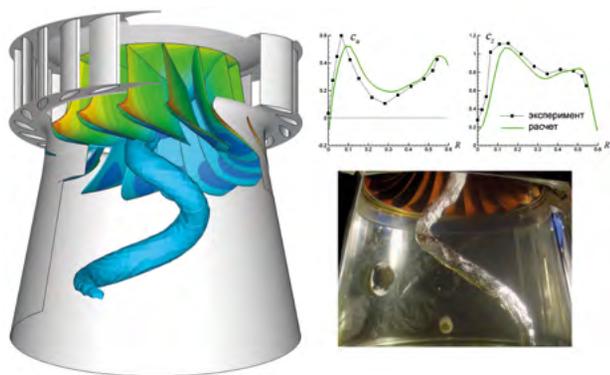
деляет мощность, КПД турбины, её кавитационные и прочностные качества.

Для крупных гидроэлектростанций проектируются уникальные рабочие колеса, максимально отвечающие напору и пропускной способности данного водохранилища. При проектировании рабочих колес гидротурбин стараются обеспечить следующие характеристики: высокий КПД в широком диапазоне режимов работы, минимальные кавитационные явления (процессы, связанные с образованием и последующим схлопыванием в потоке жидкости кавитационных пузырьков), заданный запас прочности. Таким образом, проектирование рабочего колеса – многоцелевая задача, решение которой вручную, методом проб и ошибок, чрезвычайно трудоемко и затратно. Поэтому в практике турбостроения все шире применяются математические методы оптимизации, позволяющие автоматизировать процесс проектирования формы проточной части. Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН совместно с Институтом теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН занимаются разработкой методов, вычислительных алгоритмов и программного обеспечения для автоматизации процесса проектирования ■

1. Форма лопастей рабочего колеса до и после оптимизации. Цветом показаны линии тока и распределение давления вдоль них.

2. Проточный тракт гидротурбины.

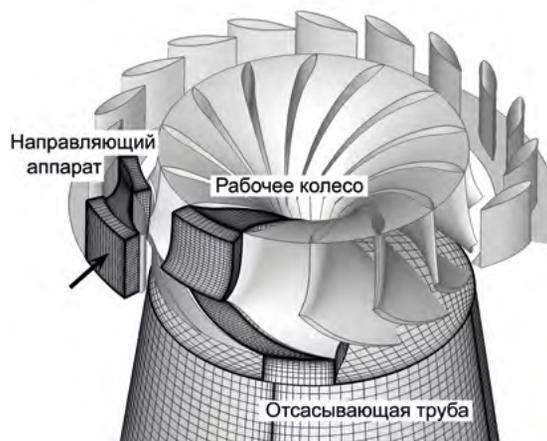
3. Фронт Парето – множество решений задачи оптимизации.



4

Исследования ведутся в кооперации с ведущим производителем гидротурбинного оборудования в России — АО «Силловые машины» (г. Санкт-Петербург). Изначально заказчиками ставилась задача создать программный комплекс гидродинамических расчетов для быстрого расчета трехмерного течения в рабочем колесе и прогноза КПД турбины. Постепенно на базе этого комплекса была создана система автоматического проектирования, которая по заданным требованиям находит оптимальную форму рабочего колеса. Эта система внедрена в конструкторское бюро АО «Силловые машины» и успешно используется при проектировании новых рабочих колес. В частности, с ее помощью были спроектированы рабочие колеса для Усть-Среднеканской и Красноярской ГЭС.

Возможности системы постоянно расширяются. Сегодня помимо чисто гидродинамических критериев качества (таких как КПД, кавитационные характеристики) есть возможность автоматически учитывать также прочность и вес рабочего колеса. Чем ниже вес, тем ниже металлоемкость рабочего колеса и стоимость его изготовления. С другой стороны, уменьшение веса может приводить к снижению прочностного запаса. Прочность и вес рабочего колеса в большой степени определяются распределением толщины лопасти, поэтому при проектировании важно уметь варьировать закон распределения толщин, желательным путем изменения небольшого числа параметров. Общее число геометрических параметров, задающих форму рабочего колеса, включая форму срединной поверхности лопасти и распределения толщины, около 30. Для поиска оптимального набора геометрических параметров используется многоцелевой генетический ал-



5

горитм, моделирующий процесс естественного отбора в биологии. В ходе оптимизации рассматривается большое число различных вариантов геометрии рабочего колеса, для каждого варианта вычисляются его критерии качества — гидродинамические и прочностные характеристики. Затем отбираются лучшие варианты, на их основе строится новое множество вариантов геометрии, и цикл повторяется. Оптимизационные расчеты, требующие перебора большого числа вариантов геометрии, проводятся на многопроцессорных ЭВМ — вычислительных кластерах.

Для демонстрации возможностей разработанной технологии проведена серия оптимизационных расчетов радиально-осевого рабочего колеса гидротурбины Красноярской ГЭС. Полученные результаты показывают, что в новой постановке удастся одновременно повысить КПД турбины на 0,8 % в широком диапазоне режимов и снизить его вес на 15 % без ухудшения прочностных характеристик лопасти. Здесь необходимо отметить, что современные рабочие колеса служат более 40 лет, их КПД составляет около 95 %, поэтому его повышение даже на десятые доли процента дает существенную прибыль генерирующей компании. А снижение веса 100-тонного рабочего колеса на 15 % позволяет сэкономить до 18 млн рублей на его производстве.

Характеристики программного комплекса:

- гибкая параметризация формы рабочего колеса — до 40 свободных параметров и отсасывающей трубы — до 19 параметров;
- расчет турбулентного течения жидкости на основе трехмерных уравнений Навье—Стокса;



6

- расчет прочностных характеристик с использованием конечно-элементного анализа;
- одновременное улучшение от 2 до 4 критериев качества (максимизация КПД в нескольких режимах работы, снижение кавитации, повышение прочности, снижение металлоемкости и т.д.);
- генетический алгоритм MOGA для решения задачи многоцелевой оптимизации;
- время проведения оптимизационного расчета — около 5 суток на вычислительном кластере при использовании 120 процессорных ядер.

Технико-экономический эффект от использования CADRUN состоит в повышении КПД гидротурбин на 0,5 %—1 % при одновременном снижении веса конструкции до 15%. Практическое использование комплекса CADRUN существенно сокращает время и затраты на проведение проектно-конструкторских работ, позволяет проектировать турбомашин с КПД на уровне лучших мировых образцов.

На рынке представлены программные продукты для расчетов течений, такие как импортные ANSYS CFX, Fluent, Numeca Fine Turbo и отечественные FlowVison, Логос. Эти программы также предоставляют средства для оптимизации формы проточной части. Однако CADRUN заточен для применения к гидротурбинам и имеет ряд преимуществ:



7

- простота освоения,
- высокая точность расчетов при сравнительно небольших вычислительных затратах,
- оперативность подготовки данных и проведения расчетов,
- автоматизация серийных расчетов,
- обработка и наглядная интерпретация получаемых результатов,
- это полностью отечественная разработка.

Программный комплекс CADRUN зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Программный комплекс CADRUN является завершенным программным продуктом и используется в проектных исследованиях СКБ «Гидротурбомаш» АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург) ■

4. Вихревой жгут под рабочим колесом в расчете и в эксперименте.

5. Конечно-объемные сетки в межлопастных каналах и отсасывающей трубе.

6. Плотина Красноярской ГЭС.

7. Рабочее колесо турбины Красноярской ГЭС.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики
им. С. С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Лаврентьева, 1

Скрипкин Сергей Геннадьевич

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
тел.: (383) 330-66-65, skryp91@mail.ru

Сентябов Андрей Васильевич

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук,
тел.: (3912) 49-47-26, sentyabov_a_v@mail.ru

Гидроэнергетика наряду с тепловой и атомной энергетикой составляет основу производства электроэнергии в современном мире. При этом себестоимость производства на гидравлических электростанциях значительно ниже, чем, например, на тепловых. Гидроэлектростанции играют важную роль в единой энергетической системе ещё и потому, что осуществляют регулирование мощности за счёт возможности оперативного изменения режима работы гидроагрегатов. Особенно важной эта роль балансирующего источника электрической мощности становится с внедрением в мировую энергетику солнечных и ветровых электростанций, которые как раз характеризуются непостоянством производства электроэнергии. Всё это приводит к частой эксплуатации гидроагрегатов в неоптимальных режимах работы, необходимых для регулирования мощности сети и покрытия пиковых нагрузок.



Научный сотрудник ИТ СО РАН, кандидат физико-математических наук А. В. Сентябрь – специалист по численному моделированию сложных гидродинамических потоков



Научный сотрудник ИТ СО РАН, кандидат физико-математических наук С. Г. Скрипкин – доклад с обзором результатов экспериментальных исследований нестационарной динамики прецессирующего вихревого жгута на вручении премии и Золотой медали Алфёровского фонда в номинации «Энергетика»

зок. Однако именно в неоптимальных режимах, когда мощность гидротурбины значительно отличается от той, на которую она была спроектирована, высока интенсивность нестационарных гидродинамических явлений, таких как прецессия вихревого жгута в отсасывающей трубе гидротурбины, формирование отрывных вихрей, лопаточная кавитация и т. д. Указанные явления порождают интенсивные пульсации давления, приводя в конечном счете к механическим вибрациям и значительным динамическим нагрузкам на конструкции турбины. На сегодняшний день мощность самых крупных электростанций достигла крайне высоких значений. Так, например, напор Саяно-Шушенской ГЭС достигает 200 метров, а её мощность превышает 5 ГВт. Величина номинального напора Красноярской и Бурейской ГЭС составляет около 100 м. Обеспечение надежной и безопасной работы столь масштабных промышленных объектов требует решения сложных научных и технических задач.

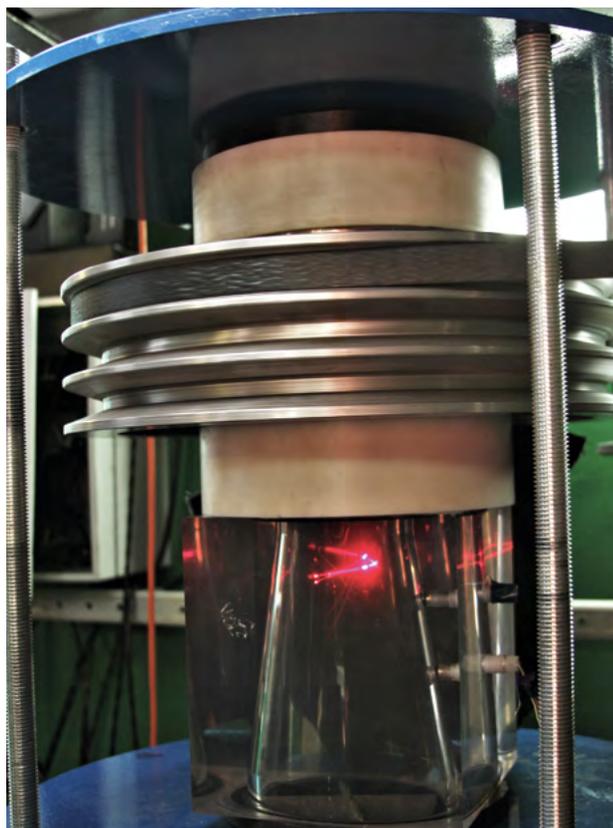
Принципиальная схема работы гидроэлектростанции с вертикальной компоновкой состоит в следующем. Вода из верхнего бьефа по напорному водоводу подаётся в турбину и из неё выпускается в нижний бьеф. Формирование закрученного потока составляет основу работы большинства современных гидротурбин. Проходя спиральную камеру и направляющий аппарат, течение получает сильную закрутку, которая затем используется для передачи крутящего момента рабочему колесу. Рабочее колесо в некотором смысле является «сердцем» любой гидротурбины, под действием напора воды оно вращается, в свою очередь приводя в работу генератор электроэнергии. В оптимальном режиме работы почти вся эта закрутка используется для вращения рабочего колеса, и вращательная компонента скорости за колесом практически отсутствует. Противное означало бы, что часть кинетической энергии, связанная с окружной скоростью, безвозвратно теряется, чего при проектировании гидротурбины стремятся избежать. В ранее упомянутых неоптимальных режимах работы при неполной нагрузке расходуется лишь часть момента импульса потока, поэтому поток за рабочим колесом становится вихревым и имеет значительную закрутку. В режиме повышенной мощности поток за рабочим колесом также имеет закрутку, однако вращается он противоположно вращению рабочего колеса.

Не менее важным элементом гидротурбины является отсасывающая труба, которая пред-

ставляет собой расширяющийся канал, соединяющий турбину с нижним бьефом. Наличие отсасывающей трубы позволяет дополнительно использовать значительную часть кинетической энергии потока, выходящего из рабочего колеса, тем самым увеличивая конечный КПД.

Вихревому потоку свойственно появление различных неустойчивостей. Ещё в начале XX века были замечены колебания мощности гидравлических электростанций. В исследованиях на модельных установках наблюдалось нестационарное поведение вихревого течения в отсасывающей трубе, а затем было установлено, что низкочастотные пульсации энергетических характеристик гидроагрегата связаны с пульсациями в отсасывающей трубе. Дело в том, что при высоких степенях закрутки потока он теряет устойчивость — происходит «распад вихря» (с англ. Vortex Breakdown). В результате на оси течения образуется застойная зона, а сам вихрь начинает совершать вращательное, прецессирующее движение вокруг оси симметрии. Впервые явление прецессии вихревого ядра (ПВЯ) было обнаружено при исследовании т. н. вихревого свистка. В этих экспериментах закрученный поток воздуха, покидая цилиндрическую трубку, генерировал звук определённой частоты. Тон звука повышался с ростом расхода. Такие же опыты были проведены на воде с использованием пузырьков воздуха в качестве визуализации. Оказалось, что пузырьки, выпускаемые на оси течения, вблизи выхода начинают прецессировать вокруг оси канала.

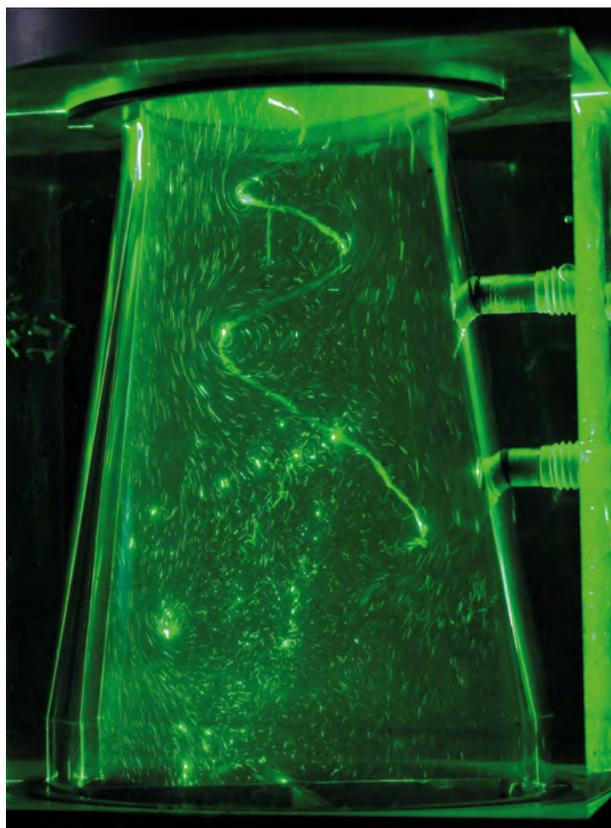
Увеличение закрутки потока в гидротурбинах также приводит к распаду вихря. За рабочим колесом формируется зона возвратного течения, граница которой неустойчива и сворачивается в прецессирующий вихревой жгут. Прецессия вихревого ядра характерна для режимов неполной загрузки (при расходах 50–85 % от оптимального), в которых поток обладает значительной степенью остаточной закрутки. В целом, эксплуатационную характеристику радиально-осевой гидротурбины можно разделить на четыре характерных зоны в зависимости от интенсивности нестационарных процессов. Первая зона находится в пределах изменения нагрузки от 0 до 30 % от максимальной мощности. В этой зоне имеется средний уровень нестационарности, который считается удовлетворительным. Длительная эксплуатация в этой зоне не рекомендуется из-за низкого значения КПД. Вторая зона находится в пределах нагрузок от 30 % до 65–70 %. Она характеризуется



1

высоким уровнем нестационарности потока. Максимальный размах пульсаций приходится на область нагрузок 45–55 %. В этой зоне необходимо снижать уровень пульсаций до допустимого уровня с помощью специальных мер. Третья зона (от 65–70 % до 100 % максимальной мощности) имеет низкий уровень пульсаций потока. В этой области располагается оптимальный режим работы с наибольшим КПД. Четвертая зона находится за линией ограничения работы турбины по мощности. В этой области происходит рост пульсаций потока. Эксплуатация гидротурбины в данных режимах не допускается.

При регулировании мощности в электросети гидроагрегат неизбежно проходит через вторую эксплуатационную зону. Чтобы снизить гидродинамические пульсации, возникающие в этой области, применяют различные способы стабилизации потока. Было предложено множество различных способов, включающих выпуск воздуха в поток, применение стабилизирующих конструкций (рёбер, крестовины, сплиттеров, полого цилиндра), модификация обтекателя рабочего колеса, стабилизация потока с помощью струй воды. В целом, ни один из методов не га-



2

рантирует устранения низкочастотных пульсаций давления в отсасывающей трубе гидротурбины, а разработка и развитие нового метода является актуальным вызовом для исследований. После аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009 г.) интерес к исследованию нестационарных явлений в проточном тракте и методов борьбы с ними значительно увеличился.

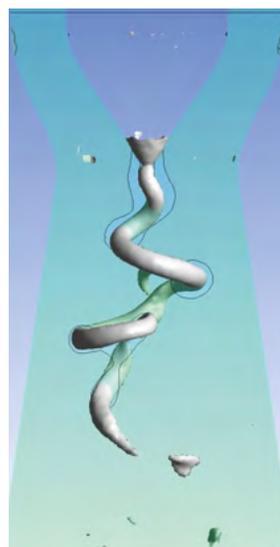
Для исследования сложных гидродинамических явлений в ИТ СО РАН проводятся экспериментальные исследования на лабораторных моделях гидротурбин (рис. 1, 2). Установки оснащены современными измерительными комплексами, включая высокоскоростные камеры, лазерно-доплеровские анемометры и полевые измерители скорости. Основной задачей лабораторных моделей является изучение сложной физики нестационарных, зачастую многофазных, закрученных течений, а также развитие и отработка современных методов контроля и управления вихревыми явлениями.

Следуя современному тренду, наряду с экспериментальными методами исследования течения в гидротурбине в ИТ СО РАН применяется численное моделирование. Ввиду высокой

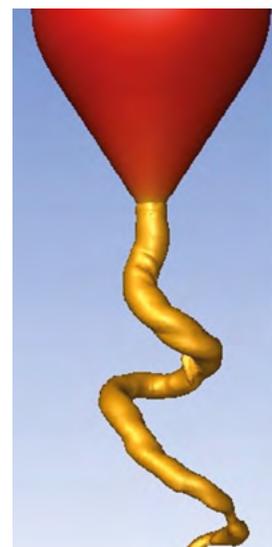
сложности течения в проточном тракте ГЭС при моделировании, как правило, используются значительные упрощения. Расчетные ресурсы для компьютерного моделирования, которыми располагают исследователи ИТ СО РАН, позволяют рассчитывать нестационарное турбулентное течение во всём проточном тракте, что обеспечивает высокую точность таких расчетов.

Примером успешного применения подходов совместного расчетно-экспериментального исследования является всестороннее изучение новых гидродинамических эффектов, напрямую связанных с безопасностью работы гидроэлектростанций. В ходе экспериментов в ИТ СО РАН было впервые обнаружено фундаментальное явление перезамыкания соседних витков вихревой спирали, формирующейся при неоптимальных режимах работы модельной турбины в очень узком диапазоне параметров течения. Позднее было изучено взаимодействие вихревого кольца со стенками отсасывающей трубы гидротурбины. На основе данных высокоскоростной визуализации, синхронизированной с измерением давления, было предложено рассматривать данное явление как возможный источник мощных апериодических пульсаций давления в гидротурбинах.

Для получения дополнительной информации о явлении перезамыкания вихревой спирали было также проведено численное моделирование, позволяющее получить важную количественную информацию о параметрах вихревой спирали. Как показывают экспериментальные и расчетные данные (рис. 3), потеря устойчивости вихревой спирали происходит на границе между различными режимами вихревого течения: между областью с малой закруткой потока и областью устойчивой прецессии вихревого ядра. Расчетные данные хорошо воспроизводят процесс перезамыкания вихревого ядра несмотря на то, что само явление носит апериодический характер. Перезамыканию могут подвергаться различные витки спирального вихря, что приводит к дополнительным непрогнозируемым пульсациям давления. Результаты недавних исследований в данном направлении, выполненных при поддержке Российского научного фонда (<https://rscf.ru/en/project/21-19-00769/>), были опубликованы в 2022 году в высокорейтинговом международном научном журнале International Journal of Heat and Fluid Flow (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142727X22000819?via%3Dihub>).



3



4

Предполагаемые области практического применения:

проведение этапа модельных лабораторных испытаний и численных расчетов для разработки различного гидроэнергетического оборудования, включая гидротурбины для больших, малых, мини- и микроГЭС, реверсивные насос-турбины и центробежные насосы.

1. Лабораторная установка ИТ СО РАН для экспериментального моделирования кавитационных течений в элементах гидроэнергетического оборудования.
2. Визуализация прецессирующего вихревого жгута за рабочим колесом гидротурбины - эксперимент.
3. Эффект перезамыкания вихревого ядра – численное моделирование (показан процесс перехлеста витков спирального вихревого жгута).
4. Перезамыкание вихревого ядра, численное моделирование (визуализация изоповерхностью давления).

МАЛЫЕ ГЭС КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
677000, г. Якутск, ул. Петровского, 2



Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

Ноговицын Дмитрий Дмитриевич

ведущий научный сотрудник отдела проблем энергетики, кандидат географических наук,
dmitry.nogovitzyn@yandex.ru

Никулин Константин Васильевич

ведущий инженер отдела проблем энергетики,
nikulin9090@mail.ru

Отделом проблем энергетики Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН — обособленного подразделения ФИЦ ЯНЦ СО РАН — выполнена оценка гидроэнергетических ресурсов территории Якутии.

На территории Крайнего Севера 53 % потребителей обеспечивают свои потребности в энергии с помощью дизельных электростанций

(ДЭС), которые в свою очередь требуют постоянного завоза ГСМ (для топливного снабжения ДЭС за год затрачивается более 7 млрд руб.) и изношены (60–70 % изношенности ДЭС в некоторых районах севера Якутии). Основной задачей возобновляемых источников энергии является сокращение использования дорогостоящего завозимого топлива. Возможная реализация в ряде районов республики первых в Якутии МГЭС, оснащенных современными агрегатами российского производства, оптимизировала бы ситуацию по расходу дизельного топлива.

Использование существующих методик расчета гидроэнергии рек и их усовершенствование и упрощение для условий Крайнего Севера позволило составить наиболее полный свод знаний о потенциальных ресурсах водной энергии малых рек арктической зоны РС(Я). Такая обширная и трудоемкая работа, включающая в себя не только анализ и обработку огромного картографического материала, но и многолетние экспедиционные работы, выполнена по бассейнам Анабара, Оленька, Яны, Индигирки и Колымы. Потенциальные запасы гидроресурсов рек Якутии составляют 507 млрд кВт·ч.

На всей территории Арктики изолированность арктических населенных пунктов, а также удаленность расположения усложняет инфраструктурные проекты с точки зрения планирования, транспортировки, реализации, эксплуатации и технического обслуживания. Дизельное топливо является основным энергетическим ресурсом в большинстве населенных пунктов. Транспортировка дизельного то-

плива в отдаленные населенные пункты также добавляет значительный риск, неопределенность и увеличивает стоимость доставки топлива. В настоящее время в Арктике используется несколько возобновляемых источников энергии, причем в исследуемом районе их доля несколько выше, чем в среднем по миру.

В настоящее время в Арктике гидроэнергетика является наиболее используемым возобновляемым источником энергии. Там, где имеются гидроэнергетические ресурсы, они могут обеспечить доступную электроэнергию. В Якутии это обусловлено увеличением потребления и большими затратами на доставку дизельного топлива в отдаленные районы республики. Высокая стоимость жидкого топлива и чрезвычайно трудные условия его доставки создают реальные предпосылки для рассмотрения возможностей создания малых ГЭС в арктической зоне республики. Ситуация, возникшая в этой зоне, требует поиска альтернативных источников энергии, которые могли бы сократить использование жидкого топлива, дать перерывы в работе ДЭС для их ремонта и возможной реконструкции. Одним из таких путей является использование энергии малых рек, поскольку количественный и качественный учет их энергетических запасов является основой для выбора створа и размещения малых ГЭС с соответствующими мощностями, соотносёнными с конкретными потребностями населенных пунктов или предприятий с сезонным характером работы.

Следует отметить, что потенциальные гидроэнергетические ресурсы рек представляют собой теоретическую сумму энергии водотоков, которая не может быть реализована полностью вследствие неизбежных потерь, поэтому при планировании использования реки важно знать технически возможные ресурсы. Ввиду отсутствия научно-обоснованной методики определения технических (промышленных) запасов гидроэнергии для этих целей чаще всего применяют приближенный способ, основанный на использовании эмпирических коэффициентов. Значения этих коэффициентов зависят от степени естественной зарегулированности речного стока, т. е. косвенно от величины реки, водности, характера питания гидрологического режима и т. д.

Исследования северных рек отразили благоприятные физико-географические и энергетические условия с точки зрения использования богатых ресурсов гидроэнергии как малых, так и средних рек.

В соответствии с принятыми коэффициентами все малые реки бассейна Яны были охвачены расчетами и общий технически возможный потенциал составил 694,8 тыс. кВт и 6086 млн кВт·ч энергии в средний по водности год.

Технический потенциал всех малых рек бассейна Анабара составил 131,4 тыс. кВт или около 1 млрд кВт·ч энергии в средний по водности год.

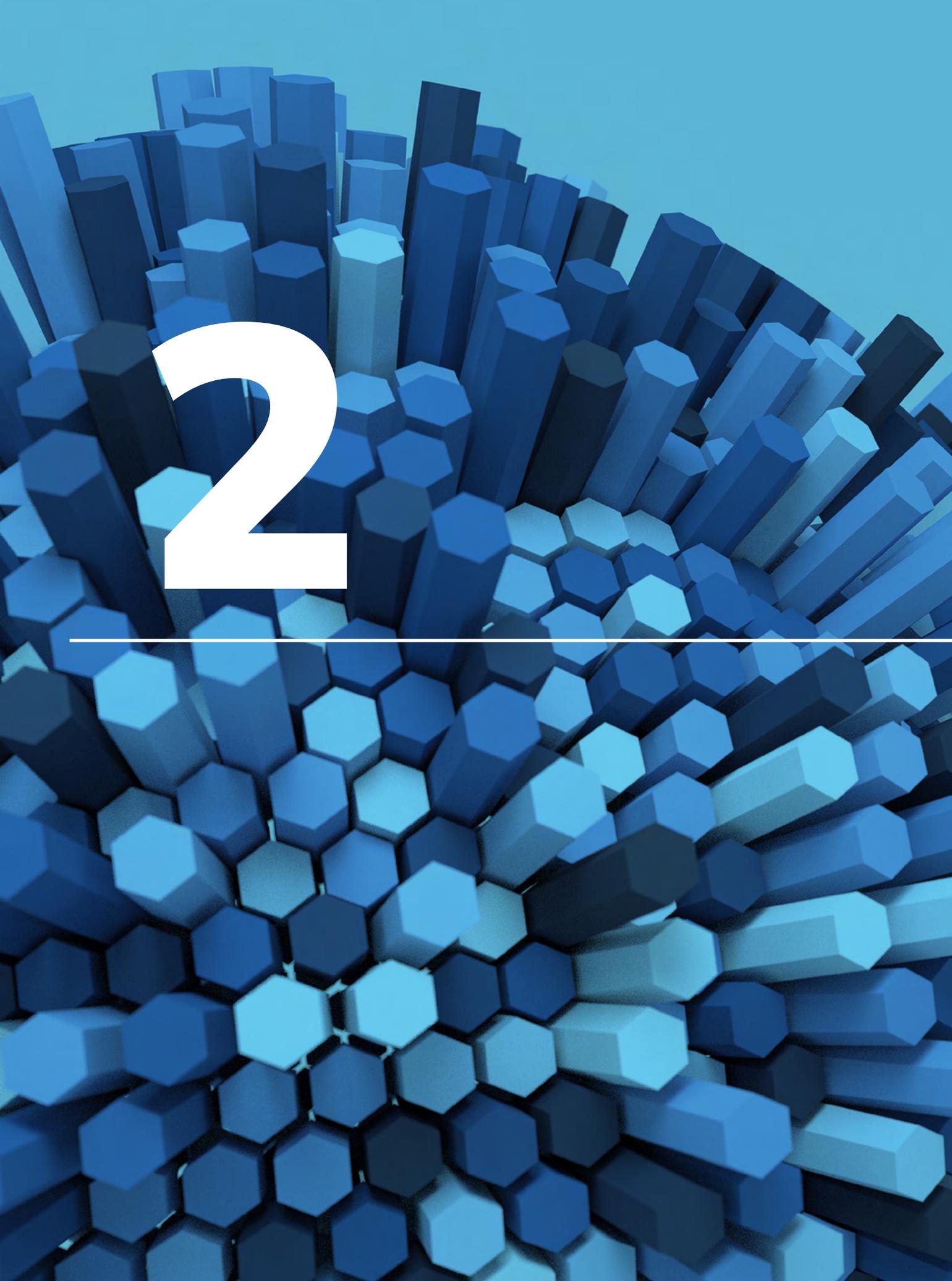
С учетом расчетных коэффициентов для бассейна Индигирки технический потенциал малых рек можно оценить величиной 1,47 млн кВт и 12,85 млрд кВт·ч энергии в средний по водности год.

Технический потенциал малых рек в бассейне реки Оленек ориентировочно составит 235 тыс. кВт и 2,06 млрд кВт·ч энергии в средний по водности год.

Технически возможный потенциал малых рек бассейна Колымы, рассчитанный по вышеуказанному способу, составил 2346 тыс. кВт и 20,6 млрд кВт·ч энергии в средний по водности год.

Поскольку основное потребление энергоресурсов приходится на зимний период с начала отопительного сезона, возможная реализация комбинированных схем на территории северных районов решила бы проблему по оптимизации расходов на топливо. В зимнее время, когда Малая ГЭС (МГЭС) прекращает работу, основная нагрузка приходилась бы на ДЭС, а в летний сезон для экономии завозимого топлива основную подачу энергии выполняла бы МГЭС.

Минусы малой гидроэнергетики не так существенны. Как и все локализованные источники, объекты МГЭС уязвимы в случае реальной возможности выхода из строя, тогда потребители рискуют остаться без электричества. Решение проблемы находится во вводе резервной генерирующей мощности. Самыми распространенными авариями могут быть разрушения плотины при переливе, например, при неожиданном подъеме паводковых вод. Иногда малые ГЭС становятся причиной заливания водохранилищ, они также могут оказывать влияние на процессы формирования русла. Необходимо найти оптимальные пути решения проблем энергообеспечения северных районов, обеспечивая при этом сохранность окружающей среды.



