ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»



ПЯТАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

(T**XM**T-2018)

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Обнинск, 8-10 октября 2018



Обнинск 2019 **Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ—2018)** : материалы конференции. — Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 8–10 октября 2018. — Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 2019. — 581 с. [электронное издание].

В сборнике представлены доклады и презентации сообщений российских ученых и специалистов на пятой конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», приуроченной к 60-летию пуска в ФЭИ первого в мире реактора с теплоносителем свинец-висмут — стенда 27/ВТ.

Материалы включены в сборник в авторской редакции.

Председатель программного комитета, заместитель генерального директора — директор Блока управления инновациями ГК «Росатом» Ю. А. Оленин

Председатель организационного комитета, генеральный директор АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» *А. А. Говердовский*

Заместитель председателя программного комитета – координатор конференции, советник генерального директора АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» *Г. И. Тошинский*

История создания АПЛ с ЖМТ в АО «СПМБМ «Малахит»

В. В. Замуков, научный руководитель специализации

АО «СПМБМ «Малахит», Санкт-Петербург

В июне 1963 г. на ходовые испытания вышла новая советская АПЛ «К-27». Внешне она почти не отличалась от серийной АПЛ первого поколения проекта 627. И все же АПЛ «К-27» имела кардинальное отличие. Это была первая в Советском Союзе опытная АПЛ пр. 645 с паропроизводящей установкой (ППУ), в ядерных реакторах которой использовался жидкометаллический теплоноситель.

Подводное кораблестроение осваивало ядерную энергетику. Шел поиск наиболее перспективных направлений создания корабельных ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Наиболее приемлемыми считались два альтернативных варианта: водо-водяная установка и установка с жидкометаллических теплоносителем (ЖМТ).

По сравнению с водой жидкометаллический теплоноситель не требовал создания в первом контуре высокого давления для удержания жидкой фазы. Снижение давления обуславливало упрощение и экономию массы корабельной ЯЭУ. Большим достоинством установок с жидкометаллическим теплоносителем считалась возможность получения во втором контуре пара с более высокими параметрами, т. е. с большими температурами и давлением. Это позволяло повысить коэффициент полезного действия ЯЭУ и сократить массогабаритные характеристики паротурбинной установки.

История создания отечественных ПЛ с реакторами на жидкометаллическом теплоносителе ведет отсчет с сентября 1952 г., когда по решению Правительства СССР началось проектирование первой отечественной АПЛ. В качестве основного тогда был выбран вариант водоводяной ЯЭУ, но работы по корабельной ЯЭУ с ЖМТ не прекратили. Их осуществлял Физикоэнергетический институт (ФЭИ) под научным руководством академика А. И. Лейпунского. Непосредственную разработку жидкометаллической ППУ, получившей обозначение ВИ, вело ОКБ «Гидропресс» Подольского машиностроительного завода им. Орджоникидзе под руководством главного конструктора Б. М. Шолковича.

При этом, согласно постановлению Правительства 1953 г., одновременно с разработкой ЯЭУ для подводных лодок предусматривалось создание стендов для испытания наземных прототипов первых ЯЭУ. Стенды создавались для наземных прототипов ЯЭУ с реакторами, охлаждаемыми водяным (стенд 27/ВМ) и жидкометаллическим (стенд 27/ВТ) теплоносителями. На каждом из стендов испытанию подлежали установки одного борта корабля в составе одного ЯР и одного ГТЗА с их вспомогательными механизмами и системами. Испытуемые стендовые установки должны были в максимальной степени приближаться к штатным корабельным. Оборудование установки другого борта, не испытываемое на стенде, в необходимой степени макетировалось.

В разработке проекта стенда 27/ВТ принимали участие сотрудники СКБ-143, ныне АО «СПМБМ «Малахит». Бюро выпустило рабочие чертежи, приняло участие в монтаже конструкции на стендовой площадке. Монтажные работы на стенде, длившиеся около четырех лет, были закончены в ноябре 1958 г. Основная причина задержки заключалась в несвоевременной поставке оборудования на стенд. В январе 1959 г. был загружен жидкометаллический сплав, а в марте этого же года стендовая установка вышла на 60% мощность. С 18 марта по июль 1960 г. шли основные испытания установки на мощности до 100% от номинальной. 22 июня 1960 г. начались ресурсные испытания ЯЭУ. Были проведены проверки надежности работы реактора и ЯЭУ. Испытания подтвердили хорошие маневренные свойства при устойчивой работе всех узлов и механизмов. В результате проведенных стендовых испытаний опытной ЯЭУ в дальнейшем был внесен ряд изменений в ЯЭУ для АПЛ пр. 645. В качестве теплоносителя отечественные физики выбрали эвтектический сплав свинецвисмут, который хотя и уступал натрию по теплофизическим свойствам, но был значительно менее химически активен и опасен в случае аварии.

Значительно отличались друг от друга парогенераторы этих двух установок. Использование в первом контуре ППУ типа ВИ более низкого давления, чем во втором, исключало распространение радиоактивности при нарушении плотности парогенераторов.

Кроме того, предусматривался доступ к трубным поверхностям парогенераторов для глушения отдельных трубок в случае выхода их из строя. Таким образом решалась проблема, которая в начальный период эксплуатации стала бичом ПЛ первого поколения, имевших водоводяные реакторы.

Но использование жидкометаллического теплоносителя имело и свою обратную сторону. При эксплуатации ПЛ необходимо было постоянно поддерживать сплав в жидком разогретом состоянии. Во избежание его замораживания установка не могла быть просто заглушена (остановлена), как это делалось на ПЛ с водо-водяными реакторами. Придя в базу, АПЛ должна была подключиться к базовой системе парового обогрева первого контура, и только после этого реактор мог быть заглушен. Это значительно усложняло и удорожало систему базирования.

Кроме того, поскольку часть оборудования ППУ все же оставалась в работе даже в базе, происходило расходование моторесурса корабельных механизмов.

В октябре 1955 г. Совет Министров СССР принял постановление о разработке опытной АПЛ пр. 645 с жидкометаллической ППУ типа ВИ. В общетехническом плане АПЛ пр. 645 сохраняла родство с первой АПЛ и, по существу, являлась модификацией проекта 627. Поэтому работы по ее проектированию начались в СКБ-143 сразу со стадии технического проекта. Главным конструктором АПЛ стал А. К. Назаров, которого в СКБ-143 пригласил начальник бюро и главный конструктор АПЛ пр. 627 В. Н. Перегудов, курировавший работы по АПЛ с жидкометаллической ЯЭУ на начальном этапе работ в 1952—1955 гг.

Согласно первоначальному замыслу предполагалось, что для большей сопоставимости жидкометаллическая и водяная ППУ будут иметь равную мощность и будут установлены на ПЛ одного проекта. Соответственно, разработка ППУ типа ВИ ориентировалась на размещение ее оборудования в реакторном отсеке АПЛ пр. 627. Сохранялась и единая структурная схема всей энергетической установки. Несмотря на большое внешнее сходство с серийными АПЛ пр. 627А, АПЛ пр. 645 отличалась по составу и размещению технических средств.

Разработка технического проекта 645 завершилась в 1956 г. По своим тактико-техническим элементам АПЛ пр. 645 была близка к серийным АПЛ пр. 627А. Не уступала она и АПЛ США «Сивулф», а по скорости хода и глубине погружения даже превосходила ее.

В течение следующего 1957 г. СКБ-143 разработало чертежи АПЛ, а в 1958 г. выпустило техническую документацию по проекту (кораблестроительные расчеты, инструкции по эксплуатации и т. д.), что позволило в сентябре 1957 г. приступить к строительству корабля на заводе № 402 в том же цехе № 42, что и АПЛ пр. 627 и 627А, под руководством главного строителя корабля А. А. Овчинникова.

Официальная церемония закладки будущей АПЛ состоялась 15 июня 1958 г. Первоначально намечалось сдать АПЛ флоту уже в конце 1960 г., однако задержка готовности паропроизводящей установки сдерживала постройку корабля. Дорабатывавшееся оборудование поступало с опозданием до 6—8 месяцев против плановых сроков. Полностью поставка оборудования ЯЭУ была завершена только в начале 1962 г. В результате спуск на воду АПЛ состоялся лишь 1 апреля 1962 г., а в мае начались швартовные испытания по проверке общекорабельных систем, механизмов и вооружения.

Параллельно велись работы по приготовлению к вводу в действие ЯЭУ корабля. Кульминация этого этапа наступала в начале декабря, когда установка приняла сплав, приготовленный и доведенный до необходимых кондиций на заводе № 402. После этого начался весьма ответственный период эксплуатации ППУ — принятый сплав требовал поддержания в разогретом состоянии и готовности к работе вспомогательных механизмов ЯЭУ. Вскоре были осуществлены физические пуски обоих реакторов. С первых дней нового 1963 года начались испытания главной энергетической установки, проводившиеся испытательной партией, ядро которой составили специалисты СКБ-143, ныне АО «СПМБМ «Малахит». При этом они непосредственно выполняли функции сдаточных операторов ЯЭУ и вспомогательных систем.

А летом 1963 г. АПЛ под командованием капитана 1 ранга И. И. Гуляева вышла в море на испытания. Для сокращения сроков сдачи АПЛ заводские и государственные испытания были совмещены. Принимала лодку специально назначенная Правительственная комиссия под председательством вице-адмирала Г. Н. Холостякова. На испытаниях АПЛ практически полностью подтвердила выполнение условий договорной сертификации. Выявленные недостатки и неисправности были оперативно устранены заводскими специалистами. 30 октября 1963 г. Правительственная комиссия подписала приемный Акт опытной АПЛ пр. 645 и рекомендовала применение ЯЭУ со сплавом свинец-висмут на АПЛ новых проектов, а качестве ближайшего шага предложила организовать длительный автономный поход АПЛ «К-27» с целью более глубокого изучения эксплуатационных качеств АПЛ и ее ЯЭУ. Только в период сдаточных испытаний АПЛ без особых осложнений прошла за 528 ходовых часов 5760 миль (в 1,5 раза больше, чем первая АПЛ с ВВР), из которых 3370 миль (59%) в подводном положении.

За успешное выполнение работ в 1964 г. главному конструктору АПЛ А.К. Назарову в составе группы создателей корабля и его ЯЭУ была присуждена Ленинская премия.

После сдачи АПЛ вошла в состав СФ и перешла к месту своего постоянного базирования, где построили специальную котельную, необходимую для поддержания в межпоходный период теплоносителя в разогретом состоянии.

Первый поход АПЛ носил испытательный характер. Предстояло проверить механизмы и технические средства корабля в работе в течение полной автономности в различных климатических зонах, определить оптимальные режимы использования ЯЭУ. Поэтому курс АПЛ был проложен в экваториальную часть Атлантики. Необычные задачи похода расширили состав экипажа. Кроме штатного личного состава в поход шли председатель Правительственной комиссии вице-адмирал Г. Н. Холостяков (руководитель похода), контр-адмирал И. Д. Дорофеев и другие представители флота, а также группа специалистов промышленности, в которую входили главный конструктор АПЛ А. К. Назаров и ведущий конструктор СКБ-143 Г. Д. Морозкин, возглавлявший при сдаче АПЛ испытательную партию энергетической установки.

АПЛ вышла в море 21 апреля и вернулась в базу через 51 сутки 11 июня 1964 года. За 1240 ходовых часов она прошла 12425 миль, из них 12278 миль (89%) — под водой. В походе энергетическая установка работала устойчиво во всех широтах, в том числе и в экваториальных, где температура воды доходила до плюс 25—27 градусов, и система охлаждения действовала на пределе своих возможностей. Результаты этого похода еще больше укрепили уверенность моряков в надежности и безопасности ППУ с жидкометаллическим теплоносителем.

В октябре 1965 г. АПЛ, совершив, как и АПЛ «Сивулф», 2 автономных похода и оставив за кормой более 44000 миль, вернулась для ремонта в Северодвинск. Предстояло также частично обновить электронное вооружение АПЛ. Из-за увеличения объема работ, не связанных с ЯЭУ, продолжительность ремонта значительно возросла.

В начале 1967 г. выполнили перегрузку активных зон, а летом установки вновь приняли сплав. Только в сентябре 1967 г., почти через 2 года после начала ремонта, АПЛ возвратилась в состав Северного флота и приступила к отработке задач боевой подготовки.

И тут началась цепь неудач, приведшая к трагедии. 13 октября, когда АПЛ находилась в море, произошел заброс сплава в газовую систему первого контура реактора правого борта. Его причиной стали отложения шлаков (окислов сплава свинец-висмут), закупорившие проход для теплоносителя, который стал поступать в газовую систему. В результате этой аварии два насоса оказались залитыми застывшим сплавом. Пришлось вывести из работы ППУ правого борта, прервать поход и вернуться в базу.

21 мая 1968 г. АПЛ вновь вышла в море для отработки задач боевой подготовки и испытаний ЯЭУ. 24 мая около 12:00 во время вывода установок на режим полного хода случилась авария с реактором левого борта. В результате нарушения теплоотвода от активной зоны произошли перегрев и разрушение тепловыделяющих элементов. Это привело к выносу радиоактивных продуктов в первый контур сплава и газовый контур, выбросу радиоактивного газа в реакторный отсек. Авария сопровождалась резким ростом гамма-излучения.

В 12:15 АПЛ всплыла в надводное положение. Реактор левого борта был заглушена, и последующий шестичасовой переход в базу совершался при работе реактора правого борта на обе турбины. Большинство участников похода получило значительные дозы облучения и было госпитализировано. Жизни 9 человек спасти не удалось.

В начале 1968 г. корабль обследовала специальная комиссия, которая пришла к выводу о необходимости проведения расхолаживания реакторов и замораживания сплава в реакторах обоих бортов. По существу, это был смертельный приговор АПЛ пр. 645 — после замораживания сплава ввести реакторы в действие становилось практически невозможным. Но комиссия пошла на этот вынужденный шаг из-за тяжелой радиационной обстановки, сохранявшейся на корабле. К 20 июня 1968 г. необходимые операции по расхолаживанию ППУ и замораживанию сплава завершились. Все механизмы ППУ были выведены из действия и законсервированы.

