

УДК 621.039

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНЫМ УСТАНОВКАМ С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

© 2023 г. Е. И. Чернов¹, М. Е. Чернов¹, В. И. Рачков², А. И. Орлов²*, Ю. М. Сысоев¹

¹Акционерное общество “Экон”, Обнинск, Россия

²Акционерное общество “Прорыв”, Москва, Россия

*e-mail: oai@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Успешное развитие мировой ядерной энергетики не представляется возможным без перехода на новую технологическую платформу. Наиболее перспективной ядерной технологией для этого на сегодня выглядят быстрые реакторы, охлаждаемые жидкометаллическими теплоносителями. В 2021 г. началось строительство первой в мире ядерной энергетической установки с быстрым реактором БРЕСТ-ОД-300 в городе Северск, Россия. Этот реактор, обладая целым рядом инновационных решений, использует жидкий свинец в качестве теплоносителя первого контура. Свинец относится к классу тяжелых жидкометаллических теплоносителей и по технологическим свойствам схож с эвтектическим сплавом Pb–Bi. Обоснованию работоспособности и безопасности тяжелых жидкометаллических теплоносителей в России уделялось особое внимание начиная с 60-х гг. прошлого века. Ключевым элементом технологии такого теплоносителя является датчик термодинамической активности кислорода, с помощью которого контролируется окислительный потенциал теплоносителя и обеспечивается чистота и коррозионная устойчивость контура. В данной статье приводится обзор основных конструктивных решений, предлагаемых для датчика активности кислорода, дается их анализ, а также рассматриваются предложения по разработке усовершенствованной конструкции датчиков, которая бы отвечала требованиям крупномасштабной ядерной энергетики.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, свинцовый теплоноситель, датчик термодинамической активности кислорода, окислительный потенциал, жидкометаллическая коррозия, ДАК

DOI: 10.31857/S0002331023010041, EDN: LVTINF

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающее потребление энергии в мире, уменьшение запасов углеводородного топлива и необходимость снижения экологически вредных выбросов требуют внедрения установок и развития технологий, позволяющих отказаться от использования углеводородного сырья для выработки тепловой и электрической энергии.

Наибольшие перспективы в этом направлении открывает создание ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) на основе свинца. Такие установки предназначены для работы в условиях топливного самообеспечения, кроме того, благодаря при-

сущей их свойствам надежности и внутренней безопасности, они являются наиболее экологичными и защищенными.

Опыт создания и эксплуатации реакторов, охлаждаемых ТЖМТ, показал обоснованность и эффективность использования данного теплоносителя [1–5].

Технология ТЖМТ имеет ключевое значение; один из главных ее элементов, влияющих на надежность и безопасность эксплуатации, — контроль в составе ТЖМТ примеси кислорода. Такой контроль необходим для недопущения коррозионных процессов конструкционных сталей, а также процессов образования твердой фазы оксида свинца, приводящих к образованию отложений. Наиболее перспективным современным способом такого контроля является электрохимический, с использованием гальванического концентрационного элемента на основе твердого оксидного электролита. Этот метод хорошо известен и применяется для определения содержания кислорода в различных отраслях промышленности, например: в энергетике, химической промышленности и автомобилестроении — для контроля кислорода в газах, в металлургии и полупроводниковой технике — в расплавах металлов, а также в ядерной энергетике для контроля термодинамической активности (ТДА) кислорода в жидкометаллических теплоносителях на основе натрия, а позже в ТЖМТ на основе свинца [12–16]. Эти приборы позволяли проводить измерения ТДА кислорода в ходе НИОКР, в основном отвечали требованиям того времени.

Таким образом, очевидна необходимость создания датчика ТДА кислорода с присущим ему свойством внутренней безопасности, поскольку этого требует идеология создания новых промышленных ЯЭУ с охлаждением ТЖМТ на основе свинца.

1. Обзор существующих методов и средств контроля ТДА кислорода в ТЖМТ

1.1. Состояние разработок за рубежом

В мире уже более тридцати лет наблюдается повышенный интерес к исследованиям в области технологии тяжелого теплоносителя. Так, например, в Японии разработан и введен в эксплуатацию исследовательский свинцово-висмутовый циркуляционный контур [6, 7], в Италии разрабатывается проект экспериментального реактора CIRCE с естественной циркуляцией жидкого свинца [8, 9], аналогичные проекты ведутся в Германии [10] и во Франции (Кадараш) [11], в Китае, Бельгии и других странах.

Внимание зарубежных исследователей фокусируется на вопросах разработки экспериментальных устройств для контроля ТДА кислорода, предназначенных для лабораторных исследований, в частности: освоения принципов измерений, определения граничных условий эксплуатации и эксплуатационных режимов, материалах, входящих в состав его конструкции, интерпретации показаний твердоэлектrolитных ячеек в ходе различных экспериментальных исследований, надежности, точности и достоверности показаний, ресурсу работы в лабораторных установках.

Анализ опубликованных иностранных исследований показывает, что ведутся активные разработки твердоэлектrolитных ячеек для контроля ТДА кислорода при проведении экспериментальных исследований. Большое внимание уделяется исследованию различных конструкций и применяемых материалов.

Так, исследователи в рамках проекта DEMETRA провели сравнительный анализ различных лабораторных устройств [17] с точки зрения наилучшей точности показаний, надежности и ресурса приборов. Внимание было уделено надежности герметизации элементов конструкции, влиянию состава твердоэлектrolитной керамики на основе диоксида циркония на достоверность и точность показаний, материалам корпуса, электрода сравнения и потенциалосъемника.

Большое внимание уделяется исследованию конструкций лабораторных датчиков в целом, а также их элементов, различных составов электродов сравнения, их положительных и отрицательных качествах. В качестве последних рассмотрены в основном

открытый воздушный электрод Pt-воздух, а также герметичный электрод: жидкий металл/оксид металла, в качестве которых применялись Bi/Bi₂O₃, Cu/Cu₂O, Fe/Fe₃O₄, In/In₂O₃, и другие материалы [17–20].

Как известно, значительное влияние на работоспособность датчика оказывает степень ионной проводимости керамического чувствительного элемента (КЧЭ), которая, в свою очередь, зависит от химического и фазового состава керамики, технологии изготовления КЧЭ. В ходе различных исследований экспериментально подтверждено улучшение прочностных характеристик и ухудшение ионной проводимости КЧЭ при частичной стабилизации диоксида циркония ZrO₂ легирующей добавкой оксида иттрия Y₂O₃ [17, 18, 21].

Часть зарубежных исследований посвящена вопросам надежности и точности показаний ячейек. Подтверждено влияние различных примесей (продуктов коррозии) в составе расплава ТЖМТ на показания, проведены сравнительные измерения и сравнение показаний нескольких одновременно установленных в одной точке лабораторных датчиков [17, 22–24].