2

автоматизация, цифровизация и моделирование

26	Системная автоматика для создания локальных интеллектуальных энергосистем и управления их режимами
29	Технология численного моделирования физико-химических процессов энергетического оборудования
34	Метод полного обращения сейсмических волновых полей с целью реконструкции верхней части геологической среды
38	АНАРЭС – программный продукт для моделирования режимов электроэнергетических систем

СИСТЕМНАЯ АВТОМАТИКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЯ ИХ РЕЖИМАМИ



**НГТУ
НЭТИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»
630073, г. Новосибирск,
пр-т К. Маркса, 20

Фишов Александр Георгиевич

профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, доктор технических наук, профессор,
тел.: (383) 346-13-34, +7-913-937-01-16, fishov@ngs.ru

Марченко Андрей Иванович

старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, кандидат технических наук,
тел.: (383) 346-13-84, +7-953-766-62-73,
andrey1991@ngs.ru



Общество с ограниченной ответственностью «Модульные Системы Торнадо»,
630128, г. Новосибирск,
ул. Инженерная, 4а

Ивкин Ефим Сергеевич

инженер, кандидат технических наук,
тел.: +7-923-136-53-94, ivkin@tornado.nsk.ru

Разработка открывает путь для масштабного применения распределенной малой генерации как современного дополнения существующей системы централизованного энергоснабжения, интересного для инвесторов в силу локальности, независимости и эффективности.



Авторы разработки (слева направо): Ивкин Е. С., Фишов А. Г., Марченко А. И.

Назначение — автоматическое управление режимами локальной системы энергоснабжения (ЛСЭ, Minigrid), интегрированной с внешней электрической сетью централизованного энергоснабжения, превращающее ЛСЭ в локальную интеллектуальную энергосистему, способную эффективно работать как автономно, так и параллельно с внешней электрической сетью.

Суть — автоматика обеспечивает высокую надежность и качество энергоснабжения потребителей ЛСЭ, экономичность режимов выработки энергии на электростанции, возможность выдачи избытков энергии и мощности во внешнюю электрическую сеть, минимальность затрат на осуществление присоединения ЛСЭ к внешней электрической сети с разрешенным режимом параллельной работы источников и двухсторонним обменом мощностью и энергией. Используются оригинальные (запатентованные) способы взаимодействующих противоаварийного, режимного управления и автооперирования генерацией, схемой выдачи мощности, восстановлением нормальных режимов.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА АВТОМАТИКИ



Основным способом противоаварийного управления в режиме параллельной работы с внешней электрической сетью является экстренное отделение сбалансированной по мощности ЛСЭ от внешней электрической сети.

Режимное управление обеспечивает постоянную готовность ЛСЭ к сбалансированному экстренному отделению за счет априорного выбора сечения для деления, состава, режимов работы и загрузки генерирующего оборудования электростанции.

Реконфигурация сети, безопасные переходы из режима автономной работы ЛСЭ в параллельный с внешней электрической сетью и наоборот осуществляются под управлением интеллектуального автооператора.

Решается проблема надежного и экономически эффективного энергоснабжения потребителей в локальных системах энергоснабжения при малых затратах на осуществление безопасной параллельной работы источников для генерирующего оборудования электростанции ЛСЭ и дорогостоящего оборудования внешней сети.

Новизна разработки состоит в новых способах управления режимами локальных систем энергоснабжения с собственными источниками энергии, их технической реализации в опытных и промышленном образцах. Запатентованы в РФ следующие способы:

1. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях. Фишов А. Г., Мука-

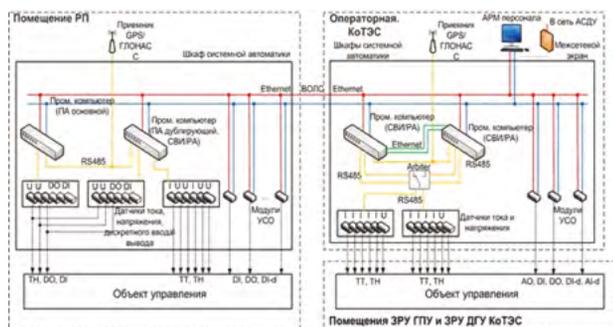
тов Б. Б., Марченко А. И. Патент на изобретение RU 2662728 C2, 30.07.2018. Заявка № 2016147843 от 06.12.2016.

2. Способ управления составом и загрузкой генераторов электростанции с собственными нагрузками, работающей изолированно и параллельно с приемной энергосистемой. Фишов А. Г., Семендяев Р. Ю., Ивкин Е. С. Патент на изобретение RU 2697510 C1, 15.08.2019. Заявка № 2018113035 от 10.04.2018.

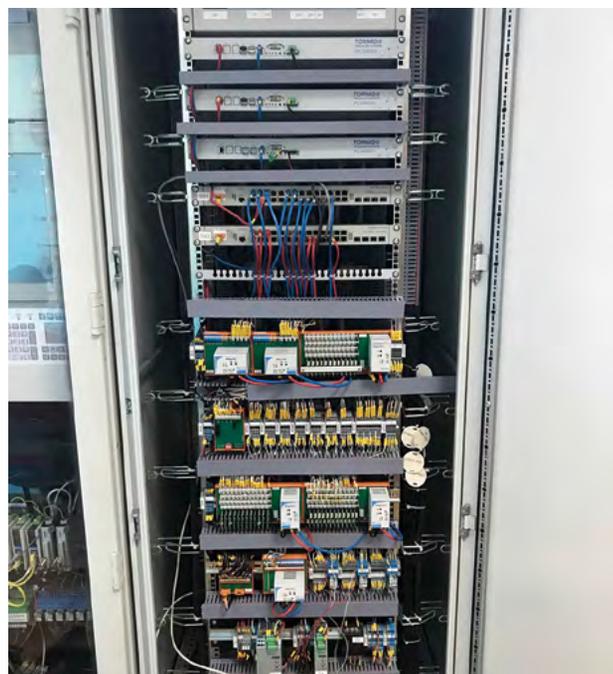
3. Способ управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях. Фишов А. Г., Какоша Ю. В. Патент на изобретение RU 2752248 C1, 23.07.2021. Заявка № 2020140023 от 07.12.2020.

4. Способ удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами. Фишов А. Г., Гуломзода А. Х. Патент на изобретение RU 2752693 C1, 30.07.2021. Заявка № 2020131758 от 28.09.2020.

Исторически собственные источники электроэнергии появлялись в системах энергоснабжения, питаемых от внешней электрической сети, как резервные, а затем — как источники, снижающие потребление энергии из внешней электрической сети. Риски режима синхронной параллельной работы внутреннего и внешних источников снимались либо запретом параллельной работы, либо отключением внутреннего источника ЛСЭ (электростанции малой мощности) от сети при аварийных возмущениях режима с сохранением электроснабжения потребителей за счет сетевого



1



2



3

резерва. Имеющаяся в настоящее время системная автоматика, например голландская фирмы «Terberg», использует этот способ, а надежность работы электростанции ЛСЭ снижается ее частыми отключениями. Разработанная автоматика исключает зависимость надежности энергоснабжения потребителей ЛСЭ от внешнего сетевого резерва, обеспечивая её совместным режимным и противоаварийным управлением сетевым и генерирующим оборудованием ЛСЭ.

Разработка может быть интересна электроэнергетической отрасли, а именно застройщикам, решающим задачи энергообеспечения новых площадок, крупным потребителям энергии, заинтересованным в снижении затрат на энергообеспечение, газовикам, нефтедобытчикам, имеющим локальные системы энергоснабжения на промышленных площадках, в системах трубопроводного транспорта, сетевым компаниям, имеющим в своем составе распределенные объекты малой генерацией. Разработка используется в ООО «Генерация Сибири», ООО «Энергосети Сибири». Эффект состоит в повышении надежности энергоснабжения потребителей, повышении экономической эффективности локальных систем энергоснабжения, в т.ч. значительного снижения сроков окупаемости объектов локальной энергетической инфраструктуры.

От индустриального партнера ожидаем внедрение технологии на предприятиях, создание совместного малого инновационного предприятия, заключение партнерского соглашения с дорожной картой.

Инвестирование в локальные системы энергоснабжения на базе малой генерации с предлагаемым интеллектуальным управлением обеспечит быстрый возврат инвестиций (от 3 до 5–7 лет) за счет гарантированного спроса на энергетическую продукцию, рациональности расходования ресурса генерирующего оборудования и экономически выгодных режимов его работы ■

1. Структура технических средств автоматики.
2. Стойка автоматики локальной интеллектуальной системы электроснабжения (Minigrid).
3. Демонстрация работы автоматики на электродинамической модели локальной интеллектуальной системы электроснабжения (Minigrid) в НГТУ представителям энергетических компаний России.

ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1



С И Б И Р С К И Й
Ф Е Д Е Р А Л Ь Н Ы Й
У Н И В Е Р С И Т Е Т

S I B E R I A N
F E D E R A L
U N I V E R S I T Y

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79



Дектерев Александр Анатольевич, руководитель Красноярского филиала ИТ СО РАН, кандидат технических наук.

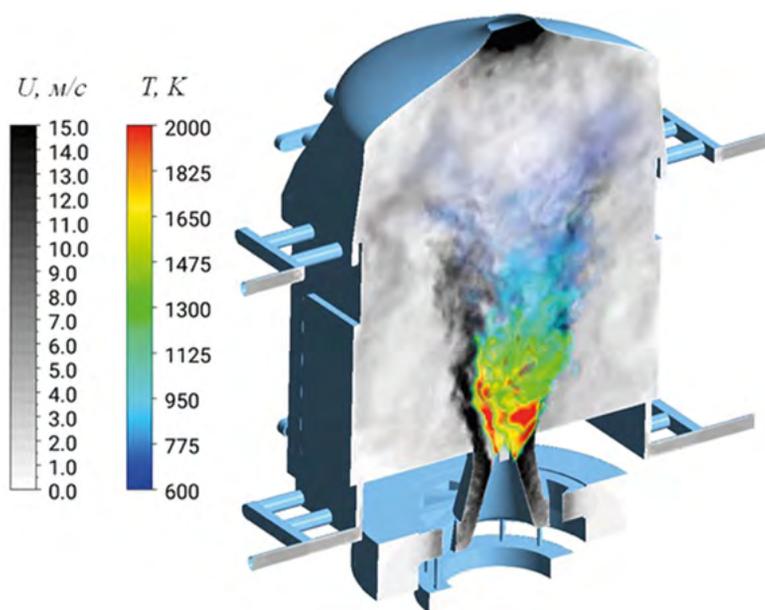
Дектерев Александр Анатольевич,
руководитель Красноярского филиала ИТ СО РАН,
кандидат технических наук,
тел.: (391) 249-47-26, dekterev@itp.nsc.ru

Минаков Андрей Викторович,
доцент, доктор физико-математических наук,
тел.: (391) 291-29-67, aminakov@sfu-kras.ru,

Дектерев Артем Александрович,
младший научный сотрудник,
тел. (391) 249-47-26, sdek_art@mail.ru

Кузнецов Виктор Александрович,
научный сотрудник, кандидат технических наук,
тел.: (391) 249-47-26, vakuznetsov@sfu-kras.ru

Процессы горения очень широко распространены в природе и технике. Большинство технологических процессов в сфере жизнеобеспечения основаны на горении и преобразовании различных видов топлив: энергетика, транспорт, металлургия, нефтехимия и другие. Оптимизация и развитие таких систем невозможна без детального исследования. Существует большое количество эффективных методов изучения физико-химических явлений. Одним из них является математическое моделирование. В последнее время всё большее распространение в промышленности для решения мультифизических задач находят методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Они позволяют ускорить процессы проектирования и оптимизации энергетического оборудования, что способствует снижению финансовых затрат на проект. При этом частично отпадает необходимость в дорогостоящих экспериментах, поскольку появляется возможность оптимизировать конструкцию изделия на основе его виртуальной модели (цифрового двойника).



1

Наряду с повышением эффективности переработки топлива, немаловажным аспектом является уровень вредных выбросов в окружающую среду. При сжигании ископаемого углеводородного топлива в атмосферу могут попадать пыль, соединения фтора, оксиды серы, оксиды азота, оксиды углерода и другие. В результате усиливается негативное воздействие на окружающую среду, ухудшается экологическая ситуация, что обуславливает рост заболеваемости и смертности населения. С каждым годом в мире экологические нормы всё больше и больше ужесточаются. В последнее время внимание уделяется росту эмиссии парниковых газов (увеличению углеродного следа) в атмосферу, который влечёт за собой воздействие на климат Земли, по некоторым оценкам приобретающее катастрофический характер.

Соответственно, существует и разрабатывается большое количество методов, технологий для борьбы с вредными выбросами, формирование которых зачастую связано с множеством протекающих взаимосвязанных физико-химических подпроцессов в реакционных камерах при переработке углеводородного топлива. На первый взгляд эффективная технология может обладать серьёзными недостатками, затрудняющими её реализацию на практике. Решение таких задач может быть получено с использованием численного моделирования, так как данная технология относительно доступна и позволяет рассматривать процессы во всем объёме исследуемого объекта.

Как уже было сказано, математическое моделирование теплоэнергетических устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения представительной информации о физико-химических процессах. Моделирование энергетического оборудования включает в себя описание сложных комплексных процессов, определяющихся совместным действием химических, тепло и массообменных процессов в турбулентных потоках многокомпонентных газовых смесей. Из-за сложности структуры топлива и его широкого разнообразия, сложных физико-химических процессов, происходящих при горении и газификации топлива, невозможно создать универсальную математическую модель и методику расчёта. Поэтому остается актуальной задача развития математических методов и моделей, позволяющих наиболее точно описать процессы горения и газификации углеводородного топлива в горелочно-топочных устройствах. А изменение свойств газовой среды в топочном пространстве при внедрении той или иной технологии также добавляет нюансы, которые нужно учитывать при разработке численной методики. В мире проводится большое количество работ, посвященных как разработке и развитию CFD-моделирования, так и исследованию процессов на их основе. В работах [1, 2] представлен обзор недавних достижений математического моделирования горения и газификации пылеугольного топлива в потоке.

Коллективом авторов уже длительное время проводится разработка и тестирование методики численного моделирования физико-химических процессов в энергетическом оборудовании, а также ее применение для решения прикладных задач. Из основных результатов проведенных научных исследований можно выделить значительный задел в разработке и совершенствовании энергетических технологий, связанных с горением и газификацией ископаемого топлива. В этом направлении создается и адаптируется комплексная методика моделирования газового горения, горения и газификации угольного топлива, сжигания жидкого топлива, основанная на сочетании методов моделирования турбулентности (RANS, LES, DES) и кинетических моделей для описания химического реагирования в потоке. С помощью данной методики проведены исследования, оптимизация процессов горения и газификации топлива для различных устройств и объектов энергетики. Ниже представлены некоторые работы авторов по теме.

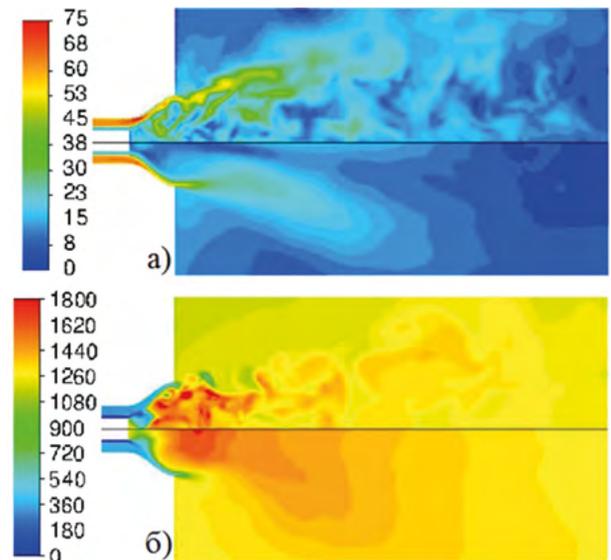
Большой класс задач посвящен исследованиям и разработкам численных методик описания процессов газового горения топлива. В работах [3–5] представлена лишь небольшая их часть. Было рассмотрено горение различных видов топлива (метан, синтез-газ и др.) при разных условиях: прямоточное горение (в ограниченной области и в открытом пространстве), закрученные пламена, сжигание бедных предварительно смешанных смесей и д. р. На рисунке 1 показаны некоторые результаты расчета турбулентного закрученного пламени со значительным избытком воздуха в модельной газовой камере сгорания, разработанной сотрудниками ИТ СО РАН.

Результаты множества тестовых расчетов газового горения показали, что использование моделей горения EDC и PDF с флэймлетами с применением детальных кинетических механизмов в сочетании с LES обеспечивает наилучшие результаты для всех пламен. Однако для некоторых случаев достаточно и более простых моделей горения в сочетании с RANS моделями турбулентности для получения приемлемых результатов при намного меньших затратах вычислительных ресурсов.

Отработанная методика расчета была успешно применена при расчетах горелочных устройств для сжигания влажного попутного газа нефтегазодобычи, для моделирования режимов работы

камеры сгорания газовой турбины, оптимизации процесса дожигания анодных газов от электролизеров, для оценки тепловых потоков на грунт при возникновении самовозгорающихся нефтегазовых факелов в природных условиях.

Ещё один блок задач посвящен исследованиям и разработкам численных методик описания процессов горения и газификации пылеугольного топлива в потоке. При рассмотрении горелочных устройств с наличием сложной закрученной структуры течения газов, поточных реакторов термохимической конверсии углей важен выбор подмоделей (модель турбулентности, модель горения, модель выхода летучих и т.д.), которые бы позволили достаточно точно описать процессы. В ряде работ [6–9] проведены исследования влияния моделей и методов описания турбулентности, а также модели выхода летучих на результаты расчёта при моделировании процессов горения пылеугольного топлива. На рисунке 2 представлены некоторые результаты моделирования процесса горения угля в закрученном потоке, полученные с использованием DES (Detached eddy simulation) метода моделирования турбулентности.



2

1. Мгновенные распределения скорости и температуры при горении смеси метан/воздух.
2. Результаты расчета пылеугольной горелки (вверху – мгновенное поле, внизу – осредненное поле): а) модуль скорости (м/с), б) температура (К).

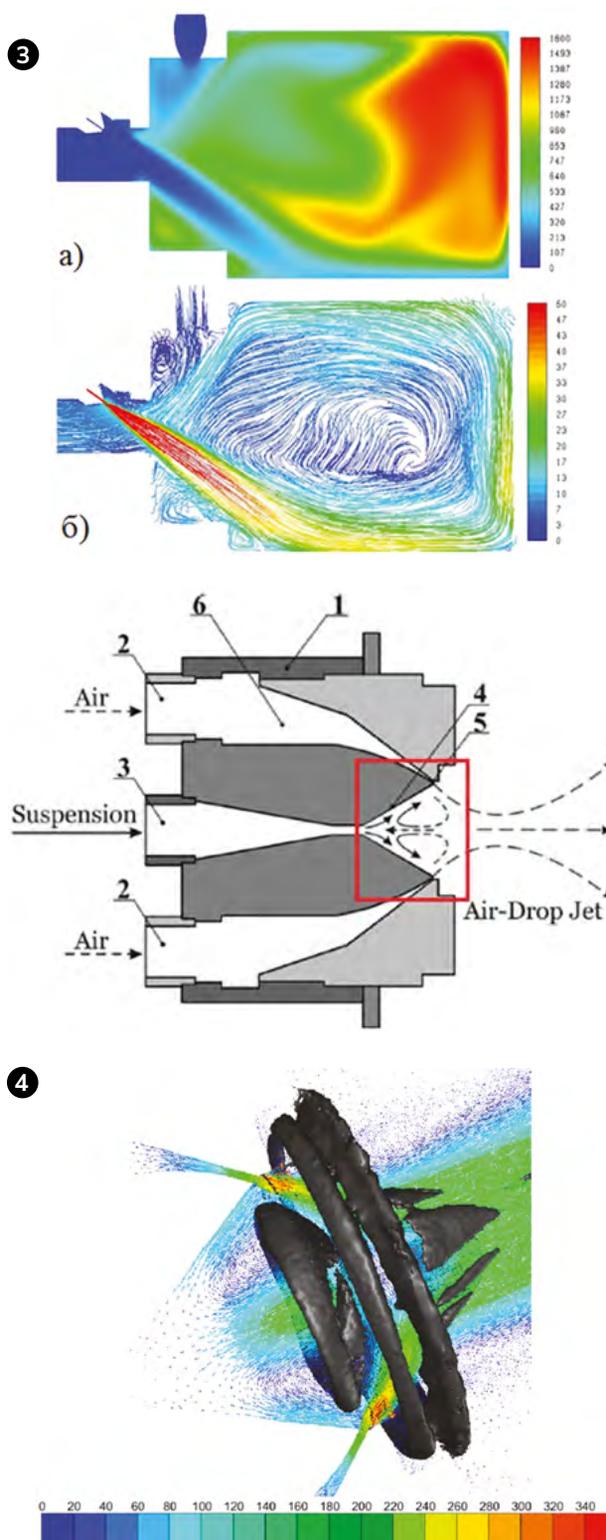
С использованием современных методов математического моделирования были проведены расчетные исследования четырёхвихревой топки пылеугольного котла [10,11], схема которой была предложена в 90-х годах и реализована на котлах Красноярской ТЭЦ-1 и Гусиноозерской ГРЭС. Результаты расчётных исследований показали наличие устойчивой четырехвихревой структуры течения в камере и низкого уровня шлакообразования на стенках при различных режимах работы котла (измененная нагрузка, отключение блока горелок и др.).

Газификация угольного топлива является одним из самых перспективных направлений переработки угля. В работах [12,13] проведены тестовые расчёты и численные исследования процессов поточной газификации пылеугольного топлива для двухстадийного газификатора EAGLE (Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity).

Имеется значительный задел в разработке численных методик расчёта процессов распыла жидкого топлива при истечении из пневматической форсунки [14–17] и его горения в топочной камере [18,19], в том числе водоугольного топлива [20, 21]. На рисунке 3 показаны некоторые результаты расчёта в виде структуры потоков внутри форсуночного устройства для распыла жидкого топлива, разработанного сотрудниками ИТ СО РАН.

Снижение токсичных продуктов сгорания является одной из основных задач при сжигании органического жидкого топлива. Одним из известных способов, позволяющих снизить вредные выбросы в атмосферу без значительных затрат на модернизацию топочного оборудования, является добавление воды и водяного пара в область горения. Проведены численные исследования горения жидкого углеводородного топлива (дизель, гептан) в горелке с подачей перегретого водяного пара в зону реакции (рис. 4) [18, 19]. Разработана численная методика горения жидкого топлива при наличии высокоскоростной высокотемпературной струи пара, позволяющая достоверно описывать процессы в камере сгорания.

Таким образом, численное моделирование энергетического оборудования позволяет получить полную информацию об аэродинамике и теплообмене в реакционных камерах при сжигании и термохимической конверсии углеводородного топлива. Использование расчет-



ных и экспериментальных данных способствует более полному пониманию работы оборудования и позволяет вносить обоснованные изменения как в его конструкцию, так и в режим эксплуатации ■

Список литературы:

- [1] Mularski J, Pawlak-Kruczek H, Modlinski N. A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics. *Fuel* 2020;271:117620.
- [2] Cai R, Luo K, Watanabe H, Kurose R, Fan J. Recent advances in high-fidelity simulations of pulverized coal combustion. *Adv Powder Technol* 2020;31:3062–79.
- [3] Dulin VM, Markovich DM, Minakov A V, Hanjalic K, Chikishev LM. Experimental and numerical simulation for swirl flow in a combustor. *Therm Eng* 2013;60:990–7.
- [4] Chikishev LM, Sharaborin DK, Lobasov AS, Dekterev AA, Tolstoguzov R V., Dulin VM, et al. LES Simulation of a Model Gas-Turbine Lean Combustor: Impact of Coherent Flow Structures on the Temperature Field and Concentration of CO and NO. *Energies* 2022;15:4362.
- [5] Lobasov AS, Dulin VM, Dekterev AA, Minakov A V. Turbulent transport in a swirling jet with vortex core breakdown. PIV/PLIF-measurement and numerical simulation. *Thermophys Aeromechanics* 2019;26:351–9.
- [6] Чернецкий М. Ю., Кузнецов В. А., Дектерев А. А., Абаимов Н. А. РАФ. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока. *Теплофизика и Аэромеханика* 2016;23:615–26.
- [7] Kuznetsov V, Chernetskaya N, Chernetskiy M. Comparative analysis of the influence of turbulence models on the description of the nitrogen oxides formation during the combustion of swirling pulverized coal flow. *J Phys Conf Ser* 2016;754:112006.
- [8] Кузнецов В. А., Дектерев А. А., Сентябов А. В. ЧМЮ. Расчетное исследование влияния моделей выхода летучих веществ на процессы горения пылеугольного топлива при закрутке потока. *Журнал Сибирского федерального университета Техника и Технологии* 2016;9:15–23.
- [9] Dekterev A, Kuznetsov V. Investigation of pulverized coal flaring based on eddy-resolving turbulence models. *J Phys Conf Ser* 2020;1677:012104.
- [10] Alekseenko SV, Anufriev IS, Dekterev AA, Shadrin EY, Kuznetsov VA, Sharypov OV, et al. Investigation of transfer processes in swirling flows in application to vortex furnaces for coal fuel. *Int J Therm Sci* 2021;161:106715.
- [11] Dekterev AA, Kuznetsov VA, Tepfer ES. Calculation analysis of heat transfer in a four-vortex furnace of a pulverized coal boiler when operating at various loads. *J Phys Conf Ser* 2021;2119:012149.
- [12] Рыжков АФ. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля. Монография (Гл 6) — Екатеринбург Изд-во УралУн-Та 2016:564.
- [13] Kuznetsov V, Chernetskiy M, Ryzhkov A. Study of the two-stage gasification process of pulverized coal at the hydrodynamic flow separation. *J Phys Conf Ser* 2016;754:112007.
- [14] Alekseenko SV, Anufriev IS, Dekterev AA, Kuznetsov VA, Maltsev LI, Minakov AV, et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *Int J Heat Fluid Flow* 2019;77:288–98.
- [15] Kuznetsov V, Shebelev A, Sharypov O, Dekterev A, Minakov A. Simulation of the liquid fuel spraying based on Eulerian-Lagrangian model. *J Phys Conf Ser* 2019;1359:012080.
- [16] Kuznetsov V, Shebelev A, Anufriev I, Shadrin E, Minakov A. Verification of the calculation modeling methods of the atomizing of a gas and gas-liquid stream from a pneumatic nozzle. *J Phys Conf Ser* 2019;1261:012019.
- [17] Minakov AV, Shebeleva AA, Strizhak PA, Chernetskiy MY, Volkov RS. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel* 2019;254:115606.
- [18] Minakov AV, Anufriev IS, Kuznetsov VA, Dekterev AA, Kopyev EP, Sharypov OV. Combustion of liquid hydro carbon fuel in an evaporative burner with forced supply of superheated steam and air to the reaction zone. *Fuel* 2022;309:122181.
- [19] Minakov AV, Kuznetsov VA, Anufriev IS, Kopyev EP. Numerical analysis of a pre-chamber vortex burner with a steam blast atomizer. *Fuel* 2022;323:124375.
- [20] Alekseenko S V., Kuznetsov VA, Mal'tsev LI, Dekterev AA, Chernetskii MY. Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments. *J Eng Thermophys* 2019;28:177–89.
- [21] Kuznetsov V, Maltsev L, Dekterev A. Numerical investigation of coal-water fuel combustion in two-chamber furnace of a low-power boiler. *J Phys Conf Ser* 2020;1677:012110.

3. Результаты расчёта в центральном сечении горелки: а) температура (°C), б) линии тока (магнитуда скорости, м/с).

4. Схема форсунки и структура газового течения: векторное поле скорости (м/с) и изоповерхность нормированного Q-критерия (Q = 0,3).

МЕТОД ПОЛНОГО ОБРАЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук
630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Коптюга, 4



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Коптюга, 3

Чеверда Владимир Альбертович

ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор,
тел.: (383) 333-00-54, +7-913-474-99-79, vova_chev@mail.ru

Лисица Вадим Викторович

ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор,
тел.: +7-903-933-74-25, lisitsavbiz@gmail.com

Роменский Евгений Игоревич

главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук,
тел.: +7-913-905-99-39, evrom@math.nsc.ru

Гадильшин Кирилл Геннадьевич

старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, тел.: +7-913-063-20-86,
gadylshin@gmail.com

Сейсморазведочные работы на обширной территории Восточной Сибири выполняются в сейсмогеологических условиях различной сложности. Получение качественного динамического сейсмического изображения для района работ является первоочередной задачей в условиях контрастных неоднородностей верхней части разреза (ВЧР). Один из способов решения этой задачи, получивший широкое распространение

в промышленности, заключается в построении так называемой эффективной глубинно-скоростной модели, обеспечивающей компенсацию скоростных аномалий и расчета статических поправок. Однако для наиболее сложного приповерхностного строения среды, например, широко распространенных в Восточной Сибири трапповых интрузий и туфогенных образований в верхней части разреза, точность и информа-

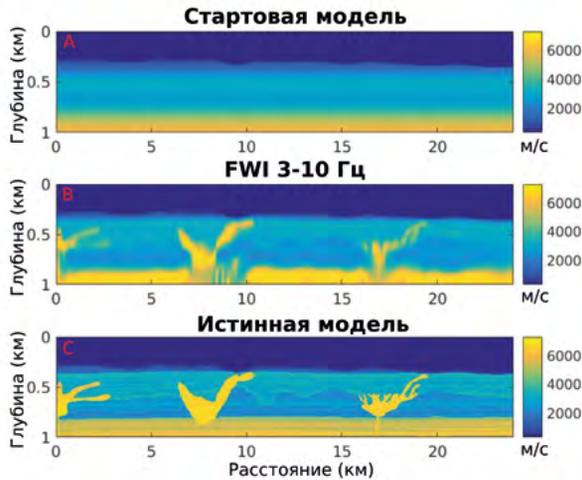


Рис. 1. Глубинно-скоростная модель, используемая для расчета синтетических наблюдаемых данных (внизу), и начальное приближение при реализации итерационного процесса отыскания точки минимума (вверху).

тивность скоростных моделей ВЧР, полученных на основании такого подхода, включая томографическое уточнение, оказываются недостаточными.

Таким образом, требуется другой подход, гарантирующий более точное и полное определение глубинно-скоростной модели ВЧР. Мы предлагаем использовать для этого метод обращения полного волнового поля, адаптированный к условиям верхней части среды, которая имеет чрезвычайно важное значение и представляет наибольшую трудность при решении обратной задачи. Действительно, взаимодействие сейсмического волнового поля с неоднородностями верхней части обуславливает его изменчивость, которую необходимо учитывать при реконструкции строения целевых геологических объектов, находящихся существенно глубже. Мы излагаем основные аспекты этого метода и приводим результаты численных экспериментов для реалистичных моделей, характерных для районов Восточной Сибири.

Математически обратная задача сейсморазведки сводится к решению операторного уравнения

$$F(m) = d \quad (1),$$

где F есть нелинейный оператор прямой задачи, описывающий процесс распространения волн в среде и отображающий пространство моделей M в пространство данных D .