В мае 1981 г. АПЛ поставили в док северодвинского предприятия «Звездочка». Полости оборудования ППУ и ее трубопроводы были заполнены специальным составом, который после затвердевания предотвращал вымывание и выход из реактора радиоактивных материалов. Свободные объемы отсека и цистерну водо-свинцовой защиты заполнили битумом. Всего в отсек было залито 270 т битума, который полностью заполнил реакторы. Этим достигалось полное исключение попадания воды к загрязненному оборудованию и последующего заражения окружающей среды в месте затопления. Консервация реакторного отсека позволила довести уровень проникающего излучения на поверхности легкого корпуса до фоновых значений.

Для сохранения плавучести АПЛ во время буксировки через неспокойное Баренцево море 4 цистерны главного балласта заполнили вспененным полистиролом.

Все операции были выполнены предприятием «Звездочка» в течение лета, и вскоре АПЛ отправилась в свой последний путь. Силами ВМФ она была отбуксирована в Карское море и осенью 1981 г. затоплена у Новой Земли на глубине около 75 м.

Такова судьба АПЛ пр. 645 — корабля, открывшего нашему флоту дорогу к использованию паропроизводящих установок с жидкометаллическим теплоносителем. Несмотря на короткую жизнь и трагический финал, эта АПЛ выполнила возлагающиеся на нее задачи опытного корабля.

В отличие от американцев, не сумевших решить проблемы использования теплоносителя из щелочного металла, отечественная ППУ со сплавом «свинец-висмут» не только подтвердила свою работоспособность, но и доказала, что может успешно конкурировать по эксплуатационным качествам с водо-водяными установками.

Не менее знаменательной вехой подводного кораблестроения стали работы по проектированию титановой, комплексно-автоматизированной АПЛ пр. 705 (705К). Инициатива создания такой ПЛ принадлежит В. Н. Перегудову, А. П. Александрову и П. Г. Котову.

При разработке этого проекта был осуществлен качественный прорыв к более совершенным решениям в области кораблестроения, электромашиностроения, материаловедения, автоматизации процессами управления лодкой и всего электронного оборудования.

Осуществлен глубокий поиск более рациональных принципов и норм проектирования боевых лодок. Все это позволило создать относительно малую ПЛ с высокой боевой эффек-

тивностью. В её проекте был впервые реализован целый ряд революционных технических решений, в том числе:

- комплексная автоматизация управления работой всех технических средств на корабле в целом из единичного главного командного пункта;
- использована ядерная паропроизводящая установка с реактором, охлаждаемым жидкометаллическим теплоносителем, с прогрессивными массогабаритными параметрами;
- использована малогабаритная блочная паротурбинная установка;
- применены новые материалы корпуса;
- внедрена электроэнергетическая система с использованием переменного тока с повышенной частотой.

Для наземного прототипа ЯЭУ подводной лодки пр. 705 на основании постановлений Правительства был создан стенд КМ-1. СКБ-143 было привлечено к участию в проектировании стенда. По техническому заданию ИАЭ, утвержденному ГКАЭ и ФЭИ, СКБ-143 выполнило технический проект прототипа кормовой части АПЛ, включающей ЯЭУ.

В целом монтаж стенда КМ-1 был завершен в 1969 г., в декабре 1977 г. на стенде был осуществлен «холодный», а в марте 1978 г. – «горячий» физический пуск ЯЭУ. Комплексные сдаточные испытания закончились в июне 1978 г. Во время комплексных испытаний впервые был осуществлен выход реактора на 100% мощность и проверена устойчивость работы ЯЭУ на этом уровне мощности.

ЯЭУ эксплуатировалась одну кампанию с 1978 г. по 1986 г. В настоящее время ЯЭУ находится на этапе вывода из эксплуатации с последующей реконструкцией для размещения перспективной установки типа AMБ-8KM1 с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. В настоящее время ведутся проектные работы.

Технический проект ПЛ пр. 705 был разработан в 1963 г. Построенная на «Судомехе» (ныне АО «Адмиралтейские верфи») опытная лодка прошла ходовые испытания и в 1971 г. была передана флоту в опытную эксплуатацию.

Пр. 705 намного опередил свое время и проложил путь для дальнейшего совершенствования ПЛ следующих поколений.

Главным конструктором был назначен талантливый конструктор М. Г. Русанов. В 1974 г. его сменил на этом посту В. В. Ромин.

Постройка серии была завершена в 1992 г. АПЛ строились на двух заводах: «Адмиралтейские верфи (4 ед.) и ПО «Севмаш» (3 ед.).

На счёт лодок этих проектов занесены успешные походы в различные точки Мирового океана. И всё же сложность их техники, серьезные трудности по обеспечению базирования, связанные с требованием постоянного поддержания первого контура в горячем состоянии, а также сложность выполнение специальных операций по предотвращению окисления сплава, контролю за его состоянием и периодической регенерацией (удаление окислов) создало пред-посылки к решению о выводе этих лодок из боевого состава ВМФ.

Кроме проектов АПЛ с ЖМТ в АО «СПМБМ «Малахит» в 2008 году в инициативном порядке совместно с АО «ОКБ «Гидропресс» и ФГУП «ГНЦ РФ—ФЭИ» был выполнен аванпроект атомной теплоэлектростанции на базе плавучего энергоблока с РУ СВБР-75/100 с ЖМТ для г. Вилючинск с обоснованием пункта размещения АТЭС, основных технологических решений, обоснованием безопасности, охраны окружающей среды и экономического обоснования проекта. Полное водоизмещение ПЭБ — 8000 т.

В настоящее время АО «СПМБМ «Малахит» не отказалось от рассмотрения энергетической установки с ЖМТ в своих перспективных разработках, в том числе в обеспечение объектов гражданской энергетики.





ПЕРВЫЙ В МИРЕ РЕАКТОР С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ СВИНЕЦ-ВИСМУТ СТЕНД 27/ВТ. КАК ВСЁ НАЧИНАЛОСЬ

Г.И. Тошинский (toshinsky@ippe.ru) АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

5-я Международная конференция «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2018) 8 – 10 октября 2018 года, Обнинск, Россия



Введение

- 1 Основные научно-технические проблемы, решенные в ходе освоения РУ с СВТ, в том числе на стенде 27/ВТ
- 2 Инциденты и аварии на стенде 27/ВТ.
 - «Опыт сын ошибок трудных»

Заключение

Введение (1)

- Шестьдесят лет назад, 25 декабря 1958 года в ГНЦ РФ-ФЭИ на стенде 27/ВТ был осуществлен физический пуск первого в мире реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ). Это был наземный стенд-прототип ядерной энергетической установки (ЯЭУ) первой атомной опытной подводной лодки 645-го проекта (К-27) с двумя реакторами на свинце-висмуте (разработчики реакторной установки (РУ): ФЭИ – научный руководитель, ОКБ «Гидропресс» – главный конструктор).
- Работы по созданию ЯЭУ для АПЛ в Советском Союзе, так же как и в США, были развернуты в двух направлениях: водо-водяные реакторы и реакторы с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ).
 В отличие от США, где в качестве ЖМТ был выбран натрий, не оправдавший себя в условиях эксплуатации ЯЭУ АПЛ, реакторы с СВТ после ряда трудностей и неудач были освоены и успешно эксплуатировались на серийных АПЛ проектов 705(705К).

Введение (2)

 Разработка РУ с СВТ велась в условиях отсутствия необходимых знаний и опыта, а также жестких директивных сроков завершения работ, практически исключавших возможность проведения сопутствующих научных исследований. Это стало причиной многих неудач на этапе освоения данной технологии.

1 Основные научно-технические проблемы, решенные в ходе освоения РУ с СВТ *1.1 Технология СВТ (1)*

- Важность этой проблемы была понята после аварии реактора на первой опытной АПЛ проекта 645 (1968 г.).
- Соответствующие методы и устройства были разработаны еще позднее, когда завершалось строительство запланированной серии АПЛ проектов 705 и 705К.
- Поэтому разместить необходимые устройства как штатные в составе РУ не удалось. Часть устройств была скомпонована в базовой установке, требовавшей один раз в год подключения к РУ.

1.1 Технология СВТ (2)

- В период разработки мероприятий по очистке теплоносителя возникло предположение, что нужно научиться чистить как можно лучше. И эта цель была достигнута. Но когда стали проводить коррозионные испытания при температурах оболочки твэлов около 600°С, появились какие-то непонятные результаты. В одном случае образцы трубок диаметром 12×0,4 мм просто растворялись, их не находили в теплоносителе. В других опытах — стоят 1000 часов, 2000 часов без следов коррозии. Это было совершенно непонятно.
- Разработка высокотемпературной водородной регенерации СВТ и первого контура для очистки от оксидных отложений (шлаков), обоснованной Ю. И. Орловым, была очень большой победой, потому что забивание окислами активной зоны было главной причиной аварии на АПЛ К-27 и плохой работы стенда 27/ВТ во второй кампании после длительных работ по модернизации РУ с разгерметизированным первым контуром.

1.1 Технология СВТ (3)

- Это ставило всех в тупик. У Александра Ильича в течение двух трех лет проводились непрерывные совещания для выяснения причины этих непонятных явлений до тех пор, пока М. Н. Ивановский и Б. А. Шматко не придумали прибор, который позволяет измерять концентрацию растворенного кислорода в теплоносителе.
- Как потом выяснилось, кислород присутствует в теплоносителе в двух формах — активной и пассивной. Пассивный кислород – это тот, который присутствует в теплоносителе в виде оксидов железа Fe₃O₄, термодинамически стойкого химического соединения.
- Какая-то примесь железа в теплоносителе всегда есть, кислород очень хорошо удаляется из свинца-висмута железом,
- и образует суспендированные частицы связанного кислорода.

1.1 Технология СВТ (4)

- Прибор, который был придуман, стал называться «активометр», или датчик термодинамической активности кислорода. Он давал на выходе разность потенциалов в зависимости от концентрации активного, растворенного кислорода. Когда на стендах были внедрены эти приборы, все стало понятно. Активный кислород был отделен от пассивного, концентрацию которого нужно поддерживать в определенном диапазоне. С тех пор технология СВТ получила научное обоснование.
- Теперь надо было научиться поддерживать концентрацию растворенного кислорода при эксплуатации в нужных пределах. Нужно не допускать окисления, контур должен быть герметичным, газ чистым. Тогда не придется проводить высокотемпературную водородную регенерацию для удаления избыточного кислорода, который будет образовывать окислы свинца, шлаки, выпадающие в виде твердой фазы в холодных частях контура, забивающие трубы.

1.1 Технология СВТ (5)

 С другой стороны, кислород нужно поддерживать в нужном интервале и при очень низкой концентрации добавлять, чтобы поддерживать стабильное состояние защитных оксидных пленок.
 Поэтому на лодках раз в год в газовую систему подавалось 100 г воздуха – или кислорода, это неважно – на контур, в котором около 50 тонн теплоносителя. Измерялась термодинамическая активность, потом лишний кислород удалялся с помощью водородной регенерации.

 Позднее П. Н. Мартыновым были разработаны массообменные аппараты, которые позволяют в автоматическом режиме по сигналу от активометра поддерживать концентрацию растворенного кислорода на требуемом уровне, и фильтры для удаления нерастворимых и не восстанавливаемых водородом примесей.

1.1 Технология СВТ (6)

 Позднее П. Н. Мартыновым были разработаны массообменные аппараты, которые позволяют в автоматическом режиме по сигналу от активометра поддерживать концентрацию растворенного кислорода на требуемом уровне, и фильтры для удаления нерастворимых и не восстанавливаемых водородом примесей.

Результаты освоения технологии СВТ



Слева до очистки, справа после очистки (водородная очистка трубопровода насосного стенда в 1980 году.

Отсутствие коррозии стали ЭП-823Ш (оболочка твэла) после испытаний в СВТ при 600 °С в течение 50000 часов.

1.2 Обеспечение радиационной безопасности при работах, связанных с загрязнением воздуха и поверхностей оборудования полонием-210 (1)

- Спецификой СВТ является образование в нем альфа-активного радионуклида полония-210 с периодом полураспада ~138 суток при облучении нейтронами висмута. Радиологическая опасность теплоносителя проявляется при попадании СВТ или контактирующего с ним газа в обслуживаемые помещения, что имело место при авариях и ремонтах РУ атомных подводных лодок и наземных стендов-прототипов в период их освоения.
- Как показал опыт эксплуатации РУ на АПЛ, выход аэрозолей полония и радиоактивность воздуха в соответствии с законами термодинамики резко уменьшаются после снижения температуры и затвердевания пролитого сплава. Быстрое затвердевание пролитого СВТ ограничивает площадь радиоактивного загрязнения и позволяет удалять пролитый СВТ в виде твердого радиоактивного отхода.

1.2 Обеспечение радиационной безопасности при работах, связанных с загрязнением воздуха и поверхностей оборудования полонием-210 (2)

- Весь персонал, участвовавший в работах, подвергался периодическим медицинским обследованиям, и на основе многочисленных радиометрических анализов биопроб персонала (как военного, так и гражданского) было объективно установлено отсутствие случаев наличия инкорпорированного полония в организме людей выше допустимых пределов.
- Это подтверждает высокую эффективность применявшихся средств индивидуальной и коллективной защиты, правильность выбора технологии и организации ремонтно-восстановительных работ. Этому также способствовали сравнительно быстрое выведение полония из организма в результате обменных процессов (эффективный период полувыведения составляет около 30 суток) и очень низкая молярная концентрация полония в теплоносителе, соответственно, снижающая его летучесть в сравнении с чистым полонием.

1.3 «Замораживание-размораживание» СВТ в РУ (1)

 Важной практической проблемой явилось обоснование возможности многократного «замораживания-размораживания» РУ с СВТ, что могло потребоваться при длительных стоянках АПЛ. Отсутствие изменения объёма СВТ при плавлении/затвердевании и достаточно высокая пластичность при низкой прочности в твердом состоянии позволили исключить повреждения РУ при переходе СВТ из жидкого в твердое состояние и при дальнейшем его охлаждении до температуры окружающей среды.

 Для безопасного «размораживания» СВТ ОКБ «Гидропресс» был отработан специальный регламент температурно-временного режима разогрева, проверенный на крупномасштабных моделях и на РУ правого борта АПЛ проекта 645 после ее длительного пребывания в «замороженном» состоянии. Однако этот режим не был внедрён в практику в связи с принятым в середине 90-х годов решением о прекращении дальнейшей эксплуатации АПЛ этого типа.