Важный вопрос – минимальная нижняя граница температурного диапазона, в котором отсутствует отклонение показаний ячейки от расчетной зависимости Нернста. Часть исследований посвящена определению факторов и степени их влияния на данную величину температуры. К таким факторам отнесены химсостав и количество легирующей добавки к материалу твердого электролита, внутреннее электросопротивление электрохимической ячейки [18, 25, 26], а также новые материалы электродов, например, легированный стронцием манганит лантана – легированный гадолинием перий [27].

Показано влияние на продолжительность работы лабораторных приборов таких факторов, как изменение характеристик эталонного электрода, качество его герметизации, разрушение КЧЭ вследствие термомеханических нагрузок, зафиксировано изменение показаний после длительной (6500 часов) эксплуатации экспериментального датчика ТДА кислорода [17, 23].

Также зарубежные исследователи применяют разработанные экспериментальные лабораторные датчики для контроля активности кислорода при проведении различных экспериментов: по очистке ТЖМТ от примесей, коррозионных испытаний [24].

Анализ опубликованных данных об уровне исследований в направлении разработки датчиков термодинамической активности кислорода в расплавах ТЖМТ показывает, что иностранные исследователи, начав работы значительно позднее примерно в 90-х гг. XX в., в настоящее время находятся на этапе всестороннего широкого исследования, а также изготовления и применения экспериментальных твердоэлектролитных ячейек и лабораторных датчиков. Зарубежные исследования основываются на использовании результатов ранних разработок советских и российских ученых, а также активно проводимому за рубежом широкому спектру исследований по большинству проблем и задач на пути создания данных устройств.

1.2. Ретроспектива и современное состояние разработок в России

В СССР работы по освоению ТЖМТ на основе свинца для охлаждения РУ проводились с конца 40-х – начала 50-х гг. В 1958 году был введен в эксплуатацию стенд 27/ВТ, в 1963 г. – атомная подводная лодка (АПЛ) проекта 645 с ЯЭУ, охлаждаемой свинец-висмутовым теплоносителем [30–32]. Данные установки принято считать первым поколением РУ, а несколько позже, в 70-х – 80-х гг., разработаны и созданы РУ второго поколения: АПЛ проектов 705 и 705К, стенд КМ-1 [33, 34]. Принципиальное отличие РУ второго поколения заключалось в реализации необходимых условий эксплуатации ТЖМТ, в частности, недопущение несанкционированного попадания кислорода в теплоноситель, поскольку это неизбежно приводило к ухудшению тепло-

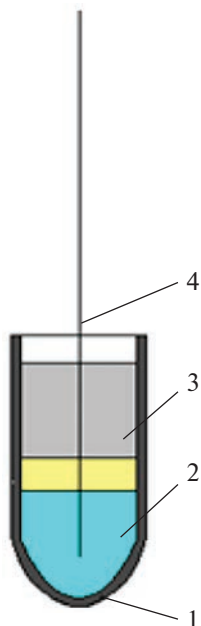


Рис. 1. Лабораторный пробирочный датчик.

гидравлических характеристик и образованию твердой оксидной фазы в циркуляционном контуре. Контроль термодинамической активности кислорода стал важнейшим элементом технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

Таким образом, на пути создания датчиков контроля кислорода отечественные исследователи прошли путь от создания экспериментальных ячеек до внедрения на действующие РУ штатных устройств контроля ТДА кислорода в жидкометаллическом расплаве.

Изначально для контроля содержания в жидком металлическом теплоносителе примеси кислорода использовался метод отбора проб с последующим анализом [29, 35], однако необходим был другой, более оперативный и точный способ и устройства для его реализации.

В 70-х годах были разработаны первые экспериментальные электрохимические твердоэлектролитные ячейки для контроля кислорода в жидких металлах при проведении лабораторных исследований и экспериментов [28, 36, 37].

Основу конструкции ячейки (рис. 1) составляла керамическая пробирка из диоксида циркония 1. Внутрь помещали электрод сравнения: металл/окись металла 2, в качестве которого использовали различные составы, например: $\text{Bi/Bi}_2\text{O}_3$, Ni/NiO , $\text{Fe/Fe}_3\text{O}_4$, $\text{In/In}_2\text{O}_3$, Pt-воздух и др. Герметичность обеспечивала пробка 3 из оксида алюминия, ЭДС контролировали при помощи потенциалосъемника 4 из молибдена. Данное лабораторное устройство позволяло контролировать ТДА кислорода в ходе лабораторных экспериментов, однако было крайне ненадежным и хрупким. Тем не менее на его основе были разработаны и изготовлены лабораторные активометры, используемые для контроля кислорода в теплоносителе циркуляционного контура (рис. 2).

Прибор измерял значения ТДА кислорода в керамической чашечке 2, в которую теплоноситель поступал из тракта циркуляции, был оснащен механизмом перемещения чашки с пробой, системой подвода-отвода расплава, термопарами. Измерения

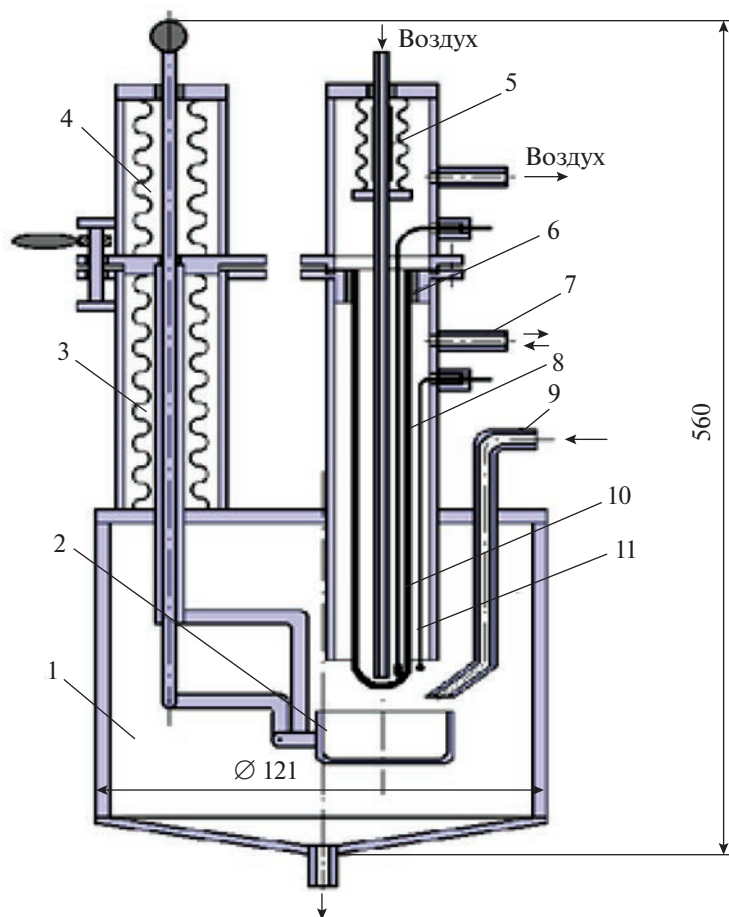


Рис. 2. Активометр для потока.