Метод обращения полного волнового поля заключается в применении нелинейного метода наименьших квадратов к уравнению (1), для чего вводится функционал, описывающий среднеквадратичное уклонение зарегистрированных данных от рассчитанных для текущей модели:

$$E(m) = \frac{1}{2} \|d^{obs} - F(m)\|^2 \quad (2)$$

Для отыскания точки минимума функционала (2) мы используем итерационный метод Ньютона–Канторовича. Его отличительная особенность состоит в необходимости на каждом шаге итерационного процесса выполнять обращение производной Фреше нелинейного оператора $F(m)$. Эта производная задаётся компактным оператором, и, следовательно, численная реализация её обращения требует привлечения регуляризующей процедуры, в качестве которой мы используем усечение его сингулярного разложения.

Ещё одним важным моментом, обеспечивающим успешную реализацию данного подхода, является грамотное использование кратных волн, обусловленных наличием свободной поверхности. Современные методы обработки сейсмических данных позволяют вполне уверенно подавлять такие волны, например, методом Surface Related Multiple Elimination (K. Hokstad, R. Sollie. 3D surface-related multiple elimination using parabolic sparse inversion // Geophysics 2006 – v. 71(6):V145-V152). Но тут нужно иметь в виду, что эти волны несут важную информацию о строении верхней части разреза, поэтому, как показано в наших предыдущих работах [1, 2], их подавление зачастую ведёт к ухудшению разрешающей способности и понижению информативности получаемых результатов.

Проиллюстрируем эффективность разработанного метода на примере реалистичной синтетической модели, отражающей строение верхней части разреза для ряда областей Восточной Сибири, геологическое строение которых характеризуется присутствием высокоскоростных трапповых образований (рис. 1). Отметим, что эта модель передана нам в рамках дого-

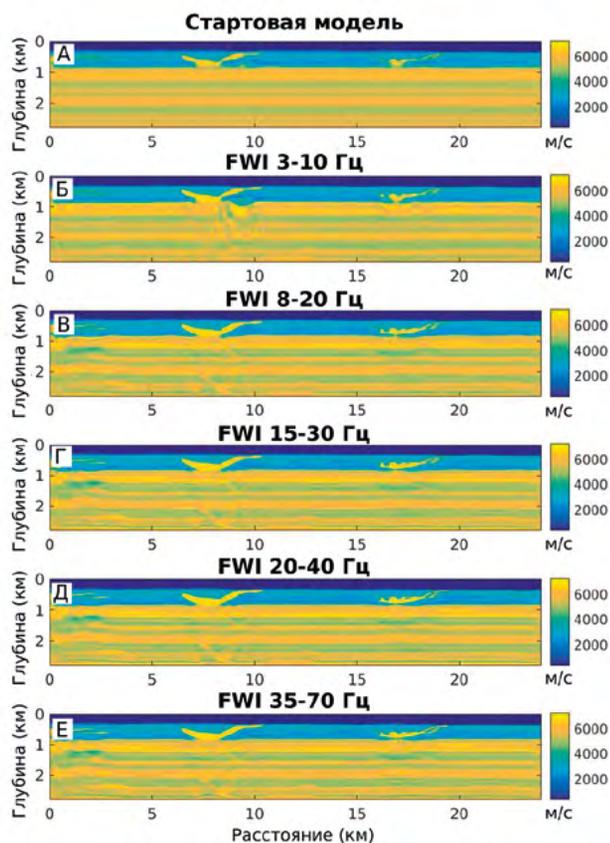


Рис. 2. Результат пошагового восстановления ВЧР с расширением частотного диапазона.

вора на проведение предконтрактной НИР с ПАО «Роснефть» (ООО «РН-КрасноярскНИПИ-нефть»), в рамках которого мы проводили апробацию разработанных в Институте математики им. С. Л.Соболева СО РАН численных методов и алгоритмов решения обратной задачи динамической теории распространения сейсмических волн в течение 2021–2022 годов. Отметим, что к настоящему моменту все работы по договору выполнены в полном объеме и в установленный срок. На этой основе сейчас прорабатывается возможность заключения пятилетнего контракта на создание инновационного обрабатывающего комплекса в рамках программы импортозамещения ПАО «Роснефть».

В качестве стартовой модели мы выбрали вертикально-неоднородную среду, построенную по сечению в одной из «скважин», которая затем модифицировалась в результате стандартной обработки данных, см. рис. 2 сверху (построение суммарных разрезов + формула Дикса).

На первом этапе полноволнового обращения участвовало всё волновое поле, включая кратные волны, связанные с наличием свободной поверхности. Глубинно-скоростная модель ВЧР, построенная в результате первого этапа реализации метода обращения полного волнового поля, приведена на рис. 2. Обращение производилось в области временных частот в диапазоне от 3 до 10 Гц, а целевая область ограничивалась глубиной в 1 км. Как можно видеть, при этом удается успешно идентифицировать высокоскоростные аномалии, однако области непосредственно под траппами восстановлены со значительными искажениями. Поэтому на последующих этапах обращения для улучшения качества восстановленной модели использовались данные с подавленными кратными волнами, связанными со свободной поверхностью. На рис. 3 приводится итоговый результат полноволнового обращения. Как видно, скоростная модель восстановлена с весьма высоким качеством.

Предлагаемый метод реконструкции верхней части разреза имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими в настоящее время средствами, используемыми в промышленности для построения скоростной модели приповерхностных структур. Как правило, эти методы опираются на использование кинематических характеристик волнового поля, извлечение которых не всегда удаётся выполнить корректно. В частности, самый первый шаг здесь заключается в определении времён первых вступлений, которые зачастую маскируются многочисленными волнами-помехами. Развиваемый нами подход позволяет избежать выполнения этой трудоёмкой и зачастую некорректной процедуры, за счёт использования информации о полном волновом поле.

Насколько нам известно, в России нет аналогичных продуктов, основывающихся на использовании метода обращения полного волнового поля. Среди зарубежных коллективов можно упомянуть следующие:

- группа под руководством Romain Brossier (Предыдущий её руководитель Jean Virieux), известная также как проект Seiscope 2 (France, Université Grenoble Alpes);
- группа Dr. Rene-Eduard Plessix, Shell Global Solutions International, The Netherlands;
- группа prof. Changsoo Shin, Seoul National University, Seoul, South Korea;

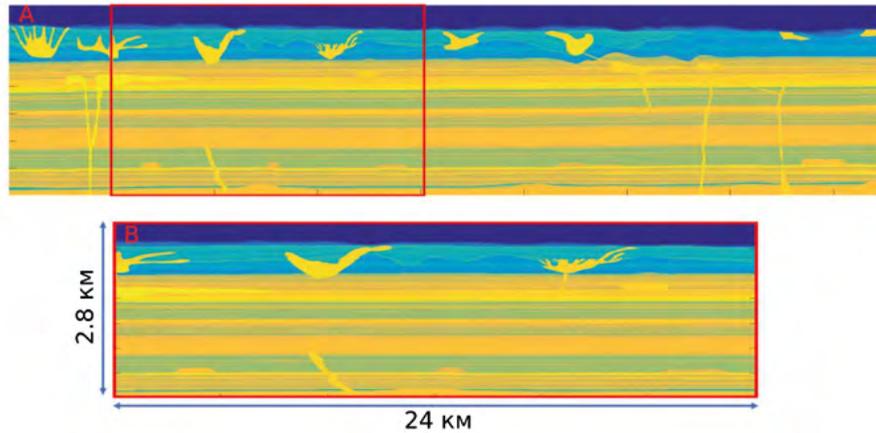


Рис. 3. Вверху – скоростная модель ВЧР, построенная в результате предварительной обработки данных. Внизу – результат первого этапа полноволнового обращения в диапазоне 3 – 10 Гц в сравнении с точной моделью.

- группа под руководством проф. М. Warner, London Imperial College.

Описываемая разработка актуальна для нефтяных и сервисных компаний. В настоящее время ведутся предварительные переговоры с ПАО «Роснефть» и ПАО «Газпромнефть» о начале работ в рамках импортозамещения программного обеспечения для нефтяной промышленности. Предварительные сроки работ – 2,5 года, начиная с лета 2023 года.

Конкретные разработчики, заинтересованные в сотрудничестве:

- Роснефть: ООО «КрасноярскНИПИнефть» (в стадии оформления);
- Газпромнефть: «Газпромнефть НТЦ» (Тюмень, Санкт-Петербург) (в стадии обсуждения).

В настоящее время ведётся предварительное обсуждение возможности организации совместных работ в области разработки программного обеспечения, направленной на импортозамещение используемых в настоящее время программных продуктов для обработки сейсмических данных, полученных в результате проведения сейсморазведочных работ по поиску и разведке месторождений углеводородов.

Данная разработка ориентирована на решение фундаментальной проблемы обработки сейсмических данных – реконструкции верхней части разреза, в которой происходит формирование

сейсмического волнового поля, которое впоследствии распространяется в среде и взаимодействует с целевыми объектами, в частности, с резервуарами углеводородов.

Для получения достоверной информации о строении потенциальных месторождений углеводородов необходимо иметь дело с контролируемыми сейсмическими волновыми полями. Наибольшее влияние на формирование этих полей вносит именно верхняя часть геологической среды. В частности, это влияние зоны малых скоростей, топографии свободной поверхности, условий возбуждения и др.

Благодарности. Исследования В. А. Чеверды выполнялись в рамках проекта РФФ 22-11-00104 «Численные методы решения многопараметрических обратных задач теории распространения сейсмических волн» и были сосредоточены на обосновании метода обращения полного волнового поля.

Литература

1. Гадлышин К.Г., Чеверда В.А., Неклюдов Д.А. Влияние свободной поверхности на качество решения обратной динамической задачи сейсмологии // Технологии сейсморазведки. 2014. № 3. С. 43–50; Gadylyshin K., Bakulin A., Dmitriev M., Golikov P., Neklyudov D., Tcheverda V.
2. Effect of Free-surface Related Multiples on Near Surface Velocity Reconstruction with Acoustic Frequency Domain FWI // Conference Proceedings, 76th EAGE Conference and Exhibition June 2014. 2014. P. 1-5)

АНАРЭС – ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
Сибирского отделения
Российской академии наук,
664033, Иркутск,
ул. Лермонтова, 130

Осак Алексей Борисович

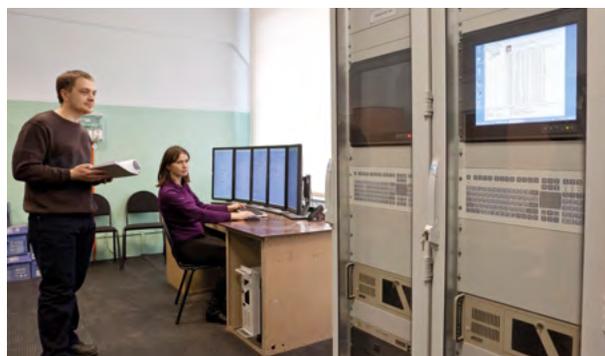
руководитель сектора,
тел.: (395) 242-84-18, +7-914-870-59-34,
osakalexey@mail.ru

Программно-вычислительный комплекс (ПВК) АНАРЭС предназначен для оперативных расчетов, анализа, планирования режимов работы электроэнергетических систем (ЭЭС) и эффективного управления такими системами на различных территориальных уровнях диспетчерского управления.

Основные пользователи – центры диспетчерского управления системных операторов ЭЭС, электросетевые предприятия, электрогенерирующие компании, крупные промышленные организации, проектные и инжиниринговые организации в электроэнергетике, учебные центры.

Программный комплекс позволяет проводить:

- расчет нормальных (установившихся) режимов;
- оптимизацию режима работы (минимизация потерь);
- поиск и анализ предельных режимов работы;

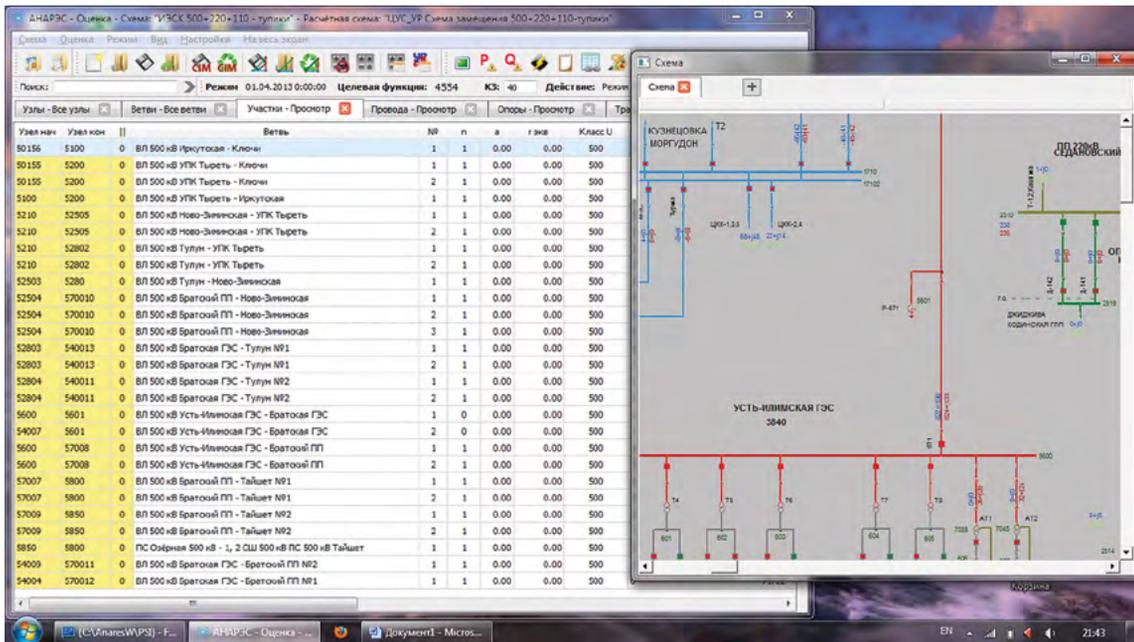


1



2

- расчет потерь;
- расчет токов коротких замыканий;
- оценивание текущего состояния;
- анализ режимной надежности с возможностью оценки вероятности возникновения и развития каскадных аварий;
- анализ динамической устойчивости (моделирование электромеханических переходных процессов);



3

- расчет установок РЗА;
- подготовку и работу с мнемосхемами (структурные схемы, схемы электрических соединений);
- проектирование электрических систем;
- решать задачи обработки телеметрической информации на уровне подстанций и подготовки её для дальнейшего использования для работы комплекса.

ПВК АНАРЭС выполнен на единой информационной и сервисной основе, работает под управлением всех операционных систем семейства Windows. Является комплексным решением в области электроэнергетики с интеграцией в существующую систему управления ЭЭС.

Комплекс содержит компоненты:

- SCADA-АНАРЭС – набор программно-технических средств для создания АСУ ТП и систем противоаварийного управления электроэнергетическими объектами, включая сети электроснабжения промышленных предприятий;
- АНАРЭС-ИНТЕГРАТОР – программное средство для стыковки различных информационных и управляющих систем в электроэнергетике и промышленной автоматизации.

Главные преимущества ПВК АНАРЭС:

- высокая технологичность программных продуктов в составе комплекса, использующих самые современные научные методы и разработки;
- высокая надежность работы – проверенные годами алгоритмы, методы и технологии;
- способность решения нестандартных проблем и задач;
- простота адаптации к условиям и нуждам конкретного заказчика;
- использование в научно-прикладных исследованиях и обучении;
- техническая и методическая поддержка пользователей.

1. Ученые-исследователи ИСЭМ СО РАН моделируют режимы электроэнергетической системы с помощью ПВК АНАРЭС.

2. Работа ПВК АНАРЭС в составе пилотной программно-аппаратной системы по управлению нормальными и аварийными режимами электроэнергетической системы.

3. Интерфейс программно-вычислительного комплекса АНАРЭС.

ПВК АНАРЭС полностью готов к промышленной эксплуатации. Основной эффект от его внедрения — это повышение качества и эффективности автоматического управления ЭЭС различного масштаба и конфигурации через интеллектуализацию с использованием продвинутых математических моделей и алгоритмов. При этом ПВК АНАРЭС обеспечивает более гибкое и адаптивное управление режимами электрической сети с получением значительного экономического эффекта в виде снижения потерь энергии и увеличения пропускной способности электрических сетей.

ПВК АНАРЭС имеет многолетнюю историю разработки, пул успешных внедренческих решений, он постоянно развивается под новые технологические требования и стандарты.

За последние годы в рамках программы по цифровизации и развитию интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid) в состав комплекса добавлен компонент, реализующий метод динамической оптимизации электрических режимов для определения наиболее эффективных управляющих воздействий. Динамическая оптимизация выполняется на данных телеметрии для точной модели энергосистемы через прогнозирование режимов работы с помощью искусственных глубоких нейронных сетей. Специально подобранная архитектура нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) позволяет прогнозировать режимы в реальном времени, что необходимо для практических нужд оперативного диспетчерского управления. Также специально в ПВК АНАРЭС впервые разработан и применен метод количественной оценки гибкости системы, в котором в качестве меры гибкости рассматривается величина, показывающая уровни и сочетания небалансов (неопределенностей), которые могут быть скомпенсированы без возникновения дефицита мощности или ввода аварийных резервов. Постоянно определяемая в режиме реального времени характеристика гибкости энергосистемы особенно важна для управления системами с большой долей стохастической генерации энергии от возобновляемых источников и активных потребителей.

ПВК АНАРЭС успешно апробирован при разработке отраслевых технологических решений в интересах энергетических компаний, в числе которых ФСК ЕЭС, ИнтерРАО, Иркутскэнерго, Магаданэнерго, Иркутская электросетевая компания и многие другие ■



4



5



6

4. Проблемы энергосбережения и энергоэффективности всегда в фокусе внимания ученых ИСЭМ СО РАН.
5. Пути создания международных энергетических объединений в Северо-Восточной Азии — одно из ключевых научных направлений ИСЭМ СО РАН.
6. Презентация программно-вычислительного комплекса «АНГАРА» для моделирования и оптимального управления системами тепло- и водоснабжения городов.



Вид на Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

A photograph of two large, grey, hyperboloid cooling towers at a power plant. The towers are set against a blue, overcast sky. In the foreground, there is a body of water with a metal walkway or bridge structure supported by concrete pillars. A white number '3' is overlaid on the left tower. A thin white horizontal line is positioned below the number.

3



атомная энергетика

44

Полимерные композиции для
«сухой» дезактивации

50

Системы автоматизации контроля
качества при производстве
ядерного топлива

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ «СУХОЙ» ДЕЗАКТИВАЦИИ



Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси, 223063, Республика Беларусь, Минская обл., Минский район, Луговослободской с/с, район д. Прилесье, 47/22. Почтовый адрес: 220109, г. Минск, Республика Беларусь, а/я 119.

Вороник Надежда Ивановна

ведущий научный сотрудник лаборатории форм радионуклидов (металл-ионов) в растворах, кандидат химических наук,
тел.: +375(17)3741845; +375(29)6073690,
lab06@sosny.bas-net.by

Разработаны полимерные композиции (гели и пасты) для «сухой» дезактивации оборудования и помещений АЭС, предприятий по производству радиоизотопной продукции, а также организаций, использующих открытые источники ионизирующих излучений.

Создание дезактивирующих композиций на основе полимерных пленок (паст) является приоритетным направлением для создания экологически безопасных малоотходных технологий дезактивации, а также для обеспечения безопасного долговременного хранения/захоронения радиоактивных отходов на фоне новых экологических стандартов и возрастающей роли атомной энергетики.

Дезактивирующие полимерные композиции (далее ДПК) созданы на основе поливинилового спирта и включают активные компоненты



Разработчик рецептур – Вороник Надежда Ивановна, ведущий научный сотрудник, кандидат химических наук, лаборатория форм радионуклидов (металл-ионов) научного учреждения «ОИЭЯИ – Сосны»



Коллектив лаборатории форм радионуклидов (металл-ионов) научного учреждения «ОИЭЯИ – Сосны»

4. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЗАКТИВИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ DRYDEC И DECONGEL
 МЕСТО ИЗМЕРЕНИЯ – ДЕЗАКТИВИРУЕМАЯ ПОВЕРХНОСТЬ.
 ТИП ИЗМЕРЕНИЯ – β-ЗАГРЯЗНЕНИЕ, БК/СМ²

№	Технологическая система	Материал	Деактивирующая композиция	Активность поверхности, Бк/см ²			Коэффициент дезактивации после цикла			
				Исходное значение	Значение после цикла			1	2	3
					1	2	3			
1	Участок трубопровода острого пара (1RA)	Сталь 17ГС	DryDec 1	211	12	2,3		91,7		
			DeconGel 1108	4,3	2,8	1,42	1,4	3	3,1* МЭД	
			DeconGel 1128	120	73	51	44	2,4	2,7	
			DeconGel 1101	142	0	67,4	67,2	2,1	2,1	
2	Углеродистая сталь	Углеродистая сталь	DryDec 1	64,5	25	7,17		9		
			DeconGel 1108	7,7	3,4	3,3	3	2,3	2,6	
			DeconGel 1128	6,7	5,2	2,6	2,5	2,6	2,7	
			DeconGel 1101	52	37	34,5	32	1,5	1,2	
3	Участок трубопровода дренажа КС (1SH)	Нержавеющая сталь	DryDec 2	5,25	1,5	0,79		6,6		
			DeconGel 1108	3,06	2,8	2,5	2,4	1,3	1,3	
			DeconGel 1128	2	1,9	15	1,2	-	1,7	
			DeconGel 1101	2,3	1,8	1,8	1,55	1,3	1,5	

и наполнители. Действие ДПК заключается в проникновении радионуклидов в материал пленки или пасты и в удалении затвердевшего покрытия вместе с удерживаемыми в нем радиоактивными загрязнениями. Использование специальных наполнителей позволяет обеспечить высокую емкость покрытий по радионуклидам и низкую выщелачиваемость.

Эффективность ДПК характеризуется значением коэффициента дезактивации, определяемого отношением уровней радиоактивного загрязнения образцов до дезактивации и после нее. Коэффициент дезактивации ДПК составляет:

- для нержавеющей стали – по 137 Cs KD = 1300, по 6 °Со KD=800;
- для углеродистой стали – по 137 Cs KD = 100, по 6 °Со KD=15;
- для полимерных напольных покрытий – по 137 Cs KD = 150, по 6° Со KD = 400.

Расход исходных ДПК зависит от геометрической формы и степени коррозионного повреждения дезактивируемой поверхности, характе-

ристик загрязнения и составляет от 2–5,5 кг/м². При использовании ДПК на материалах с высокой степенью коррозионного повреждения может использоваться армирующая сетка.

При использовании пленкообразующих полимерных композиций и паст отходами дезактивации являются затвердевшие полимерные пленки и пасты с различной степенью хрупкости – в зависимости от вида и количества наполнителя. Все ДПК в виде паст являются самоотслаивающимися, так как силы когезии между наполнителем и связующим превышают силы адгезии паст к материалу образца. В технологическом плане это означает, что отработанные затвердевшие пасты можно собирать сметанием или при помощи пылесоса. При этом количество образующихся сухих отходов дезактивации составляет 0,9–2,5 кг/м².

Одной из важнейших характеристик иммобилизационного материала является его стойкость к выщелачиванию радионуклидов водой, так как невозможно дать абсолютную гарантию того, что за многие годы хранения отвержденные радиоактивные отходы никогда не вступят в контакт с водой подтоплений или осадков.

Методом длительного выщелачивания по ГОСТ 29114–91 определены скорости выщелачивания радионуклидов ^{137}Cs из сухих отходов дезактивации и рассчитаны величины фиксации радионуклидов ^{137}Cs в процентах от начальной активности радионуклида в сухих модельных образцах твердых отходов дезактивации. Показано, что фиксация радионуклидов пленкой и пастами составляет до 99 % в зависимости от выбираемой рецептуры.

ДПК использовались для проведения работ по дезактивации оборудования и материалов на различных ядерно- и радиационноопасных объектах:

- в СЗАО «Изотопные технологии» для дезактивации капсул источников ионизирующего излучения и оборудования по производству изотопной продукции;
- при выводе из эксплуатации Игналинской АЭС применялись рецептуры в соответствии с ТУ ВУ 190341033.005–2015 для «сухой» дезактивации изделий из сталей, пластика, стекла и бетона (DryDec 1) и для изделий из нержавеющей сталей (DryDec 2). Полученные результаты и сравнение с характеристиками дезактивирующих композиций DeconGel (разработчик – Cellular Bioengineering Polymers Inc., производитель – Industrial ChemSolutions Inc., USA) представлены в 1, 2;
- при выводе из эксплуатации комплекса систем хранения и обращения с отработавшим ядерным топливом в научном учреждении «ОИЭЯИ – Сосны» применялась композиция полимерная дезактивирующая на основе борафтористоводородной кислоты КДП-3, РЦ ВУ 190341033.002–2015 (3–5). Были дезактивированы бассейны выдержки отработавшего ядерного топлива, пеналы для хранения отработавшего ядерного топлива и дистанционирующие решетки.

Преимущества технологии: простота применения, высокая эффективность дезактивации, соответствующая уровню лучших мировых аналогов, кратное уменьшение количества вторичных радиоактивных отходов.

Отличительной особенностью применения полимерных композиционных рецептур (паст) является отсутствие жидких отходов дезактивации, требующих дополнительной обработки.



1



2



3

а

Полимерные матрицы являются, наряду с цементом, битумом, стеклом и керамикой, одной из основных разновидностей материалов, применяемых для иммобилизации радиоактивных отходов с целью организации их дальнейшего безопасного хранения. В результате применения дезактивирующих покрытий на основе пасты образуются твердые отходы дезактивации. Разработанные композиции обладают способностью удерживать в своем составе компоненты – химические соединения и радионуклиды (скорость выщелачивания агрессивной химической составляющей композиций не превышает установленных нормативов).

Использование пленкообразующих покрытий для дезактивации оборудования позволяет:

- снизить дозы облучения для персонала за счет уменьшения времени пребывания персонала возле дезактивируемого оборудования;
- сократить время простоя и значительно сэкономить средства на дезактивацию, осуществляемую на различных этапах эксплуатации и вывода из эксплуатации ядерных установок;
- уменьшить экологическую опасность процесса дезактивации за счет сокращения количества радиоактивных отходов и операции с радиоактивными объектами.

Стадия развития. Выполнена научно-исследовательская работа, разработаны и зарегистрированы в установленном порядке



б

технические условия и рецептуры на дезактивирующие композиции:

ТУ ВУ 190341033.005–2015 «Композиции дезактивирующие полимерные» № гос. регистрации 043163 от 09.02.2015 г.

Композиции дезактивирующие полимерные (КДП) РЦ ВУ 190341033.002–2015.

Композиции дезактивирующие полимерные пасты (КДПп) РЦ ВУ 190341033.003–2015.

Данная разработка защищена патентом Республики Беларусь:

Патент РБ № 16314 «Пленкообразующий состав для дезактивации металлической поверхности» МПК G21F 9/34; авторы: Вороник Н. И., Давыдов Ю. П., Сапрунова Н. А.

Патентообладатель: Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси.

1. Бассейн выдержки отработавших тепловыделяющих сборок в процессе дезактивации.
2. Бассейн выдержки отработавших тепловыделяющих сборок после дезактивации.
3. Пеналы для хранения отработавших тепловыделяющих сборок: а - в процессе дезактивации, б - после дезактивации.

Задачи по дезактивации поверхности разнообразны по масштабам и сложности. Технологии, которые могут быть использованы для очистки, включают химические, механические и термические методы, такие как струйная обработка сжатым воздухом, криогенная струйная обработка CO₂, вода под высоким давлением, перегретая вода, промывка водой, очистка паром, ручная чистка, автоматическая чистка, пенная обработка, очистка горячим воздухом, промывка дезактивирующими растворами, вакуумная и ультразвуковая чистка. Однако в каждом из этих методов есть свои проблемы.

Действие покрытий для «сухой» дезактивации заключается в проникновении радионуклидов в материал пленки или пасты и в удалении затвердевшего покрытия вместе с удерживаемыми в нем радиоактивными загрязнениями. Эти способы могут быть использованы для удаления фиксированных и/или рыхлых загрязнений без повреждения поверхности подложки.

Ближайшие аналоги разработанных композиций:

дезактивирующие пленкообразующие составы компании ООО ДРЕКО, РФ марок ВА (ТУ 6991-005-78102670-2009) и ВЛ (ТУ 6991-004-78102670-2009);

дезактивирующие пленкообразующие составы компании DeconGel, разработчик – Cellular Bioengineering Polymers Inc., США; производитель – Industrial Chem Solutions INC., США.

За счет внедрения технологий дезактивации, обеспечивающих снижение объема эксплуатационных радиоактивных отходов в 10 раз и более, можно получить экономический эффект только за счет снижения затрат на окончательную изоляцию РАО, а также снизить коллективную эффективную дозу, получаемую персоналом, занятым переработкой радиоактивных отходов.

Использование собственных разработок обеспечит технологическую безопасность – независимость от зарубежных производителей и полное их замещение аналогами, не уступающими по своим свойствам импортным образцам. Поэтому создание дезактивирующих композиций на основе полимерных пленок (паст) является приоритетным направлением для создания экологически безопасных малоотходных технологий дезактивации, а также может сыграть положительную роль в достижении безопасного долговременного хранения/захоронения радиоактивных отходов на фоне новых экологических стандартов, возрастающей роли атомной энергетики.

Экономическая значимость разработки заключается в импортозамещении, увеличении эффективности дезактивации, повышении экономических показателей процесса дезактивации за счет снижения затрат на переработку отходов дезактивации.

Перспективно использование разработанных дезактивирующих рецептур на предприятиях атомной энергетики, в организациях, использующих открытые источники ионизирующих излучений.