1.3 «Замораживание-размораживание» СВТ в РУ (2)

 Нужно сказать, что свойство CBT затвердевать при 123,5 °C в некоторых случаях играло и положительную роль. Например, при хранении выгруженной активной зоны в баке с «замороженным» CBT формируется дополнительный защитный барьер на пути выхода радиоактивности в окружающую среду.

1.4 Обеспечение высокой надёжности парогенераторов

- Первые модификации парогенераторов РУ с СВТ для АПЛ, как и РУ с водо-водяными реакторами (ВВР), не отличались высокой надёжностью. Однако лодки с СВТ и с текущими парогенераторами выходили в море и нормально возвращались. Пар, попадающий в первый контур, барботировал через теплоноситель и конденсировался в аварийном конденсаторе газовой системы.
 Этот радиоактивный конденсат сбрасывался в море.
- Низкая надежность первого поколения ПГ была связана с выбором материала трубной системы ПГ, которые менялись по мере накопления опыта.

 Были также отработаны технология надёжной заделки трубок в трубные доски (пройден путь от механической развальцовки с герметизацией сваркой к вальцовке взрывом и далее к гидравлической вальцовке с электроннолучевой сваркой), и конструкция узла дистанционирования трубок в пучке, которая потребовала глубокой модернизации.

2 Инциденты и аварии на стенде 27/ВТ. «Опыт – сын ошибок трудных»

2.1 Сборка активной зоны, роль молотка (1)

 Конструкция активной зоны этого реактора была рассыпной.
 Т. е. активная зона была бескассетная. Это был просто комплект стержневых твэлов диаметром 12 мм. Для следующих активных зон твэлы стали объединять в пучки — шестигранные тепловыделяющие сборки, это было гораздо удобнее для сборки активной зоны.

 Как технологи ни старались сделать эти твэлы прямыми, все равно какая-то кривизна была, стрела прогиба была 1–1,5 мм. Сборка активной зоны осуществлялась в горизонтальном положении снизу выемной части реактора при снятой крышке корзины. Для этого выемная часть реактора вставлялась в специальный кантователь устройство, которое позволяло ее поворачивать в горизонтальное положение.

2.1 Сборка активной зоны, роль молотка (2)

 Началась горизонтальная укладка твэлов. Уложили нижний ряд твэлов, пробки касаются друг друга плотно, одна к одной. Второй ряд уложили, третий – все шло хорошо. Но когда дошли до последнего верхнего ряда — может быть, двух рядов, — то из-за того, что накапливались прогибы, оказалось, что свободного места для установки твэлов мало, последние твэлы не лезут.

 Всю ответственность за последующие события взял на себя главный инженер института Д. М. Овечкин, подполковник МВД, решительный человек. Он, к ужасу конструктора-технолога твэла Малыха, после вставления твэла руками, насколько он туда входил, забивал их киянкой. Что будет потом, никто не мог предсказать треснут сварные швы или не треснут. Твэлы он туда забил. Последующая эксплуатация показала, что твэлы герметичность не потеряли.

2.2 Первое «замораживание» (1)

- Закончился монтаж, включили систему обогрева и начали готовиться к приему свинца-висмута в реактор. Вскоре после начала заполнения реактора сплав перестал идти из монжюса. Значит, сплав где-то «замерз», образовался «козел». А все термопары показывают, что все прогрето. Главный инженер реактора К. И. Карих понял, что произошло.
- На стенде 27/ВТ корпус реактора имел систему обогрева просто в виде паровой рубашки. В этот защитный кожух подавался пар, а конденсат отводился по другой трубке, одна сверху — подача пара, другая снизу — отвод конденсата, и шел прогрев корпуса. На всех остальных реакторах пар подавался не в рубашку, а в змеевик обогрева, а рубашка играла просто защитную роль от механических повреждений. Клапан подачи пара в рубашку не имел полной герметичности, а давления пара перед клапаном уже было.

2.2 Первое «замораживание» (2)

- Пока реактор был холодным, пар потихоньку протекал через эту негерметичность. Расход пара был очень маленький, а корпус холодный, пар в рубашке конденсировался, и вся рубашка оказалась заполненной холодным конденсатом. Поэтому, когда первая порция сплава прошла и попала в холодное место, сплав затвердел. Карих приказал полностью открыть все сбросные клапана из паровой рубашки и через какое-то время давлением пара этот конденсат оттуда выдавило, и только тогда начался прогрев.
- Все, конечно, очень боялись, что затвердевание сплава вызовет такие напряжения в конструкциях, которые их поломают — у всех в голове были батареи отопления: когда зимой прекращается подача тепла, надо их дренировать, иначе их разорвет образующимся льдом. Отсюда возникло, как сегодня ясно, неоправданное требование — держать всегда первый контур в жидком состоянии. Но все закончилось благополучно.

2.3 Течи теплоносителя (1)

• Одной из серьезных проблем, возникших вскоре после начала эксплуатации, были течи теплоносителя первого контура. Течь идентифицируется очень легко, потому что контур при работе циркуляционных насосов заполнен теплоносителем, и снижение уровня CBT в буферной емкости при постоянном температурном режиме говорит об утечке теплоносителя.

В буферной емкости размещены насосы возврата протечек (НВП), • которые создают противокавитационный подпор на всасе главного и вспомогательного циркуляционных насосов. Расход СВТ, создаваемый НВП, подается в щелевые уплотнения валов главного и вспомогательного насосов (это вертикальные насосы, которые имели масляные уплотнения валов по гелию, исключающие попадание воздуха в газовую систему первого контура и выход радиоактивного газа в воздух отсека). Из щелевых уплотнений теплоноситель свободным сливом по трубопроводам слива протечек самотеком идет в буферную емкость, куда также поступает теплоноситель по трубопроводам воздушников ПГ.

2.3 Течи теплоносителя (2)

- Таким образом, в РУ, кроме основного контура циркуляции СВТ, • есть вспомогательный контур слива и возврата протечек. Насос возврата протечек создает расход около 15 м³ в час при давлении около 15 атмосфер. Когда контур герметичен, течи нет, – уровень СВТ в буферной емкости постоянный, он реагирует только на температурные изменения. Так вот, при работе на постоянной мощности медленно стал снижаться уровень. Сначала, как всегда, не хотели видеть худшее, думали, может быть, уровнемер врет, переключили на второй, и по второму то же самое, показывает снижение уровня, – деваться некуда, значит надо останавливаться, искать эту течь, иначе установка работать не сможет.
- Так и было сделано мощность снижена, реактор остановлен.
 Начались работы по разборке защиты, герметичного ограждения, потому что в герметичной выгородке поддерживалось небольшое разрежение, чтобы не выходила радиоактивность в обитаемую часть отсека.

2.3 Течи теплоносителя (3)

- Проникли в тот объем, который в трюме это же лодочный отсек
 и увидели на дне отсека большую лужу уже затвердевшего
 свинца-висмута. Нужно было искать, откуда течет, причины
 определять, какие-то мероприятия разрабатывать, чтобы в будущем
 этого не происходило на лодках, потому что это была первая
 установка, а лодки уже стояли на стапелях.
- Доступ в этот объем по радиационной обстановке буквально через • два — три дня был возможен без переоблучения, потому что свинецвисмут сам имеет очень маленькую наведенную гамма-активность, обусловленную только примесями, в основном марганцем. Поэтому можно было длительно работать. Естественно, по полонию воздух был загрязнен, персонал работал в спецодежде, в респираторах. Стали осматривать вспомогательные трубопроводы, а их там много – подача теплоносителя от насоса возврата протечек в первый контур, слив теплоносителя назад, дренажные трубопроводы, воздушники, это все небольшого диаметра трубы.

2.3 Течи теплоносителя (4)

- Они все были опутаны трубками-спутниками парового обогрева.
 Такое решение было принято для поддержания теплоносителя
 в жидком состоянии на трубопровод накладывались две трубки
 парового обогрева малого диаметра, снаружи все теплоизолировалось.
- Когда разобрали теплоизоляцию, отрезали и сняли все эти трубкиспутники и добрались до труб теплоносителя, то увидели, что на ряде трубопроводов имеется сетка коррозионных трещин под углом 45 градусов. Все трубы первого контура были из аустенитной нержавеющей стали, считалось, что она самая коррозионностойкая.
- Все эти вспомогательные трубопроводы изнутри со стороны сплава не могли корродировать, потому что температура протекающего по ним СВТ была 250°С, при этой температуре коррозия не идет. Когда на эти трубы посмотрели материаловеды, они сразу сказали — это типичная картина коррозионного растрескивания аустенитных сталей под воздействием хлоридов и кислорода.

2.3 Течи теплоносителя (5)

- Кислород в герметичной выгородке есть, потому что там воздух.
 А откуда хлориды? Эти установки создавались быстро, в сжатые сроки. В качестве теплоизоляции применили ту, которая используется в теплоэнергетике, в котельной технике. Когда сделали химический анализ этой теплоизоляции, оказалось, что там есть хлориды натрия и магния. Если она сухая и горячая никаких проблем нет. Чтобы шла коррозия, нужны ионы хлора, т. е. надо, чтобы эти соли растворились.
- Исследование трубопроводов парового обогрева показало следующее. В отсеке очень затесненные условия и контролировать сварные швы сложно, нужно рентгеновскую пленку положить, нужно место для аппарата и т. д. Все сварные швы по первому контуру были очень хорошо рентгеном проконтролированы. А к сварным швам труб парового обогрева отношение было другое — казалось, можно было бы и не подвергать их рентгеновскому контролю.

2.3 Течи теплоносителя (6)

 И оказалось, что некоторые трубки парового обогрева имели течь по пару. А в этом же объёме были и холодные поверхности, некоторое оборудование охлаждалось водой. И пар, который медленно туда попадал, конденсировался где-то сверху, на холодных поверхностях, а капли конденсата падали вниз, на теплоизоляцию, насыщались там хлоридами, и эта вода с хлоридами капала на трубопроводы. Причина стала ясна.

 То же самое произошло позднее на опытной АПЛ проекта 705 (заказ 900). Но сделать уже ничего было нельзя. АПЛ уже стояла на стапеле со смонтированным реакторным отсеком. Иначе надо было бы демонтировать РУ. Поэтому у всех сразу возник вопрос а что же будет на АПЛ? И все поняли, что если там будет попадать пар, то произойдет то же самое. Это и послужило причиной досрочного прекращения эксплуатации АПЛ заказа 900.

2.3 Течи теплоносителя (7)

- Почему в теплоэнергетике эта теплоизоляция применяется, хотя она и мокрой может быть – потому что там черные стали, углеродистые, а эти стали подвергаются общей коррозии – ржавлению, а коррозионного растрескивания в присутствии хлоридов и кислорода у углеродистых сталей нет. Поэтому там прекрасно работала эта теплоизоляция. Т. е. перенос опыта теплоэнергетики, без учета различий используемых материалов, оказался некорректным.
- В ходе ремонтно-восстановительных работ на стенде 27/ВТ была проведена замена поврежденных трубопроводов и ньювелевой теплоизоляции на асбестовую с нормированным содержанием хлоридов. На трубках парового обогрева стали контролировать каждый шов, это было трудно, долго, но проблема была решена.
- Повторные пуски установки показали, что в ходе проведения ремонта были заменены не все трубопроводы, пораженные хлорной коррозией. Это обстоятельство потребовало полной реконструкции системы вспомогательных трубопроводов первого контура.

2.3 Течи теплоносителя (8)

- Полностью ремонтные работы и ликвидация последствий течи системы первого контура были завершены только к средине марта 1960 г., т. е. потребовали для своего проведения около года.
- Реакторная установка дальше эксплуатировалась без проблем по коррозии с наружной стороны. Были сделаны рекомендации для лодок.
- По поводу этой аварии академик А. П. Александров (руководитель всех работ по АПЛ в СССР) сказал – эта авария, этот опыт нам очень помог. В то время уже шел монтаж реакторной установки атомного ледокола «Ленин», и там была эта же самая теплоизоляция.
 На основании этого опыта все там было обновлено, была небольшая задержка, но была поставлена теплоизоляция без хлоридов.

2.4 Выброс полония (1)

 В ходе работ по замене труб началась вторая эпопея. Это был первый опыт сварочных работ на трубопроводах, внутри которых протекал теплоноситель, содержащий полоний. Не было предпринято никаких особых мер, кроме защиты с помощью респиратора органов дыхания сварщика, поставили раструб в вытяжную вентиляцию, чтобы «грязный» воздух не выходил в центральный зал, сварщик начал варить. Через несколько минут зазвонила вся дозиметрическая сигнализация в центральном зале.

 Прибежали дозиметристы, все работы немедленно остановили, так как в воздухе центрального зала было зафиксировано загрязнение воздуха на уровне 14000 предельно допустимых концентраций по аэрозолям полония. Собралось совещание у Лейпунского, главный инженер Овечкин произнес – «это последний гвоздь в крышку гроба этого направления», что не подтвердилось. В дальнейшем он заслуженно получил Государственную премию в числе других награжденных.

2.4 Выброс полония (2)

- Причину поняли: когда ведутся огневые работы, даже невидимая глазу пленка, загрязненность поверхности, содержащая полоний, полоний моментально возгоняется. Была разработана инструкция, что сначала надо «в холодную» все зачистить до блеска, потом тампоном со спиртом все протереть и высушить, потом взять мазок и отдать дозиметристам и только по разрешению дозиметриста, что альфа-активность в допустимых пределах, можно варить.
- Когда стали это все соблюдать, дозиметрическая обстановка стала нормальной, и все новые вспомогательные трубопроводы первого контура были сварены.
2.4 Выброс полония (3)

- По здоровью людей это не имело никаких последствий, потому что аэрозоли полония короткоживущие, они очень быстро осаждаются на стенах, на полу, т. е. происходит самоочистка воздуха. Через сутки на стенах еще что-то мазалось, а в воздухе уже ничего не было. Однако в то время работали в своей одежде, в своей обуви, уходили, приходили.
- Стало ясно, что люди, проводившие эти работы, вышли из здания, загрязненные полонием, и по их следам пошли дозиметристы.
 Как с миноискателями. У них очень чувствительные приборы, шли по дорожке, через проходную, дошли до квартиры, звонок – дайте-ка сюда ботиночки. «Грязные», – обувь в мешок, и все, до свидания.
 Такой был эпизод освоения этой технологии.