можно было осуществлять как при непрерывном потоке теплоносителя, так и при отсечении от контура пробы расплава. Однако прибор обладал и существенными недостатками: сложностью конструкции и эксплуатации, низкой точностью и термостойкостью.

С целью использования в контурах охлаждения проектируемых РУ и экспериментальных стендов с ТЖМТ на основе свинца в 70–80-х гг. [37] была разработана конструкция датчика (рис. 3), имеющая в основе твердый оксидный электролит в виде таблетки диаметром 5 мм и высотой 5 мм. Разработанная конструкция позволяла использовать датчик не только в стационарном расплаве, но и непосредственно в трубопроводе при циркуляции теплоносителя, что обеспечивало удобство эксплуатации, отсутствие влияния газовой атмосферы на показания, надежность. Была разработана и отлажена технология изготовления этих приборов, разработано и изготовлено технологическое оборудование, налажен выпуск различных модификаций, наиболее распространенная известна под названием ДАК-45. Результаты проведенных многочисленных испытаний данного устройства позволили допустить эксплуатацию ДАК-45 в реакторной установке АПЛ проекта 705 и 705К, охлаждаемой свинцом-висмутом.

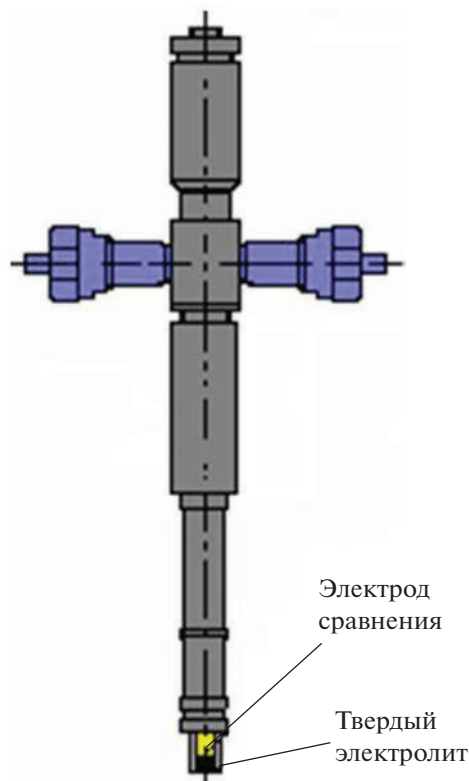


Рис. 3. Датчик ДАК-45 для циркуляционных контуров.

С созданием ДАК-45 поставленная задача контроля примеси растворенного в теплоносителе свинец-висмут кислорода для циркуляционных контуров и стендов была в целом решена. Появление инструмента оперативного контроля ТДА кислорода в режимах эксплуатации контуров с ТЖМТ обеспечило интенсивное развитие средств технологии и лучшее понимание процессов, протекающих в контурах с тяжелым теплоносителем, позволило надежно контролировать кислородный режим теплоносителя действующих РУ АПЛ.

Датчик ДАК-45 отличался непревзойденными даже на сегодняшний день техническими характеристиками: ресурсом работы до 12000 часов (в некоторых случаях до 100 000 часов) в интервале температур 280–500 (650)°С при давлении теплоносителя до 6.0 МПа, скорости изменения температуры до 10°С/с и в диапазоне измерения ТДА кислорода в пределах $-1-10^{-7}$ [38, 39].

Несмотря на сложность конструкции и технологии изготовления, необходимости использования для производства сложного и уникального технологического оборудования, относительно небольшой выход годных изделий, высокие трудозатраты при изготовлении, ДАК-45 был надежным и безотказным прибором для условий эксплуатации в циркуляционных контурах.

Возрождение интереса к тематике ТЖМТ на основе свинца в контексте разработки новых проектов энергетических реакторов в начале 2000-х годов потребовало проведения комплекса исследований, направленных на определение свойств ТЖМТ, при-

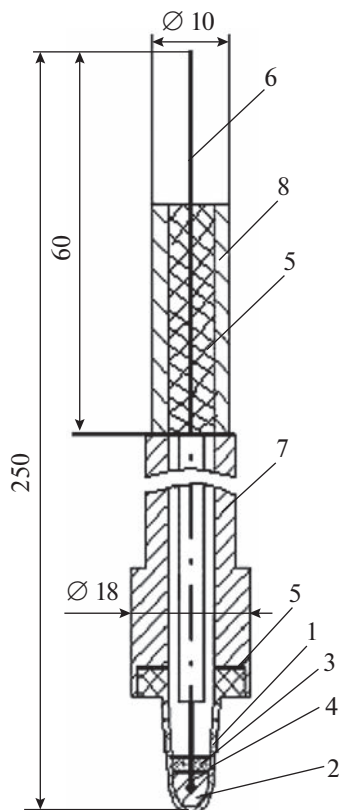


Рис. 4. ДАК капсульного типа.

менительно к использованию его в разрабатываемых проектах реакторов на быстрых нейтронах [40, 41]. Новые прикладные экспериментальные исследования: изучение кинетики растворения PbO и предельной кинетики растворимости кислорода в расплавах Pb и $Pb-Bi$, исследование полей термодинамической активности кислорода в свинецсодержащих расплавах, определение влияния течи парогенератора на технологические параметры и исследование процесса взаимодействия расплавов на основе свинца с водой, исследования процессов массообмена и диффузии, многочисленные коррозионные испытания и ресурсные испытания элементов и устройств технологии ТЖМТ потребовали большого количества простых и надежных датчиков ТДА кислорода лабораторного типа [42].

Такой лабораторный датчик для контроля ТДА кислорода в статическом расплаве был разработан, налажен его серийный выпуск, прибор сертифицирован как средство измерения [43–45]. В основе конструкции – короткая пробирка (капсула) из ZrO_2 легированного добавкой Y_2O_3 . Общий вид капсульного датчика представлен на рис. 4.

Внутри керамической капсулы 1 размещен электрод сравнения 2, 3, например, $Bi-Bi_2O_3$. Капсула герметична с корпусом 7 при помощи стеклогерметика 5. В верхней части датчика расположен гермоввод 8 с потенциалосъемником 6.

На основе данной конструкции лабораторного датчика были разработаны различные экспериментальные системы измерения ТДА кислорода и макетные образцы: для

устройств баковой компоновки глубиной до 8 метров — датчик с тремя чувствительными элементами, датчик периодического контроля, оснащенный электроприводом [46–48], разработана автоматизированная система управления содержанием кислорода в теплоносителе [49].