От индустриального партнера ждем: инвестиции на ранних стадиях разработки технологии, партнерское соглашение ■



ТРО ДЕЗАКТИВАЦИИ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ ОЯТ И ПЕНАЛОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОТВС С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ. КОМПОЗИЦИЯ ПОЛИМЕРНАЯ ДЕЗАКТИВИРУЮЩАЯ НА ОСНОВЕ БОРОФТОРИСТОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ КДП-3, РЦ ВУ 190341033.002-2015

Показатель	Активность, Бк				
	Донные отложения		Сухие отходы дезактивации		
	бассейн 1 (иловые)	бассейн 2 (иловые + продукты коррозии)	бассейн 1	бассейн 2	пеналы + решетки
Масса отходов, кг	6	3	4,1	4	10,9
60 Co	1,2·10 ⁶	8,4·10 ⁵	3,1·10 ⁴	7,3·10 ³	1,8·10 ⁵
137 Cs	9,7·10 ³	4,3·10 ⁴	4,2·10 ³	1,1·10 ²	3,1·10 ²
152 Eu	3,7·10 ⁵	2,4·10 ⁵	1,6·10 ⁴	7,0·10 ³	2,1·10 ⁴
154 Eu	4,5·10 ⁴	2,8·10 ⁴	1,6·10 ³	7,2·10 ²	2,3·10 ³
241 Am					4,0·10 ²
Сумма	1,6·10⁶	1,2·10⁶	5,3·10⁴	1,5·10⁴	2,0·10⁵

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЗАКТИВИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ DRYDEC. МЕСТО ИЗМЕРЕНИЯ – ДЕЗАКТИВИРУЕМАЯ ПОВЕРХНОСТЬ. ТИП ИЗМЕРЕНИЯ -ЗАГРЯЗНЕНИЕ, БК/СМ²

№	Технологическая система	Толщина стенки	Материал	Активность поверхности, Бк/см ²			Коэффициент дезактивации после 2 цикла
				Исходное значение	Значение после 1 цикла	Значение после 2 цикла	
Дезактивирующая композиция DryDec1							
1	Участок трубопровода острого пара (1RA)	Ø630x28	сталь 17 ГС	211	12	2,3	91,7
2	Участок трубопровода ПДУ (1RR)	В=18	Углеродистая сталь	20,5	2,5	1	20,5
3	Участок сбросного трубопровода БРУ-К (1RC)	В=16	Углеродистая сталь	64,5	25	7,17	9
Дезактивирующая композиция DryDec2							
4	Участок трубопровода конденсата греющего пара (1RH)	В=12	Нержавеющая сталь	2,7	0,15	0,06	45
5	Участок трубопровода отбора (1RD)	В=10	Нержавеющая сталь	13,1	0,02	0,02	655

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА



Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Конструкторско-технологический
институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской
академии наук, 630058,
г. Новосибирск, ул. Русская, 41

Завьялов Петр Сергеевич

помощник директора по научно-техническим проектам, и.о.
заведующего лабораторией № 1-1, кандидат технических наук,
тел.: +7-913-466-84-52, раб. тел.: 306-58-68, zavyalov@tdisie.nsc.ru

Выхристюк Игнат Александрович

заведующий лабораторией № 1-2, старший научный сотрудник,
тел.: +7 913-956-19-75, раб. тел.: 306-62-12, uic@ngs.ru

Сысоев Евгений Владимирович

ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук,
тел.: +7-913-919-23-49, раб. тел.: 306-62-12, evsml@mail.ru

Куликов Родион Владимирович

научный сотрудник лаборатории № 1-2,
тел.: +7 913 919-23-49, раб. тел.: 306-62-12, rstalcker@ngs.ru

Скоков Дмитрий Владимирович

главный конструктор, начальник отдела № 2-5,
тел.: +7-923-253-10-92, раб. тел.: 306-59-33, 15823@mail.ru

Власов Евгений Владимирович

и.о. заместителя заведующего лабораторией, научный
сотрудник лаборатории № 1-1,
тел.: +7-983-134-49-38, раб. тел.: 306-62-24, vlasov@tdisie.nsc.ru

Белобородов Алексей Вадимович

ведущий программист лаборатории № 1-1,
тел.: +7-952-909-88-48, раб. тел.: 306-59-40, alexey@tdisie.nsc.ru

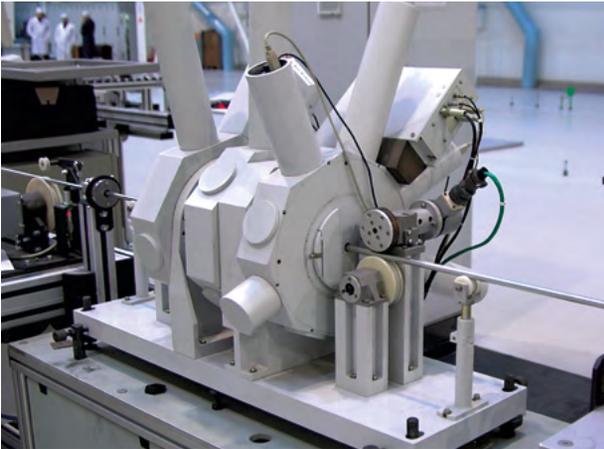
Гущина Анна Александровна

ведущий программист лаборатории № 1-1,
тел.: +7-913-936-54-09, раб. тел.: 306-59-40,
agushchina@tdisie.nsc.ru

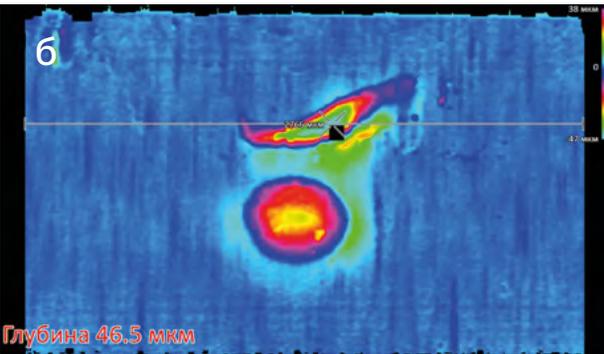
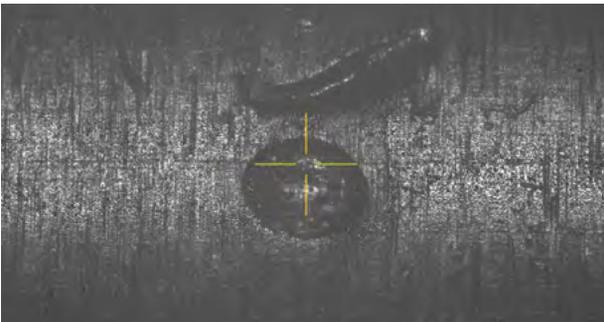
«Размер»

- Система контроля геометрических параметров тепловыделяющих элементов (далее — твэл):
- используется теневой метод измерения;
- измерение внешнего диаметра, овальности, отклонения от прямолинейности, длины;
- диапазон измерения длины, мм 2500–4500;
- погрешность измерения длины, мм $\pm 0,04$;
- диапазон измерения диаметров, мм 8–10;
- погрешность измерения диаметров, мм $\pm 0,01$;
- погрешность измерения отклонения от прямолинейности, мм $\pm 0,04$ (на базе 500 мм);
- производительность, твэл/ч до 180;
- изготовлено 4 системы (ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» (далее — ПАО «НЗХК»)), КНР.

Область применения: атомная, машиностроительная, химическая, металлургическая и другие отрасли промышленности.



1



Изготовлено 6 рабочих образцов трех различных модификаций, в т.ч. один, встроенный в автоматическую линию (НЗХК, ЧМЗ)

2

«Профиль»

Оптический интерференционный профилометр для измерения трехмерного профиля поверхности.

- Бесконтактное измерение глубины и профиля дефектов на внешней поверхности твэл.
- Измерения основаны на оптической интерференции низкокогерентного излучения.
- Область измерения мм2 2,1 x 1,3.
- Количество одновременно измеряемых точек, шт 960x600.
- Погрешность измерения глубины, мм $\pm 0,003$.
- Диапазон измерения глубины, мм 0–0,5.
- Время измерения, сек. менее 10.
- Возможность измерения шероховатости поверхности.
- Изготовлено 6 рабочих образцов трех различных модификаций, в т.ч. один, встроенный в автоматическую линию (НЗХК, ЧМЗ).

Система внесена в Госреестр в качестве средства измерения (№ 24403–03), получен сертификат Госстандарта России (RU.C.27.007A № 14245).

«Дефект-М»

Программно-аппаратный комплекс технического зрения для высокопроизводительного контроля внешнего вида таблеток.

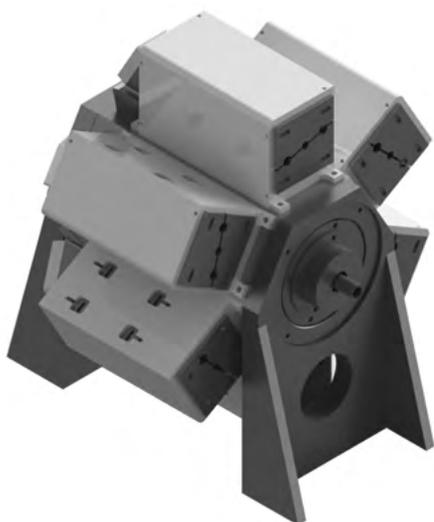
- Автоматический бесконтактный контроль внешнего вида таблеток ядерного керамического топлива.
- Диаметр таблеток, мм: 7,54–7,8.
- Длина таблеток, мм: 9–12.
- Вероятность выявления отклонений внешнего вида не менее 0,95.

1. Система «Размер».

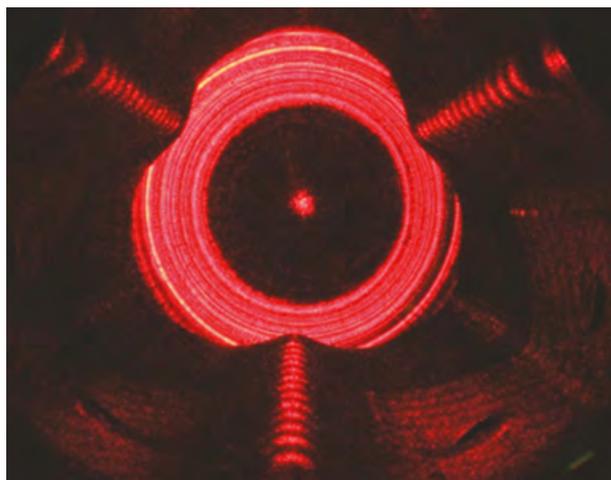
2. Микрофотография дефекта:

а) 3d-модель дефекта,

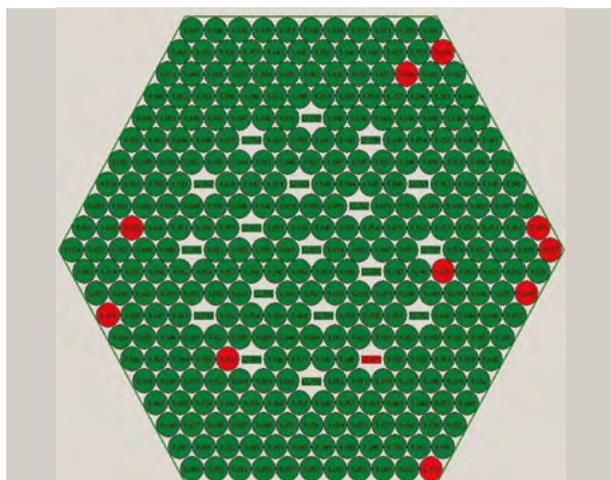
б) Профилограмма дефекта.



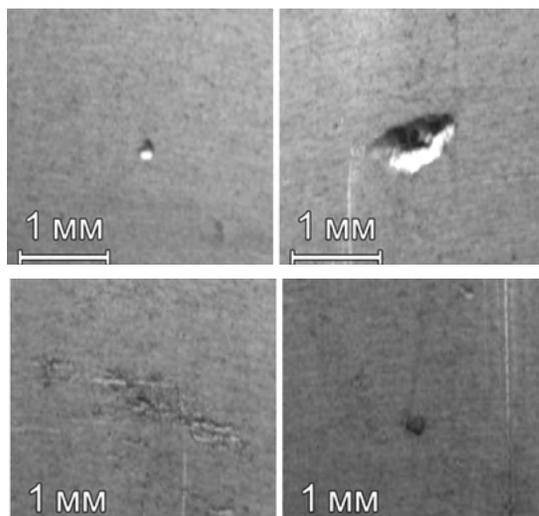
3



5



6



4

- Перебраковка годных таблеток, %: не более 2.
- Производительность, табл./с не менее 6.
- Контролируемый линейный размер дефекта, мм: не менее 0,2.
- Используется классификация дефектов по атласу допустимых отклонений внешнего вида.

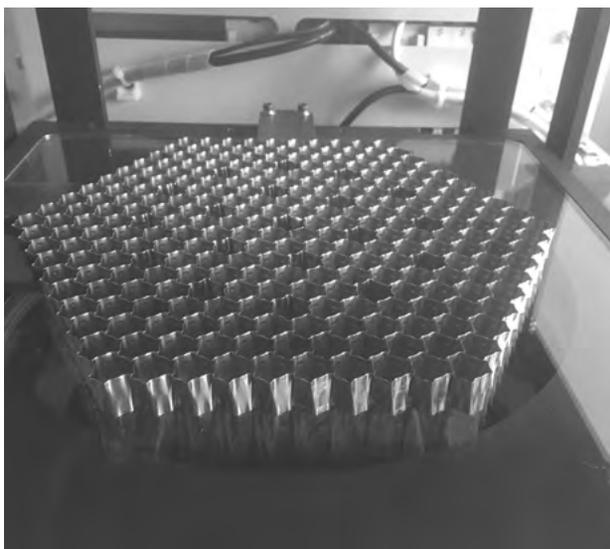
Два комплекта «Дефект-М» находятся в промышленной эксплуатации в производстве топливных таблеток на ПАО «НЗХК».

Система автоматического контроля внешнего вида оболочек твэл

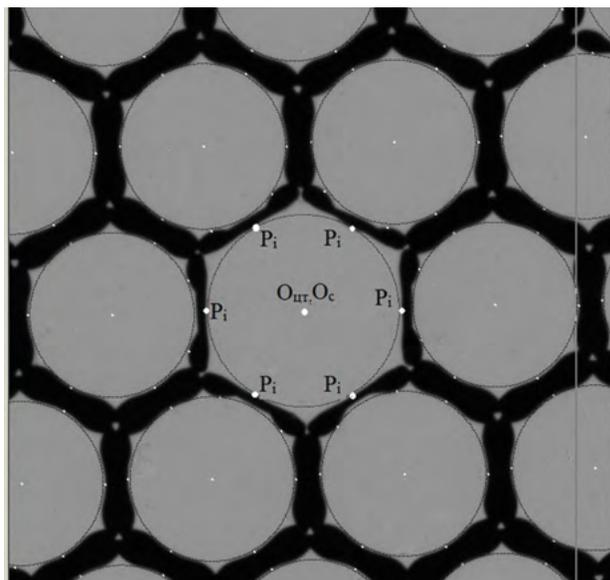
- Автоматический бесконтактный контроль внешнего вида оболочек твэл.
- Используется классификация дефектов с использованием искусственной нейронной сети.
- Определение положения условно допустимого дефекта для последующего автоматического прецизионного измерения глубины системой «Профиль».
- Производительность, мм/с: 166.
- Система проходит опытную эксплуатацию.

«Решетка-Н»

На основе разработанного метода структурного освещения создана универсальная оптико-электронная система для контроля геометриче-



7



8



9

ских параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н») в интересах ПАО «НЗХК» и Корпорации «ТВЭЛ».

Система производит контроль геометрических параметров широкой номенклатуры дистанционирующих решеток (более 12 типов) с высоким быстродействием (в 300 раз выше, чем у существующих координатно-измерительных машин).

Применение системы «Решетка-Н» позволило улучшить:

- качество тепловыделяющих сборок;
- безопасность и надежность российских атомных реакторов;
- конкурентоспособность ядерных реакторов на рынке атомных технологий.

«Решетка-Т»

Установка автоматизированного контроля геометрических параметров перемешивающих решеток для тепловыделяющих сборок.

- Погрешность измерения диаметров вписанных окружностей в ячейки и отверстия под канал, мм: $\pm 0,03$.
- Погрешность измерения отклонения центров вписанных окружностей в ячейки и в отверстия под канал, мм $\pm 0,1$.
- Определяет пространственную форму и положение осей ячеек и отверстий под канал.
- Определяет наличие/отсутствие ячейки в месте расположения отверстия под канал.
- Время контроля одного изделия не более 2 мин.

В стадии опытной эксплуатации на ПАО «НЗХК» ■

3. Блок видеоконтроля.
4. Изображения дефектов различных типов: накол, вмятина, растрав, микровыступ.
5. Перемешивающая решетка.
6. Фрагмент обработанного изображения.
7. Вид ячейки в структурном освещении.
8. Картограмма измеренной решетки.
9. Вид на КТИ НП СО РАН.

4



ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

56	Высокоэффективный метод трехстадийного сжигания твердых биотоплив в двухкамерных циклонно-слоевых топках
60	Технология сжигания угля в виде водоугольной суспензии
65	Плазменный реактор для переработки отходов
68	Экспериментальный стенд для разработки технологий обезвреживания особо опасных органических отходов, включая стойкие органические загрязнители, с утилизацией получаемой тепловой энергии

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ТРЕХСТАДИЙНОГО СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ БИОТОПЛИВ В ДВУХКАМЕРНЫХ ЦИКЛОННО-СЛОЕВЫХ ТОПКАХ



Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», 220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 15.

Пицуха Евгений Александрович

заведующий лабораторией химико-энергетических процессов ИТМО НАН Беларуси, доктор технических наук, тел.: +375(29)792-58-28, тел. раб.: +375(17)370-24-80, pit.ea@mail.ru

Теплицкий Юрий Семенович

главный научный сотрудник лаборатории химико-энергетических процессов ИТМО НАН Беларуси, доктор технических наук, тел.: +375(29)682-57-93, тел. раб.: +375(17)278-23-10, tep@hmti.ac.by

Бучилко Эдуард Казимирович

научный сотрудник, тел.: +375(29)760-66-42, раб. тел.: +375(17) 353-13-45, ebuchilko@gmail.com

В настоящее время в мире большое внимание уделяется возобновляемой энергетике, и в частности производству тепловой и электрической энергии при сжигании твердых топлив биологического происхождения, таких как древесные топлива и отходы, растительные отходы, торф. Необходимость широкого вовлечения в энергобаланс возобновляемых энергоресурсов во многих странах обусловлена ограниченными запасами ископаемых топлив и ухудшением

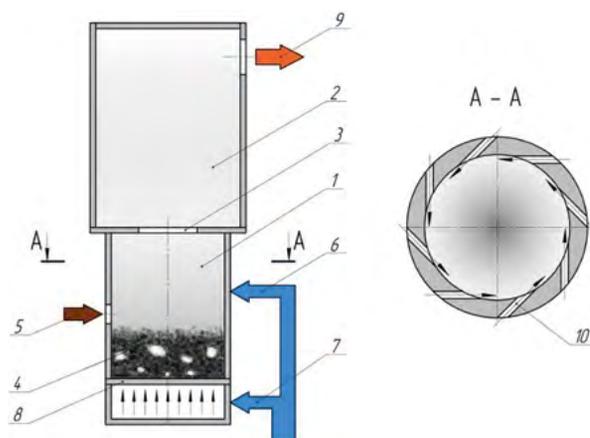
экологической обстановки. Приоритетными современными требованиями при разработке новейшего энергетического оборудования становятся энергоэффективность и экологическая безопасность, что подразумевает в том числе дальнейшее развитие технологий сжигания биотоплив и конструкций котельных агрегатов.

Для сжигания твердых биотоплив сейчас в основном применяются котлы, оснащенные топочными устройствами с неподвижным слоем (НС), несколько реже используются топки с псевдоожиженным (кипящим) слоем (КС). Достоинства слоевого сжигания — возможность использования биотоплив сравнительно крупной фракции (до 50–70 мм) и устойчивость процесса горения. Характерными недостатками этих топочных устройств являются повышенные коэффициенты избытка воздуха ($\alpha = 1,4-1,8$) и габаритные размеры топочной камеры, а для топок неподвижного слоя еще и повышенные механический недожог топлива ($q_4 \approx 2-4\%$), и эмиссия оксидов азота (NO_x). Это не позволяет в полной мере использовать располагаемую теплоту сгорания топлива и приводит к снижению коэффициента полезного действия (КПД) котельных агрегатов и увеличению их стоимости. Для сжигания биотоплив также применяются вихревые топочные устройства, которые работают с достаточно низкими избытками воздуха ($\alpha = 1,15-1,35$). Однако небольшая глубина регулирования мощности и необходимость использования лишь мелкофракционных и парусных топлив ограничивают диапазон применения вихревых топок, особенно в малой энергетике, где обычно используются твердые биотоплива широкого фракционного состава с размерами частиц (кусков), как отмечено выше, примерно до 50–70 мм.

Указанные недостатки существенно уменьшены у топочных устройств с совмещенным слоевым и вихревым сжиганием — циклонно-слоевых топков, использующих лучшие особенности слоевого и вихревого сжигания, позволяющих достичь высоких показателей по энергоэффективности, пониженной эмиссии вредных выбросов и уменьшенных габаритных размеров, принципиальная схема которых приведена на рисунке 1 [1, 2]. Метод сжигания твердых биотоплив в циклонно-слоевых топках с кипящим (неподвижным) слоем был разработан в ИТМО НАН Беларуси.

Циклонно-слоевая топка состоит из вихревой камеры сгорания (1) с неподвижным или кипящим слоем и камеры догорания (2), которые разделены пережимом (3). Первичный воздух подается под слой, а вторичный — тангенциально над слоем, создавая в камере сгорания интенсивный закрученный газовый поток. Важным элементом конструкции является аэродинамический пережим (3). Он позволяет сформировать в нижней камере (1) активный вихревой гидродинамический режим и удерживать несгоревшие частицы топлива до их полного выгорания. Во второй камере (2) происходит диссипация вихревого потока на более мелкие вихри, возникает ряд рециркуляционных течений, что способствует более качественному перемешиванию продуктов газификации и окислителя. Процесс сжигания топлива в циклонно-слоевой топке трехступенчатый. Первая стадия сжигания осуществляется в кипящем (неподвижном) слое, вторая — в нижней камере (1), а третья, дожигание — в верхней камере (2). Наличие двух камер является важным конструктивно-технологическим решением, улучшающим качество смесительных процессов, поскольку в однокамерных конструкциях поперечное распределение температур и концентраций газов неравномерно, что приводит к увеличению химнедожога топлива. При использовании кипящего слоя сжигание осуществляется в низкотемпературном режиме, т.е. не превышая температуру плавления золы топлива. Непосредственно в КС температура составляет 820–880 °С. В камерах сгорания и догорания максимальный уровень температур в зависимости от качества топлива достигает 850–980 °С и 800–950 °С соответственно.

Основными достоинствами данной трехстадийной технологии сжигания являются более качественное вихревое смесеобразование летучих и продуктов неполного горения с дутье-



1

вым воздухом, снижение габаритных размеров топочного устройства, уменьшение коэффициента избытка воздуха до низких нехарактерных для слоевого сжигания биотоплив значений $\alpha = 1,15-1,25$, снижение механического и химического недожога топлива и, соответственно, увеличение КПД котлоагрегатов (до 92 % для качественных биотоплив), уменьшение эмиссии монооксида углерода (СО) (до 80–250 мг/м³ при $\alpha = 1,2-1,25$) и оксидов азота (NOx). Ориентировочно единичная мощность данных топочных устройств может находиться в диапазоне 0,1–10 МВт.

В ИТМО НАН Беларуси проведен ряд исследований по изучению особенностей сжигания различных биотоплив (пеллет из древесины, соломы, лузги полсолнечника, торфяных пеллет, древесных отходов, щепы, фрезерного торфа, дробленого торфобрикета, смесей щепы и фрезерного торфа и др.) в циклонно-слоевых топках с НС и КС экспериментальных и опытно-промышленных установках различного масштаба с тепловыделением в топочной камере $N_{ch}=0,0165-2,0$ МВт и диаметром камеры сгорания $D=0,2-1,15$ м [2, 3]. Установлено влияние конструктивных и режимных параметров (масштаба камеры, относительного диаметра пережима, живого сечения тангенциальных сопел,

1. Принципиальная схема циклонно-слоевой топки: 1 – камера сгорания (вихревая камера), 2 – камера догорания, 3 – пережим, 4 – кипящий (неподвижный) слой, 5 – ввод топлива, 6 – тангенциальный ввод вторичного воздуха, 7 – ввод первичного воздуха, 8 – газораспределительная решетка, 9 – отвод продуктов горения, 10 – сопла ввода вторичного воздуха.

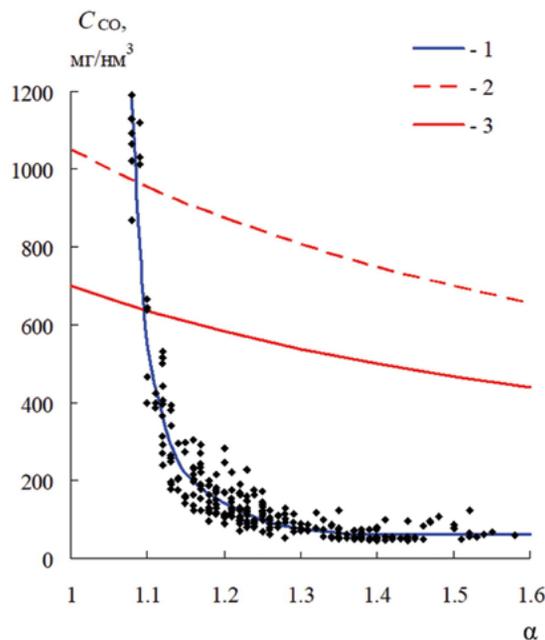


2

а

высоты слоя, расхода воздуха, доли и температуры донного дутья, числа псевдооживления) на гидродинамику и массоперенос в вихревой надслоевой зоне циклонно-слоевых камер. Получены экспериментальные зависимости концентраций монооксида углерода (CO) и оксидов азота (NOx) в отходящих газах при сжигании биотоплива от коэффициента избытка воздуха, доли донного дутья (первичного воздуха), мощности топки, диаметра выходного отверстия камеры сгорания. Выполнено численное моделирование гидродинамики, перемешивания газов и горения топлива в циклонно-слоевых топочных камерах различной геометрии, разработан полуэмпирический метод расчета циклонно-слоевых топок, учитывающий влияние масштабного фактора. На рисунке 2 приведена характерная зависимость концентрации монооксида углерода (CO) от коэффициента избытка воздуха (α), полученная на экспериментальной установке с циклонно-слоевой топкой КС мощностью $N_{ch} = 25$ кВт при сжигании древесных пеллет рабочей влажностью $W_p = 10\%$ (кривая 1). На этом же графике нанесены нормативные кривые концентрации CO, согласно экологическому стандарту Беларуси – ЭкоНиП [4] для котлоагрегатов различных диапазонов мощности (кривые 2, 3). Видно, что при избытке воздуха $\alpha = 1,15-1,25$ концентрация CO существенно ниже нормативных значений.

На способ циклонно-слоевого сжигания твердого биотоплива и ряд технических устройств,



б

его реализующих, получены патенты РБ № 7853, 8360, 12090, 23746.

Водогрейный котел с циклонно-слоевой топкой кипящего слоя мощностью 2 МВт, созданный на основании выполненных исследований, успешно эксплуатируется в Брестском ЖКХ с 2018 года, используя в качестве топлива древесные отходы повышенной зольности (рисунок 3).

В последнее время авторами разработки проводятся исследования по адаптации рассматриваемой технологии для сжигания растительных сельскохозяйственных отходов, таких как солома, льнокостра, лузга подсолнечника и др., спецификой которых является парусная форма частиц, мелкофракционный состав и низкая насыпная плотность, что требует изменения технологических и геометрических параметров циклонно-слоевых топочных устройств по отношению к обычным (непарусным) биотопливом.

Выполняются также исследования сжигания осадка сточных вод (ОСВ) и биоуглей, полученных термообработкой из ОСВ. Эффективное энергетическое и экологически чистое использование данных материалов хорошо вписывается в современную концепцию малой распределенной энергетики [5] и позволит уменьшить себестоимость продукции в производстве и переработке сельхозпродукции и снизить накопление отходов в системе ЖКХ.



3

В качестве предложений о сотрудничестве может рассматриваться научно-техническое сопровождение работ по освоению заказчиком технологии циклонно-слоевого сжигания и созданию топочных устройств и котельного оборудования на основе данной технологии для работы на различных видах твердых биотоплив ■

Основная область применения технологии циклонно-слоевого сжигания биотоплива — малая энергетика, предприятия ЖКХ, деревоперерабатывающие предприятия, предприятия по производству и переработке сельхозпродукции

2. Экспериментальная установка с циклонно-слоевой топкой КС мощностью $N_{ch} = 25$ кВт (а), характерная зависимость концентрации монооксида углерода (СО) (б) от избытка воздуха α при сжигании древесных пеллет: 1 – средняя концентрация СО, 2 – нормативные значения концентрации СО согласно ЭкоНиП РБ [4] для котлов мощностью 0,3–2 МВт; 3 – для котлов мощностью 2,0–50 МВт.

3. Водогрейный котел мощностью 2 МВт с циклонно-слоевой топкой кипящего слоя.

Литература

1. Пищуха, Е. А. Новый высокоэффективный метод двухстадийного сжигания твердых биотоплив в кипящем слое / Е. А. Пищуха, Ю. С. Теплицкий, Э. К. Бучилко // Энергоэффективность. – 2017. – № 3. – С. 28–31.
2. Пищуха, Е. А. Научные основы создания высокоэффективных циклонно-слоевых топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе: автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.14.04 / Е. А. Пищуха; Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2019. – 48 с.
3. Пищуха, Е. А. Гидродинамические и термохимические аспекты сжигания твердых биотоплив в циклонно-слоевых топках различного масштаба / Е. А. Пищуха, Э. К. Бучилко, Ю. С. Теплицкий, В. А. Дубина // Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену – «РНКТ – 7». Москва, 22–26 октября 2018 г.: Сб. науч. трудов / Издательский дом МЭИ. – Москва, 2018. – С. 271–275.
4. Экологические нормы и правила. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности: ЭкоНиП 17.01.06–001–2017. – Введ. 1.10.2017. – Минск: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ от 18.07.2017 № 5-Т, 2017. – 139 с.
5. Антропов А. П., Батенин В. М., Зайченко В. М. Новые технологии распределенной энергетики. – ТВТ, 2015. – Т. 53. – № 1. – С. 111–116.

ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ВИДЕ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

Алексеев Сергей Владимирович

академик РАН, научный руководитель ИТ СО РАН,
тел.: (383) 330-70-50, alexs@itp.nsc.ru

Мальцев Леонид Иванович

главный научный сотрудник, доктор технических наук,
тел.: +7-913-702-02-09, Maltzev@itp.nsc.ru



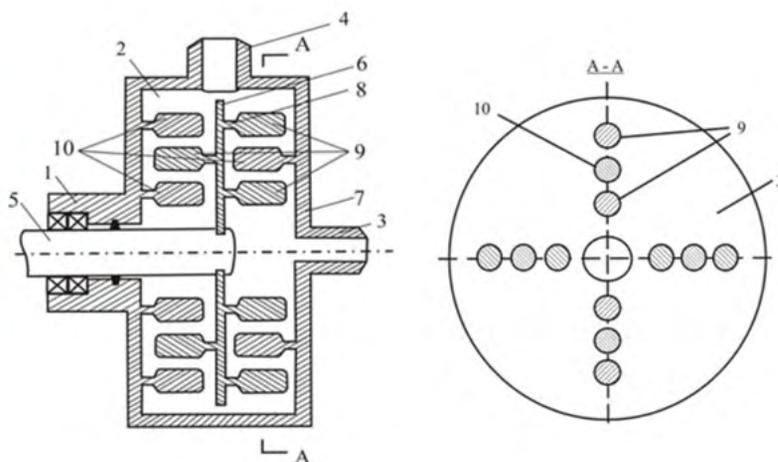
Разработчики технологии – Алексеев Сергей Владимирович (справа) и Мальцев Леонид Иванович (слева).

В системе мирового энергопотребления основным энергоносителем является нефть, однако в последние десятилетия темпы роста ее потребления уменьшились, а доля угля увеличилась [1, 2]. В то же время уголь остается самым «грязным» видом топлива на всех этапах его жизни от добычи до сжигания. К настоящему времени практически весь добытый уголь при первичной переработке подвергается сортировке и обогащению, в результате чего образуются большие объемы мелких угольных фракций (отсевов, угольных шламов), имеющих повышенную влажность и зольность. Обогащение углей на обогатительных фабриках производится преимущественно с использованием «мокрых» технологий, и после обогащения остаются огромные объемы сильно обводненных мелкодисперсных отходов (кеков), которые содержат порой до 30–40 % углерода. Для энергетического использования переувлажненных угольных отходов по традиционным технологиям необходимо осуществить их обезвоживание. Однако термическая сушка об-

водненных угольных отходов экономически не оправдана. В результате отходы выбрасываются в природу, загрязняя ее. При сжигании в котлах уголь нередко выгорает далеко не на все 100 %, а процесс сжигания сопровождается вредными выбросами в окружающее пространство.