2.5 Инциденты на оборудовании второго контура (1)

• В любой паротурбинной установке есть байпасный трубопровод свежего пара с клапаном травления. Если турбина по каким-то причинам не может принимать пар, должен открываться клапан травления и по трубопроводу пар должен идти мимо турбины, прямо в конденсатор.

 Чтобы эта операция проходила гладко, без повышения давления и без срабатывания предохранительных клапанов сброса пара в атмосферу, на стенде 27/ВТ было механическое устройство, которое обеспечивало открытие клапана травления – сброса пара на конденсатор – когда закрывался клапан, пускающий пар на турбину (маневровый клапан), т. е. просто переключался поток пара. При этом в поток пара, поступающий в конденсатор, осуществлялся впрыск воды для снижения температуры и давления пара в конденсаторе.

2.5 Инциденты на оборудовании второго контура (2)

 Но в этом устройстве было предусмотрено ручное отключение блокировки, которое использовалось в процессе наладки, а во время работы на мощности все должно было работать так — один клапан открывается, другой закрывается. Во время работы на мощности, конечно, клапан травления закрыт, иначе это байпас, холостая потеря мощности, так как часть пара идет мимо турбины.

 Однако по невыясненным причинам оказалось, что во время работы на мощности эта блокировка была снята, и клапаны управлялись независимо. Т. е. исходное состояние — клапан подачи пара на турбину открыт, а клапан сброса на конденсатор закрыт.
 Что-то произошло с турбиной, — там много сигналов, защищающих турбину от превышения числа оборотов, еще есть гидротормоз, моделирующий нагрузку на гребной винт АПЛ и др., — и клапан подачи пара на турбину захлопнулся, а клапан сброса пара на конденсатор не открылся из-за того, что снята была эта блокировка.

2.6 Инциденты на оборудовании второго контура (3)

- Мощность реактора была около 60% от номинальной. В первый момент, когда захлопнулся клапан подачи пара на турбину резко возросло давление пара.
- На всех реализованных РУ с СВТ парогенератор по второму контуру разделен на две части. В испарителе насосы многократной принудительной циркуляции (МПЦ) прокачивают котловую воду.
 На выходе образуется пароводяная смесь, поступающая в сепаратор, где она разделяется на сухой насыщенный пар и воду при температуре кипения (сепарат). В пароперегревателе насыщенный пар перегревается.
- Когда выросло давление пара, еще до срабатывания предохранительных клапанов, выросла температура кипения воды, и резко ухудшился теплоотвод в испарителе, потому что он осуществлялся в основном кипящей водой, за счет скрытой теплоты парообразования. Потом уже сработали предохранительные клапаны.

2.7 Инциденты на оборудовании второго контура (4)

 В результате ухудшения отвода тепла в ПГ резко возросла температура СВТ на выходе из реактора, что с некоторым запаздыванием вызвало срабатывание аварийной защиты (АЗ) реактора.

 Кроме самописца, который регистрировал давление пара, был самописец, который записывал температуры теплоносителя и на входе в реактор, и на выходе. На ленте этого самописца было видно, что почти мгновенно за 1–2 секунды температура CBT на выходе реактора возросла на 100 градусов, а затем стала снижаться после срабатывания АЗ.

 Но все, тем не менее, обошлось без повреждений. Если бы теплоноситель первого контура имел высокий коэффициент объемного расширения, как вода, то был бы такой бросок давления в первом контуре, который мог бы привести к повреждению контура, — таковы природные свойства теплоносителей.

2.8 Первая эпопея с течами парогенератора (1)

- Создание лодочных РУ с теплоносителем свинец-висмут потребовало разработки для них целого ряда механизмов и оборудования, отличных от применявшихся в РУ с другими теплоносителями.
- К такому оборудованию относились и ПГ с многократнопринудительной циркуляцией воды по второму контуру, обеспечивавшие выработку перегретого пара.
- Первые РУ с СВТ стенд-прототип 27/ВТ и АПЛ проекта 645 были оснащены однотипными ПГ, соответственно, МП-1 и МП-2, имевшими, как показала их эксплуатация, ряд конструктивных недостатков, что было обусловлено отсутствием опыта разработки такого оборудования.

2.8 Первая эпопея с течами парогенератора (2)

 Каждая из трех секций МП-1, как и аналогичные им секции МП-2, изготавливались из нержавеющей стали аустенитного класса и представляли собой цилиндрический корпус со сферическим днищем и приваренной сверху трубной доской.

 Поверхность теплообмена была выполнена в виде пучка Uобразных трубок с развальцовкой и обваркой их свободных концов в трубной доске. СВТ прокачивался по межтрубному пространству, а пар и вода – по трубкам. Для организации требуемого направления движения теплоносителя вдоль труб внутри корпуса ПГ имелась цилиндрическая перегородка. С ее помощью межтрубное пространство делилось на полость испарителя и перегревателя.

 СВТ из реактора поступал в наружную кольцевую полость межтрубного пространства и опускался в нижнюю ее часть, омывая трубки перегревателя, после чего поднимался вверх по внутренней цилиндрической полости ПГ, в которой размещались трубки испарителя, и после выхода из ПГ направлялся на всас насоса первого контура.

2.8 Первая эпопея с течами парогенератора (3)

- Трубки испарителя и перегревателя дистанционировались специальными решетками из стальных пластин. На трубной доске располагалась цилиндрическая обечайка с пароводяными камерами, которые закрывались промежуточной и силовой крышками с уплотняющими прокладками. Наличие съемных крышек обеспечивало возможность свободного доступа к трубной доске для обнаружения и глушения негерметичных трубок.
- Эксплуатация обеих РУ сопровождалась частыми случаями нарушения межконтурной герметичности в местах заделки трубок в трубной доске ПГ, что было связано с большой температурной неравномерностью в трубной доске, вызванной совмещением перегревателя и испарителя в одном корпусе, и неотработанностью технологии герметизации трубных пучков в трубных досках.

2.8 Первая эпопея с течами парогенератора (4)

- Значение течи в отдельных случаях достигало 120-150 кг/сутки.
 Технологические схемы первых контуров всех РУ АПЛ с СВТ и их прототипов обеспечивали возможность определения текущей секции ПГ любой петли теплообмена реактора.
- Восстановление герметичности трубной системы на выведенной из работы секции ПГ достигалось установкой заглушек в текущую трубку со стороны входа и выхода пара/воды и их обваркой в трубной доске. Такой ремонт не вызывал особых трудностей, так как температура трубной доски не была выше 160-180 °C, и на АПЛ проекта 645 выполнялся даже при нахождении лодки в море, для чего на борт лодки брался сварщик с завода.
- Частая течь трубной системы испарителей всех трех секций ПГ стенда 27/ВТ по заделке трубок в трубной доске приводила к необходимости прекращения испытаний для проведения ремонтных работ, а также и к забросу СВТ в полость второго контура ПГ в случаях неправильных действий персонала при поисках течи. Это требовало удаления СВТ и последующей дезактивации.

2.9 Выгрузка топлива (1)

- Операция выгрузки топлива, когда активную зону вынимают целиком, проводилась впервые. ОКБ «Гидропресс» разработало защитный перегрузочный скафандр. В нем была лебедка с электромотором, которая втягивала выемную часть реактора вместе с активной зоной.
- Отвод остаточного тепловыделения производился воздухом, для чего в верхней части скафандра были предусмотрены гофрированные гибкие резинометаллические шланги, подключенные к коробу вытяжной спецвентиляции. Чистый воздух снизу засасывался в скафандр и охлаждал активную зону. Кран скафандр поднял скафандр, перенес его на то место в центральном зале, где размещено хранилище, лебедка опустила выемную часть в хранилище, скафандр поставили на место и закрыли крышку хранилища. Там тоже была система охлаждения.
- Поскольку этот скафандр был открыт снизу для входа охлаждающего воздуха, все понимали, что теплоноситель будет капать на пол в процессе транспортировки скафандра.

2.9 Выгрузка топлива (2)

- Поэтому перед транспортировкой скафандра краном дали выдержку около 30 минут для стекания основной массы сплава с выемной части в корпус реактора, а по маршруту движения скафандра был развернут рулон пластиката, чтобы не загрязнить пол. Все капли свинца-висмута, упавшие на пластикат (визуально не более стакана), собрали и вместе с рулоном сбросили в хранилище твердых отходов. Через три года там уже практически не осталось полония.
- Вся процедура выгрузки прошла гладко, хотя опасения были.
 Опасения были связаны с тем, что феррито-мартенситная сталь оболочки твэлов под действием быстрых нейтронов в нижней «холодной» части активной зоны охрупчивается. Поэтому материаловеды предложили восстановить пластичность стали ЭИ-852 (более совершенная сталь ЭП-823Ш была освоена значительно позднее) путем проведения высокотемпературного отжига радиационных дефектов. Сегодня такой отжиг проводится периодически на всех корпусах реакторов ВВЭР, так как они тоже охрупчиваются, но тогда это делалось впервые.

2.9 Выгрузка топлива (3)

- Для этого были открыты перепускные клапаны в обечайке выемной части реактора, которые обеспечивают короткое замыкание потока теплоносителя внутри реактора – горячий теплоноситель из активной зоны идет вверх, и, если открыт клапан, он попадает в опускной участок, где размещены каналы расхолаживания.
- При отжиге охлаждение каналов расхолаживания было отключено.
 Реактор выводился на небольшую мощность 100-200 кВт
 и устанавливалась естественная циркуляция СВТ за счет его
 охлаждения через корпус реактора со сбросом тепла в бак водо свинцовой защиты. При этом температура СВТ поднималась на входе
 до 450 °C, когда уже идет отжиг и пластичность стали частично
 восстанавливается.
- Эти клапаны были предусмотрены не для отжига, а для расхолаживания реактора при потере возможности расхолаживания через ПГ. О низкотемпературном радиационном охрупчивании стали в период разработки проекта еще не знали.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (1)

- Вторая кампания стенда 27/ВТ предусматривала не только отработку новой конструкции активной зоны, но и испытание новых, более совершенных парогенераторов. С этой целью на стенде была установлена секция ПГ МП-7 аналога парогенераторов РУ АПЛ проекта 705.
- Парогенератор был полностью выполнен из стали перлитного класса, коррозионностойкой по отношению коррозионному растрескиванию в присутствии хлоридов и кислорода в воде, а также по отношению к СВТ. ПГ представлял собой трубчатый теплообменник, изготовленный в виде двух U-образных корпусов, установленных последовательно на единой опорной плите. СВТ из реактора последовательно проходил межтрубное пространство пароперегревательной и испарительной секций ПГ, после чего поступал на вход главного циркуляционного насоса первого контура.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (2)

- Трубные пучки были также выполнены в виде U-образных труб, развальцованных и обваренных в двух трубных досках каждой секции. Дистанционирование труб в трубном пучке осуществлялась с помощью пластинчатых решеток в нескольких местах по высоте цилиндрических частей секций.
- По межтрубному пространству (первый контур) оба корпуса в верхней части объединялись переходной камерой. На корпусе испарительной секции над трубными досками располагались цилиндрические камеры котловой воды и пароводяной смеси, на корпусе пароперегревательной секции – камеры насыщенного и перегретого пара. Все пароводяные камеры уплотнялись съемными крышками на никелевых прокладках, что обеспечивало доступ к трубным доскам при ремонте ПГ.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (3)

 Испытания секции ПГ МП-7 показали, что конструкция требует серьезной доработки как в части технологии герметизации трубок в трубных досках из-за периодических течей в местах заделки труб, так и в части повышения жесткости дистанционирования трубного пучка. Если редкие течи трубок в местах заделки в трубные доски больших проблем у эксплуатации не создавали, так как технология ремонта ПГ путем глушения трубок, потерявших герметичность, была освоена, то проблема недостаточной жесткости дистанционирования трубок оказалась очень серьезной.

 Значимость этой проблемы стала ясной, когда в ходе испытаний начались систематические течи трубок испарительной секции ПГ, имевшей большую длину по сравнению с перегревательной секцией и поэтому более низкую собственную частоту колебаний трубок.
 Поскольку течи были систематическими, нужно было найти их причину, а затем и устранить ее. Вся тяжесть этой сложной работы легла на ОКБ «Гидропресс», чьи конструкторы сопровождали эксплуатацию.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (4)

- Во-первых, было установлено, что течи происходят не по местам заделки труб в трубные доски ПГ, а где-то по длине трубок. Во-вторых, с помощью специальных приспособлений и методик испытаний было определено расстояние от трубной доски до места негерметичности трубки.
- Оказалось, что у всех труб, потерявших герметичность, место неплотности находится на одном и том же расстоянии от трубной доски. Когда это расстояние отметили на чертеже, оказалось, что оно совпадает с местом расположения дистанционирующих планок. Это было шоком, потому что означало, что конструкцию парогенератора нужно менять, т. к. заменить дистанционирующие планки невозможно.
- Это было предположением до тех пор, пока ОКБ «Гидропресс» не сумел с помощью специально изготовленного инструмента изнутри трубки, имеющей диаметр 8 мм, отрезать ее в конце прямого участка в месте, где начинается гиб, рассверлить сварной шов и извлечь этот кусок трубы из ПГ.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (5)

- И тут все стало окончательно ясно, поскольку в местах расположения дистанционирующих планок цилиндрическая трубка с толщиной стенки 2 мм стала шестигранной, как карандаш. В результате вибрации трубок происходил их механический износ в местах касаний стенки трубки с дистанционирующими планками, размещенными по высоте в три яруса, с образованием шестигранной ячейки.
- Сразу возник вопрос, как это могло произойти, если на модели ПГ с уменьшенным количеством трубок вибрационные испытания при проектных скоростях течения теплоносителя показали отсутствие вибрационного износа труб.
- Анализ полученных результатов и условий проведения испытаний на модели ПГ и натурном образце показал, что причиной разительного отличия результатов испытаний является масштабный фактор, всегда трудно учитываемый при переносе результатов испытаний с уменьшенной модели оборудования (это, конечно, дешевле и быстрее) на натурный образец.