Однако необходимо отметить, что конструкция капсульного датчика подразумевает использование его в первую очередь в статическом тяжелом теплоносителе. Несмотря на то что данный датчик на сегодняшний день является единственным аттестованным средством измерения ТДА кислорода, а также более чем двадцатилетний опыт широкого его использования в различных экспериментальных исследованиях, применение его в циркуляционных контурах стенов и разрабатываемых ЯЭУ с ТЖМТ на основе свинца требует дополнительного обоснования.

Таким образом, на сегодняшний день уровень отечественных разработок в области исследования и создания электрохимических твердоэлектролитных датчиков контроля ТДА кислорода в ТЖМТ является передовым. Пройден большой путь от создания экспериментальных ячеек на твердых электролитах до создания средств измерения ТДА кислорода для проведения экспериментальных исследований и датчиков для циркуляционных стенов, а также и внедрение на действующие РУ штатных устройств контроля ТДА кислорода в жидкометаллическом расплаве.

Россия является лидером, обладая приоритетом, признаваемым и западными исследователями [18]. Данный приоритет, созданный в том числе и благодаря советским работам, подтвержден широким применением лабораторных датчиков в экспериментальных исследованиях, а также созданию промышленного датчика для ЯЭУ АПЛ.

Тем не менее вопрос создания штатных устройств контроля ТДА кислорода для новых ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца, пока не решен.

2. Актуальные задачи по созданию средств контроля (датчиков) ТДА кислорода применительно к создаваемым промышленным ЯЭУ с ТЖМТ и возможные пути их решения

К современному средству контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ для разрабатываемых промышленных ЯЭУ на быстрых нейтронах можно предъявить следующие основные требования: **безопасная и надежная работа** в условиях длительной эксплуатации при рабочих условиях, а также **достоверность показаний** на протяжении срока эксплуатации.

В соответствии с техническим заданием на ДАК для РУ БРЕСТ-ОД-300 основные условия эксплуатации датчика таковы:

- рабочая температура: $T = 380\text{--}600^\circ\text{C}$;
- максимальное рабочее давление (избыточное): $P = 0.5$ МПа;
- срок непрерывной работы: 1 г.;
- назначенный ресурс: 2 г.

К основным потенциальным событиям, связанным с датчиком, которые могут привести к **проблемам безопасности** для РУ БРЕСТ-ОД-300 и других установок такого типа можно отнести:

— выход из строя датчика с прекращением показаний (внутренний обрыв, короткое замыкание), что будет составлять косвенную угрозу безопасности эксплуатации ЯЭУ, поскольку исчезнет возможность контролировать важнейший параметр технологии теплоносителя — содержание кислорода;

— выход из строя датчика с прекращением показаний, разрушением элементов его конструкции и попаданием фрагментов в расплав, что создаст прямую угрозу безопасности эксплуатации ЯЭУ, связанную с возможностью попадания фрагментов керамики и других элементов конструкции в механизмы или устройства циркуляционного контура;

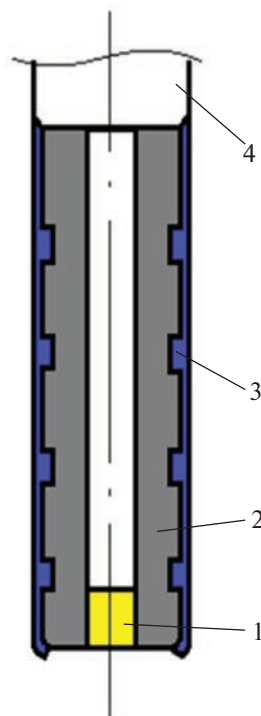


Рис. 5. Схема чувствительного элемента датчика ДАК-45.

— выход из строя датчика с разрушением элементов его конструкции и выходом расплава наружу — в рабочие помещения, что также создаст прямую угрозу безопасности эксплуатации ЯЭУ, связанную с разгерметизацией контура и радиоактивным загрязнением;

— нарушения в работе датчика, которые могут привести не к прекращению показаний, а к передаче недостоверных показаний.

Анализ известных на сегодняшний день конструкций датчиков показывает, что проблемы безопасности и надежной эксплуатации в подобных условиях наиболее удачным образом были решены в конструкции датчика типа ДАК-45. В связи с этим решение задачи создания современного надежного средства контроля ТДА применительно к условиям РУ с ТЖМТ возможно на базе известной конструкции ДАК-45 — штатного датчика ТДА, разработанного применительно к транспортным ЯЭУ с теплоносителем свинец-висмут, путем модернизации этого прибора применительно к новым задачам и адаптации к новым технологическим и производственным возможностям.

Конструкция чувствительного элемента ДАК-45 (рис. 5) включает твердый электролит 1 из ZrO_2 , полностью стабилизированный добавкой Y_2O_3 в виде таблетки диаметром ≈ 5 мм и высотой ≈ 5 мм, изолирующую керамическую втулку 2 из оксида бериллия BeO , наружную стальную трубку 3 из феррито-мартенситной стали, переходящую в корпус 4, являющийся несущим элементом конструкции и герметично соединенной со втулкой 2.

Герметичность между твердым электролитом и керамической изолирующей втулкой обеспечивается технологическим приемом совместного высокотемпературного спекания этих двух деталей при температуре порядка $1600\text{--}1700^\circ\text{C}$, что обеспечивает



Рис. 6. Трещина в твердом электролите ДАК-45 не приводит к разрушению и потере герметичности.

диффузионное взаимопроникновение этих двух разнородных материалов, образующих в месте стыка прочное герметичное соединение.

Герметичность между керамической изолирующей втулкой и наружной стальной трубкой достигается методом газостатического обжата.

Надежность и прочность, а следовательно долговечность такой конструкции, несмотря на известную относительно низкую термостойкость диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия, достигается тем, что таблетка из твердого электролита находится в предварительно сжатом состоянии, обеспечиваемым некоторой разницей в коэффициентах термического линейного расширения (КТЛР) сопрягаемых материалов: твердого электролита 1 и изолирующей втулки 2. Необходимая разница в КТЛР достигается на этапе подготовки керамических материалов, путем варьирования составами и технологическими режимами.

Даже в тех случаях, когда происходило растрескивание твердого электролита в виде таблетки 1 (рис. 6) в результате чрезмерных механических воздействий или термоударов, разгерметизации датчика не происходило.

Необходимо отметить, что в датчиках капсульного типа (рис. 4), где керамический чувствительный элемент является несущим элементом конструкции датчика, образование трещин в нем неизбежно приводит к его разрушению.