Таким образом, необходимы технологии сжигания углей с максимально возможной полнотой сгорания топлива и минимальным воздействием на природу, позволяющие замещать другие, более дорогие виды топлива, а также использовать низкокачественные угли и отходы. Одним из перспективных способов решения такой задачи может служить применение технологии сжигания углей в виде водоугольного топлива (ВУТ), более конкретно – водоугольной суспензии (ВУС).

Исследования свойств ВУТ из различных углей, способов их приготовления, хранения, транспортировки и сжигания ведутся с 50-х годов



1

прошлого столетия. Показано, что ВУТ-технология обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами сжигания твердого топлива: взрыво- и пожаробезопасность; возможность транспорта по трубопроводу; возможность сжигания широкой гаммы топлив (низкосортных углей, сланцев, угольных шламов и отходов углеобогащения); высокая степень выгорания горючей массы (95–97 %); высокий КПД котла (82–85%); высокие экологические характеристики (по содержанию угольной пыли, золы, NOX, CO). Интерес к ВУТ-технологиям определяется, как правило, состоянием рынка энергоносителей и ценами на углеводородные топлива. В последние годы в мире снова пробудился интерес к водоугольному топливу, обусловленный прежде всего ростом цен на мазут и другие энергоносители и возрастанием требований по экологии окружающего пространства.

Наиболее заметные успехи в технологии ВУТ в настоящее время имеются в Китае. Китайская технология приготовления ВУТ – традиционная и состоит в комбинации мокрого помола угля в шаровых и вибрационных мельницах в присутствии пластификаторов. Определенные успехи в развитии ВУТ-технологии имеются и в РФ. Тем не менее на данный момент технологию ВУТ нельзя назвать завершенной. Остается нерешенным целый ряд вопросов как по методам приготовления и сжигания ВУТ, так и по практической реализации технологии.

В Институте теплофизики СО РАН им. С. С. Кутателадзе выполнены необходимые исследования и практические проработки по технологии приготовления и сжигания ВУТ, по моделированию горения ВУТ в вихревых топочных камерах, по разработке нового оборудования. Проведены опытно-промышленные испытания.

2. Приготовление ВУТ

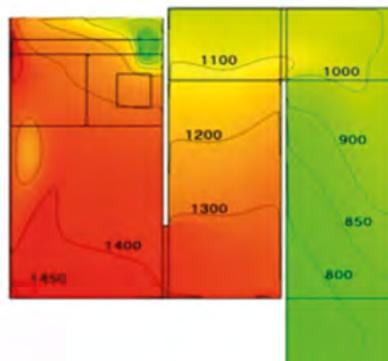
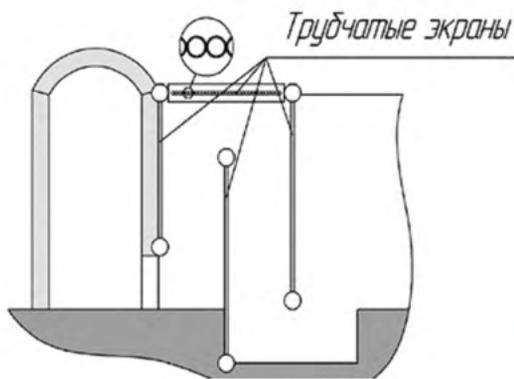
Нами применяется технология приготовления ВУТ, включающая мокрый помол угля на шаровой барабанной мельнице и доизмельчение угля в полученной суспензии на оригинальном роторном гидродинамическом генераторе кавитации (ГК, см. рис. 2). В процессе работы данного генератора на твердые частицы суспензии воздействуют сразу три механизма их измельчения: ударный, истирание, кавитационный.

Обработка водоугольной суспензии на ГК в течении 1–2 минут приводит к доизмельчению угольной массы, гомогенизации суспензии, улучшению ее реологических характеристик (вязкость, текучесть, стабильность, механохимическая активация). Наиболее заметное изменение размеров частиц угля происходит в верхней части спектра. Содержание частиц размером до 10 мкм увеличивается с 5–7 % до 25–30 %. Суммарная удельная поверхность угольной массы при этом возрастает более чем в два раза.

Генератор кавитации защищен патентами [3, 4] и описан в [5].

1. Роторный гидродинамический генератор кавитации: а – общий вид, б – принципиальная схема устройства.

1 – корпус, 2 – рабочая камера, 3 – входной патрубков, 4 – выходной патрубков, 5 – вал двигателя, 6 – диск, 7 – торцевая стенка рабочей камеры, 8 – обтекаемая стойка цилиндра, 9 – подвижные цилиндры, 10 – неподвижные цилиндры.



2

3. Проблемы сжигания ВУТ в топочных камерах

3.1. Теоретические основы и моделирование процессов горения ВУТ

Использование математического моделирования при изучении горения ВУТ позволяет получать детальную информацию о тепловых процессах и быстро находить решения проблем. В качестве математической модели для описания течения в камере сгорания выбрана модель многокомпонентного несжимаемого неизотермического газа, основанная на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса. Также решаются уравнения переноса энергии, лучистой энергии и компонент газа. При описании турбулентных характеристик течения используются k - ω SST модель турбулентности с применением метода пристеночных функций. Вычисление коэффициентов поглощения газа основано на модели суммы серых газов. Для описания процесса горения летучих компонент топлива используется гибридная модель, состоящая из комбинации кинетической модели горения газовых компонент и модели «обрыва вихря».

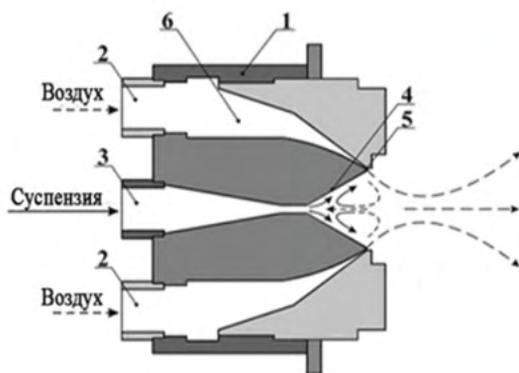
ВУТ представляется дискретным набором частиц, которые подаются через форсунки в топочную камеру. Частицы состоят из комплекса «вода + уголь». В данном случае вода — это внешняя влага, которая была добавлена при изготовлении водоугольного топлива. Учитывается также внутренняя влага в составе топлива, которая определяется при техническом анализе. Движение частиц описывается уравнениями динамики материальной точки (метод Лагранжа) с учетом турбулентности потока, сил тяжести и сопротивления.

При описании горения отдельных капель учитываются стадии её преобразования: нагрев

капли, испарение внешней влаги (используется модель испарения капель), появление угольных частиц, испарение внутренней влаги, выход и воспламенение летучих компонент, горение коксового остатка [6].

3.2. Выбор конструкции топочной камеры и режимов работы котла

Водоугольное топливо содержит более 30 % воды, и вопрос выбора топочного устройства и режимов работы котла при сжигании такого топлива исключительно важен. Топочная камера, предназначенная для сжигания ВУТ, должна обеспечивать достаточно большое время пребывания частиц топлива в камере горения, интенсивное перемешивание топлива и окислителя, поддерживать во всем объеме камеры высокую температуру, например, на уровне температуры плавления золы. Очевидно, что такие условия могут быть получены только в теплоизолированных топочных камерах — муфельных печах, оснащенных системой жидкого золошлакоудаления. Кроме того, горячие газы из камеры сгорания уходят в камеру охлаждения с конвективным пучком труб. Расплавленные частицы золы уноса, попадая на трубки конвективного пучка, налипают на них и затвердевают. Со временем межтрубные пространства зарастают затвердевшим шлаком, и камера с конвективным пучком труб выходит из строя. С целью решения возникающих проблем выполнены расчетные и опытно-промышленные исследования работы котла, содержащего муфельную камеру сгорания ВУТ с системой жидкого шлакоудаления и дополнительную камеру, оснащенную экранными трубами, где одновременно происходит дожигание топлива и снижение температуры газов перед их поступлением в конвективный пучок (рис. 3). Наши исследования показывают, что исполь-



3

зование многокамерных топок позволяет оптимизировать режимы сжигания водоугольных топлив, а также совместного сжигания водоугольных и пылеугольных топлив, и в частности существенно уменьшать содержание окислов азота в уходящих газах [7–11].

3.3. Форсунка

В технологии сжигания жидких топлив исключительно важное место занимают распылительные форсунки. В результате многовариантных исследований авторами разработан принципиально новый тип пневматической форсунки для распыливания жидких (в том числе суспензионных) топлив, защищенный патентами [12, 13], и описанный в работе [14]. На рисунке 3 представлено схематическое изображение форсунки. Она содержит корпус 1 с патрубком 2 для вдува газа, трубку 3 для подачи топлива, переходящую в диффузорное сопло 4, и кольцевую насадку 5, формирующую совместно с корпусом кольцевое газовое сопло 6 и струйный поток с точкой остановки на оси симметрии и формированием прямого течения вдоль оси форсунки и возвратной кумулятивной струи.

Подача по трубе 3 жидкого топлива под напором приводит к формированию струи, вытекающей из сопла 4. Благодаря эффекту Коанда жидкость имеет тенденцию прилипать к стенкам диффузного сопла. Однако процесс этот не является устойчивым. Высокоскоростная возвратная струя газа, внедряясь в топливную струю вдоль ее оси, нарушает целостность струи и заставляет жидкость равномерно распределяться тонкой струей по стенкам диффузора. На выходе из диффузора трехкомпонентная струя (газ, жидкость, уголь) взаимодействует с газовым потоком, в результате чего внутри диффузора формируется то-

роидальный вихрь, а за пределами форсунки образуется мелкодисперсный газодисперсный прямой поток.



4

2. Схема котла и результаты расчёта (температура в центральном сечении, °С).

3. а) Схема пневматической форсунки: 1 – корпус; 2 – патрубок для подачи газа; 3 – патрубок для подачи топлива; 4 – диффузорное сопло; 5 – кольцевое газовое сопло; 6 – газовая камера; б) газодисперсный поток (расход воды – 100 г/с; давление в камере 6–4 атм.).

4. Бийский котел KE 10/14, переоборудованный на сжигание ВУТ.

4. Опыт авторов по сжиганию ВУТ и угольных шламов

На Заводе стеновых блоков (Новосибирск) построены три опытно-промышленные котельные установки мощностью 1,5, 3 и 7 МВт на водоугольном топливе. Последняя установка (7 МВт) создана на базе бийского котла КЕ 10/14 (рис. 4).

В 2011 году в поселке Мошково Новосибирской области в котельной, обеспечивающей поселок теплом, котел КЕ 10/14 был также переведен на сжигание углей в виде водоугольной суспензии.

В указанных котлах было организовано сжигание ВУТ, приготовленного из кузнецких углей марки Г и Д, антрацита, угольных шламов и шламов антрацита, отходов углеобогащения кузнецких углей. Испытания показали, что каждый из перечисленных продуктов может быть принят в качестве исходного материала для приготовления ВУТ. Коэффициент выгорания углерода составляет 95–97 %. Коэффициент полезного действия котлов достигает значений 85–87 %. Характеристики уходящих газов приближаются к характеристикам мазутных котельных.

В 2016 году в муниципальной котельной поселка Барзас Кемеровской области построен котел мощностью 1 МВт на ВУТ [8]. Для приготовления ВУТ использовались кеки с ОФ «Северная». В течение отопительного сезона 2016–2017 годов котел частично использовался для обогрева поселка.

5. Выводы

Выполнены исследования по моделированию горения ВУТ в вихревых топочных камерах, произведены практические проработки по технологии приготовления и сжигания ВУТ и создано новое оборудование. Проведены опытно-промышленные испытания. Полученные результаты позволяют утверждать, что предлагаемая технология готова к внедрению в малой энергетике для решения поставленных задач ■

Литература

1. Мариничева О. Уголь возвращается в генерацию // Энергетика и промышленность России. — 2012. — Т. 11, № 199. — С. 1–4.
2. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, —2018. — P. 56.
3. Патент РФ № 2403095. Генератор кавитации. Авторы Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Кравченко А. И., Самбор-

ский В. Е. Зарегистрирован в Госреестре 10 ноября 2010 г.

4. Патент 2635142 РФ В01F7/0066. Генератор кавитации // Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Карташова Л. В., Кравченко А. И. — Оpubл. 2017.
5. С. В. Алексеенко, Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, А. А. Дектерев, В. А. Кузнецов. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах // ГОРЕНИЕ И ПЛАЗМОХИМИЯ. 19 (2021) 269–281.
6. Chernetsky, M. Yu. and Dekterev, A. A. A Mathematical Model of the Processes of Heat Exchange and Combustion of Pulverized Coal in Flame Combustion. *Fiz. Goreniya Vzryva*, 2011, no. 3, pp. 37–46.
7. Патент 2518754. РФ МПК F23C3/00. Устройство для сжигания водоугольного топлива (Варианты) // Алексеенко С. В., Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Кравченко А. И., Карташова Л. В. — Оpubл. 10.06.2014.
8. Алексеенко С. В., Мальцев Л. И., Богомолов А. Р., Чернецкий М. Ю., Кравченко И. В., Кравченко А. И., Шевырёв С. А., Лыршиков С. Ю. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — № 12. — С. 16–28.
9. Kuznetsov V. A., Maltsev L. I., Dekterev A. A., Chernetskiy M. Y. Numerical investigation of the influence of operating conditions on the description of the nitrogen oxides formation in combustion chamber of low-power boiler during the combustion of water-coal fuel // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2018. — P. 012042.
10. Kuznetsov V. A., Maltsev L. I., Dekterev A. A. Numerical investigation of coal-water fuel combustion in two-chamber furnace of a low-power boiler // XXXVI Siberian Thermophysical Seminar (STS 36) 2020, *Journal of Physics: Conference Series* 1677 (2020) 012110 IOP Publishing.
11. Патент № 2717868. РФ F23N5/20. Алексеенко С. В., Дектерев А. А., Кузнецов В. А., Мальцев Л. И., Кравченко И. В. Способ оптимизации капельно-факельного сжигания водоугольного топлива в вихревом потоке. Оpubл. 26.03.2020.
12. Патент РФ № 2346756. Пневматическая форсунка. // Мальцев Л. И. — Оpubл. 20.02.2009 г.
13. Патент № 2523816. РФ В05В7/08. Алексеенко С. В., Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Кравченко А. И. // Пневматическая форсунка. — Оpubл. 27.07.2014/
14. Alekseenko S. V., Anufriev I. S., Dekterev A. A., Kuznetsov V. A., Maltsev L. I., Minakov A. V., Chernetskiy M. Yu., Shadrin E. Yu., Sharypov O. V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // *International Journal of Heat and Fluid Flow.* — 2019. — Vol. 77. — P. 288–298.

ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 г. Томск, пр. Ленина, 30

Пак Александр Яковлевич

доцент, кандидат технических наук,
тел.: (382) 270-17-77 доб. 1948, +7-953-922-00-03,
ayarak@tpu.ru

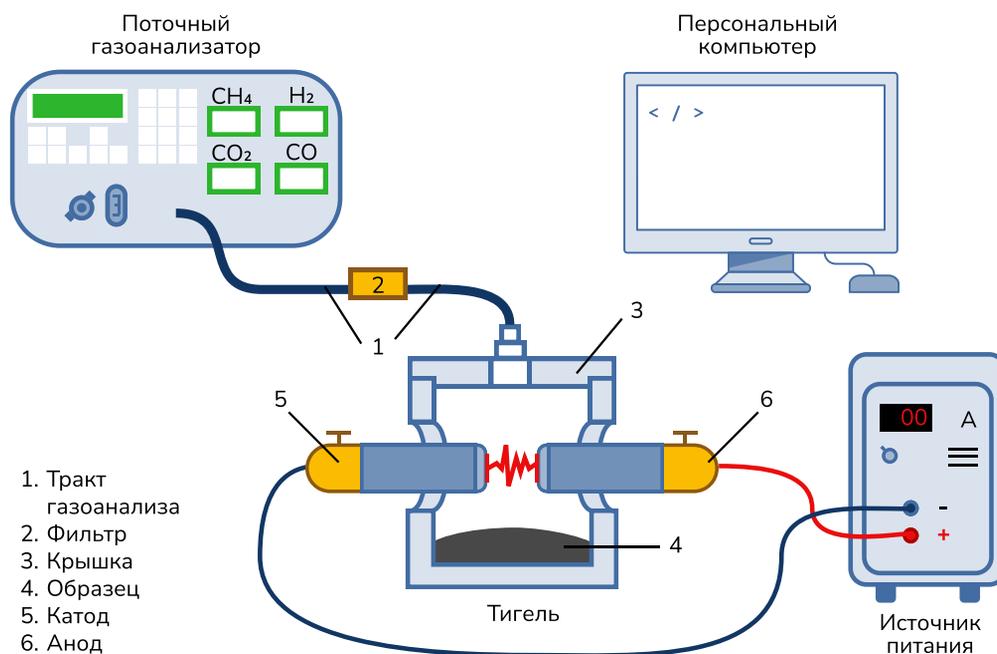
В Томском политехническом университете разработаны методика и устройство для плазменной переработки отходов с получением полезных продуктов. Тепловое поле плазменного факела дугового разряда используется для достижения высоких температур, достаточных для осуществления процессов плазменной переработки низкосортного сырья и отходов. Методика апробирована на процессах электродуговой переработки автомобильных покрышек с получением синтез-газа и ультрадисперсного углерода, а также на примере переработки золошлаковых отходов и стеклоотходов с получением керамики на основе карбида кремния в качестве продуктов. В настоящее время методика реализована на базе лабораторного стенда с присоединенной мощностью 10 кВт, рабочим током до 200 А. Такие параметры системы позволяют обрабатывать до 1 г отходов за один рабочий цикл длительностью 20–30 секунд. Получены патенты на основные элементы устройств плазменного реактора, на методики работы, на программное обеспечение для управления режимами и мониторинга рабочих параметров.

Основным отличием от прямых аналогов и конкурентным преимуществом следует считать использование так называемого эффекта са-

моэкранирования реакционного объема от кислорода воздуха. Эффект заключается в формировании локального «облака» из газов CO и CO₂ в области горения дугового разряда; это облако не содержит несвязанного кислорода, в этой связи направления движения химических превращений и фазовых переходов смещаются от окислительных процессов в сторону карбидообразования, несмотря на горение дугового разряда в технологическом цикле в открытой воздушной среде. Такой подход позволяет ликвидировать в составе плазменного реактора систему создания инертной газовой среды, которая обычно включает в себя вакуумный нанос, баллоны с инертным газом, систему расходомеров, газовых трактов, запорной арматуры и герметичную камеру — реактор. Ликвидация этих узлов и систем позволяет уменьшить массовые и габаритные показатели плазменного реактора в 2–3 раза. При этом согласно проведенным оценкам вакуумное оборудование за счет непрерывного режима работы может потреблять до 90 % электроэнергии в работе плазменного реактора, которые можно сэкономить с использованием предлагаемого подхода.

Исторически вопрос использования дугового разряда постоянного тока, инициированного в открытой воздушной среде, рассматривался в первую очередь как основа простой и высокопроизводительной методики синтеза углеродных наноструктур. Суть методики заключалась в том, что при окислении углерода формируются газовые продукты, которые «уходят» из продукта синтеза, а всё оставшееся в реакционной зоне представляет собой некоторый «наноуглерод». В последние годы (2016–2021) публикуется цикл работ, в котором описываются электродуговые процессы синтеза карбида кремния с использованием оксида кремния в качестве исходной среды; при этом доказывается тот факт, что вне зависимости от состава внешней газовой среды процесс синтеза идет

СХЕМА РЕАКТОРА



в основном в среде формирующихся при горении дугового разряда на графитовых электродах газов CO и CO₂. Этот тезис был расширен и подтвержден экспериментально научной группой в Томском политехническом университете: для синтеза бескислородной керамики можно использовать дуговой разряд постоянного тока, существующий в открытой воздушной среде при условии достижения эффекта самоэкранирования реакционного объема. В результате успешно были реализованы процессы синтеза карбидов кремния и карбидов титана с вовлечением в процесс низкосортного сырья и отходов (зола, шлак, стекло, продукты пиролиза органических отходов) и получением полезной продуктов в виде материалов на основе карбидов. Кроме того, в ходе плазменной обработки резины автомобильных покрышек была показана возможность получения синтез-газа, а также ультрадисперсного углерода.

Текущий уровень готовности по международной шкале можно оценить на уровне TRL3 – TRL4. Основной проблемой на пути дальнейшего развития предложенного метода является необходимость проведения НИОКР, связанных с оценкой путей и возможностей масштабирования процесса и обеспечения работы системы в автоматизированном режиме. Также на данном уровне представляет сложность процесс подго-

товки комплекта конструкторской документации для тиражирования создаваемого плазменного реактора. В связи с этим разработчики приглашают промышленных партнеров для проведения совместных НИР/НИОКР в области отработки походок и режимов работы плазменного реактора для повышения его производительности, тиражирования методики и оборудования.

Данная разработка потенциально может быть интересна предприятиям, занимающимся утилизацией отходов на основе оксидных фаз кремния (зола, шлак, битое несортированное стекло), органических отходов, в частности биомассы. Внедрение методики позволит осуществлять процессы получения полезных продуктов из отходов ■

Представленные сведения о «безвакуумном» плазменном реакторе позволят в будущем создать простую и дешевую технологию переработки отходов, которая попутно совмещает и синтез востребованных материалов на основе карбидных составов.



Пак
Александр Яковлевич

Личный комментарий от разработчика:

«Созданные в Томском политехническом университете методика плазменной переработки отходов и группа электродуговых устройств для ее реализации являются важным шагом к развитию и внедрению отечественного оборудования, способствующего развитию технологий энергетики будущего»

Установка (лабораторный «безвакуумный» плазменный реактор) и оператор



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОСОБО ОПАСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ, ВКЛЮЧАЯ СТОЙКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ, С УТИЛИЗАЦИЕЙ ПОЛУЧАЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ



Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси», 220072, г. Минск ул. Академическая, 15, корп. 2

Голубев Виктор Петрович

заведующий сектором «Технологии утилизации отходов», кандидат биологических наук, тел.: +375(29)6343611, vrgolubev@mail.ru

Шевчик Николай Евгеньевич

заместитель директора по научной работе и проектированию, кандидат технических наук, доцент, тел.: +375(29)6171461, тел. раб.: +375(17)2841129, neshvchik@gmail.com

Повышение уровня экологической безопасности за счет экономии невозобновляемых источников энергии и снижения выбросов парниковых газов в атмосферу — инновационный переход от затратного обезвреживания особо опасных органических отходов к их экономически выгодному использованию.

В общественном сознании глубоко укоренилось представление о том, что обезвреживание особо опасных отходов должно обязательно сопровождаться значительными затратами материальных, энергетических и финансовых ре-

сурсов. Это считается обязательной платой за поддержание приемлемого уровня экологической безопасности.

В данной работе термин «особо опасные органические отходы» (далее по тексту — опасные отходы) включает стойкие органические загрязнители (СОЗ), медицинские и фармацевтические отходы, в том числе цитостатические препараты, а также отходы, при сжигании которых могут образовываться опасные продукты.

Основной технологией обезвреживания опасных отходов является их сжигание или инсинерация. Сама технология достаточно проста: отходы сжигаются вместе с органическим топливом, обычно это дизельное топливо и/или природный газ. При всей простоте такая технология имеет существенные недостатки:

- при сжигании отходов протекают неконтролируемые химические реакции, приводящие к образованию весьма опасных продуктов (например, диоксинов), поэтому приходится использовать сложные и дорогие системы очистки выбросов;
- в выбросах присутствуют продукты горения как отходов, так и органического топлива, что существенно увеличивает нагрузку на окружающую среду;
- для обезвреживания отходов используются энергетические ресурсы.



1

Приведенные недостатки столь существенны, а стоимость обезвреживания опасных отходов настолько значительна, что необходимость разработки новых технологий обращения с опасными отходами не вызывает сомнений. Оптимальным решением представляется разработка технологий, обеспечивающих, с одной стороны, надлежащий уровень экологической безопасности и, с другой стороны, экономическую эффективность. Для разработки таких технологий разработан и изготовлен специальный экспериментальный стенд (фото 1).

Экспериментальный стенд позволяет разработать экономически выгодные технологии обезвреживания опасных отходов. Экономический эффект достигается за счет оплаты процедуры обезвреживания отходов, уменьшения затрат на хранение отходов, экономии экологических платежей, использования получаемой тепловой энергии. Для достижения максимальной экономической и энергетической эффективности используются два вида отходов: отходы деревообработки (щепка, ДСП, ДВП, отходы старой мебели и т. п.) для получения генераторного газа (модуль 1) и опасные отходы для получения пирогаза (модуль 2). Постоянное поддержание достаточной температуры для полного сгорания в камере дожига (модуль 3) смеси генераторного газа и пирогаза производится за счет энергии горения генераторного газа. Это может иметь принципиальное значение, например, в случае обезвреживания медицинских отходов, содержащих большие по массе количества стеклянных флаконов и незначительные остатки лекарственных препаратов. Фактически имеет место процесс обезвреживания опасных отходов за счет энергии других отходов. В случае необходимости экспериментальный стенд позволяет вместо генераторного газа использовать природный газ или смесь пропан-бутан.

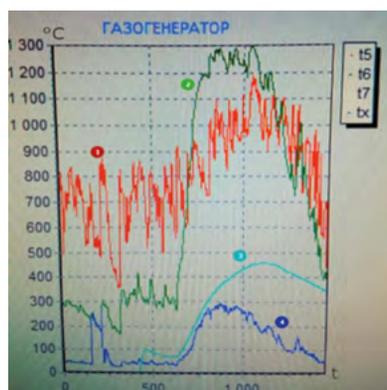
- 1 – модуль получения генераторного газа из отходов растительного сырья.
- 2 – модуль получения пирогаза из отходов.
- 3 – камера высокого температурного дожига (1500–2000 °С) смеси генераторного газа и пирогаза.
- 4 – модуль регулирования температуры продуктов горения до оптимальных значений для подачи на теплообменник.
- 5 – теплообменник.
- 6 – система регулирования подачи теплоносителя требуемой температуры для отопления помещений.

Камера дожига (модуль 3) включает комплекс оборудования, способного обеспечивать полную деграцию органических веществ, в том числе и с использованием «холодной плазмы». Это позволит отказаться от сложной и дорогой системы очистки выбросов, что обеспечит существенное снижение себестоимости обезвреживания опасных отходов.

В модуле регулирования температур (модуль 4) продукты горения автоматически охлаждаются до температур, заданных оператором, и поступают в теплообменник (модуль 5), где нагревают теплоноситель. Система регулирования подачи теплоносителя (модуль 6) обеспечивает его оптимальную температуру для систем отопления и горячего водоснабжения производственных помещений.

Производительность оборудования во многом определяется скоростью термической конверсии опасных отходов. С целью исключения протекания неконтролируемых химических реакций и возможного образования опасных веществ процесс проводится в герметичном пространстве без доступа кислорода. Протекающие химические реакции в основном направлены в сторону образования газообразных высококалорийных продуктов. Нагрев отходов осуществляется трубчатыми электронагревателями (ТЭНы). Температура в камере пиролиза устанавливается оператором и поддерживается автоматически с точностью до 2 °С. Максимальная температура – 800 °С. Для ускорения процесса пиролиза используется сверхвысокочастотное

1. Экспериментальный стенд для разработки технологий обезвреживания особо опасных органических отходов, включая стойкие органические загрязнители, с утилизацией получаемой тепловой энергии.

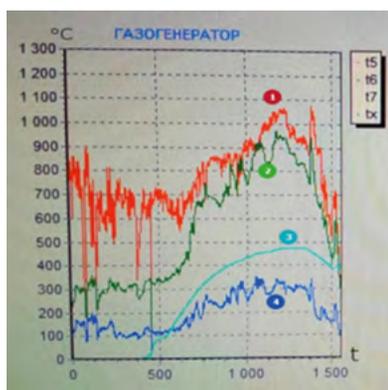


2

электромагнитное поле (СВЧ-поле), что позволяет существенно повысить скорость разложения отходов и получать больший выход газообразных продуктов (рисунки 2 и 3). Мощность СВЧ-поля может регулироваться, что позволяет отработать оптимальные параметры технологического процесса для обезвреживания конкретных отходов или смеси отходов. Максимальная мощность магнитронов — 3 кВт.

Для повышения производительности предусмотрена возможность перезагрузки опасных отходов «на горячую». После завершения цикла пиролиза одной партии отходов производится продувка модуля получения пирогаза (модуль 3), удаление золы пиролиза и загрузка следующей партии отходов. Такой подход позволяет проводить 4–5 циклов пиролиза в сутки. Большинство же существующих систем сжигания отходов требуют охлаждения печей сжигания до безопасных температур, чтобы провести выгрузку золы и загрузку новой партии отходов. В результате осуществляется один цикл обезвреживания отходов в сутки.

С помощью системы термопар и датчика давления осуществляется анализ и контроль температурных параметров процессов термохимической конверсии отходов в модуле получения пирогаза (модуль 2), в камере горения генераторного газа и смеси генераторного газа и пирогаза (модуль 3), в модуле регулирования температур (модуль 4), в теплообменнике (модуль 5), в системе регулирования подачи теплоносителя (модуль 6). Эти параметры отображаются на экране монитора блока управления экспериментальным стендом в режиме реального времени в цифровом и графическом виде. На представленных рисунках приведены фотографии экрана монитора с графическим отображением результатов экспериментов.



3

Результаты исследований процесса термохимической конверсии додецилсульфата натрия в отсутствие и присутствии СВЧ-поля представлены на рисунках 2 и 3, соответственно.

В качестве топлива для получения газогенераторного газа использовали щепу хвойных пород в количестве 20 кг. В качестве образца для получения пирогаза использовали додецилсульфат натрия марки Техарон K12 G в количестве 6 кг. Марка Техарон K12 G является наиболее чистым промышленным образцом додецилсульфата натрия.

Как видно из данных, представленных на рисунке 2, максимальная температура наблюдается при горении генераторного газа, получаемого из древесной щепы (линия 1). Максимальная температура достигает 1050 °C. Значительные колебания температуры горения генераторного газа происходят из-за того, что щепы подается в топку порционно, после сгорания одной партии щепы автоматически поступает следующая. Естественно, что количества образующегося генераторного газа выходят в таком же «колебательном» режиме. По мере нагревания камеры сгорания величины этих температурных колебаний уменьшаются.

Температура горения смеси генераторного газа и пирогаза, получаемого в результате термической деструкции Техарон K12 G в пиролизном блоке, составляет около 900–950 °C.

Как следует из данных, представленных на рисунке 3, максимальные температуры горения смеси генераторного газа и пирогаза составили 1250–1300 °C. Эти значения существенно выше значений температур, достигнутых при пиролизе образца додецилсульфата натрия в отсутствие СВЧ-поля (900–950 °C). Причем время, необходимое для термической деструкции Техарон K12 G, уменьшается более чем на 40 %.

1 – температура горения генераторного газа.

2 – температура горения смеси генераторного газа и пирогаза.

3 – температура продуктов горения в блоке регулирования температуры.

4 – температура в блоке дымоудаления.

Это однозначно свидетельствует о том, что скорость термохимической деструкции додецилсульфата натрия в присутствии СВЧ-поля существенно увеличивается, что повышает энергетическую и, как следствие, экономическую эффективность предлагаемого подхода к обезвреживанию опасных отходов.