2.10 Вторая эпопея с течами ПГ (6)

- Тяжесть этой ситуации заключалась в том, что такая же судьба ждала все парогенераторы на всех семи АПЛ проектов 705 (705К), которые уже стояли на стапелях двух судостроительных заводов в высокой готовности со смонтированными реакторными установками.
- Однако ставить перед директивными органами вопрос о немедленной остановке строительства всей серии АПЛ, разработке модернизированных ПГ, их изготовлении и замене уже смонтированных ПГ на новые на всех АПЛ никто не решился. Такое решение было принято после проведения испытаний и завершения опытной эксплуатации опытной АПЛ проекта 705 (заказ 900), давших важные результаты для серийных АПЛ.
- Представительные испытания натурного образца модернизированного ПГ МП-7М с дистанционирующими решетками новой конструкции, разработанной ОКБ «Гидропресс», на специальном стенде ОКБМ показали полное отсутствия вибрационного износа труб. Кроме того, в технологию изготовления модернизированных ПГ был внедрен новый метод герметизации трубок в трубных досках.

Заключение (1)

- 1 Разработка РУ с СВТ велась в условиях отсутствия необходимых знаний и опыта, а также жестких директивных сроков завершения работ, практически исключавших возможность проведения сопутствующих научных исследований, что стало причиной многих неудач на этапе освоения этой технологии.
- 2 При проведении испытаний стенда 27/ВТ был приобретен бесценный опыт, позволивший на РУ серийных АПЛ проекта 705(705К) исключить причины имевших место аварий и обеспечить их надежную эксплуатацию.
- 3 Полученные в ходе испытаний и эксплуатации РУ характеристики, такие как мощность и параметры установки, продолжительность кампании, запас реактивности, коэффициенты реактивности, эффекты отравления, распределения температур, динамические параметры, радиоактивность теплоносителя, мощности доз нейтронного и гамма-излучений за защитой, достаточно хорошо совпали с результатами расчетов.

Заключение (2)

- 4 При проведении ремонтных работ и выгрузке реактора не требовалось проводить дезактивацию первого контура, которая связана со сбором, хранением, транспортировкой и переработкой большого количества жидких радиоактивных отходов (ЖРО).
- 5 Была подтверждена возможность эксплуатации РУ при небольшой течи трубной системы ПГ, высокая ремонтопригодность ПГ, возможность устойчивой работы РУ на любых низких уровнях мощности. Хранение выгруженных отработавших выемных частей реактора в «замороженном» теплоносителе обеспечивает ядерную безопасность и исключает образование ЖРО.
- 6 На основе критически проанализированного опыта эксплуатации ведется разработка проекта РУ гражданского назначения (СВБР-100), удовлетворяющей требованиям Generation IV.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ





ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Г.И. Тошинский (toshinsky@ippe.ru) АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

5-я Международная конференция «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2018) 8–10 октября 2018 года, Обнинск, Россия

Содержание

Введение

- 1 Безопасность и экономика
- 2 Пути снижения радиофобии населения
- 3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ
- 4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности
 - Заключение

Введение (1)

- Водоохлаждаемые реакторы типа ВВЭР (PWR), составляющие основу ядерной энергетики (ЯЭ), прошедшие большой путь эволюционного развития, эксплуатируются надежно и удовлетворяют современным требованиям безопасности. Они сохранят свою конкурентоспособность по себестоимости электроэнергии с угольной генерацией при работе в открытом ядерном топливном цикле (ЯТЦ) в течение длительного времени.
- Это обусловлено низкими существующими ценами на природный уран и отсутствием тенденции к их росту в ближнесрочной и среднесрочной перспективе, а также незначительным вкладом стоимости свежего топлива и стоимости хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в себестоимость производимой электроэнергии. Вместе с тем существующая технология ВВЭР на эволюционном пути развития фактически достигла предела и может не обеспечить в будущем конкурентоспособность на мировом рынке.

Введение (2)

- Дальнейший прогресс ядерных энергетических технологий (ЯЭТ) может быть достигнут только при существенном повышении температурного уровня теплоносителя первого контура и параметров генерируемого пара, а следовательно, и КПД термодинамического цикла.
- Применительно к реакторам типа ВВЭР (PWR) это может быть достигнуто при использовании водного теплоносителя сверхкритических параметров (ВВЭР-СКД). Однако при этом остается не устраненным конфликт между возрастающими требованиями безопасности и требованиями экономики.

Введение (3)

- Этот конфликт, характерный для реакторных установок (РУ), в которых используются теплоносители, содержащие большую запасенную потенциальную энергию (энергию компрессии, химическую энергию), проявляется в том, что повышение требований безопасности в связи со значительным увеличением количества энергоблоков АЭС неизбежно приводит к увеличению количества систем безопасности и их мощности, к увеличению числа защитных барьеров.
- Это повышает капитальные и эксплуатационные затраты и снижает конкурентоспособность АЭС. Для сравнения, значения запасенной потенциальной энергии (компрессия и химическая энергия) при рабочих параметрах в водном и тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ) составляют, соответственно, двадцать и ноль ГДж/м³.

1 Безопасность и экономика (1)

- Проблема обеспечения безопасности АЭС, резко обострившаяся после Чернобыльской аварии, вновь вышла на первый план после аварии на АЭС Фукусима. В результате доверие населения и политиков, отражающих мнение населения, к безопасности ядерной энергетики в ряде стран снизилось, что вызвало замедление темпов её развития.
- В то же время дальнейшее повышение требований безопасности, одним из важных количественных критериев которой является значение вероятности тяжелой аварии, требующей эвакуации населения, для АЭС с реакторами традиционных типов может привести к потере конкурентоспособности ЯЭ на базе реакторов с водным теплоносителем.

1 Безопасность и экономика (2)

- Для уменьшения удельных капитальных затрат и себестоимости вырабатываемой электроэнергии потребовалось повышение единичной мощности реакторов, которое, однако, вызывает увеличение полных затрат в строительство АЭС, сроков строительства, что увеличивает финансовые риски.
- Примером является опыт сооружения энергоблоков EPR-1650 в Финляндии (Олкилуото) и Франции (Фламанвилль) мощностью 1650 МВт(э), сроки строительства которых возросли почти в 2 раза, а стоимость увеличилась в 2-3 раза. Это резко снижает рентабельность проекта и, в зависимости от тарифа, может привести к его убыточности.

1 Безопасность и экономика (3)

- Вместе с тем в будущем ЯЭ будет играть очень важную роль, поскольку она позволяет вырабатывать электрическую и тепловую энергию без ограничений по топливным ресурсам, выбросов вредных веществ в окружающую среду и потребления кислорода, приводящих к глобальным изменениям климата на планете.
- Развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), демонстрирующих существенный прогресс технико-экономических показателей, может заместить лишь сравнительно небольшую долю топливно-энергетических ресурсов. Кроме того, ВИЭ могут развиваться только при государственной поддержке, покрывающей все еще низкую экономичность.

1 Безопасность и экономика (4)

- Принятое 196 странами в Париже 12.12.2015 и подписанное 22 апреля 2016 года Глобальное соглашение по климату, которое вступит в силу в 2021 году, призванное заменить Киотский протокол, не определяет конкретных путей уменьшения выбросов в атмосферу углерода и не предусматривает введение обязательного налога на выброс углерода.
- Это соглашение не предусматривает также ядерной опции, что связано прежде всего с радиофобией населения, мнение которого учитывают политики. Вместе с тем именно ЯЭ при её крупномасштабном развитии создает возможность значительного снижения выброса углерода в атмосферу.

2 Пути снижения радиофобии населения (1)

- У прогрессивной части ядерной общественности постепенно растет понимание того, что в обозримом будущем на базе использования ТЖМТ можно принципиально исключить тяжелые аварии, требующие эвакуации населения. Об этом говорит возрастающее количество исследований и разработок реакторов с ТЖМТ за рубежом.
- Если на первой международной конференции ТЖМТ-98, где Россией было представлено большое количество докладов по технологии ТЖМТ, в том числе и по опыту эксплуатации реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) на атомных подводных лодках (АПЛ), присутствовало 12 иностранных участников, то на четвертой конференции ТЖМТ-2013 было уже 47 иностранных участников.

2 Пути снижения радиофобии населения (2)

- В 2018 году США подключились к работам над реакторами с ТЖМТ в рамках международного форума GEN-IV. Проводятся летние школы по ТЖМТ в Бельгии, прошли симпозиумы по ТЖМТ в Республике Корея (GLANST-2017) и в КНР (Шеньчжень) в 2018 году. В КНР создан промышленный альянс CIIALER (China Industry Innovation Alliance of Lead-based Reactor), в который входит свыше 100 предприятий. Количество публикаций в реферируемых журналах по тематике ТЖМТ в 2018 году по данным ScienceDirect сравнялось с количеством публикаций по натриевому теплоносителю.
- О большой возможной роли ТЖМТ в будущей ЯЭ говорят, в частности, и выводы известного отчета Maccaчусетского технологического института: «If the corrosion resistant characteristics of these alloys are confirmed for realistic reactor conditions and assuming that there are no other unexpected challenges, LFRs could become an attractive alternative to SFRs».

2 Пути снижения радиофобии населения (3)

- Использование ТЖМТ в БР придает реактору очень важные свойства внутренней самозащищенности в отношении наиболее тяжелых аварий, требующих эвакуации населения. Это обусловлено природными свойствами ТЖМТ – их высокой температурой кипения и химической инертностью при взаимодействии с водой и воздухом.
 В реакторах с ТЖМТ отсутствует аккумулированная в теплоносителе потенциальная энергия, способная при определенных исходных событиях вызвать разрушение защитных барьеров и катастрофический выброс радиоактивности.
- При использовании ТЖМТ создаются предпосылки для упрощения конструкции РУ за счет исключения ряда систем безопасности, требующихся в РУ с другими теплоносителями. Это может позволить сделать АЭС на базе БР с ТЖМТ не только более безопасными, но и более экономичными в сравнении с АЭС на базе традиционных реакторов.

2 Пути снижения радиофобии населения (4)

- Хотя уровень безопасности сегодня не имеет денежного эквивалента, его повышение создает конкурентные преимущества при одинаковых технико-экономических показателях проектов АЭС различных типов и снижет финансовые риски владельца АЭС в период эксплуатации.
- Кроме того, детерминистическое исключение необходимости эвакуации населения при тяжелых авариях обеспечивает более высокий уровень доверия населения, что может быть определяющим при выборе проекта АЭС для сооружения (например, если в реакторе нет давления, отсутствует выделение водорода, значит, он не может взорваться и т. п.). Это понятнее людям из их жизненного опыта, чем результаты вероятностного анализа безопасности.

2 Пути снижения радиофобии населения (5)

- В восприятии населения возможность катастрофических последствий ядерной аварии гораздо важнее очень низкой вероятности ее реализации. Хотя в соответствии с достоверно установленными статистическими данными, техногенные риски от работы промышленных предприятий и их топливноэнергетической инфраструктуры на много порядков превышают соответствующие риски для ЯЭ.
- С точки зрения ядерной общественности и просвещенной части населения такое восприятие ЯЭ является иррациональным. Тем не менее с этим фактором нужно считаться как с объективным и доказывать высокую безопасность АЭС населению, которое выносит окончательное суждение, «прозрачными» аргументами, по возможности не прибегая к методам вероятностного анализа.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (1)

- Сегодня общепризнано, что БР будут играть определяющую роль в будущей крупномасштабной ЯЭ. Это обусловлено тем, что только на быстрых нейтронах в реакторе может быть получен коэффициент воспроизводства (КВ) равный или больше единицы, что позволяет вовлечь в производство электроэнергии на АЭС вместо редкого легкого изотопа урана ²³⁵U распространенный тяжелый изотоп урана ²³⁸U.
- Это расширяет сырьевую топливную базу ЯЭ примерно в сто раз, что может обеспечить человечество энергией на многие тысячи лет, без выброса углерода в атмосферу и уничтожения кислорода. Для реализации этой возможности БР должны работать в замкнутом ЯТЦ с рециклированием нарабатываемого плутония.
3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (2)

- Вместе с тем, несмотря на это неоспоримое преимущество перед действующими водоохлаждаемыми тепловыми реакторами (TP), БР не получили широкого развития. Более того, период времени их экономически целесообразного внедрения в ЯЭ постоянно отодвигается.
- Например, США, имеющие наибольший парк ТР (около 100 ГВт-э), не планируют в этом веке внедрение БР по причине значительного возрастания стоимости природного урана, которое может привести к потере конкурентоспособности АЭС на базе ТР с ТЭС на органическом топливе.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (3)

- Основная причина этого заключается в том, что БР оказались существенно дороже ТР. Это связано с тем, что в качестве теплоносителя БР был повсеместно выбран натрий, обладающий наилучшими теплопередающими свойствами, позволяющими обеспечить интенсивный теплосъем в активной зоне и высокую скорость наработки избыточного плутония.
- Данное требование к БР было определяющим в семидесятых годах прошлого века, вследствие сложившихся в то время внешних условий, которые характеризовались малыми разведанными ресурсами дешевого природного урана и высоким темпом развития электроэнергетики вообще и ЯЭ в частности. Требуемое время удвоения плутония (а значит, и время удвоения количества энергоблоков АЭС) характеризовалось значением 10 лет и менее.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (4)

- Более низкие экономические показатели БР обусловлены дополнительными затратами на безопасность, связанными с природными свойствами натрия: его очень высокой химической активностью при контакте с водой и воздухом, возможном в аварийных ситуациях. К этим затратам относятся промежуточный натриевый контур между первым контуром радиоактивного натрия и пароводяным контуром, необходимость очехловки натриевых трубопроводов, более сложная технология обращения с ОЯТ, а также специальные меры противопожарной безопасности.
- Это привело к тому, что будущая крупномасштабная ЯЭ по необходимости стала планироваться как двухкомпонентная ЯЭ: более дорогие быстрые натриевые реакторы (БН), «кормят» в замкнутом ЯТЦ своим избыточным плутонием более дешевые ТР.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (5)

- В настоящее время упомянутые выше внешние условия в большинстве стран, развивающих ЯЭ, отсутствуют. Поэтому реакторы БН перестали быть безальтернативными, за исключением стран, планирующих агрессивное развитие ЯЭ и не обладающих большими запасами дешевого природного урана (Китай, Индия).
- Это нужно принимать во внимание при решении вопроса о строительстве реактора БН-1200 в России, что позволит также сохранить компетенции и кадровый потенциал натриевой технологии. Кроме того, это позволит иметь «на ходу» действующую ЯЭТ на базе БР, работающих в замкнутом ЯТЦ, которая может потребоваться в случае непредвиденных неудач при внедрении БР с ТЖМТ.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (6)