Работоспособность датчика в значительной степени определяется поведением важнейшей его составляющей – керамического чувствительного элемента. Конструкция, технология изготовления датчика должны обеспечивать прочность, герметичность этого элемента, а также надежность и герметичность его закрепления. Обеспечение этих условий является сложной научно-технической задачей, обусловленной различными термомеханическими свойствами и отличающимся КТЛР сопрягаемых деталей. В рабочих условиях в расплаве ТЖМТ, характеризующихся широким интервалом рабочих температур, термоударами, высоким рабочим давлением, гидродинамическими нагрузками от набегающего потока расплава, вибрацией, конструкция датчика и керамический чувствительный элемент, в частности, испытывают значительные механические знакопеременные нагрузки. В данных условиях особую роль играет учет напряженно-деформированного состояния керамического чувствительного элемента.

Керамика, и, в частности, ZrO_2 , обладает высокими прочностными характеристиками при работе на сжатие, но в силу присущей керамике ограниченной пластичности плохо сопротивляется нагрузкам на изгиб и разрыв. В связи с этим керамическая пробирка в конструкции капсульного датчика (рис. 4), являясь по сути консольной бал-

кой с односторонней заделкой, испытывает изгибающие нагрузки от температурной деформации, от гидродинамического давления при движении металла, от вибраций и гидроударов. Превышение предельно допустимых нагрузок приводит к разрушению керамического чувствительного элемента в капсульном датчике.

Конструкция датчика другого типа – ДАК-45 (рис. 5) предусматривает гораздо более простую геометрическую форму твердого электролита – в виде таблетки с близкими размерами по высоте и диаметру, что положительно сказывается на прочности данной детали. Кроме того, такая таблетка полностью утоплена в толстостенную изолирующую керамическую втулку, что практически исключает воздействие на твердый электролит внешних динамических нагрузок при движении расплава. При этом таблетка из ZrO_2 находится в предварительно сжатом состоянии, что значительно увеличивает прочность конструкции.

Однако полностью исключить возможность растрескивания керамического чувствительного элемента в датчике ТДА кислорода в процессе работы, как показывает практика, нельзя. Тем не менее необходимо минимизировать или свести к нулю последствия от возможного образования таких трещин. Это и предусмотрено конструкцией типа ДАК-45, где разрушение твердого электролита не приводит к выходу из строя датчика.

Дополнительную степень защиты конструкции ДАК-45, предохраняя от выхода расплава ТЖМТ наружу, придает керамический гермоввод, расположенный в верхней части датчика, обеспечивающий также электроизоляцию потенциалосъемника.

Несмотря на все достоинства, ДАК-45 также не лишен недостатков, связанных в первую очередь с технологией изготовления. Например, способ уплотнения керамической втулки 2 и стального корпуса 3 (рис. 5) – газостатическое обжатие – предусматривает сжатие под высоким давлением (порядка 5–7 Мпа) при высокой температуре (порядка 1000–1100°C) керамического чувствительного элемента для осуществления герметичного соединения. Это приводит к зарождению внутренних напряжений, способных вызвать разрушение керамики как в процессе изготовления, так и эксплуатации, что может привести к погрешности в измерениях.

Проблемы достоверности показаний – постепенное или скачкообразное изменение значений ЭДС датчика в процессе проведения измерений сложно распознать и диагностировать, поскольку такое изменение показаний может быть как признаком неисправности датчика, так и отражением реальной ситуации с поведением ТДА кислорода в расплаве.

Тем не менее известные причины, вследствие которых ДАК может неадекватно отражать ТДА кислорода в расплаве, можно классифицировать на две основные группы:

- проблемы на внешней поверхности керамического чувствительного элемента датчика (на внешнем электроде);
- внутренние проблемы работоспособности датчика.

Известно значение влияния, оказываемого отложениями продуктов коррозионного взаимодействия материалов контура с теплоносителем на метрологические характеристики (точность и инерционность) датчиков [15, 38, 39]. Блокирующее действие таких отложений на внешней поверхности керамического чувствительного элемента рассматривается как образование комбинированного электрода. Особенности такого электрода заключаются в том, что его отдельные элементы обмениваются через электролит ионами кислорода. Этот обменный ток выравнивает окислительный потенциал соседних участков. При этом, если окислительный потенциал данных отложений на поверхности электрода является равновесным относительно окислительного потенциала теплоносителя, то такие отложения лишь повышают инерционность датчика. Однако в реальных условиях контура термодинамическое равновесие между концентрацией кислорода в растворенном виде и в связанной форме в составе отложений в виде оксидных образований соблюдается далеко не всегда [50], особенно в присут-

ствии продуктов коррозии конструкционных сталей, что характерно для ситуации в реальном циркуляционном контуре. В таких условиях, при образовании неравновесных отложений на поверхности датчика, показания не будут соответствовать значению ТДА кислорода в потоке расплава. Отклонения в показаниях могут усугубляться дефектами поверхности КЧЭ, способствующими накоплению и задержке отложений на ней, в частности, формой и шероховатостью поверхности, раковинами и включениями, трещинами.

Искажения показаний, связанные с процессами, происходящими внутри конструкции датчика и отдельных его элементов, возможны по нескольким разнообразным причинам: снижению сопротивления изоляции и шунтированию полезного сигнала; “старению” материала твердого электролита и увеличению его электросопротивления из-за внутренних преобразований в керамическом материале твердого электролита [51]; химические процессы, происходящие с материалами электрода сравнения, потенциальсъемника и других элементов конструкции [52, 53].

Необходимо отметить, что проблемы достоверности показаний присущи в той или иной степени любой разработанной на сегодняшний день конструкции датчика. Несмотря на значительные усилия, прилагаемых разработчиками для минимизации и устранения явления искажения показаний ДАК, проблема не была решена на ранних этапах разработок в прежних конструкциях, не решена она и до сих пор.

Как уже отмечалось, создание новых безопасных ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца, требует применения надежных, безотказных и точных средств контроля состояния теплоносителя. В основе идеологии датчика термодинамической активности кислорода для таких установок должна лежать концепция абсолютной пассивной внутренней безопасности данного устройства.

По мнению авторов, фундаменту, на котором можно основывать разработку ДАК ТДА кислорода в ЯЭУ с ТЖМТ на основе свинца, в наибольшей степени соответствует конструкция ДАК-45.

Однако напрямую данная конструкция не может считаться пригодной для непосредственного применения в новых условиях поскольку:

- изменился состав ТЖМТ, сегодня это преимущественно чистый свинец;
- изменились условия эксплуатации датчика, в частности, увеличилась рабочая температура до 650°C;
- повысились требования к безопасности;
- изменились требования к габаритным размерам датчика, в частности, к необходимой длине, которая должна быть увеличена;
- новые требования к технологии изготовления должны включать ее доступность, безвредность и предусматривать использование стандартного технологического оборудования;
- новые требования к конструкции датчика должны включать применение известных и разработанных и безопасных материалов.