Важно отметить, что использование СВЧ-поля может быть эффективным не только для обезвреживания опасных отходов, но и для очистки стеклянной и пластмассовой упаковки от остатков моющих средств и других загрязнений (например, медицинских препаратов). Часто такие загрязнения не позволяют использовать упаковку в качестве вторичных материальных ресурсов.

В целом экспериментальный стенд позволяет разрабатывать оптимальные (с экономической точки зрения) технологии обезвреживания опасных отходов, сложных по морфологическому составу отходов или отходов неизвестного состава. Возможна разработка технологий для опасных отходов в любой физической форме: твердые, жидкие, гелеобразные, газообразные. Применяемые в экспериментальном стенде технологические подходы обладают научной новизной и не имеют аналогов.

Ноу-хау является использование СВЧ-поля для получения высококалорийного газообразного топлива из опасных отходов. Патенты: на стадии оформления. Возможно совместное оформление патентов на технологии обезвреживания конкретных видов отходов и на оборудование для обезвреживания отходов.

Разработка интересна предприятиям, в которых образуются фармацевтические, медицинские, ветеринарные, химические (в том числе заводских и научно-исследовательских лабораторий), лакокрасочные, клеевые, пластмассовые отходы.

Что ждем от индустриального партнера: создание совместного малого инновационного предприятия, участие в КНТП, НОЦ, внедрение технологии на предприятиях ИП, покупку лицензии, инвестиции на ранних стадиях разработки технологии, партнерское соглашение + дорожная карта ■

2. Результаты исследований процесса термохимической конверсии додецилсульфата натрия в отсутствие СВЧ-поля (фото экрана монитора блока управления).

3. Результаты исследований процесса термохимической конверсии додецилсульфата натрия в присутствии СВЧ-поля (фото экрана монитора блока управления).

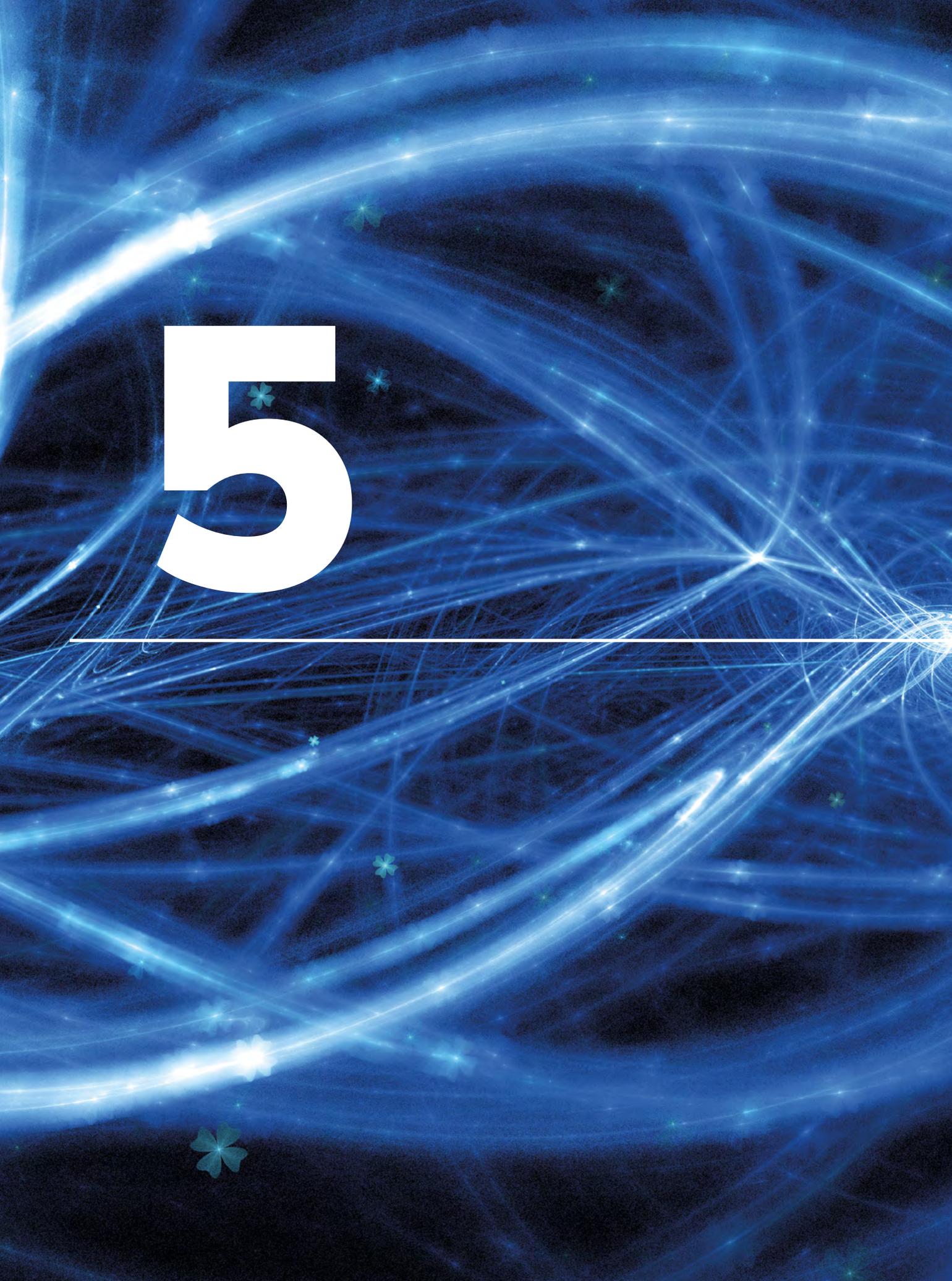
Личный комментарий от разработчика:



Голубев Виктор
Петрович

«Предлагается использовать универсальный стенд для разработки технологий, обеспечивающих энергетически и экономически выгодное использование широкого спектра отходов, включая опасные отходы, в качестве источника энергии и местного вида топлива. Оборудование способно утилизировать получаемую тепловую энергию и направлять нагретый до оптимальных температур теплоноситель для отопления, горячего водоснабжения и/или в технологический цикл. Использование оборудования позволит существенно сократить перечень отходов, образующихся на предприятии, поскольку эти отходы станут продуктом для получения тепловой энергии. Это снизит затраты на временное хранение отходов на предприятии, на их транспортировку и захоронение на полигоне. При работе оборудования не образуются сточные воды, поэтому нет затрат на очистку сбросов. В зависимости от природоохранного законодательства конкретной страны уменьшатся экологические отчисления и платежи. Оборудование легко встраивается в существующие системы отопления и горячего водоснабжения предприятий. Для его размещения не требуется капитальных сооружений, возможно размещение в быстровозводимых ангарах или под навесом».

5



хранение энергии

74

Механохимически
стимулированный синтез катодных
материалов для металл-ионных
аккумуляторов

МЕХАНОХИМИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ КАТОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 630128, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

Косова Нина Васильевна

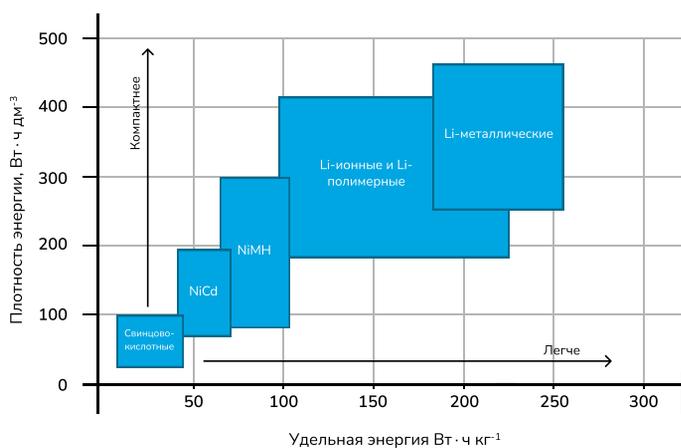
ведущий научный сотрудник, руководитель группы «Материалы для металл-ионных аккумуляторов», доктор химических наук, тел.: +7-913-390-91-55, kosova@solid.nsc.ru



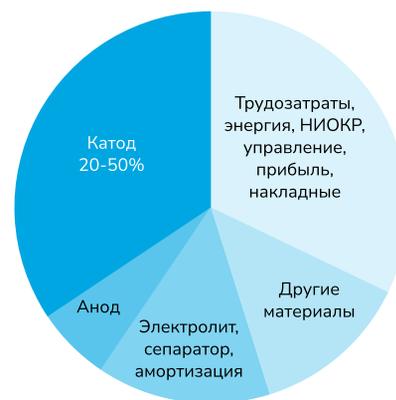
Разработчик технологии – Косова Нина Васильевна

Технология хранения энергии на основе перезаряжаемых литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) относится к наиболее актуальным направлениям современной науки и техники. Это подтверждается присуждением в 2019 году Нобелевской премии по химии Д. Гуденафу, С. Уиттингему и А. Йошино за развитие ЛИА. По своим эксплуатационным характеристикам (удельная энергия, срок службы) они намного превосходят все другие виды аккумуляторов (рис. 1), что обеспечило их применение в различных беспроводных электронных устройствах, включая мобильные телефоны, персональные компьютеры и т.п. Распространение ЛИА в новые области, прежде всего в современный электротранспорт, требует дальнейшего увеличения их емкостных и мощностных характеристик (работоспособности при высоких скоростях заряда и разряда), снижения скорости деградации при циклировании и хранении.

В последние годы остро встает вопрос о замене литий-ионных электрохимических систем на натрий-ионные, что позволит избежать проблем, связанных с дефицитом лития на Земле и его высокой стоимостью. Наиболее перспективной областью применения натрий-ионных аккумуляторов (НИА) станут, вероятно, крупногабаритные стационарные накопители энергии, где решающее значение приобретают доступность сырья и его невысокая стоимость, высокий ресурс и пожаробезопасность. Однако НИА отличаются более низкой эффективностью электродных материалов и более низкой удельной энергией, чем ЛИА, поскольку окислительно-восстановительный потенциал пары Na^+/Na^0 ($-2,71$ В относительно стандартного водородного потенциала) на $0,3$ В выше потенциала пары Li^+/Li^0 , а молярная масса больше. Поиск новых натрийсодержащих катодных материалов с удельной энергией, срав-



1



2

нимой с литийсодержащими материалами, является актуальным направлением в области технологий, которые придут на смену ЛИА.

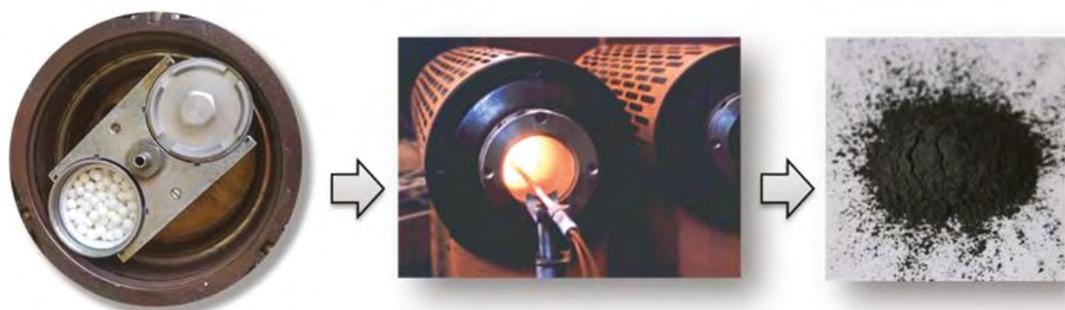
Конструкция ЛИА, как и НИА, включает в себя положительный (катод) и отрицательный (анод) электроды, разделенные пористым сепаратором, пропитанным апротонным электролитом, который обеспечивает перенос ионов Li^+ или Na^+ между катодом и анодом. Свойства металл-ионных аккумуляторов (МИА) в первую очередь зависят от свойств электродных материалов. Это стимулирует поиск новых и модифицирование используемых материалов. Материалы электродов должны обладать высокой электронной и ионной проводимостью, структурной устойчивостью при обратимой интеркаляции ионов щелочных металлов, быть экологически безопасными. Улучшению мощностных характеристик материалов способствует повышение их дисперсности и электронно-ионной проводимости, что достигается путем катионного замещения и создания электропроводящего углеродного покрытия. Стоимость катодных материалов составляет 20–50 % от стоимости аккумулятора и зависит как от затрат на реактивы, так и на проведение синтеза (рис. 2), что делает актуальной разработку эффективных методов синтеза.

Для приготовления электродных материалов используют различные растворные (гидротермальный, золь-гель, метод соосаждения) и твердофазные методы. Преимуществом растворных методов является невысокая температура синтеза и возможность получения продукта с заданной морфологией путем тщательного контроля параметров процесса. Как

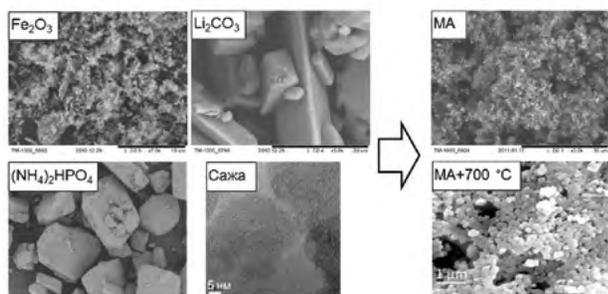
правило, полученные продукты подвергают последующей высокотемпературной обработке для повышения степени кристалличности. Для синтеза высокопроводящих композитов с углеродом проводят смешение полученных материалов с углеродсодержащими органическими прекурсорами и отжиг для реализации процесса их пиролиза и создания электропроводящего покрытия.

Твердофазные методы синтеза отличаются большей простотой и отсутствием жидкофазных отходов производства. По сравнению с традиционным керамическим методом синтеза, включающим механическое смешение реагентов и последующий многочасовой отжиг при высоких температурах, механохимически стимулированный твердофазный метод позволяет проводить измельчение и тонкое смешение реагентов в высокоэнергонапряженных мельницах (рис. 3). В результате кратковременной (минуты) механической обработки образуются высокореакционный прекурсор, что позволяет активировать последующий твердофазный синтез, значительно снизить температуру и продолжительность отжига и получить продукт в наноструктурированном состоянии, что делает этот метод экономически эффективным, а отсутствие жидкофазных отходов — экологически чистым. Данный метод активно разрабатывается в ИХТТМ СО РАН [1].

1. Сравнение удельной энергии и плотности энергии ЛИА с другими видами аккумуляторов.
2. Структура стоимости ЛИА.

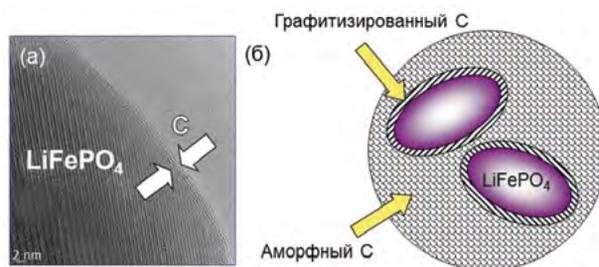


3



4

На рисунке 4 приведены микрофотографии сканирующей электронной микроскопии исходных реагентов для синтеза фосфата железа-лития LiFePO_4 , измельченной смеси и конечного продукта, полученного в ходе отжига. Реакционная смесь состоит из четырех компонентов, заметно отличающихся размером частиц: от миллиметров до нанометров. Механическая активация (МА) позволяет получить прекурсор с частицами субмикронных размеров. Для получения конечного продукта в хорошо окристаллизованном состоянии требуется последующая стадия отжига, однако продолжительность и температура отжига при этом снижаются. Частицы продукта имеют округлую форму и характеризуются достаточно однородным распределением по размерам. Для предотвращения возможного загрязнения продуктов материалами мелющих тел и получения наноструктурированных катодных материалов для МИА в ИХТТМ СО РАН разработаны различные подходы, основанные на быстротекающих механохимических реакциях и использовании высокореакционных реагентов, обладающих низкой твердостью (протонсодержащие соединения: гидроксиды, кислые и основные соли и пр.), включающие кислотно-основные реакции, окислительно-восстановительные реакции и реакции присоединения.



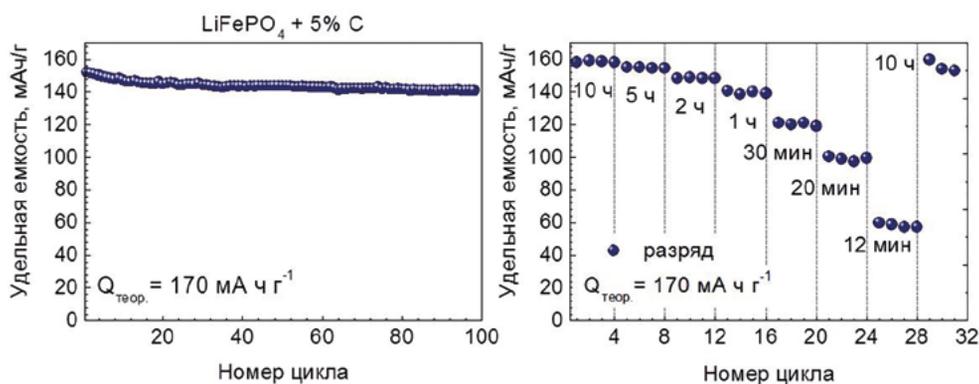
5

Одним из примеров окислительно-восстановительного процесса является синтез фосфата железа-лития LiFePO_4 . Он основан на селективном карботермическом восстановлении оксида железа Fe_2O_3 с ионами Fe^{3+} . При этом, углерод, взятый в избытке, образует электропроводящую матрицу непосредственно в ходе синтеза, т.е. параллельно со стадией синтеза, что упрощает процесс [2]. Электронная проводимость композита LiFePO_4/C увеличивается на 5–6 порядков, что делает материал электрохимически активным. На рисунке 5 приведена микрофотография просвечивающей электронной микроскопии композита, на которой видно образование слоя графитизированного углерода на поверхности частицы LiFePO_4 , а также схематическое изображение структуры композита LiFePO_4/C . В случае ис-

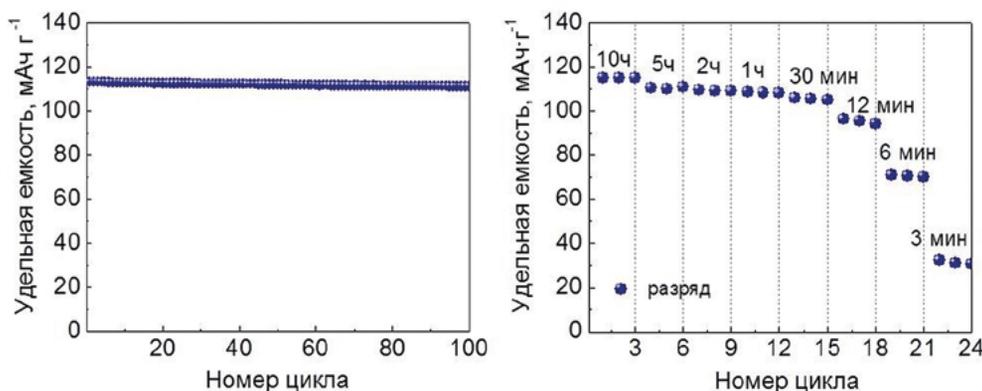
3. Схема механохимически стимулированного твердофазного синтеза LiFePO_4 .

4. Микрофотографии реагентов для синтеза LiFePO_4 (слева) и мехактивированной смеси до (справа сверху) и после отжига (справа внизу).

5. Микрофотография просвечивающей электронной микроскопии композиционного материала: LiFePO_4/C (а) и схематическое изображение композита (б).



6



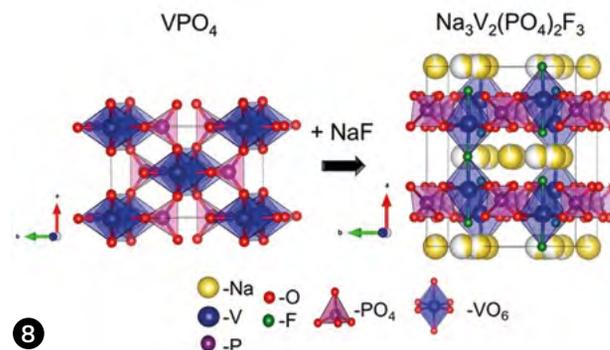
7

пользования дигидрата оксалата железа (2+) $\text{FeC}_2\text{O}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ в качестве прекурсора в ходе нагревания происходит выделение большого количества газообразных продуктов, что увеличивает затраты энергии и уменьшает выход продукта.

Электрохимические свойства полученного композиционного катодного материала LiFePO_4/C являются конкурентноспособными. Ресурсные испытания (рис. 5а) указывают на высокую разрядную емкость (150–160 мАч/г) и высокую Кулоновскую эффективность (90 % от начальной емкости после 100 зарядно-разрядных циклов), которая при повышенных плотностях тока достигает 75 % от начальной емкости (рис. 5б).

В таблице 1 приведен ряд катодных материалов, синтезированных с применением МА, и их электрохимические характеристики.

Первоначально поиск электродных материалов для НИА проводился по принципу аналогии с известными литиевыми катодными материалами. Однако в большинстве случаев Na-содержащие материалы отличаются по составу, структуре и электрохимическим характеристикам от Li-содержащих. Перспективным классом катодных материалов для НИА считаются полианионные соединения. Упор делается на материалы с высокими значениями окислительно-восстановительного



8

6. Зависимость удельной разрядной емкости LiFePO_4/C от номера цикла (а) и от скорости разряда в единицах времени (б).

7. Зависимость удельной разрядной емкости $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ от номера цикла (слева) и от скорости разряда в единицах времени (справа) в натриевой электрохимической ячейке.

8. Структурные превращения при синтезе $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ из VPO_4 и NaF .

ТАБЛИЦА 1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ КАТОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Катодный материал	Рабочее напряжение, В	Практическая емкость, мАч/г	Удельная энергия, Втч/кг	Промышленное производство в мире	Промышленное производство в России	Наличие разработок в ИХТТМ
LiCoO ₂	3,6	137	493	да	да	да
Li(Ni,Co,Mn)O ₂	3,8	170	646	да	да	да
LiMn ₂ O ₄	3,9	117	456	да	нет	да
LiNi _{0,5} Mn _{1,5} O ₄	4,7	146	686	нет	нет	да
LiFePO ₄	3,4	160	544	да	нет	да
LiCoPO ₄	4,8	120	576	нет	нет	да
Li ₃ V ₂ (PO ₄) ₃	3,8	120	456	нет	нет	да
LiVPO ₄ F	4,2	120	504	нет	нет	да
Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₃	3,4	110	374	нет	нет	да
Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₂ F ₃	3,9	120	468	нет	нет	да
Na ₂ FePO ₄ F	3,0	120	360	нет	нет	да
Na ₂ FeP ₂ O ₇	3,0	100	300	нет	нет	да
Na ₄ Fe ₃ (PO ₄) ₂ P ₂ O ₇	2,9/3,2	120	360	нет	нет	да

ТАБЛИЦА 2. УСЛОВИЯ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА НА-СОДЕРЖАЩИХ КАТОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МА.

Соединение	Пространственная группа	Размерность каналов	Реакционная смесь	T, °C	Время отжига, ч	Газовая атмосфера
Na ₂ FePO ₄ F	Pnmb	2D	NaFePO ₄ , NaF	600	1	Ar
Na ₂ FeP ₂ O ₇	P-1	3D	Na ₂ CO ₃ , FeC ₂ O ₄ ·2H ₂ O, (NH ₄) ₂ HPO ₄	600	2	Ar
Na ₄ Fe ₃ (PO ₄) ₂ P ₂ O ₇	Pn2 ₁ a	3D	Na ₄ P ₂ O ₇ , FeC ₂ O ₄ ·2H ₂ O, (NH ₄) ₂ HPO ₄	450	4	Ar
Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₃	R-3	3D	Na ₂ CO ₃ , (V ₂ O ₅ +C), (NH ₄) ₂ HPO ₄	650	2	Ar
Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₂ F ₃	P4 ₂ /mnm	2D	VPO ₄ , NaF	650	< 1	Ar

потенциала и способностью к многоэлектронным процессам, что может быть достигнуто при наличии в их структуре катионов, обладающих несколькими устойчивыми степенями окисления (например, ванадия). Соединения данного класса обладают в основном каркасной структурой, благодаря которой в ходе обратимой интеркаляции ионов натрия наблюдается небольшое изменение объема элементарной ячейки, что увеличивает их структурную устойчивость при циклировании и, как следствие, срок службы, а прочная ковалентная связь кислорода с неметаллом в составе аниона гарантирует отсутствие выделения O_2 из решетки, тем самым повышая их эксплуатационную безопасность.

В таблице 1 приведена информация о Na-содержащих полианионных катодных материалах на основе железа и ванадия, полученных механохимически стимулированным твердофазным методом и детально исследованных, а в таблице 2 — составы наиболее предпочтительных реакционных смесей и условия отжига, температура которых не превышает $650\text{ }^\circ\text{C}$. Среднее рабочее напряжение для большинства Na-содержащих катодных материалов составляет 3 В. Наиболее высокое значение среди Fe- и V-содержащих соединений наблюдается для $Na_4Fe_3(PO_4)_2P_2O_7$ (3,2 В) и $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ (3,9 В) соответственно, а наибольшая обратимая емкость — для Na_2FePO_4F (120 мАч/г) и $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ (115 мАч/г).

Фосфат ванадия-натрия $Na_3V_2(PO_4)_3$ относится к насиконоподобным соединениям и обладает высокой ионной проводимостью. Среднее рабочее напряжение $Na_3V_2(PO_4)_3$ составляет 3,4 В относительно Na/Na^+ , а теоретическая удельная емкость равна $118\text{ мА}^*\text{ч/г-1}$. Обратимая интеркаляция ионов Na^+ сопровождается минимальными структурными изменениями, что стабилизирует процесс циклирования. При замене одного фосфат-иона PO_4^{3-} в $Na_3V_2(PO_4)_3$ на ион F^- образуется фторид-фосфат ванадия-натрия $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$, что способствует повышению потенциала окислительно-восстановительной пары V^{3+}/V^{4+} , а среднее рабочее напряжение катодного материала повышается до 3,9 В. Стоит отметить, что реакция фосфата ванадия VPO_4 , являющегося ковалентным соединением, с фторидом натрия NaF , являющимся ионным соединением, относится к классу быстропротекающих процессов [4] и после стадии МА протекает за считанные минуты в ходе нагрева при умеренных температурах ($570\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$), что делает производство $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ экономически чрезвычайно

выгодным (рис. 6). Полученный в данных условиях $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ отличается высокой удельной емкостью и стабильностью при циклировании (рис. 7). На данный момент $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ считается одним из наиболее близких к коммерциализации катодных материалов для НИА.

Таким образом, настоящая разработка отличается универсальностью и позволяет получать широкий спектр высокодисперсных катодных материалов не только для ЛИА, но и для НИА, обладающих конкурентоспособными характеристиками. Это подтверждено наличием около 100 статей в ведущих российских и международных изданиях и патентов РФ [5, 6].

Поскольку для создания НИА требуются те же производственные линии, что и для ЛИА, это может свести к минимуму первоначальные инвестиции и обеспечить высокую технологичность, что является положительным фактором при рассмотрении вопроса о коммерциализации НИА. В настоящее время в России начался выпуск ЛИА на базе зарубежных материалов. Имеющиеся разработки позволяют провести импортзамещение и наладить выпуск электродных материалов на предприятиях, входящих в состав «Росатома», ООО «РЭНЕРА» и др. Получаемые материалы смогут найти свое применение на российских предприятиях, осуществляющих сборку аккумуляторов, в том числе на крупнейшем в России заводе «Лиотех-Инновации» в Новосибирске ■

Литература:

1. E. G. Avvakumov, M. Senna, N. V. Kosova. *Soft Mechanochemical Synthesis: A Basis for new Chemical Technologies*, Kluwer Acad. Publ., 2001.
3. N. V. Kosova, V. R. Podugolnikov, E. T. Devyatkina, A. B. Slobodyuk. Structure and electrochemistry of $NaFePO_4$ and Na_2FePO_4F cathode materials prepared via mechanochemical route // *Materials Research Bulletin* 60 (2014) 849–857.
4. D. O. Semykina, M. R. Sharafutdinov, N. V. Kosova. Understanding of the mechanism and kinetics of the fast solid-state reaction between NaF and VPO_4 to form $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ // *Inorganic Chemistry* 61 (2022) 10023–10035.
5. Патент РФ № 2444815. Способ получения высокодисперсных композиционных катодных материалов $LixFeyMzPO_4/C$ со структурой оливина / Косова Н. В., Девяткина Е. Т., Томилова Г. Н., Ляхов Н. З., Александров А. Б., Снопков Ю. В., Резвов С. А., Рожков В. В. (2012).
6. Патент РФ № 2747565. Способ получения композиционного катодного материала на основе $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ для натрий-ионных аккумуляторов / Косова Н. В., Семыкина Д. О. (2021).

6



Энергетика и климат

82

Разработка методов
внедрения централизованного
хладоснабжения на базе
абсорбционных чиллеров
в регионах России с резко
континентальным климатом

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВНЕДРЕНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АБСОРБЦИОННЫХ ЧИЛЛЕРОВ В РЕГИОНАХ РОССИИ С РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ КЛИМАТОМ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
677000, г. Якутск, ул. Петровского, 2



Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1

Павлов Никита Владимирович,

заведующий отделом проблем энергетики,
pavlov_nv@iptpn.ysn.ru

Васильев Семен Семенович

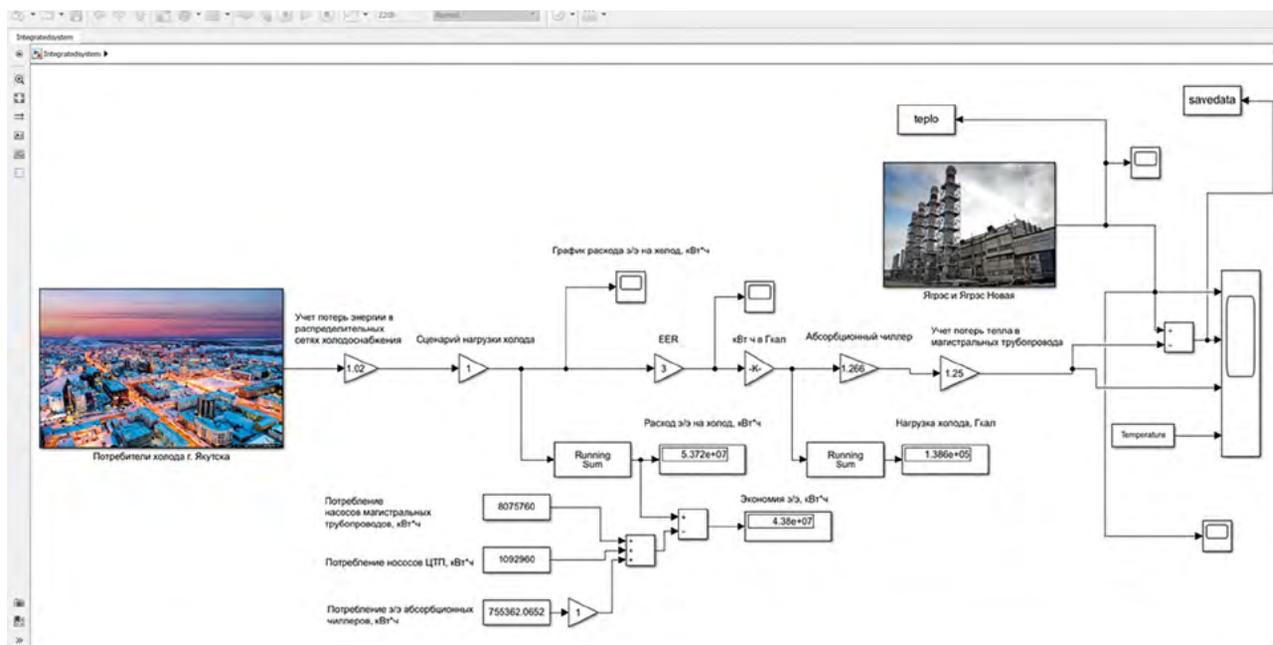
ведущий инженер отдела проблем энергетики,
asilievss_ykt@mail.ru

Изменения климата, наблюдаемые в последнее время, характерны увеличением амплитуды годовых колебаний температуры и общим трендом на повышение среднеглобальной температуры. Очень заметными будут и изменения градус-суток теплого и холодного периодов, что приведет к существенному росту потребности в энергии на отопление и кондиционирование

зданий в России. Как следствие, весьма вероятно значительное увеличение и без того высокого спроса на кондиционирование зданий в регионах с резко континентальным климатом — с холодной зимой и жарким летом. В свою очередь, повышение спроса на кондиционирование повышает актуальность применения различных технологий охлаждения, таких как автономные сплит-системы, многозональные системы кондиционирования воздуха, системы чиллер-фанкойл и системы централизованного хладоснабжения.