- Использование ТЖМТ в качестве теплоносителей БР, обладающих в сравнении с натрием значительно худшими теплопередающими свойствами, не позволяет получить короткое время удвоения плутония. Однако, благодаря природным свойствам химической инертности и очень высокой температуре кипения, создаёт предпосылки создания БР с очень высоким уровнем внутренней самозащищённости, детерминистически исключающим тяжелые аварии, требующие эвакуации населения.
- При этом БР не будут обременены дополнительными затратами на безопасность, необходимыми как для водоохлаждаемых ТР, так и для реакторов БН. Это позволяет рассматривать в качестве одной из опций однокомпонентную структуру будущей крупномасштабной ЯЭ на базе БР с ТЖМТ после демонстрации этой технологии.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (7)

- Вместе с тем проектная себестоимость вырабатываемой энергии, определяющая уровень конкурентоспособности ЯЭТ, зависит не только от значения удельных капитальных затрат на строительство АЭС, но и затрат на сопутствующий топливный цикл.
- При существующих низких ценах на природный уран и отсутствии тенденции к их росту в ближнесрочной перспективе, низком вкладе стоимости изготовления уранового топлива и затрат на хранение ОЯТ в проектную себестоимость электроэнергии, замыкание ЯТЦ приведет к повышению этого показателя и снижению уровня конкурентоспособности ЯЭТ.
- Поэтому на начальном этапе внедрения БР с ТЖМТ в ЯЭ (при их технологической готовности и меньшем значении удельных капитальных затрат в сравнении с ТР, – пока, это предположение, подтвержденное только на бумаге) экономически эффективной может оказаться работа БР на урановом топливе в открытом ЯТЦ с отложенной переработкой ОЯТ.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (8)

- Это целесообразно и по соображениям нераспространения, особенно при строительстве таких реакторов в неядерных странах, имея в виду, что обогащение урана не превышает 20 %. При этом ОЯТ ТР может быть постепенно утилизировано в виде топлива подпитки в замкнутом ЯТЦ БР, когда замыкание ЯТЦ станет экономически оправданным.
- Необходимый темп роста мощностей БР с ТЖМТ при ограниченных возможностях использования природного урана и недостатке имеющихся запасов выделенного плутония для запуска БР с ТЖМТ можно обеспечить путем включения в структуру ЯЭ соответствующего количества быстрых реакторов — размножителей плутония с натриевым теплоносителем.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (9)

- В этом случае на этапе роста вводимых мощностей структура ЯЭ станет трехкомпонентной:
 - 1) менее дорогие БР с ТЖМТ, работающие в замкнутом ЯТЦ в режиме топливного самообеспечения,
 - 2) ТР, работающие в открытом ЯТЦ частично на урановом, частично на плутониевом топливе с передачей ОЯТ в замкнутый ЯТЦ БР,
 - 3) реакторы-размножители с натриевым теплоносителем, работающие в замкнутом ЯТЦ, снабжающие избыточным плутонием ТР.
- Оптимальное соотношение между типами реакторов будет определяться их технико-экономическими показателями и экономическими показателями соответствующих топливных циклов.
- По достижении стационарного уровня суммарной мощности АЭС вполне достаточным будет режим топливного самообеспечения с КВ = 1, обеспечиваемый БР с ТЖМТ, работающих в замкнутом ЯТЦ с постепенным переходом к однокомпонентной структуре ЯЭ.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (10)

- Следует упомянуть еще об одной особенности БР с ТЖМТ: более жесткий спектр нейтронов, обусловленный слабым замедлением нейтронов на ядрах свинца и висмута, в сравнении с БР с другими теплоносителями. Это приводит к повышению эффективности ядерной трансмутации младших актинидов (МА), имеющих пороговую зависимость микроскопического сечения деления от энергии как в критических, так и в подкритических БР (ADS).
- В результате, при работе БР в замкнутом ЯТЦ концентрация ядер МА (нептуний, америций, кюрий) при их рециклировании через определенное время достигает насыщения, так как скорость их убыли в результате деления сравнивается со скоростью их образования.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (11)

- При этом удельная радиоактивность МА (в расчете на один ГВт-год выработанной энергии) будет уменьшаться с увеличением кумулятивной энерговыработки. Это облегчает решение проблемы обращения с МА на завершающей стадии ЯТЦ (back-end), так как долгоживущие изотопы МА определяют радиотоксичность отходов, которые должны направляться на окончательное захоронение.
- Более жесткий спектр нейтронов приводит также к снижению положительной составляющей пустотного эффекта реактивности, делая его отрицательным для БР малой мощности с большой утечкой нейтронов, что важно для безопасности.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (12)

 В России в качестве ТЖМТ рассматриваются освоенный в условиях эксплуатации реакторов атомных подводных лодок (АПЛ) свинцово-висмутовый теплоноситель (СВТ) эвтектического состава, примененный в разрабатываемом реакторе СВБР-100, ориентированном на создание модульных атомных станций (АС) малой и средней мощности, и еще не освоенный свинцовый теплоноситель (СТ), примененный в разрабатываемом реакторе БРЕСТ-ОД-300, как этап к созданию коммерческого энергоблока со свинцовым теплоносителем БР-1200.

3 Роль БР с ТЖМТ в будущей крупномасштабной ЯЭ (13)

- СВТ имеет значительно более низкую температуру плавления (124 °C) по сравнению со свинцом (327 °C), что удобно в эксплуатации. Именно поэтому он был выбран в качестве теплоносителя первого контура реактора СВБР-100, несмотря на более высокую (на четыре порядка) полониевую радиоактивность.
- Меры обеспечения радиационной безопасности, разработанные при освоении этой технологии применительно к АПЛ, оказались эффективными, о чем говорит тот факт, что никто из лиц обслуживающего персонала как военного, так и гражданского, принимавшего участие в ликвидации последствий аварийных проливов теплоносителя, не получил дозу облучения, превышающую допустимую санитарными правилами. Конечно, полоний является источником потенциальной радиационной опасности, который необходимо учитывать при разработке проектов АС на базе РУ с СВТ и их эксплуатации.

4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности (1)

- В последний период времени во многих странах мира возрос интерес к разработке модульных АС малой и средней мощности (SMR), к которым относится и АС на базе РУ СВБР-100, требующих меньших капитальных затрат и более коротких сроков сооружения, что снижает инвестиционные риски и делает более вероятным привлечение частных инвестиций.
- В этой мощностной нише ядерные энергоисточники сегодня практически отсутствуют, хотя ТЭС и ТЭЦ такой мощности производят основную часть электроэнергии и фактически всю тепловую энергию, являясь при этом главными загрязнителями окружающей среды.

4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности (2)

- Среди более чем двух десятков проектов SMR, развиваемых многими странами, основную часть представляют эволюционные проекты, основанные на традиционных водных технологиях.
 Если рассматривать ближнесрочную коммерциализацию, наиболее реальным выбором является проект плавучей АС на базе РУ КЛТ-40С и дальнейшее развитие этого проекта на базе более совершенной РУ РИТМ-200.
- В числе проектов SMR, разрабатываемых за рубежом, есть ряд проектов с ТЖМТ. Это проекты с CBT – CLEAR (КНР), PEACER и URANUS (Корея), НҮРЕRION (США), ENHS (США), МҮRRHA с ускорителем (Евросоюз), и со свинцовым теплоносителем – SSTAR (США), ALFRED (Ansaldo, Италия), SEALER (Швеция). Недавно в разработку реактора с ТЖМТ включилась фирма Westinghouse.

4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности (3)

- Высокий уровень безопасности, обусловленный природными свойствами ТЖМТ, исключающий необходимость иметь избыточное давление, и химическая инертность при контакте с водой и воздухом устраняет возможность взрыва реактора и пожаров, сопровождающихся высоким выбросом радиоактивности.
- Это обеспечивает терпимость к отказам оборудования, ошибкам персонала и злонамеренным действиям, что особенно важно при размещении АС в странах с высоким уровнем террористической угрозы.
- Высокая безопасность SMR с ТЖМТ позволяет размещать их в центрах энергопотребления или вблизи регионов добычи минерально-сырьевых ресурсов, что исключает необходимость сооружения дорогостоящих протяженных линий передачи электроэнергии и снижает потери при передаче электроэнергии на большие расстояния, а также транспортные расходы на дальние перевозки сырья.

4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности (4)

- Однако АС малой и средней мощности, призванные заместить ТЭС, должны удовлетворять более высоким требованиям безопасности, так как они должны размещаться на сравнительно близком расстоянии от городов, имея в виду и функцию теплоснабжения.
- Основным препятствием на пути широкого внедрения таких АС в энергетику, кроме удовлетворения повышенным требованиям безопасности и уровня технологической готовности, является трудность достижения требуемого значения LCOE – (Levelized Cost Of Energy), к полному количеству выработанной энергии.
- Этот критерий введен в проекте ИНПРО для сравнения конкурентоспособности ядерных и альтернативных источников энергии.

4 Модульные реакторы с ТЖМТ малой и средней мощности (5)

- Указанная трудность обусловлена общей закономерностью увеличения значения удельных капитальных затрат в строительство АС с уменьшением мощности станции в противоположность с ТЭС на органическом топливе, для которых LCOE определяется в основном топливными расходами.
- В то же время при дисконтировании капитальные затраты, произведенные до начала ввода АС в коммерческую эксплуатацию, возрастают, особенно при увеличении срока строительства, а текущие годовые доходы от продажи энергии – уменьшаются.
- SMR с ТЖМТ, не обремененные, в силу высокого уровня внутренней самозащищенности, большими затратами на обеспечение безопасности и обладающие преимуществами модульности, изготавливаемые на заводе и доставляемые на площадку АС в готовом виде, с учетом серийности производства могут позволить с большей вероятностью достичь требуемых значений LCOE по сравнению с другими типами РУ.

Заключение (1)

- 1 Быстрые реакторы, работающие в замкнутом ЯТЦ, будут играть определяющую роль в крупномасштабной ЯЭ будущего, позволяя обеспечить человечество энергией на тысячелетия без ограничений по топливным ресурсам, без выбросов вредных веществ в атмосферу и потребления огромного количества кислорода, снижая политические риски, связанные с поставками углеводородов.
- Уменьшение темпов развития ЯЭ и увеличение экономически доступных ресурсов природного урана позволяют рассматривать БР с ТЖМТ, работающих в замкнутом ЯТЦ в режиме топливного самообеспечения, в качестве одной из опций будущей ЯЭ. Такие БР не позволяют обеспечить короткое время удвоения плутония, как в освоенных БР с натриевым теплоносителем, но благодаря природным свойствам ТЖМТ могут позволить одновременно повысить безопасность и улучшить техникоэкономические показатели.

Заключение (2)

- 3 РУ с ТЖМТ имеют наименьший запас потенциальной энергии в теплоносителе, что позволяет реализовать в максимальной степени свойства внутренней самозащищённости и пассивной безопасности и исключить причины тяжелых аварий, требующих эвакуации населения. Такие РУ не являются усилителями внешних воздействий и, поэтому, масштаб повреждений будет определяться только энергией внешнего воздействия.
- 4 РУ такого типа будут обладать свойствами робастности, которые обеспечивают их повышенную устойчивость не только в случаях единичных отказов оборудования и ошибок персонала (влияние человеческого фактора), но и в случаях умышленных злонамеренных действий. Такие качества РУ с ТЖМТ должны позволить преодолеть радиофобию населения, усилившуюся после аварии на АЭС Фукусима, что очень важно для создания ЯЭ крупного масштаба и устойчивого развития.

Заключение (3)

- 5 РУ с ТЖМТ, требующие этапа своего освоения, включая получение реального опыта эксплуатации в условиях АЭС, могут быть использованы:
 - 1) для создания энергоблоков большой единичной мощности, покрывающих базовую часть нагрузки,
 - для создания SMRs, работающих в локальных или региональных энергосистемах и вырабатывающих наряду с электрической энергией тепловую энергию, и позволяющих замещать угольные ТЭС, являющиеся основными загрязнителями окружающей среды.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ



ПРОЕКТ СВБР-100 ДЛЯ РЫНКА АС МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Петроченко В.В., Григорьев С.А., Дедуль А.В., Комлев О.Г., Кондауров А.В., Тошинский Г.И.

СОДЕРЖАНИЕ*)

- Статус работ по Проекту
- Тенденции развития энергетики
- Интеграция в структуру энергетики как ЯЭТ следующего поколения
- Заключение

*) Данные материалы подготовлены для презентации на конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносителя в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)» (09-11.10.2018 г. Обнинск). Они не должны рассматриваться в качестве оферты и не ведут к возникновению каких-либо обязательств со стороны АО «АКМЭ-инжиниринг»



3

СТАТУС РАБОТ ПО ПРОЕКТУ



Цели реализации	 Разработка базовой технологии СВБР, включая демонстрацию на опытно-промышленном энергоблоке (ОПЭБ) с РУ СВБР-100, и Ее коммерциализация на отечественных и зарубежных рынках
Ключевой продукт	 Готовый к установке реакторный модуль СВБР заводского изготовления транспортируемый железнодорожным, водным или автотранспортом Проект АЭС установленной мощности 100-500 и более МВт многоцелевого назначения (электроэнергия, тепло, пар, опреснение) с гибкими режимами эксплуатации (работа в слабых сетях и в режимах следования за нагрузкой), которые могут размещаться вблизи населенных пунктов и производственных комплексов
Основные этапы	 завершение основных НИОКР, разработка проектной/рабочей документации, получение необходимых лицензий и сооружение ОПЭБ ввод в эксплуатацию ОПЭБ (Ульяновская область, Димитровград) получение первых референций промышленной эксплуатации серийные поставки РУ / АС

ОПЭБ НА БАЗЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ СВБР-100

АЭС на базе ОПЭБ с РУ СВБР-100 в г. Димитровград (Ульяновская обл., вблизи с НИИАР)



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПЛОЩАДКЕ:

- Завершены общественные слушания
- Получена лицензия Ростехнадзора на размещение
- Подписан договор аренды земли
- Подписано соглашение о сотрудничестве с администрацией г. Димитровград

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ АЭС



- 1 энергоблок
- Режим когенерации
- Установленная мощность: 100 МВт(э)
- Теплофикационная мощность: 100 Гкал/ч
- КПД: ~36%
- Срок работы: 50 лет
- КИУМ: ~90%



Наименование параметра	Значение	
Мощность РУ тепловая, МВт	280	
Давление генерируемого насыщенного пара, МПа	7	
Паропроизводительность, т/ч	580	
Теплоноситель 1 контура: - состав	44,5% Pb + 55,5% Bi	
Температура теплоносителя 1 контура, на вх. в актив. зону/на вых. из актив. зоны , °С	335 / 477	
Топливо: тип среднее обогащение по U-235,% максимальное обогащение по U-235,%	UO2 16,7 19,5	
Кампания активной зоны, тыс. эфф.ч	50	
Интервал времени между перегрузками, лет (одномоментная перегрузка всего топлива)	7	
Габариты МБР (диаметр/высота), м	4,40 / 12,4	





СТАТУС РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА РУ (1/3)

Документация технических проектов элементов активной зоны (твэл, пэл, РИН, активная часть ПИН), ГЦНА, НМПЦ, СТТ и перегрузочного оборудования в объеме соответствующих ведомостей технических проектов выпущена.