Также, по мнению авторов, задачи разработки нового датчика можно решать с учетом конструктивных и технологических наработок, полученных при создании газовых твердоэлектролитных сенсоров для высокотемпературных газоанализаторов кислорода, предназначенных для эксплуатации в дымовых и других газах при температурах до 800°C. Такие высокотемпературные приборы разработаны, производятся более 25 лет и надежно работают на многих предприятиях России и за рубежом. Такие газоанализаторы предназначены для работы в условиях агрессивного воздействия дымовых газов и высокой температуры, имеют срок службы 7–15 лет и являются аттестованным средством измерения концентрации кислорода [54, 55].

Твердоэлектролитные сенсоры таких приборов – также “таблеточного” типа различной формы (рис. 7), изготовленные из отечественных материалов по разработан-



Рис. 7. Твердоэлектролитные сенсоры.

ной и запатентованной технологии [56, 57] состоит из твердоэлектролитной таблетки на основе керамического материала диоксида циркония в кубической фазе, полностью стабилизированного оксидом иттрия ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$), изолирующей втулки из алюмомагнезильной шпинели (АМШ) и стальной оболочки являющейся корпусом. Требуемый согласованный КТЛР таблетки и изолирующей втулки достигается составом материала АМШ и технологическими режимами термообработки.

Керамические детали — твердый электролит и изолирующая втулка изготовлены методом горячего шликерного литья керамики в металлические формы на отечественном оборудовании [58]. Надежное, герметичное соединение таблетки из твердого электролита с керамической втулкой осуществляется методом совместного спекания при высокой температуре, а втулки с металлическим корпусом — технологическим процессом диффузионной пайки.

Кроме того, данные сенсоры (рис. 7) с использованием электролита на основе оксида гафния, стабилизированного оксидом гадолиния ($\text{HfO}_2 \cdot \text{Ga}_2\text{O}_3$), снабженные электродом сравнения из индия ($\text{In}/\text{In}_2\text{O}_3$), также нашли свое применение в макетных образцах датчиков внутриреакторного контроля кислорода и водорода. В ходе экспериментальных исследований для обоснования контроля содержания примесей в первом контуре ЯЭУ на БН с натриевым теплоносителем [59, 60] данные сенсоры в составе макетных датчиков стабильно отработали в жидком натрии 6000 часов при температуре 350–480°C в условиях радиоактивного облучения.

Ставя во главу угла безопасность эксплуатации и достоверность показаний будущего штатного датчика ТДА кислорода для новых ЯЭУ с ТЖМТ на основе свинца, такую разработку необходимо основывать на базе вышеописанных известных конструкций: ДАК-45 и “таблеточных” твердоэлектролитных сенсоров для контроля кислорода в газе и жидком натрии. На базе данных разработок, используя накопленный опыт изготовления и применения различных керамических материалов, изготовления герметичных соединений, конструирования, разработки технологий, испытаний твердоэлектролитных датчиков и эксплуатации их при проведении различных прикладных исследований, возможно изготовить надежное и точное средство измерения кислорода в ТЖМТ новых ЯЭУ на быстрых нейтронах.

Основные необходимые направления работ на этом направлении:

- разработка новых и апробирование уже известных керамических материалов для условий нового применения;
- разработка адаптированной конструкции датчика;
- разработка и освоение необходимой технологии изготовления;
- проведения комплекса необходимых экспериментальных исследований в обоснование работоспособности, надежности, метрологических характеристик;
- сертификация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидна необходимость создания штатного средства измерения — датчика термодинамической активности кислорода, применительно к условиям работы и требованиям вновь разрабатываемых промышленных ядерных энергетических установок с охлаждением тяжелым жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца. Такой прибор должен быть надежным, обеспечивать достоверные показания, являться средством измерения и быть безопасным в эксплуатации.

Анализ отечественных и зарубежных разработок в данном направлении демонстрирует высокую активность зарубежных исследователей по решению большинства проблем и задач на пути создания экспериментальных датчиков. Несмотря на то что большинство работ посвящено различным аспектам изучения работоспособности твердо-электролитных ячеек и лабораторных устройств, спектр проводимых исследований широк, он охватывает большинство существующих материаловедческих, конструкторско-технологических и метрологических вопросов.

Уровень отечественных разработок в области создания электрохимических твердо-электролитных датчиков контроля ТДА кислорода в ТЖМТ является передовым, Россия обладает приоритетом, созданным в том числе и благодаря советским разработкам, а также созданию промышленного датчика для ЯЭУ АПЛ. Это подтверждает многолетний опыт изготовления и широкое применение как лабораторных датчиков в экспериментальных исследованиях по технологии ТЖМТ, так и успешная эксплуатация ДАК-45 — штатного средства контроля ТДА кислорода ЯЭУ АПЛ.

Тем не менее вопрос создания устройств контроля ТДА кислорода для новых ядерных энергетических установок, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца, пока не решен.

Решение задачи создания надежного средства контроля ТДА с присущим ему свойством внутренней безопасности применительно к условиям РУ БРЕСТ ОД 300 (и других установок с ТЖМТ) возможно на базе модернизации конструкций датчиков “таблеточного” типа. Эту работу можно проводить на основе опыта создания и многолетней успешной эксплуатации таких приборов: ДАК-45 для расплава свинец-висмут, а также высокотемпературного сенсора для контроля кислорода в газах и жидком натрии. Данная работа требует проведения комплекса исследований в направлении подтверждения работоспособности в новых условиях известных, а также создания новых: конструкций, технологий и материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В.И. Основы безопасности ядерной энергетики // Сборник тезисов международной конференции “ТЖМТ-98”, Т. 1. Обнинск. 1999. С. 33–43.
2. Орлов В.В., Филин А.И., Цикунов В.С., Сила-Новицкий А.Г., Смирнов В.С., Леонов В.Н. Задачи и требования к конструкции опытно-демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 // Сборник тезисов международной конференции “ТЖМТ-98”, Т. 2. Обнинск. 1999. С. 450–457.
3. Кривенцев В., Хорошев М., Батра К. Обзор деятельности МАГАТЭ в области развития технологий быстрых реакторов: текущее состояние дел и перспективы // Сборник тезисов докладов V конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)”, Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2018. 155 с.
4. Тошинский Г.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной энергетике // Сборник тезисов докладов V конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)”, Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2018. 155 с.
5. Иностраннный источник
6. Такизука Т., Цудзимота К., Соса Т., Такано Х. Использование тяжелого жидкометаллического теплоносителя в ускорительно-управляемых трансмутационных системах JAERI // Сборник докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии”, Т. 1. Обнинск. 1999. С. 149.
7. Aria Y. et al. Recent Progress of Nitride Fuel Development in JAERI // Proc. Int. Conf. Future Nuclear Systems “Global 97”. Yokohama. 1997. P. 78.