В ряде городов Европы, таких как Париж, Вена, Стокгольм, Сольна, Хельсинки, Векшё, на протяжении 20 лет успешно функционируют системы централизованного хладоснабжения. В качестве источника холода выступает естественное охлаждение, электрические и абсорбционные чиллеры. Охлажденный хладагент от источника холода поступает к потребителям по трубопроводным системам централизованного хладоснабжения, распределенным по всей площади городов. В ряде городов России предлагается внедрение схожей технологии централизованного хладоснабжения. В качестве примера выбран город Якутск. Климат в городе Якутске характеризуется как резко континентальный. Экстремально низкие температуры в зимнее время способствовали созданию крупной системы теплоснабжения, а жаркое лето создает потребность в кондиционировании воздуха в летнее время.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ



На данный момент разрабатывается методика внедрения классического варианта централизованного холодоснабжения с использованием абсорбционных чиллеров, которая является элементом интегрированных энергетических систем. Абсорбционный чиллер использует в качестве источника энергии сбросное тепло от тепловых электростанций в летнее время (вода с температурой 90–120 °С) и вырабатывает холод (вода с температурой 4–7 °С). Полученную охлажденную воду можно распределить, и кондиционировать воздух в зданиях с помощью дешевого источника энергии – сбросного тепла.

Данная технология предпочтительна благодаря наличию ряда существенных факторов. Мощные тепловые электростанции работают круглый год, зимой выработанное тепло идет на теплоснабжение зданий, а летом излишки тепла сбрасываются в атмосферу. По полученным оценкам, они составляют около 1 млн Гкал для двух тепловых электростанций г. Якутска. Трубопроводные системы централизованного теплоснабжения, питающие почти все здания, охватывают подавляющую часть города. Сочетание трех таких факторов, как наличие большого количества сбросного тепла, трубопроводных сетей теплоснабжения с большими пропускными мощностями и потребность в кондиционировании воздуха в летнее время, создает предпосылки для высокоэффективной и целесообразной эксплуатации централизованного

хладоснабжения с использованием технологии абсорбционных чиллеров.

Моделирование потребности холода производится с помощью программы eQuest на базе программы DOE-2. Почасовое моделирование потребления холода производится в зависимости от температуры окружающей среды, солнечной инсоляции, расположения относительно сторон света, этажности, площади, внутренних теплопритоков, теплопроводности конструкций и т.д.

Расчет потребности холода в масштабе города выполнен с помощью инженерного метода «снизу вверх» с использованием архетипов. Моделирование работы всей интегрированной энергосистемы г. Якутска производится на базе разработанного программного обеспечения в среде графического программирования Simulink на основе MATLAB.

Результаты моделирования показывают наличие достаточного количества сбросного тепла за все время работы централизованного холодоснабжения, даже для максимально возможной нагрузки холода. Расчеты показывают возможность снижения потребления электропотребления города от 0,8 до 20,0 %. Первичные результаты моделирования показали возможную экономическую успешность проекта централизованного холодоснабжения для городов России с резко континентальным климатом ■

7



безопасность энергетики

86

Новая методология оценки работоспособности и остаточного ресурса длительно работающих объектов топливно-энергетического комплекса

НОВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева»
650000, Кемеровская область, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» (КЦСК),
650040, г. Кемерово,
ул. Радищева, стр. 1-Б

Абабков Николай Викторович

заведующий кафедрой технологии машиностроения КузГТУ,
кандидат технических наук, доцент,
тел.: +7-904-994-315-54, +7-995-514-64-25,
n.ababkov@rambler.ru

Смирнов Александр Николаевич

профессор кафедры технологии машиностроения КузГТУ,
директор КЦСК, доктор технических наук, профессор,
тел.: (3842) 44-14-93, +7-903-946-47-13,
galvas@gmail.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 634021, Томск, пр. Академический, 2/4

Данилов Владимир Иванович

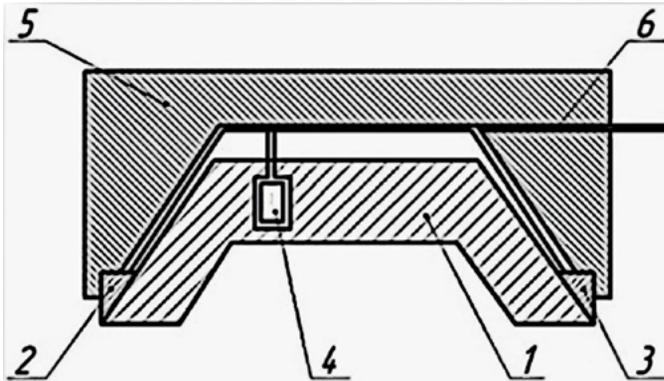
главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор,
тел.: (3822) 28-68-62, +7-903-914-56-11, dvi@ispms.ru

Зуев Лев Борисович

заведующий лабораторией физики прочности, доктор физико-математических наук, профессор,
тел.: (3822) 49-13-60, +7-913-850-41-55, lbz@ispms.ru

В настоящее время в России более 70 % промышленного оборудования отработало расчетный срок. В частности, на начало 2021 года по официальной статистике процент такого оборудования в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) составляет 49 %, но по отдельным группам и предприятиям может достигать 95 %. Это с неизбежностью приводит к авариям, а в ряде случаев и катастрофам на теплоэнергетических предприятиях. Причем большее количество аварий на объектах котлонадзора происходит в Сибирском федеральном округе. По результатам анализа аварий, произошедших за последние 5 лет при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением пара и горячей воды, установлено, что несмотря на отсутствие таких опасных факторов, как наличие взрывоопасных, пожароопасных и ток-

МАЛОБАЗНЫЙ РЕЛЕЕВСКИЙ ДАТЧИК



- 1 - двусторонний клин из оргстекла;
- 2 - излучатель релеевских волн;
- 3 - приемник релеевских волн;
- 4 - излучатель-приемник термоимпульсов;
- 5 - корпус;
- 6 - высокочастотный кабель.

сичных сред, такие аварии остаются одними из самых тяжелых по экономическим и социальным последствиям.

Анализ основных причин происшествий и аварий, произошедших за период 2015–2019 годов, показывает, что наличие положительного заключения экспертизы техники безопасности не является гарантией сохранности оборудования. Менее 10 % происшествий и аварий связаны с эксплуатационными дефектами оборудования, в то же время почти 40 % из них произошли по причине некачественного обслуживания, неудовлетворительной диагностики и нарушений техники безопасности.

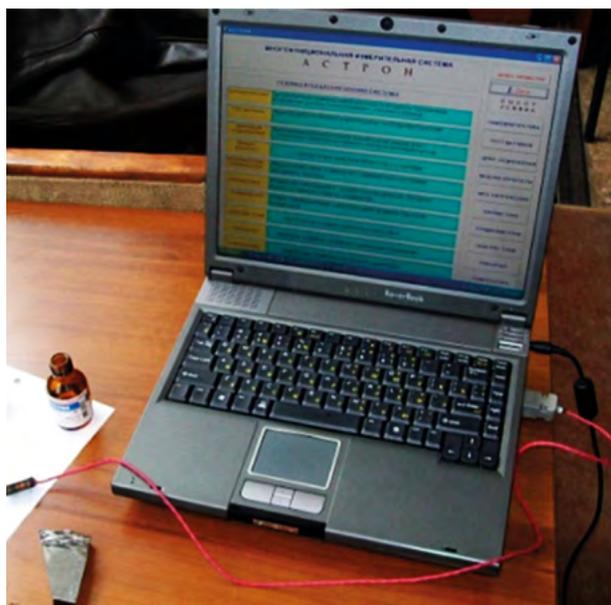
В современных условиях вопросы эксплуатационной надежности длительно работающего основного металла и сварных соединений оборудования ТЭК приобретают всё большее значение. Продление сверх расчётного срока эксплуатации этого оборудования в настоящее время решается путем проведения технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. Одной из важнейших задач технического диагностирования является проведение неразрушающих испытаний наиболее повреждаемых элементов.

Первоначальную оценку качества ремонтных или монтажных работ выполняют проведением испытаний оборудования повышенными нагрузками (повышенным давлением). В зависимости от типа и назначения оборудования применяют различные методики испытаний и различные нагрузки. Требования к испытаниям регламентированы нормативными документами Ростехнадзора. Однако до настоящего времени в технической литературе практически отсутствует информация о физических процес-

сах, протекающих в теплоэнергетических материалах при выполнении таких испытаний. Не оценено влияние предварительной нагрузки (деформации) на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений, особенно в сварных соединениях, и, как следствие, на дальнейшую безаварийную эксплуатацию испытанного оборудования.

Лабораторией физики прочности Института физики прочности и материаловедения СО РАН, кафедрой технологии машиностроения Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева и Кузбасским центром сварки и контроля в период с 2015 по 2022 год. был выполнен проект, целью которого являлось обеспечение безопасной эксплуатации длительно работающих объектов ТЭК на основе идентификации процессов образования дефектной структуры методами неразрушающего контроля и расчета структурных и деформационных коэффициентов. Идея работы заключалась в выявлении и использовании связей между процессами и параметрами изменения структурного состояния, локальных полей внутренних напряжений и образования дефектной структуры с акустическими характеристиками и в расчете структурных и деформационных коэффициентов для оценки работоспособности и остаточного ресурса длительно работающих объектов ТЭК.

Основное научное положение заключается в следующем: зоны опасной локализации деформации для одного и того же материала, но в разных состояниях (без эксплуатации, после длительной эксплуатации) имеют приблизительно одинаковое структурно-фазовое состояние, в том числе количественные структурные параметры. Выявление зон локализации

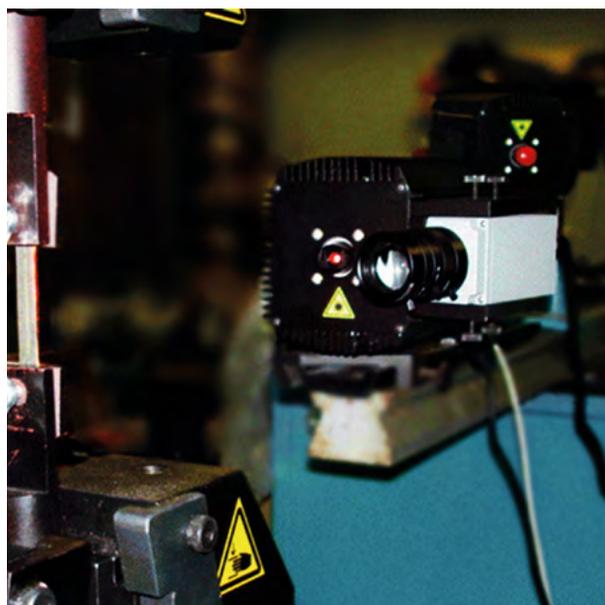


Внешний вид комплекса «АСТРОН»

деформации физическими методами неразрушающего контроля (измерение параметров распространения поверхностных акустических волн) — основа подхода к определению мест возможного разрушения и оценке остаточного ресурса длительно работающих объектов ТЭК.

В лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН разрабатывается автоволновая концепция пластической деформации материалов, согласно которой процесс формоизменения под нагрузкой от предела текучести до разрушения происходит локализованно и представляет собой генерацию и трансформацию автоволновых мод. Перед разрушением автоволны коллапсируют путем формирования стационарной зоны маролокализации деформации, по которой и происходит разрушение. По результатам механических испытаний образцов материалов ТЭК в исходном состоянии и после длительной эксплуатации могут быть определены время начала коллапса и его продолжительность, а также координаты зоны устойчивой локализации деформации сразу после ее зарождения.

Анализ дислокационной субструктуры в зоне устойчивой локализации показал, что здесь достигается критическое значение плотности фрагментированной субструктуры — другими словами, согласно теории эволюции субструктурных превращений наступает точка бифуркации, когда доля фрагментированной



субструктуры превалирует над всеми остальными. Достижению критического значения доли фрагментированной субструктуры, то есть формированию зоны устойчивой локализации деформации, приводящей к разрушению, соответствуют определенные значения времен задержки поверхностной акустической волны. Эти измерения проводились на специально разработанном измерительно-вычислительном комплексе «АСТРОН» (рис. 1, 2).

Установлено, что время задержки поверхностной акустической волны строго коррелирует с баллом микроповрежденности металла ТЭК. Увеличение балла микроповрежденности приводит к уменьшению времени задержки поверхностной акустической волны. Но для металла, в котором поры начали сливаться в микротрещину, установлено увеличение времени задержки ПАВ на 1,5 % по сравнению с исходным состоянием. Эти результаты использованы для определения структурного критерия оценки остаточного ресурса оборудования.

На базе механических испытаний был предложен деформационный критерий оценки остаточного ресурса. Он основан на определении времени начала коллапса автоволны локализованной деформации — t_{coll} . Это время определяет долю относительно однородной деформации — t_{coll}

$$K_{def} = \frac{t_{coll}}{t_{\delta}} = \frac{\varepsilon_{coll}}{\delta},$$

t_{δ} – время до разрушения, ε_{coll} – деформация, соответствующая началу коллапса, δ – относительное удлинение до разрыва. Чем больше этот критерий, тем больше остаточный ресурс материала.

Результаты выполнения проекта позволили уточнить методику оценки остаточного ресурса материалов теплоэнергетического оборудования. В настоящее время принята следующая формула определения остаточного ресурса τ_{resid}

$$\tau_{current} \rightarrow f(K_{mon}, K_{met}, K_{rem}, K_{mode}) \tau_{resid}.$$

Здесь K_{mon} – коэффициент, учитывающий дефекты монтажа, K_{met} – коэффициент, учитывающий металлургические дефекты, K_{rem} – коэффициент, учитывающий дефекты, образовавшиеся при ремонте, K_{mode} – коэффициент, учитывающий режим и условия работы оборудования.

Предлагается дополнить эту формулу K_{struc} – коэффициентом, учитывающим структурные изменения и K_{def} – коэффициентом, учитывающим локализованный характер пластической деформации.

$$\tau_{current} \rightarrow f(K_{mon}, K_{met}, K_{rem}, K_{mode}, K_{struc}, K_{def}) \tau_{resid}.$$

При этом структурный коэффициент определяется по результатам акустических измерений, а деформационный – по параметрам коллапса автоволны локализованной пластичности.

Данная методика дает более объективные оценки остаточного ресурса, хотя и более пессимистичные ■

8

материалы энергоустановок

ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Гуляев Игорь Павлович

старший научный сотрудник,
тел.: +7-903-998-07-79, gulyaev@itam.nsc.ru

Кузьмин Виктор Иванович

старший научный сотрудник,
тел.: +7-913-955-40-04, vikuzmin57@mail.ru

Сегодня невозможно представить ни одно передовое технологическое направление машиностроения или энергетики без применения защитных покрытий: автомобилестроение и авиацию, добычу и транспортировку нефтегазовых энергоносителей, газовые и гидроэлектростанции. Для повышения срока службы и функциональных характеристик деталей (например, рабочей температуры, давления, скорости вращения и т.п.) на их поверхности наносят тонкие слои материалов, обладающих превосходными показателями — стойкостью к износу, температуре или агрессивным средам, электропроводностью или изоляцией, каталитическими или биосовместимыми свойствами. Газотермическое напыление покрытий прочно вошло в производственные цепочки и является точкой внедрения новых материалов и научных разработок. Новосибирский Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН — разработчик уникального отечественного оборудования и технологий атмосферного плазменного нанесения покрытий.



Экспериментальные будни сотрудников лаборатории: Виктор Кузьмин, Игорь Гуляев, Александр Тамбовцев, Павел Тырышкин.

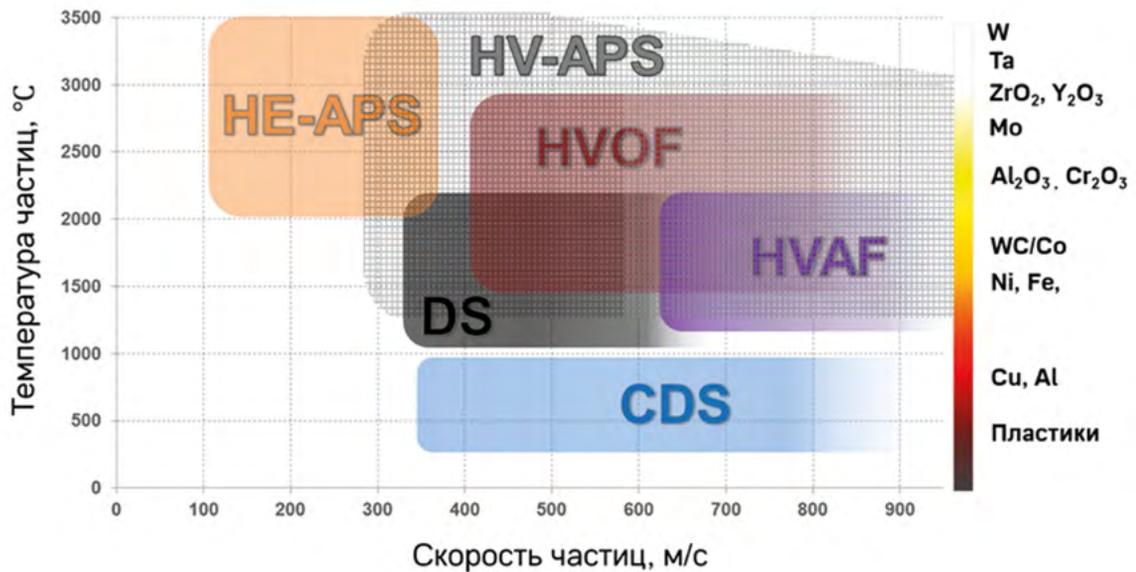
Введение

Плазменное напыление — технология нанесения покрытий толщиной от 20 мкм до 10 мм, в которой в качестве источника энергии используется электродуговая плазма с температурой 3...15 тысяч градусов (в зависимости от плазмообразующего газа) и скоростью 200...2000 м/с. Напыляемый материал в виде порошка подают в поток нагретого газа, в котором частицы расплавляются и ускоряются в направлении обрабатываемой поверхности. Покрытие формируется из растекшихся и затвердевших частиц и имеет слоистую структуру с высокой концентрацией структурных дефектов: пор и границ раздела частиц. Управление дефектами — управление свойствами покрытий.

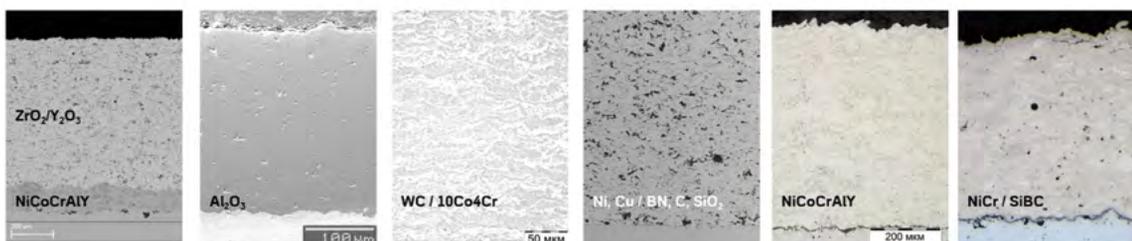
Список материалов, используемых в плазменном напылении, исчисляется сотнями наименований и благодаря разработкам новых составов пополняется с каждым днем. Типичные примеры: упрочняющие и коррозионностойкие

Техническое решение	Преимущество	Аналоги
Применение воздуха в качестве плазмообразующего газа	Снижение в 10 раз стоимости рабочих газов.	Смеси особо чистых газов Ar-H ₂ , Ar/He, Ar/N ₂ .
Каскадная схема плазмотронов с межэлектродными вставками (МЭВ)	Высокая стабильность дуги, отсутствие пульсаций напряжения и мощности. Ресурс электродов 200 ч.	Двухэлектродная схема. Каскадная схема плазмотронов стала появляться в зарубежных аналогах с 2010-х годов. Ресурс электродов 40 ч.
Кольцевая инжекция порошка в канал плазмотрона с газодинамической фокусировкой	Фокусировка порошка на ось струи: повышение эффективности нагрева и ускорения частиц, коэффициента использования материала. Производительность напыления до 20 кг/ч.	Радиальная 1-, 2-, 3- или 4 – точечная подача порошка под срез сопла. Производительность напыления 5-10 кг/ч.
Сверхзвуковой плазмотрон HV-APS	Скорость частиц выше 700 м/с. Покрытия на металлической основе с низкой пористостью, высокой адгезией, низким окислением.	Скорость частиц 200-400 м/с. Для нанесения плотных покрытий применяется альтернативная технология HVOF.

Сравнение методов газотермического напыления



APS – атмосферное плазменное напыление, HV-APS – сверхзвуковое APS
 HVOF, HVAF – высокоскоростное газопламенное напыление
 DS – детонационное напыление, CDS – холодное газодинамическое напыление



Вывод кабель-шлангов под углом 90°
Длина корпуса 185 мм
ПНК-90



ПНК
Классическая компоновка

ПНК-1D
Для внутренних поверхностей
Диаметром от 120 мм



Состав плазменной установки



Интерфейс панели оператора

сплавы на основе NiCr, FeCr, FeMo, NiAl, CoCr, Mo, бронзы; высокотемпературная оксидная керамика ZrO₂, Al₂O₃, Y₂O₃, SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃; превосходная износостойкая карбидная металлокерамика WC/CoCr, Cr₃C₂/NiCr.

На протяжении последних 20 лет промышленные предприятия, как правило, оснащались установками газотермического напыления зарубежного производства: Oerlikon Metco (Швейцария), GTV (Германия), FST (Голландия) и др. Вместе с оборудованием в производство внедрялись зарубежные технологические процессы и материалы — таким образом важные технологические направления были поставлены в зависимость от ныне недружественных стран. Неудивительно, что в последние годы явно проявился интерес со стороны крупных государственных и частных промышленных компаний России к отечественному оборудованию и технологиям. Ответом на этот запрос стала плазменная установка «Термоплазма 50» и её сердце — напылительные плазмотроны ПНК.

Новосибирские напылительные плазмотроны

Школа физики низкотемпературной электродуговой плазмы была заложена в Новосибирске академиком М. Ф. Жуковым более 60 лет назад. Сегодняшние прикладные работы стоят на фундаменте колоссального объема исследований приэлектродных процессов, взаимодействия электрической дуги с газовым потоком, теплообмена со стенками канала. В 1980-х годах было начато развитие направления напылительных плазмотронов, в 2000-х созданы первые полнокомплектные промышленные установки, включающие плазмотроны, источник питания, блоки охлаждения и газоподготовки, дозаторы порошков. Разработка плазмотронов, которая шла независимо от общепринятой на западе концепции, привела к уникальным в области атмосферного плазменного напыления (APS) решениям: использование воздуха в качестве рабочего газа и каскадная схема плазмотрона. В 2010-х годах ведутся научные исследования, направленные на развитие технологий нанесения покрытий. Создается оригинальный узел кольцевого ввода порошка в напылительный поток [1], разрабатывается сверхзвуковая версия плазмотрона HV-APS [2], ускоряющая напыляемые частицы выше 750 м/с, напылительная установка «Термоплазма 50» теперь в стандартной комплектации включает два плазмотрона: высокоэнтальпийный HE-APS для нанесения ке-

Плазмотроны ПНК и комплекс плазменного напыления «Термоплазма 50»



ротор и втулки винтового
забойного двигателя



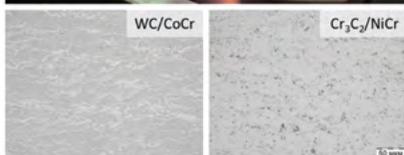
шток гидроцилиндра



винт речного
мотора



статор гидронасоса



Покрyтия WC/10Co4Cr

Шероховатость Ra	3.0 мкм
Пористость	0.3±0.1%
Микротвердость	1300 HV
Адгезия	>90 МПа

Покрyтия WC/CoCr

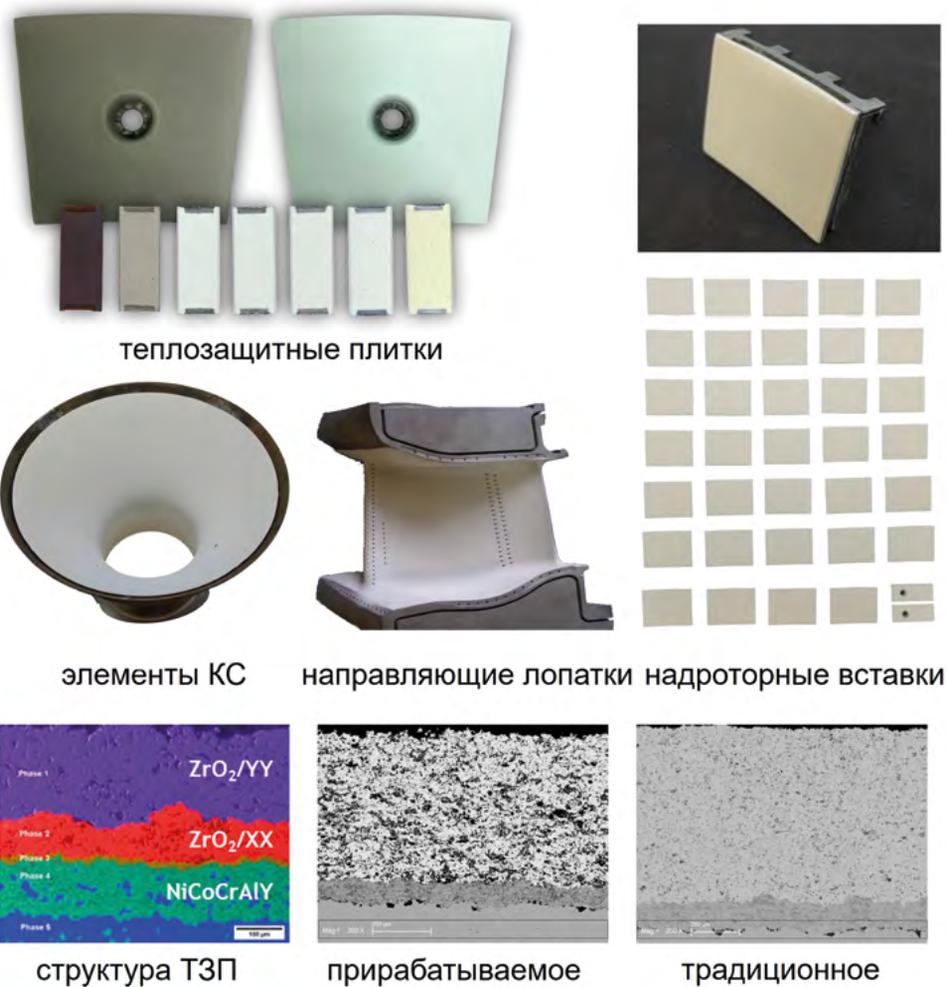
рамики и высокоскоростной HV-APS для нанесения металлов [3]. В начале 2020-х создан плазмотрон ID-APS для нанесения покрытий на внутренние поверхности диаметром от 120 мм. После того, как стало ясно, что созданное оборудование по техническим характеристикам не уступает лучшим в классе аналогам, начинается активная работа над самими покрытиями: материаловедческие исследования и испытания [4], разработка новых составов материалов и дизайн структуры, тесное сотрудничество с отечественными промышленными партнерами и производителями материалов.

Износостойкие покрытия

На сегодняшний день лучшие износостойкие покрытия широкого спектра применения при температурах до 600 °С – металлокерамические композиты на основе карбида вольфрама WC металлической связкой 8–20% вес. на основе Ni, Co, Cr. Покрытия, полученные по технологии HV-APS, имеют характеристики на уровне лучших в классе образцов по твердости, адгезионной прочности, стойкости к сухому трению, абразивному и кавитационному износу. По сравнению с традиционной для этого материала технологией HVOF плазменные покрытия отличаются высокой пластичностью, которая является определяющим фактором ресурса во многих приложениях. Покрытия на основе карбида хрома Cr₃C₂ имеют на 20–30 % более низкие показатели износостойкости, однако могут применяться при температурах до 900 °С.

Теплозащитные покрытия

Многослойные теплозащитные покрытия (ТЗП), применяемые в горячей части газовых турбин, по праву считаются самым высокотехнологичным направлением газотермического напыления, требующим глубокого анализа механизмов деградации, научно обоснованного дизайна многослойной структуры, выбора составов и применения лучшего оборудования. Такие покрытия состоят из металлического слоя (Ni, Co)CrAl, защищающего основной металл от окисления, и металлического слоя ZrO₂/Y₂O₃ (YSZ) с низкой теплопроводностью, снижающего температуру деталей. За последние годы в ИТПМ СО РАН проведен большой объем работ по разработке, исследованию и испытанию ТЗП как традиционных составов, так и новых. В результате удалось не только подтвердить возможность замены зарубежного оборудования HVOF/APS, технологий и материалов, но и разработать новые структуры ТЗП. По срав-



теплозащитные плитки

элементы КС

направляющие лопатки надроторные вставки

структура ТЗП

прирабатываемое

традиционное

Теплозащитные покрытия (Ni,Co)CrAl/YSZ.



WC/CoCr - пуансоны формовки
стеклянного расплава



Al₂O₃/бронза –
антенный модуль



ZrO₂ –
поршни ДВС



NiCrSiBC - ролики стана
горячего проката



Al₂O₃ - электроизоляция
10 кВ



Y₂O₃ – покрытие поддонов
порошковой металлургии



WC/CoCr – детали
микронасоса



Al₂O₃ – тепловая защита плазмоторна 1 МВт
для переработки промышленных отходов

Примеры изделий с защитными покрытиями различного назначения.

нению с традиционными для отрасли покрытиями получено повышение рабочей температуры, повышение жаростойкости и термоциклической стойкости, снижение теплопроводности керамического слоя на 30–50 %. Сегодня эти покрытия проходят испытания на ведущих предприятиях по производству авиационных, энергетических и газоперекачивающих газовых турбин.