- оболочка из трубы со спиральными ребрами
- Модифицированное оксидное топливо



Модифицированное оксидное топливо:

- повышенная плотность
- повышенная теплопроводность
- свойства подтверждены реакторными испытаниями в БОР-60 и ИВВ-2, комплексными исследованиями в Курчатовском институте

Опытно-промышленная партия полноразмерных оболочек (для твэлов, ПИН и РИН) изготовлена





Топливные таблетки, изготовленные на заводе

Полноразмерные твэлы заводского изготовления



Макеты РИН успешно испытаны в БОР-60



Макеты ПЭЛ для испытаний в БОР-60





СТАТУС РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА РУ (2/3)

Выпущенная документация технического проекта РУ содержит все основные технические решения по РУ и ее элементам.





СТАТУС РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА РУ (3/3)



Разработан технический проект ГЦНА с электроприводом и системой управления



- Проведены испытания модельной проточной части ГЦНА на воде
- Получены необходимые напорно-расходные характеристики

Стенд для испытаний элементов ГЦНА и натурного ГЦНА (БГС)



- Введён в
 эксплуатацию
 большой
 гидравлический стенд
 в объеме первой
 очереди
- Проведен первый этап работ по программе испытаний колонок модельного блока подшипников



ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТА

Экспертиза Ростехнадзора, ФБУ «НТЦ ЯРБ», Росприроднадзора:

- Достаточность нормативной базы для лицензирования ОПЭБ
- Достаточность программы НИОКР и концепция безопасности
- Лицензирование

*	Федеральное болжетное учражание «КАУЧНО-ТЕХНЯЧЕССКИЙ ЦЕНТР ЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ КЕЗОПАСНОСТИ» (ФБУ-«ИТЦ ЯРБ»)	ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРВОРАЦИЕ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРТИИ «РОСАТОМ»	VTEPRILAD Прелодитель HTC Mil Геосориала «Pocross-	УТВЕРЖДАЮ Заместноваь предоедителя НГС 268 Госкорпорация «Росатова»	
ФОДРАЛЬНЫ СКОМА И АТОМНОМУ ЦАДОРУ О "ВОЛИОГИЧЕСКОМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМИ И АТОМНОМУ ЦАДОРУ РЕПЛЕНИИ ПОСАНИИ СУЛДИ № 3 «Боневоских объертов ретовления резоной	104		LOAzasa		AR CATARIA PRECEDENT IS ATOMICONT MARDONY
migrate tay was estimated to our a vegapation of 20 who are Monitorio comp, estimatemedianty a strumony estimation error, 00.06.2014 p. Risecretaria. 1 Inc. 2010. 1997 (2010).	P.5. Шарофутлянов // ленибера 2014 г.		РЕШЕННИЕ селлики НТС № 17 осворяющия «Росятов» по вопросу: алти» прознащленного мергиблика и материалы технического	РЕШЕНИЕ 2.26.8 Госкорнорицая «Росктом» по вопросу: гориалев экспертизая по ввоексу СВБР-100».	H3NS at 13 despects 2015 at 13 despects 2015 at 13 despects 2015 at 20
1. Precisionpose preparation automation a data setting and a structure international setting and a setting and	WATER PROOF 3 AP INVESTIGAT		проекта реакторной установки СВБР-100» 15.09 2015 г.	26.04.2018 r.	n, y.n. Theremenan, n. 13, cop. 1. Instant servites, "High Sci.
 Регультиче ППР, выполнятных ФБУ «МПТ] ЯРБе в ромах за из тупа, Формирование тематиче ППР По верного конросу. 	тимые организации и полности со разгорной ой на быстрых нейтровах со священосяние учение на мактрых нейтровах со священо-вакаутовые также в Уживонской сбласти (на этаке размешения)	БАСТОРИТЕЛЬНЫЙ ОРИСТ ЭН ЭКАТАК ЭКСТИРТИКИ МАТЕРИСКИ ОРОСТИКА ОТОНТОВ. ДИКАТО БИРОКОВСК, С РАСКРИЧИНИ СТАНОВНОЙ НА БАГТИКА КАХ СО СТИВИЩОЮ МАСКУТИКАЛИ ПЕОСИНОСТИСТИИ СВИ-НИ.	повой технологии и монемака 36 и ПЦ СВБР САО «АКМЭ-акказарият», Клыгев О.Г. (10 анк.) проект РУ СВБР-100 (основные технические решения, состояние	наков Проекта CBSP-100 гроведских в соетветствии с пителя генерального лиректора – даряктора Бакка по шему базнесу Госкоорпорация «Росатоле Конкрова 54-85 от 12.02.2018) в рамких ваналанения 1070 дивется Госкоорпорация «Росатоле Конкрова»	namen Timilinati part prosents.
Заступал сообщиния тизначескиго перегогра ОАО - АХУУ-ингланиристь всячествия, на техну «Обселичиние собязования засладугируранный созданий пробласой федеральносу горы и правой в общега ингложившание вой мертик при редолжащи проска ОСГЭ с РУ (1857-100-и сообщиние начаят ителан ФОУ «НТЦ 1976-50.50) динины на техну «Осслована»		manphont game R.H.a. 1999.4.4.	ноток) АО ОНБ- «ГИДРОПРЕСС», Климия И.И. (20 мин.) пресеты законитов встаний зоны и сталия из обсезования АО «ГИЦРФ-ФОК», Памони О.А. (10 мин.)	1954-P (c minimum of 06.07.2017 M 1-11539-P at P)	en yelanosod ze fastyari astyari nanose 0.00 -4830-assessanse aspanet sender to assessmentere, rickE30552202
натим листим колболдочного доработки акрестивных тробеваний и сти использования головой устругия для плоте регустарования какрыма и адоесоной ботосказности ОП.36 с римстортей (уструктивный ССРО-1006.	лела безоплоности 107, пляд. техн. наук Лон, М.Ю. Ланкон		проект системы технология техноносктеля АО «ГНЦ РФ-ФОЦ», Стороженко А.Н. (10 ком.)		si 11 designa in 2020 c. Insue processi all'Annes antonan Interessal annes
Соказан НТС отменаете Опаттио-сроманаетовый экоробова (ОП263 с реакторов) регистаной А.10. Окслидатерносая организация - ОАО «АКМ-экономистисти»	работы во жавертое Др В.М. Маутадыров		вовышения технол-жовочических показателей технология АО «ГНЦРФ-ФЭС», Голинский Г.И. (10 мнг.)	Э.Г. (АО «НЕВСИЭТ»), Бахметьева А.М. (АО «ОКЕМ ощан Дазуля А.В. (АО «АКМЭ-комонирант»), «ГНЦ РФ-ФОИ») по вопросу	- and
нит истым радов скойств, отличающая его от сооружатамся в раторуемых в постоящое время в Россая атоманах ставший, в частвести истолуцийские в качатые топаноботова первого контура засаствения.			5 с РУ С257-140 (основные решения, конхурентоспособность с рацияма)		
 саятное мислеут, проявляля большую технолосу («10 вта" при средной, почнотрятуре в натаваной зоне 400 °С); истотрятурствая натаванной обрудствания пермого контура; истотрятилия почнотояния собрудствания научность; 	Можня	Moore 201	АО «АГОМПРОЕНТ», Попов А.Н. (15 ком.) консутным проекта Рокололитичи, рабоней сумутиче	I.Н. (Частное учреждение «ИТЦЛ «ПРОРЫВ»), тное учреждение «ИТЦЛ «ПРОРЫВ»), содоклад UCMЭ-наказаниения») по аспосеч	Copue 8.8 to 358485
 длятельные работа без зерегружае половы;. 	2014 Уколертиза	0. <u>000.000</u>	Tyxe A.A. (20 sax)		

Отраслевая экспертиза с рассмотрением на НТС Госкорпорации «Росатом»:

- Возможность оптимизации технических решений
- Достаточность программы НИОКР и концепция безопасности
- Возможности достижения экономической конкурентоспособности

- Нормативная база достаточна (предложения по доработке)
- Предложения по дополнению
 Программы НИОКР и
 концепции безопасности
- Предложения по доработке проекта ОПЭБ и обеспечения целевых ТЭХ серийных АС
- Отсутствие технических препятствий для продолжения Проекта
- Лицензия на размещение



ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



World Energy Outlook, International Energy Agency, 16 November 2017.

BP Statistical Review of World Energy, 67th edition, June 2018.

New Energy Outlook 2018, Bloomberg NEF, 2018.

Shell Scenarios SKY, Meeting the Goals of the Paris Agreement, Shell International B.V., 2018

International Energy Outlook, US Energy Information Administration, September 14, 2017.

2018 Outlook for Energy: A View to 2040, **ExxonMobil**, 2018.

IRENA (2018), Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

National Renewable Energy Laboratory. (2012). Renewable Electricity Futures Study. Hand, M.M.; Baldwin, S.; DeMeo, E.; Reilly, J.M.; Mai, T.; Arent, D.; Porro, G.; Meshek, M.; Sandor, D. eds. 4 vols. NREL/TP-6A20-52409. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Renewables 2018, Global Status Report, **Renewable Energy Policy Network** for the 21st Century, REN21, 2018.



производство электроэнергии



Потребление электроэнергии будет увеличиваться



Генерация ЭЭ на АЭС в мире



Прогнозы развития АЭ в широком диапазоне



Мощность АЭС в мире

 SMALL MODULAR REACTOR
 Тяжель

 GINEERING
 NUCLEAR SYSTEMS

Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018) Октябрь 9-11, 2018 г. Обнинск, Российская Федерация

<u>13</u>

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ



Существенное удешевление ВИЭ

Доля NRES в потребленной ЭЭ в мире



Доля ЭЭ от СЭС и ВЭС

Существенные доли произведенной энергии ВИЭ

Доля Hydro в потребленной ЭЭ в мире



Парижских соглашений по климату

SMALL MODULAR REACTOR ENGINEERING NUCLEAR SYSTEMS

ОСОБЕННОСТИ ВИЭ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ



Почасовое производство ЭЭ



Почасовое производство ЭЭ ВИЭ 14 ■ ГеоЭС ■ Биомасса ■ Биогаз ■ МГЭС ■ ВЭС ■ СЭС (PV) ■ СЭС (Th) ΓBτ 12 Призводство ЭЭ, 10 8 6 2 0 6 11 21 1 16 Часы

Суточные колебания и неопределенность производства ЭЭ ВИЭ



Децентрализация ЭЭ


ИНТЕГРАЦИЯ В СТРУКТУРУ ЭНЕРГЕТИКИ







возможности многоцелевого применения

ГИБКОЕ НАРАЩИВАНИЕ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ И УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ



Создание когенерационных АС малой и средней мощности для региональных и удаленных потребителей со слабой инфраструктурой

Концептуальный проект разработан СПБ Атомпроект, ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ФЭИ

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ (КЛАСТЕРЫ) САМОДОСТАТОЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ЯДЕРНЫМ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОМ В КАЧЕСТВЕ БАЗОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ



ENGINEERING SMALL MODULAR REACTOR

Опресненная вода:

ОПРЕСНЕНИЕ

Береговые

комплексы

осмоса

дистилляции

опреснительные

на

И

основе

обратного

200 000 – 350 000 м³/сут

Shore-based nuclear desalination power complex based on a transportable reactor unit with a SVBR-75/100 reactor, Atomic Energy. 2005. T. 99. № 6

ПЛАВУЧИЕ ЭНЕРГОБЛОКИ С СВБР-100



Энергоблок доставляется к месту работы и к месту перезарядки активной зоны в ядерно-безопасном состоянии с замороженным теплоносителем

Техническое предложение по 50 МВт установке КРУИЗ-50 разработано СПМБМ Малахит, ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ФЭИ

Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)

Октябрь 9-11, 2018

г. Обнинск, Российская Федерация

ПРЕДПОСЫЛКИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯМ К GEN-IV

Цели Generation IV	Решение в СВБР-100		
Sustainability			
устойчивое производство энергии и эффективное использование топлива	Реактор на быстрых нейтронах, U-Pu и U-Th замкнутый топливный цикл, высокое выгорание топлива, различные типы		
минимизировать ядерные отходы и управлять ими	топлив (оксидное, нитридное, карбидное)		
Safety and reliability			
превосходны в области безопасности и надежности	Отсутствие катастрофических последствий при технически		
очень низкая вероятность и степень повреждения активной зоны реактора	реализуемых ИС Пассивные системы безопасности Проектные аварии не приводят к повреждению активной зоны		
ядерно-энергетические системы исключат необходимость аварийного реагирования вне площадки	Зона аварийного реагирования ограничена площадкой АЭС		
Economics			
ясное преимущество цены жизненного цикла над другими источниками энергии	Стоимость жизненного цикла (LCOE) сравнима с показателями АЭС большой мощности (60-70 \$/МВтч, ставка 7%)		
уровень финансовых рисков сопоставим с другими энергетическими проектами	Многолетний летний опыт эксплуатации прототипов и создание ОПЭБ		
Proliferation resistance and physical protection			
очень непривлекателен для диверсий или хищения оружейных материалов и обеспечивает защиту против террористических актов	Обогащение 235-U менее 20% Чувствительная к несанкционированным нарушения физика малых активных зон Длительная кампания топлива Невозможность разгона на мгновенных нейтронах Невозможность ввода полного запаса реактивности		

ENGINEERING SMALL MODULAR REACTOR NUCLEAR SYSTEMS

ядерный топливный цикл



ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА



ПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИРОДНОГО УРАНА





ENGINEERING NUCLEAR SYSTEMS





ПРЕДПОСЫЛКИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯМ К GEN-IV



Поромотр	CAC			
параметр	1 РУ	2 РУ	4 РУ	
Стоимость строительства, \$/кВт	4500	3100	2350	
Время строительства, мес	42-45	45-48*	51-57*	
LCOE, \$/MBт·ч	86	69	60	

 * Монтаж и ввод второй (и каждой последующей) РУ в эксплуатацию по отдельному графику (не менее 9 мес.)