8. Чинотти Л., Корсини Дж., Джерарди Дж. и др. Проблемы, связанные с конструкцией ускорительно-управляемой системы, охлаждаемой свинцово-висмутовой эвтектикой // Сборник докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии”, Т. 1. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 1999. С. 173.
9. Cinotti L., Corcini G. A proposal for enhancing the primary coolant circulation in the EA. // International Workshop on Physics of Accelerator-Driven System for Nuclear Transmutation and Clean Energy Production. Trento, Italy. 1997. P. 67.
10. Corrosion and Oxygen control. Minutes of the Workshop on Heavy Liquid Metal Technology. September 16–17. 1999. Forschungszentrum Karlsruhe, Germany. P. 49.
11. Nakagata T., et al. Nuclear Data for OMEGA Project. // Proc. 3rd OECD/NEA Int. Information Exchange Mtd. On P–T, Cadarache. 1994. P. 371.
12. Караваяев Ю.Н., Неймулин А.Д., Пальгуев С.Ф. Твердые электролиты для кислородных датчиков // Тезисы доклада Всесоюзного симпозиума. Ангарск. 1971. С. 7.
13. Явойский В.И., Лузгин В.П., Вишкареев А.Ф. Окисленность стали и методы ее контроля. М.: Металлургия. 1970. 284 с.
14. Чернов Е.И., Бабошин А.В., Чернов М.Е. Высокотемпературные твердоэлектролитные газоанализаторы // Сборник тезисов докладов научно-практической конференции “Энергосбережение в регионах России. Проблемы и возможности”. Калуга. 2000. С. 58.
15. Шматко Б.А., Шимкевич А.Л., Блохин В.А. Диагностика коррозии и контроль технологических процессов методами активометрии в теплоносителе свинец-висмут // Сборник докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии”, Т. 2. Обнинск. 1999. С. 741.
16. Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Шелемetyев В.М. Капсульные твердоэлектролитные датчики для контроля кислорода // Новые промышленные технологии. 2004. № 3. С. 26.
17. Carsten Schroer, Juergen Konys, Ariadna Verdaguier, Jordi Abellà, Alessandro Gessi, Alena Kobzova, Stella Babayan, Jean-Louis Courouau. Design and testing of electrochemical oxygen sensors for service in liquid lead alloys. Journal of Nuclear Materials, 415, 2011. P. 338–347.
18. Bassini S., Antonelli A., Di Piazza I., Tarantino M. Oxygen sensors for Heavy Liquid Metal coolants: Calibration and assessment of the minimum reading temperature. Journal of Nuclear Materials, 486, 2017. P. 197–205.
19. Pribadi Mumpuni Adhia, Masatoshi Kondob, Minoru Takahashi. Performance of solid electrolyte oxygen sensor with solid and liquid reference electrode for liquid metal. Sensors and Actuators, B 241. 2017. P. 1261–1269.
20. Manfredia G., Lima J., Rosseela K., Van den Boscha J., Aerts A., Th. Doneuxb, Buess-Hermanb C. Liquid metal/metal oxide reference electrodes for potentiometric oxygen sensor operating in liquid lead bismuth eutectic in a wide temperature range. Procedia Engineering 87, 2014. P. 264–267.
21. Tianpeng Wen, Lei Yuan, Tao Liu, Qiaoyang Sun, Endong Jin, Chen Tian, Jingkun Yu. Enhanced ionic conductivity and thermal shock resistance of MgO stabilized ZrO2 doped with Y2O3. Ceramics International, V. 46. I. 12. 15 August 2020. P. 19835–19842. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.038>
22. Lim J., Mariën A., Rosseel K., Aerts A., Van den Bosch J. Accuracy of potentiometric oxygen sensors with Bi/Bi2O3 reference electrode for use in liquid LBE. Journal of Nuclear Materials 429 2012. P. 270–275.
23. Yuji Kurata, Yuji Abe, Masatoshi Futakawa, Hiroyuki Oigawa. Characterization and re-activation of oxygen sensors for use in liquid lead–bismuth. Journal of Nuclear Materials 398 2010. P. 165–171.
24. Brissonneau L., Beauchamp F., Morier O., Schroer C., Konys J., Kobzova A., Di Gabriele F., Courouau J.-L. Oxygen control systems and impurity purification in LBE: Learning from DEMETRA project. Journal of Nuclear Materials 415 (2011) 348–360.
25. Abu Khalid Rivai, Minoru Takahashi. Investigations of a zirconia solid electrolyte oxygen sensor in liquid lead. Journal of Nuclear Materials 398 2010. P. 160–164.
26. Pribadi Mumpuni Adhia, Nariaki Okubob, Atsushi Komatsub, Masatoshi Kondoc, Minoru Takahashic. Electrochemical impedance analysis on solid electrolyte oxygen sensor with gas and liquid reference electrodes for liquid LBE. Energy Procedia 131 2017. P. 420–427.
27. Lim J., Manfredi G., Mariën A., Van den Bosch J. Performance of potentiometric oxygen sensors with LSM-GDC composite electrode in liquid LBE at low temperatures. Sensors and Actuators B 188 2013. P. 1048–1054.
28. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат. 1970. С. 178.
29. Безносков А.В., Серов В.Е., Гулевский В.А., Орлов Ю.И. Анализ методов и устройств контроля примесей в системах со свинцовым теплоносителем // Сборник тезисов докладов “Использование жидких металлов в народном хозяйстве”. Обнинск: ФЭИ. 1993. С. 124–126.
30. Субботин В.И. Жидкометаллические теплоносители в ядерной энергетике // Материалы Российской межотраслевой конференции “Теплофизика 2002”. Т. 1. Тезисы докладов. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2002. 332 с.