Экспериментальный участок

В ИТПМ СО РАН действует роботизированный научно-производственный участок плазменного нанесения покрытий, на котором выполняются поисковые исследования, разработка технологий уровня готовности TRL 8–9, изготавливаются образцы-демонстраторы покрытий, а также контрактные работы по напылению покрытий на мелкосерийные партии изделий.

Заключение

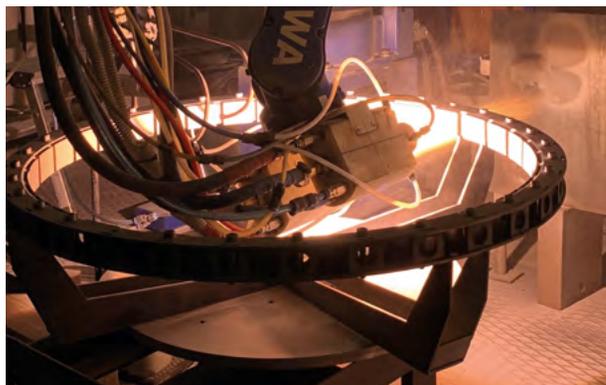
У новосибирского Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН богатый опыт в области разработки плазменнодугового оборудования, на основе которого создана промышленная установка атмосферного плазменного напыления «Термоплазма 50». Напылительные устройства HE-APS и HV-APS обладают рядом преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами и позволяют наносить теплозащитные, износостойкие, коррозионно-стойкие, электроизоляционные и другие типы покрытий из широкого набора материалов. Разработанные технологии имеют высокую степень готовности, ориентированы на применение отечественных материалов и предлагаются к внедрению на производственных предприятиях энергетического машиностроения ■

Ссылки

1. Узел кольцевого ввода порошкового материала электродугового плазмотрона. Кузьмин В. И., Михальченко А. А., Картаев Е. В. Патент на изобретение RU 2474983 C1, 10.02.2013.
2. Supersonic air-plasma spraying of carbide ceramic coatings V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev et al. Materials Today: Proceedings 38 (2021) 1974–1979
3. Установка плазменного напыления покрытий. Кузьмин В. И., Ковалев О. Б., Гуляев И. П. и др. Патент на изобретение 2753844 C1, 24.08.2021.
4. Способ плазменного напыления износостойких покрытий толщиной более 2 мм. Кузьмин В. И., Ващенко С. П., Гуляев И. П. Патент на изобретение RU 2665647 C2, 03.09.2018.



Участок напыления
ИТПМ СО РАН



Участок атмосферного плазменного напыления
в ИТПМ СО РАН.

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ, «ЗЕЛЕНАЯ» МЕТАЛЛУРГИЯ: КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ, СОЗДАНИЕ НОВЫХ ВИДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ



Общество с ограниченной ответственностью
«ЭПОС-Инжиниринг»
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Демакова, 27/1

Безруков Иван Андреевич

генеральный директор, кандидат технических наук,
тел.: +7-913-918-10-52, office@epos-nsk.ru

Филимоненко Владимир Николаевич

заместитель генерального директора, кандидат
технических наук,
office@epos-nsk.ru

Вопросы качества среды обитания всегда актуальны. Создавая комфортные условия проживания, мы платим за это повышением расхода условно невозобновляемых источников энергии, а извлекая необходимые продукты из недр, платим за их переработку генерацией большого количества твердых, жидких и газообразных отходов. Нет возможности отказаться от источников энергии и сырья, исключить отходы, однако существенно сократить их, в разы — доступная цель, на решение которой могут быть направлены усилия.

Проблемы экологии в целом, в том числе декарбонизация, «зеленая» металлургия, низкий углеродный след, особо актуальны для металлургических и энергетических отраслей промышленности.

Одним из крупнейших генераторов отходов в мире является металлургический цикл.

В нем исходный продукт, руды, превращаются в металлы и сплавы с использованием значительного количества электроэнергии и энергии органических восстановителей, в первую очередь на основе углерода, и здесь генерируется большое количество отходов в виде твердых и жидких продуктов переработки руд и газовых продуктов (в массовом количестве CO, CO₂, соединения серы, фосфора, пары воды, соединения азота и т.д.). Основные источники генерации вредных отходов при производстве металлургической продукции: производство восстановителей для металлургии (кокс, полукокс), собственно металлургический восстановительный процесс, где восстановление идет с образованием большого количества газов, преимущественно CO, а также сопутствующие процессы в металлургии — газовые, топливные и другие устройства и горелки для сушки и нагрева шихты, системы нагрева и сушки ковшей, нагрев желобов и проч.

Комплексное рассмотрение указанной проблемы снижения экологической нагрузки от металлургического процесса производства, поиск экологически целесообразных, «зеленых», технико-технологических решений позволили разработать и создать технологии и последовательность технологических агрегатов, работающих по новым технологиям, обеспечивающих снижение экологической нагрузки от металлургического производства в разы, а также вместе с тем снижение затрат, иногда в разы.

Общая идея включает несколько взаимосвязанных технологий и состоит в следующем:



Рис. 1. Плазменная руднотермическая шахтная электропечь для реализации «зеленой» электротехнологии производства металлов и сплавов

1. Создаем восстановитель из недорогих исходных продуктов, который дешев в производстве, эффективен в восстановительном процессе производства металла, при этом его расходуется меньше на единицу готовой продукции; при производстве восстановителя реализуем практически безотходный процесс, генерируемые отходы используются для выработки электроэнергии, а продукты утилизации отходов могут быть с пользой применены для создания других продуктов.

2. Металлургическое оборудование и технологии конструируем таким образом, что они полнее используют указанный восстановитель, полностью утилизируют электрическую энергию и химическую энергию восстановителей, резко уменьшают расходы исходных руд и восстановителей, а количество выбросов в технологии снизят в разы. При этом наряду со снижением экологической нагрузки стремимся резко снизить технологическую себестоимость получаемой продукции.

3. Снижаем прочие воздействия на производственной площадке и сопутствующие операции — затраты и расходы на нагрев и сушку сырья, ковшей, подогрев желобов и прочее: они проводятся без сжигания органических топлив и загрязнения атмосферы, с минимизацией выбросов.

4. Продукты — отходы от сжигания углеводородов, шлаки, включая ТЭЦ, а также другие отходы (в т.ч. с привлечением продуктов переработки ТБО) — утилизируются с превращением в полезные продукты, например, ферросплавы, исходные компоненты для строительства и прочее.

Количество выбрасываемых в атмосферу продуктов в этом случае, на стадиях переделов и в целом, снижается в разы или даже на порядок.

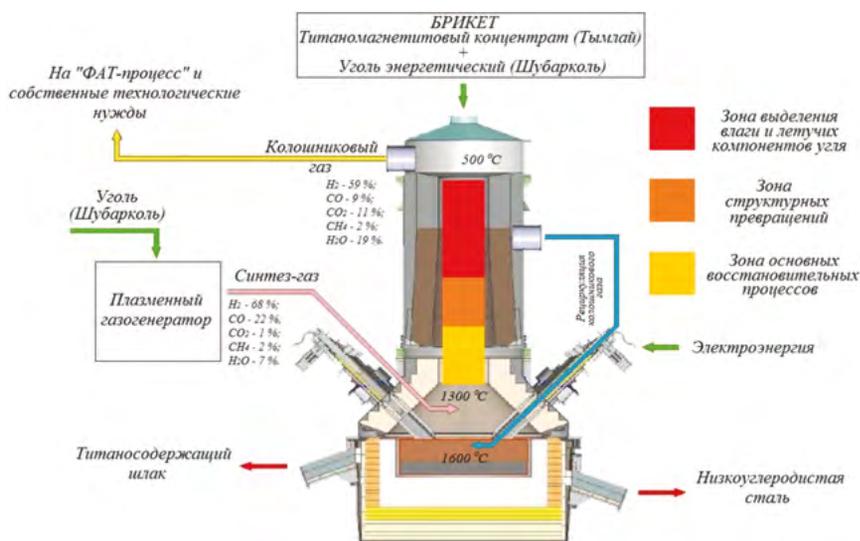
Проработан и реализован комплекс взаимосвязанных и доведенных до стадии промышленного применения технологических решений, а также создано оборудование, призванное комплексно решать указанную задачу «зеленой» металлургии, а именно: новая технология проведения восстановительного процесса EPOS-process и оборудование для него — шахтная плазменная рудовосстановительная печь, новый восстановитель для указанного процесса (зарегистрированный товарный знак «Карбо-Сил-Э»), сконструировано и проверено в работе новое плазменное оборудование нагрева и сушки, а также технологии и способы переработки отходов и комплексные решения по применению указанного оборудования в «зеленой» металлургии.

Технология и оборудование EPOS-PROCESS

Процессы восстановительной плавки, в т.ч. производство ферросплавов, в РФ и за рубежом осуществляются преимущественно на ферросплавных печах традиционного типа, открытых и закрытых, далеких от реализации идеального технологического процесса и имеющих общий набор проблем: высокие удельные расходы электроэнергии, в разы превышающие расчетные; повышенный в ряде случаев более чем вдвое в сравнении с теоретически необходимым на реакцию восстановления расход восстановителя; огромный объем горячих газов и твердых частиц, поступающих из печи на газоочистку; большую материалоемкость; сложность обслуживания и эксплуатации; высокую зависимость электрических и тепловых режимов, качества продукции от состава и качества сырья и восстановителей; сложность настройки режимов, сложность контроля процесса и ряд других проблемных моментов.

Проблемы решаются запуском конструкции новых плазменных шахтных руднотермических печей по технологии EPOS-PROCESS, предна-

РАЗРЕЗ ШАХТЫ ПЕЧИ РШПП ПО ТЕХНОЛОГИИ EPOS-PROCESS НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД



значенных для восстановительной плавки в непрерывном процессе методом восстановления входящих в ферросплав металлов, как вариант — из моношихты в виде брикетов с оптимизированным составом компонентов для металлургического передела.

Внешний вид электропечи РШПП приведен на рисунке 1., разрез шахты — на рисунке 2.

Особенности конструкции и процессы

Преимуществами EPOS-process в шахтной схеме печи являются эффективная регенерация тепла, улавливание возгонов (могут достигать до 20 % от объема выпуска), более полное использование восстановителя, меньшая требовательность к шихте, экологичность (герметичная система), лучшие весогабаритные характеристики, в разы меньшая технологическая себестоимость производства продукции.

В технологии использованы метод восстановления в твердой фазе и идея хорошо сбалансированного брикета. Новыми составляющими технологии EPOS-PROCESS являются также использование плазменных горелок особой конструкции вместо электродов РВП, применение специального профиля шахты, технология и схема рециркуляции горячих газов печного пространства по контурам печи, через плазмотрон и систему рециркуляции, полное использование восстановительных возможностей плазмообразующих газов и влаги из атмосферы печи,

в т.ч. без окислителей. Шахтная схема печи с рециркуляцией восстановительного газа, дающая полное использование восстановителя и регенерацию тепловой энергии, использование паров воды, взаимодействующих с углеродом при высоких температурах с выделением водорода, обеспечивает снижение температуры реакций, сокращение продолжительности процессов и полноту реакций прямого восстановления оксидов до металлов.

Из расчетов следует, что водород восстанавливает высшие оксиды железа в верхней части шахты при температуре < 650 °C, что позволяет ускорить процесс твердофазного восстановления шихты в шахте при более низких температурах, чем при использовании в качестве восстановителя лишь углерода.

При этом используются металлургические плазмотроны запатентованной конструкции, предназначенные для работы под слоем шихты, не боящиеся контакта с электропроводящей шихтой и расплавом, с отсутствием ограничений по длительности непрерывной работы.

Преимущества:

- выход базового элемента выше, чем в классической РВП;
- расход углерода (кокшика или низкосортного угля) в шахтной печи меньше до двух раз по сравнению с классической печью;

- температура отходящих колошниковых газов пониженная, объем газа меньше на порядок;
- в шахтной печи происходит более полное использование тепловой и химической энергии отходящих газов;
- принципиально по-другому, качественно решен плазменный узел, позволяющий работать автономно, под шихтой. Энерговыведение от дуги плазмотрона обеспечило пространственную, тепловую и электротехнологическую независимость от других источников, местоположение энерговыведения может быть выбрано индивидуально, его можно полностью локализовать в шихте практически без потерь, а управление формой электрической дуги разряда плазмотрона позволяет формировать требуемую форму зоны энерговыведения, что снимает ряд важнейших ограничений при планировании технологии и металлургии процесса. Возникает возможность локальных восстановительных процессов в зоне работы плазмотрона, их совместная работа на общую плавно-восстановительную зону, возможность ввести и вывести плазмотрон без нарушения технологического процесса, поменять его местоположение и т.д. — процесс превращается в гибко управляемую технологию. Расход плазмообразующего газа через плазмотрон может быть изменён в диапазоне от 0 до 100 % от требуемого, наш плазмотрон может работать без расхода газа. Мощность плазмотрона изменяется плавно, от десятков киловатт до десятков мегаватт, управление мощностью и расходом газа разомкнуты один от другого. Плазмообразующие газы могут быть как восстановительными, так и окислительными, а также защитными, газы могут быть взяты прямо из печи, горячими, грязными, запыленными, и отправлены через плазмотрон обратно в печь.

К преимуществам применения плазмотронов специальной конструкции можно добавить реализованную технологию управления режимом при помощи специальных алгоритмов, разработанных нами под данный процесс и позволяющих точно идентифицировать состояние зоны энерговыведения и управлять ею. Плазменная шахтная печь становится универсальным, технологически гибким электрометаллургическим агрегатом, точно адаптирующимся под конкретный процесс, с достижением оптимальных технико-экономических преимуществ.

При равных установленных мощностях источников возникает возможность довести до зоны энерговыведения не четверть или половину, а до 95–98 % мощности и напряжения источника при значительно меньших токах и малых тепловых потерях.

Реализация преимуществ оборудования и технологии формирует современное, высокотехнологичное, малолюдное, автоматизированное производство, обеспечивает резкое, до 35–40 %, увеличение выхода ферросплава из единицы массы руды, снижение расхода электроэнергии и восстановителей до двух раз, гарантированно обеспечивает высокую рентабельность производства ферросплавов.

Может быть предложено оборудование для восстановительных процессов в руднотермических печах мощностью до 150,0 МВт с мощностью одного плазменного модуля до 20–30 МВт, количеством плазменных узлов от одного до 9 и более.

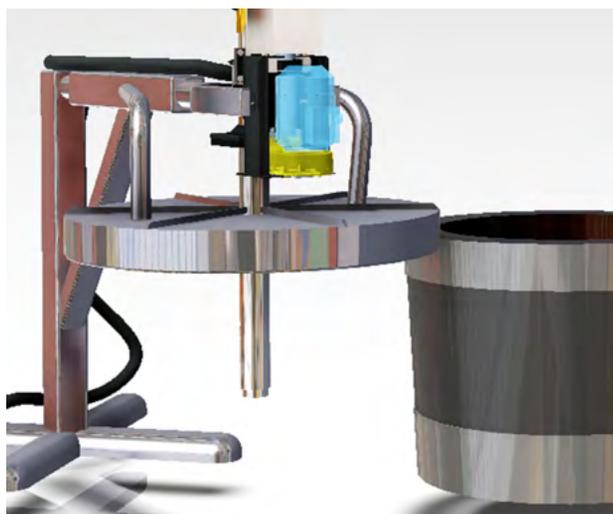
Плазменные руднотермические печи обеспечат следующие преимущества: экономия энергии — до 50 %, увеличение выхода годного с 70 % до 95 %, снижение выбросов до 10 раз, снижение технологической себестоимости производства до 2–3 раз.

Экспериментально достигнуто, в сравнении с традиционной технологией, увеличение процента извлечения полезных компонентов из руды с 70–75 % до 90–95 % от исходного при значительно меньшей технологической себестоимости, и это делает EPOS-PROCESS, при правильном его применении, одним из самых перспективных в области переработки руд и утилизации промышленных отходов.

Снижение экологической нагрузки от вспомогательных операций

Для снижения экологической нагрузки при операциях сушки и нагрева ковшей, леток и т. д. разработана конструкция и технология применения плазменных систем особой конструкции, работающих совместно с металлургическими агрегатами. Плазменная дуга нагревателя работает в замкнутом объеме, передавая свою мощность объекту нагрева излучением.

Технология реализуется без расходов газа. Объект греется под воздействием излучения поверхности, подогреваемой изнутри плазменным



3

устройством нагрева. При этом достигается высокая управляемость и равномерность нагрева изделия. Обеспечивается экологическая чистота, отсутствие вредных выбросов, КПД 98 %, гибкое управление. Нет ограничений по температуре нагрева при большом ресурсе нагревателя и простоте устройства.

Экономия энергии при эксплуатации обеспечивается до 10 раз. Исключительная простота применения в сочетании с технологичностью делает указанную технологию бесспорной альтернативой существующим топливным и газовым горелкам.

«КарбоСил-Э». Свойства, оборудование и технология производства

Минимальный углеродистый след достигается максимальной эффективностью восстановительного процесса. Следующее звено в общей «зеленой» технологии, обеспечивающее общий низкоуглеродистый след, — применение нового восстановителя, зарегистрированного под товарным знаком «КарбоСил-Э».

«КарбоСил-Э» — высокорекреационный высокопористый углеродистый восстановитель нового поколения для металлургических производств, изготавливаемый из недорогих каменных углей, например, марок Д и Г. Для его производства созданы патентозащищенные технология и оборудование, позволяющие обеспечить массовое производство указанного восстановителя для широкомасштабного применения. Технология основана на высокотемпературной электротехнологической обработке угля в электрической



4

пиролизной печи шахтного типа, имеющей цилиндрический внешний корпус и футерованный свод шатровой формы. Рабочее пространство выполнено с наличием двух зон энергосвечения, с верхней загрузкой в герметичную камеру, с управляемым составом газа, с управляемым составом газовой среды в рабочей зоне в объеме, задающем необходимую скорость нагрева и протяженность зоны энергосвечения совместно с нагревом за счет энергосвечения от протекания тока в шихте.

Температура обработки материала варьировалась в пределах от 900 до 2100 °С.

Производство продукта не сопровождается большим количеством выбросов вредных веществ, как при производстве кокса или полукокса, при этом дополнительно выделяется большое количество горячего высококалорийного газа (может достигать по массе количество «КарбоСила-Э»), пригодного для производства тепло- и электроэнергии, что обеспечит собственное производство и ряд внешних потребителей. Температура горячего газа на выходе из электропечи может достигать 1000 °С. Термообработанный в зоне нагрева материал с температурой около 1000 °С опускается через систему электрических полей и зон протекания тока и нагрева, где происходит выравнивание температурного поля.

В ходе электротермического процесса производятся два товарных продукта — специальный коксовый остаток (углеродистый продукт «КарбоСил-ТМ») и горючий газ. Горючий газ, выделившийся в зоне подогрева материала,

Физико-химические свойства	Виды восстановителей			
	Доменный кокс	Нефтекокс	Древесный уголь	*КарбоСил-Э
Крупность, мм	20,0÷60,0	8,0÷30,0	Менее 100,00	5,0÷40,0
Сернистость, %	До 1,5	1,0÷1,5	< 1,00	0,05-0.4
Зольность, %	12,8÷15,5	0,11	2,0	2,5÷6,0(возможно SiC-до 4,5-10%)
Выход летучих веществ, %	1÷1,5	8,0 – 10,0	17,0 – 18,0	0,5÷ 2,0
Структурная прочность, %	83,4÷87,6	71,0	40,00	68,0 , 72,0
Влажность, %	До 4,0	4,20	12,20	< 0,5
Ств, %	83,0	88,0	73,00	85,0 - 90,0
Пористость, %	35,0	16,0÷25,0	79,00÷83,00	47,0 , 60,0
Реакционная способность, см ³ /г·с	0,27	0,31	8,00÷12,00	4,00÷8,00
Удельное электросопротивление ρ, Ом·см (1600°K)	0,32	0,45	1,32	1,0÷8,0 Управляемый параметр

принудительно подается вниз, в зону дополнительного электронагрева и в зону выдержки, обеспечивая температуру карбонизата, достаточную для удаления из него остаточного количества летучих. Пары воды из угля удаляются вместе с горючим газом.

Дополнительным положительным результатом является возможность перевода части зольного остатка данных углей (окислов кремния) почти полностью в карбид, достигающий 10–15 % от массы восстановителя, что резко улучшает его показатели и работу в печи.

В таблице 1 представлены некоторые характерные свойства «КарбоСила», в сравнении с другими продуктами. Приведенные цифры соответствуют одной конкретной марке исходного угля и могут изменяться для других марок углей посредством подбора для применения в конкретной технологии в широких пределах.

Из одной тонны угля можно получить от 0,5 до 0,65 тонны карбонизата (зависит от генезиса угля), а также до 2–3 МВт тепловой и электрической энергии (в зависимости от марки угля).

Технология обеспечивает высокую пористость продукта (на порядки выше кокса). Такая структура пор обеспечивает максимальную газопроницаемость и большую площадь поверхности соприкосновения реакционных газов со стенками пор в атмосфере ферросплавной печи при высоком электросопротивлении и низком газовыделении.

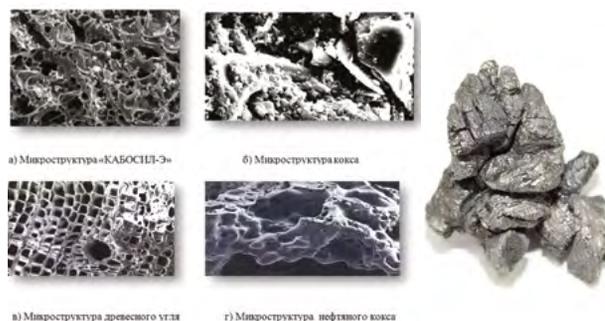
Таким образом, оба продукта — карбонизат и горючий газ — являются полезными в безотходной технологии.

Микрофотографии восстановителей и внешний вид образца восстановителя представлен на рисунке 5.

3. Нагрев плазменным устройством ковшей, литников и проч.

4. Установки производства «КарбоСил-Э»TM: для отработки технологии (слева) и полупромышленная установка (справа) для производства опытных партий продукта.

5. Микрофотографии восстановителей. Справа внешний вид «КарбоСил-Э».



5



Рис. 6. Образцы ферросилиция от плавки с золой 10 %, 20 %, 30 % на марку ФС65.

Преимущества восстановителя «КарбоСил-Э»:

- ниже потери углерода при производстве продукта;
- реакционная способность в 15–20 раз выше, чем классического кокса. эффективное проведение процесса при низких энергозатратах;
- удельное электрическое сопротивление на порядок выше, чем кокса;
- выход летучих, daf 0,5–3 %;
- развитая пористость, высокая сорбционная ёмкость;
- более высокое электрическое сопротивление в области высоких температур.

Кроме упомянутого выше применения восстановителя, ряд свойств и возможных направлений применения продуктов мы продолжаем дополнительно исследовать применительно для производств: сорбенты, катализаторы, системы очистки и другие направления.

Обозначенное направление – переработка низкосортных углей в качественные продукты, в т.ч. восстановители, – может быть важной частью инвестиционной программы как угледобывающих предприятий, так и крупных металлургических холдингов.

Результаты проверки восстановителя в металлургии

На Западно-Сибирском электрометаллургическом заводе («СГМК – Групп») на основании разработанного ООО «ЭПОС – Инжиниринг» восстановителя «КарбоСил-Э» проводились

работы по оптимизации работы печей РКО мощностью 14,0 МВА для производства ферросилиция и силикомарганца. Использовалась наработанная опытная партия (70 тонн) «КарбоСила», работы по выплавке ферросиликомарганца составили 6 дней. Печь прежде в среднем производила 24,3 тонны ферросплава в сутки, иногда цифра кратковременно поднималась до 30 тонн (на качественном сырье). Количество пылевых выбросов достигало 250 кг на тонну сплава.

После перехода на «КарбоСил-Э» при прочих равных условиях:

- глубина посадки электродов возросла до более 1,7 метра;
- потери марганца со шлаком снизились с 11,5 до 3,5–5,0 %;
- коэффициент извлечения марганца возрос с 71,5 до 95–96 %;
- пылевые выбросы упали с 250 до 40 кг/т сплава.

Изменения в режиме печи:

- глубокая посадка электродов, более полное использование мощности печи, стабильное горение дуг, спокойный режим;
- сниженные пылевые выбросы, хорошая работа газоочистки;
- отсутствие загазованности в рабочей зоне, снижение температуры газа на колошнике;
- при одинаковой мощности печи производительность увеличилась свыше 1,5 раз;

- снижение удельного расхода электроэнергии на 2,2 мвтч на тонну;
- производство сплава возросло с 24–30 тонн до 58–59 тонн в сутки на печь.

Таким образом, подтверждена высокая эффективность указанного восстановителя для производства ферросплавов в сравнении с ранее примененными.

Оригинальная патентозащищенная технология и оборудование для массового производства указанного восстановителя отработана. Из любого угля можно получить восстановитель определённого качества с набором свойств, зависящих, в том числе, от характеристик угля.

Производство ферросплавов — не единственное направление использования восстановителя. В настоящее время активно изучаются для практического применения следующие направления: высокореакционные восстановители нового поколения, высокоэффективные сорбенты и катализаторы, бездымные бытовые брикеты, высокоэффективные фильтры очистки выбросов, материалы очистки сточных вод, экологически чистое газообразное топливо.

«Зеленая» технология в работе с отходами. Переработка промышленных отходов в полезные продукты

Экспериментально обрабатывалась технология переработки шлаков, золоотходов, продуктов сжигания ТБО для производства ферросплавов, в частности ферросилиция. На экспериментальном оборудовании предприятия получен образец ферросплава ФС65 из шихты с содер-

жанием золы 10, 20 и 30 % (сверх 100 по кварциту в шихте). Фото полученных образцов ферросплава приведены на рисунке 6.

В ходе металлургических реакций и превращений происходит восстановление базового элемента — кремния, восстановление балластирующих элементов шихтовых материалов из содержащихся в шихте, восстановителе и стружке (на поверхности) окислов, карбонатов и более сложных соединений. Ключевым элементом достижения положительного результата явились специальные, практически безальтернативные, плазменные системы для восстановительной плавки. Они пригодны и на заводах для утилизации ТБО и промышленных отходов. Экспериментально подтверждена возможность производства ферросплава марки ФС65 с применением зол ТБО и ЗШН, из отходов экономичным способом произведен товарный продукт. Установлено, что возможно использование в составе шихты золы в пределах до 40 % (сверх 100 % по кварциту) без превышения по фосфору. Разработана аппаратурно-технологическая схема и просчитаны параметры завода производства не менее 20 тысяч тонн ферросилиция.

Общие выводы

Предназначенная для реализации «зеленой» технологии описанная выше комбинация технологий и оборудования в совокупности позволяет обеспечить важное продвижение к достижению реальных «зеленых» технологий в металлургии — с минимизацией отходов, с резким снижением влияния на экологическую обстановку: как с точки зрения выбросов, так и с точки зрения общего снижения затрат сырья и материалов при производстве продукции ■





НОВОСИБИРСКИЙ ОБЛАСТНОЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОНД

Новосибирский областной инновационный фонд является центром инновационного развития для всех субъектов инновационной деятельности региона: научных институтов, образовательных организаций, инновационных компаний и предпринимателей, управляющих компаний технопарков и бизнес-инкубаторов, физических лиц, создающих инновации и иной инновационной инфраструктуры.

Фонд реализует региональную политику в области развития науки и инноваций по принципу «единого окна». Он выполняет функции оператора Фонда «Сколково» и Фонда содействия инновациям в Новосибирской области; проектного офиса Национальной технологической инициативы и научно-образовательного центра мирового уровня «Сибирский биотехнологический научно-образовательный центр» в регионе; оператора пространства коллективной работы «Точка кипения — Новосибирск».

Фонд является также оператором презентационно-имиджевого мероприятия Новосибирской области «Сибирская Венчурная Ярмарка», которая проходит ежегодно в рамках международного форума «Технопром».



Основные направления деятельности фонда:

- консультирование по вопросам привлечения финансирования в инновационные проекты, в т. ч. и на НИОКР;
- содействие в привлечении инвестиций;
- поиск промышленных партнёров для пилотного внедрения и содействие в бизнес-планировании;
- продвижение проектов на российский и международные рынки;
- экспертная оценка результатов научно-исследовательских работ, инновационных проектов, с привлечением профессиональных экспертов;
- организация научных и деловых мероприятий, направленных на развитие и повышение уровня управленческих и предпринимательских компетенций в сфере инновационной деятельности.

Учреждение подведомственно Министерству науки и инновационной политики Новосибирской области.

Вся информация о деятельности Фонда размещена на сайте fondnid.ru.
Телефон для справок: (383) 363-70-89



Научно-исследовательский центр «ЭКОЛОГИЯ»

- Мониторинг экологической обстановки на территориях и объектах.
- Разработка проектов работ в области экологии, рекультивации и рационального пользования ресурсами (вторичная переработка и извлечение).
- Работы на объектах в зоне многолетнемерзлых пород (оценка устойчивости инженерных конструкций и гидротехнических сооружений, прогнозное моделирование).
- Изучение состояния и динамики экосистем, в т.ч. подвергшихся атипичным природным и антропогенным нагрузкам.
- Научное и методическое сопровождение проектов по линии экологической безопасности и влияния на экосистемы.
- Экспертиза и работы в области нормативного регулирования (определение фоновых значений поллютантов для специфических территорий).
- Консультационные услуги и подготовка кадров.

Научно-исследовательский центр «Экология» Сибирского отделения Российской академии наук — обладатель междисциплинарных компетенций, разработчик научно-технологических программ и решений в сфере изучения и охраны окружающей среды.

Кейсы

- Полевые сезоны 2020-2021 гг.
- разлив нефтепродуктов из трубопровода на нижней Оби, ноябрь 2020 г.
- проект вторичного извлечения на Беловском хвостохранилище, 2020 г.

Контакты:

директор Юркевич Николай Викторович,
+7-923-240-10-42, ecology@sb-ras.ru



МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СО РАН

ПО ПРОБЛЕМАМ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
В СЕВЕРНОЙ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ (МНЦТВ)

Образован в 2019 году как структурное подразделение Сибирского отделения РАН, на сетевой основе координирующее исследования и разработки институтов Отделения по проблемам экономических, научно-технологических, экологических, медико-санитарных и гуманитарных взаимодействий со странами Северо-Восточной Азии (СВА).

Приоритетными направлениями деятельности Центра являются:

- проведение научных исследований по проблемам трансграничных взаимодействий;
- экономическое сопровождение проектов научно-технологического сотрудничества институтов СО РАН с научными центрами, регионами и компаниями стран СВА;
- организация международных форумов, конференций и семинаров;
- содействие в реализации программ обучения студентов и аспирантов из стран Северо-Восточной Азии в ведущих университетах Сибири, а также программ стажировки научных сотрудников СО РАН в научных центрах СВА;
- научное и экономическое сопровождение проектов взаимодействия российских высокотехнологичных компаний с компаниями стран СВА.

Сетевыми партнерами МНЦТВ являются около 50 академических институтов, университетов, высокотехнологичных компаний, неправительственных организаций России, Китая, Монголии, Японии, Южной Кореи, Казахстана, Киргизии.

Селиверстов Вячеслав Евгеньевич
Директор МНЦТВ, д.э.н., sel@sb-ras.ru,
тел. +7-383-330-8954; +7-383-238-3741

Темир-оол Айдыс Павловна
Ведущий специалист МНЦТВ,
ondar@sb-ras.ru; тел. +7-383-238-3741