31. Ефанов А.Д., Иванов К.Д., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Технология свинцово-висмутowego теплоносителя на ЯЭУ первого и второго поколений // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2007. № 1. С. 138–144.
32. Зеленский В.Н., Комлев О.Г., Тошинский Г.И. Исследование теплотехнических характеристик ядерной энергетической установки стенда 27/ВТ // Сборник тезисов докладов третьей межотраслевой конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии (ТЖМТ-2008)”. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ. 2008. 126 с.
33. Тошинский Г.И. Атомная энергетическая установка с жидкометаллическим теплоносителем для подводных лодок. Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / Под общ. Ред. А.А. Саркисова: РАН. М.: Наука, 2008. 654 с. http://elib.biblioatom.ru/text/rol-nauki-v-sozdanii-podvodnogo-flota_2008/go,600/
34. Филатов Б.В., Василенко В.А. и др. Стенд КМ-1. Опыт эксплуатации / Сб. докладов конф. “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях”. Обнинск, 1999. Т. 1. С. 80.
35. Козлов Ф.А. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. М.: Энергоатомиздат. 1983. 180 с.
36. Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К., Воробьев Т.А., Ульман Х., Реец Т., Рихтер В. Электрохимическая ячейка для измерения активности кислорода в натрии // Атомная энергия. 1981. Т. 51. № 2. С. 99.
37. Блохин В.А., Будылов Е.Г., Великанович Р.И. и др. Опыт создания и эксплуатации твердо-электролитных активометров кислорода в теплоносителе свинец–висмут / Сб. докладов конф. “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях”. — Обнинск, 1999. Т. 2. С. 631.
38. Горелов И.Н., Рыжков А.Н., Шматко Б.А. Твердоэлектролитные приборы для контроля примеси кислорода в жидких металлах и газах // Сборник тезисов докладов межотраслевой конференции “Теплофизика–91”. Обнинск: ФЭИ. 1993. 131 с.
39. Шматко Б.А., Шимкевич А.Л., Блохин В.А. Диагностика коррозии и контроль технологических процессов методами активометрии в теплоносителе свинец–висмут // Сборник докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии”, Т. 2. Обнинск. 1999. С. 741.
40. Орлов В.В., Филин А.И., Цикунов В.С., Сила-Новицкий А.Г., Смирнов В.С., Леонов В.Н. Задачи и требования к конструкции опытно-демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 // Сборник тезисов международной конференции “ТЖМТ-98”, Т. 2. Обнинск. 1999. С. 450–457.
41. Филин А.И. Экспериментальные работы в подтверждение концепции быстрого реактора со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ). Результаты и планирование // Сборник докладов конференции “ТЖМТ”, Т. 2. Обнинск. 1999. С. 436.
42. Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Чернов М.Е. и др. Перспективные методы контроля состояния тяжелых теплоносителей // Сборник тезисов докладов Российской межотраслевой конференции “Тепломассоперенос и свойства жидких металлов”. Обнинск. 2002. С. 190.
43. Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А., Проворов А.А. Разработка электрохимического датчика капсульного типа для контроля кислорода в тяжелых теплоносителях // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 5. С. 360.
44. Чернов М.Е. Датчик капсульного типа для контроля кислорода в контурах ЯЭУ с теплоносителями свинец и свинец-висмут: диссертация кандидата технических наук: 05.14.03. ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, 2005. 172 с.
45. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Стороженко А.Н., Чернов М.Е. и др. Особенности метрологической поверки датчиков активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. № 3. 2012. С. 68.
46. Чернов М.Е., Мартынов П.Н., Стороженко А.Н. и др. Достижения и перспективы в разработке датчиков контроля кислорода для моноблочных РУ с теплоносителями Pb–Bi и Pb. Новые промышленные технологии, 2011, Вып. 1. С. 11–13.
47. Асхадуллин Р.Ш., Стороженко А.Н., Шелемetyев В.М., Скоморохов А.Н., Садовничий Р.П., Легких А.Ю. Современное состояние разработок АО “ГНЦ РФ-ФЭИ” датчиков активности кислорода для реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 5. 2017. С. 12–19.
48. Садовничий Р.П., Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Стороженко А.Н., Чернов М.Е. Контроль содержания кислорода в ТЖМТ. Проблемы и решения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 3. 2015. С. 115–126.
49. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А., Ланских В.С., Чернов М.Е. и др. Автоматическая система управления термодинамической активностью кислорода в винцово-висмутowym теплоносителе // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. № 3. 2009. С. 176–183.
50. Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И., Чернов М.Е. и др. Обобщение результатов экспериментальных исследований поведения примеси кислорода в циркуляционных контурах

- с тяжелыми теплоносителями // Сборник тезисов докладов Российской межотраслевой конференции “Тепломассоперенос и свойства жидких металлов”. Обнинск. 2002. С. 163.
51. Перфильев В. М., Демин А. К., Кузин Б. Л., Липилин А. С. Высокотемпературный электролиз газов. М.: Наука. 1988. 232 с.
 52. Шелемetyев В. М., Иванов И. И., Асхадуллин Р. Ш., Стороженко А. Н., Кузин П. В. Влияние конструктивного исполнения электрода сравнения на метрологические характеристики твердоэлектродного датчика кислорода в газе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 1. 2019. С. 96–116.
 53. Осипов А. А., Иванов К. Д., Садовничий Р. П., Шелемetyев В. М. Эффекты поляризации и электронной проводимости ионных проводников на основе ZrO_2 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 2. 2014. С. 48–60.
 54. Чернов Е. И., Денискин Е. И. и др. Приборы для систем контроля технического процесса сжигания топлива // Сборник тезисов докладов конференции “Методы и средства измерения теплофизических параметров”. Обнинск. 1996. С. 160.
 55. Чернов Е. И. и др. Датчик контроля дымовых газов // Патент на изобретение № 2142129 от 10.02.1997 г.
 56. Чернов Е. И., Чернов М. Е. Чувствительный элемент газоанализатора кислорода и способ его изготовления // Патент на изобретение № 2339027, от 10.12.2007 г.
 57. Чернов Е. И., Чернов М. Е. Чувствительный элемент газоанализатора кислорода и химнедожога. Патент на изобретение № 2584265, от 14.04.2015.
 58. Чернов Е. И., Чернов М. Е. Литьевая установка. Патент на полезную модель № 149450, от 11.07.2014.
 59. Блохин В. А., Борисов В. В. и др. Датчик контроля кислорода в натрии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 4. 2016. С. 108–115.
 60. Блохин В. А., Борисов В. В., Камаев А. А. и др. Датчики для внутриреакторного контроля водорода и кислорода в натрии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. № 4. 2017. С. 5–14.

The Current State of Development and Prospects for the Creation of Sensors of Thermodynamic Activity of Oxygen in Relation to Reactor Units with a Heavy Liquid Metal Coolant

E. I. Chernov^a, M. E. Chernov^a, V. I. Rachkov^b, A. I. Orlov^b, *, and Yu. M. Sysoev^a

^aJSC “Ekon”, Obninsk, Russia

^bJSC “Proryv”, Moscow, Russia

*e-mail: oai@proryv2020.ru

Successful development of the world nuclear energy is not possible without a transition to a new technological platform. The most promising nuclear technology for this today seems to be fast reactors cooled by liquid metal coolants. In 2021, the construction of the world’s first nuclear power plant with a fast reactor BREST-OD-300 began in the city of Seversk, Russia. This reactor, having a number of innovative solutions, uses liquid lead as the primary coolant. Lead belongs to the class of heavy liquid metal coolants and is similar in technological properties to the Pb-Bi eutectic alloy. Since the 60s of the last century, special attention has been paid to the substantiation of the operability and safety of heavy liquid metal coolants in Russia. The key element of the technology of such a coolant is the thermodynamic oxygen activity sensor, which controls the oxidation potential of the coolant and ensures the cleanliness and corrosion resistance of the circuit. This article provides an overview of the main design solutions proposed for the oxygen activity sensor, their analysis is given, and proposals for the development of an improved sensor design that would meet the requirements of large-scale nuclear power are considered.

Keywords: heavy liquid metal coolant, lead coolant, oxygen thermodynamic activity sensor, oxidation potential, liquid metal corrosion, OAS