На рисунке показаны диапазоны LCOE для:

- АС большой мощности (обозначены "АЭС"),
- Электростанции на природном газе (обозначены "Газ"),
- Электростанции на угле (обозначены "Уголь"),
- Солнечные электростанции (обозначены "Солнце")
- Ветровые электрогенераторы (обозначены "Ветер")

Минимальное значение LCOE для AC с CBБР на данном рисунке приведено для режима когенерации **Максимальное значение LCOE** приведено для варианта работы в конденсационном режиме

Условия сравнения и данные по LCOE взяты из «Projected Costs of Generating Electricity», IEA, NEA, OECD, ISBN 978-92-64-24443-6, 2015



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

SMALL MODULAR REACTOR

NGINEERING NUCLEAR SYSTEMS



АС с РУ СВБР по своим характеристикам безопасности, возможностям работы в ЗЯТЦ, поддержки режима нераспространения, возможностям многоцелевого использования и гибкости технических решений при внедрении в энергетику могут рассматриваться в качестве возможной опции для обеспечения энергией региональных потребителей для достижения целей устойчивого развития







ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

ЭНЕРГОБЛОК С РУ БРЕСТ-ОД-300

Лемехов В.В., Моисеев А.В., Бажанов А.А., Саркулов М.К., Смирнов В.С., Ярмоленко О.А., Лемехов Ю.В., Черепнин Ю.С., Васюхно В.П., Афремов Д.А. и др. и др. участники ПН «Прорыв» Научный руководитель - ГНЦ РФ-ФЭИ

ГНЦ РФ - ФЭИ, Обнинск, 08-10 октября 2018

Этапы создания коммерческих РУ со свинцовым теплоносителем

БРЕСТ-ОД-300



Исключение аварий на АЭС, требующих эвакуации, а тем более отселения населения

Формирование ЗЯТЦ для полного использования энергетического потенциала природного уранового сырья — <u>использование Pu BBЭP</u> на старте Коммерческая РУ

Последовательное приближение к радиационно-эквивалентному

(по отношению к природному сырью) захоронению РАО на этапе эксплуатации после освоения топлива с МА Обеспечение конкурентоспособности по сравнению с другими видами генерации — <u>демонстрация потенциала</u> <u>технологии</u>

Технологическое укрепление режима нераспространения отсутствует бланкет



Опытно-демонстрационный энергетический комплекс





- Здания и сооружения модуля фабрикации и рефабрикации (МФР) – I очередь
- Здания и сооружения энергоблока (ЭБ)
 с РУ БРЕСТ-ОД-300 II очередь
- Здания и сооружения модуля переработки (МП) – III очередь
- Перевод (модернизация) МФР на рефабрикацию ЯТ из продуктов переработки ОЯТ РУ БРЕСТ

Землетрясение МРЗ/ПЗ 8/7 МСК-64 Тепловая/ эл. мощность 700/300 МВт Загрузка топлива 20,8 т/ 169 ТВС Перегрузки 6%/9% т.ат. 7,2/4,8 т



Активная зона (нейтронная физика и топливо)





Активная зона (испытания ТВС)





- Изготовлены полномасштабные макеты всех типов тепловыделяющих сборок, проведены механические испытания, получены гидравлические и виброметрические характеристики в воде и жидком свинце
- Для последующего изготовления изделий активной зоны промышленностью освоено большинство полуфабрикатов



Корпус блока реакторного







- Экспериментально получены свойства высокотемпературных бетонов при рабочих температурах и под облучением, показана химическая инертность теплоносителя по отношению к бетонам
- Выпущен обобщающий отчёт по металлическим конструкционным материалам, включая сварные соединения, материалы поставлены на производство
- > Верифицированы коды под тепловые и прочностные задачи
- > Расчётно и на макетах подтверждена локализующая функция бетона
- > Принципиально разработана технология сборки и монтажа



Парогенератор (1/2)





- Обоснованы требуемые теплогидравлические параметры ПГ. Определена граница устойчивой работы – более 15 % по расходу воды
- Выпущены обобщающие отчёты со свойствами материалов
- Расчетно обоснована прочность элементов
 ПГ во всех эксплуатационных режимах
- Поставлена на производство теплообменная труба
- Экспериментально показано отсутствие зависимого отказа при разрыве одной ТОТ
- Обоснован нейтральный ВХР, позволяющий уменьшить кол-во отложений при эксплуатации ПГ. Разработана технология отмывки теплообменных труб ПГ



Парогенератор (2/2)



- Подтверждено выполнение условий термоциклической прочности теплообменных труб и сварных швов приварки к трубной доске
- Проведены эксперименты, обосновывающие прибавку на коррозию в условиях воды, пара и свинцового теплоносителя
- Показано незначительное влияние свинца на скорость ползучести в свинце при нагрузках, характерных для парогенератора
- Проведена серия испытаний трибосопряжения ТОТ ДГ. Разработана физико-механическая модель. Расчёты по модели подтверждают ресурс 30 лет. Создаётся стенд для натурного изучения вибрационных характеристик













8

ГЦНА





- Проведена оптимизация проточной части на водяном и свинцовом среднемасштабных стендах
- Получена необходимая характеристика напор-расход для обеспечения работы насоса в диапазоне от 30 до 100 %.



- Разработан и изготовлен нижний радиальный подшипник
- Проводятся ресурсные испытания подшипника на свинце (набранный ресурс — 30% от проектного)
- Разработана конструкция торцевого уплотнения по газу. Начато изготовление для стендовой отработки
- Начато изготовление опытного насоса
- Ведётся подготовка к созданию полномасштабного стенда для испытаний ГЦНА на свинце
- Проведены прочностные расчёты по свойствам конструкционных материалов из обобщающих отчётов

Прочие элементы



- Положительно окончены испытания опытного образца привода исполнительного механизма СУЗ
- Изготавливаются и проходят испытания первичные преобразователи параметров первого контура
- Разработан технический проект АСКУ РУ, создан стенд, на котором показана устойчивость работы регуляторов КСУЗ при различных переходных режимах
- > Разработана и испытана арматура системы безопасности парогенератора
- Проводятся ресурсные испытания компонентов системы поддержания качества теплоносителя
- Завершается отработка элементов системы контроля герметичности оболочек твэл





Теплогидравлические расчеты в обоснование конструкторских решений и безопасности







Распределение температуры и модуля скорости в вертикальном сечении, проходящем через ось одного из ГЦНА (1-я секунда переходного процесса потери системного энергоснабжения)

- Проведено расчётное обоснование циркуляции в первом контуре трёхмерными кодами
- Расчёты проведены как для нормальной эксплуатации, так и для нарушений нормальной эксплуатации
- Трёхмерные расчёты, как правило, показывают, что расчёты по канальным кодам в режимах с нарушения нормальной эксплуатации дают консервативные (более высокие) температуры
- > Завершается верификация трёхмерных кодов



Обоснование радиационной безопасности (1/2)







Обоснование безопасности (2/2)







Нормативные правовые акты и стандартизация



- В основу проекта реакторной установки заложены требования действующих федеральных норм и правил в отношении АЭС: ОПБ, ПБЯ, НРБ и т. д.
- Для обеспечения создания инновационных АЭС процессы разработки проекта, новых ФНП и перспективных программных средств (расчётных кодов) идут практически одновременно
- Специфическими являются правила устройства и безопасной эксплуатации и сопутствующие документы (сварка, правила контроля и т. д.), нормы расчёта на прочность корпуса
- В настоящее время идёт совместная работа с Ростехнадзором по согласованию и вводу в действие основополагающих ФНП, на основании которых будет вестись создание РУ







Наименование	Статус	Количество
Нейтронная физика, теплогидравлика оборудования, прочность, ВАБ	Аттестованы	5
Радбезопасность	Имеются положительные заключения секции	2
Остальные	В процессе аттестации	5





HYDRA-IBRAE/LM/V1.1



.Н.А.Доллежале



- При разработка РУ БРЕСТ-ОД-300 создаются технологии, проводятся эксперименты, находятся современные технические решения для создания оборудования, пригодные в том числе для масштабирования
- Расчётные коды, используемые для БРЕСТ-ОД-300, также можно будет применять для расчётов подобных РУ или с небольшим уточнением в случае изменения параметров новых РУ
- Нормативная база, в том числе усовершенствованная после получения опыта при прохождении этапов жизненного цикла БРЕСТ-ОД-300, может быть применена для других РУ
- Присущие качества могут быть использованы для других РУ в достаточно широком диапазоне мощности



Заключение



- Технические решения по оборудованию РУ подтверждены положительными результатами экспериментов на макетах оборудования или его компонентов, расчётным обоснованием с учётом влияния свинцового теплоносителя, ведутся испытания опытных образцов.
- 2. Технические решения по активной зоне подтверждены положительными результатами облучательных экспериментов, гидравлических и вибрационных экспериментов, нейтронно-физических расчетов по аттестованным программным кодам.
- Проведённые теплогидравлические расчёты с использованием CFD-кодов показали непревышение пределов безопасной эксплуатации по температуре топлива, оболочки твэлов, обеспечение локализующей функции корпуса реакторного блока при нарушениях нормальной эксплуатации с реализацией множественных отказов.
- Проведённые расчёты радиационной безопасности подтвердили целевые показатели: отсутствие необходимости эвакуации и отселения населения за границей промплощадки при нарушениях нормальной эксплуатации РУ с множественными отказами.
- 5. Проект энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 проходит лицензирование в Ростехнадзоре.
- 6. Решения, применяемые в РУ БРЕСТ-ОД-300, могут быть использованы в коммерческих РУ большой мощности.



Госкорпорация «Росатом» АО «НИКИЭТ»









Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физикоэнергетический институт имени А. И. Лейпунского»



ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

<u>Асхадуллин Р.Ш.,</u> Стороженко А.Н., Мельников В.П., Легких А.Ю., Ульянов В.В. (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

ТЖМТ-2018, Обнинск, 08.10.2018





ЭТАПЫ ОСВОЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ (ТЖМТ) В РОССИИ





1951 г. Первый циркуляционный стенд с теплоносителем Pb-Bi (ФЭИ)



1963 г. - Первая АПЛ К-27 (Проект 645) с теплоносителем Pb-Bi



1971 г. - АПЛ (Проекты 705 и 705К) с теплоносителем Pb-Bi

2018 г.:

Продолжается разработка реактора «БРЕСТ-ОД-300» (свинцовый теплоноситель). Решается вопрос о продолжении работ по реактору «СВБР-100» (свинцово-висмутовый теплоноситель).



БРЕСТ-ОД-300

СВБР-100



АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ (ТЖМТ) Pb-Bi, Pb



Отсутствие средств технологии теплоносителя может привести к негативным последствиям:

- отложению шлаков на теплопередающих поверхностях;
- блокировке расхода теплоносителя по отдельным участкам контура;
- усилению коррозионного износа, снижению ресурса эксплуатации установок, ухудшению радиационной обстановки и т.д.



Первая атомная подводная лодка «К-27» с теплоносителем Pb-Bi

- Пуск в эксплуатацию 1963 год
- Авария 1968 год
- Причина отсутствие систем технологии теплоносителя



РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДОВ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ТЕХНОЛОГИИ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ





Шлаки на трубопроводе Отложения шлаков в контуре при испытаниях ГЦН в МОЦКТИ

Отложения шлаков в теплообменнике

После введения в состав циркуляционных контуров систем технологии теплоносителей подобного состояния поверхностей контуров не наблюдалось.



- Обеспечение чистоты теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура для поддержания проектных теплогидравлических характеристик при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет при работе реакторной установки на мощности до 100%);
- Обеспечение условий коррозионной стойкости конструкционных сталей при длительных ресурсах работы (несколько десятков лет, при работе реакторной установки на мощности до 100%);
- Обеспечение современных требований безопасности на различных этапах эксплуатации реакторной установки (подготовка теплоносителя, пуск реакторной установки, текущая эксплуатация, ремонты и перегрузки, разгерметизация, режимы отклонения от условий нормальной эксплуатации).



ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАБОТ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ Pb-Bi, Pb



Выбор исходного состава теплоносителей. Этап 1 Технология подготовки теплоносителя для загрузки в первый контур РУ

Процессы технологии теплоносителя при

- **Этап 2** проведении исходной (стартовой) пассивации конструкционных материалов
- Этап 3 Технология теплоносителей при текущей эксплуатации РУ

Этап 4 Технология теплоносителей после вывода РУ из эксплуатации



БРЕСТ-ОД-300 http://nikiet.ru



6



СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКС МЕР ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЖМТ



Приготовление ТЖМТ	Очистка теплоносителя и контура от примесей при текущей эксплуатации			
Подготовка ТЖМТ и его загрузка	Контроль и управление окислительным потенциалом теплоносителя в процессе эксплуатации			
Предварительная пассивация узлов РУ	Очистка защитного газа			
Технология теплоносителя при ремонтах и перегрузках	Проведение технологических операций при отклонениях от нормальных условий эксплуатации			

Вывод из эксплуатации, подготовка к повторному использованию

Оборудование технологии ТЖМТ обеспечит проведение необходимых технологических мероприятий и является важной составной частью общей системы безопасности при эксплуатации реакторных установок на всех этапах их жизненного цикла.



Промышленные марки Pb (РФ)		Промышленные марки Ві (РФ)						
Элемент	C2	C2C	C1	CO	C00	Элемент	Bi1	Bi00
Массовая доля, %			M	Массовая доля, %				
Pb	99,95	99,97	99,985	99,992	99,9985	Bi	98	99,98
Ag	0,0015	0,002	0,001	0,0003	0,00001	Ag	0,12	0,00002
Cu	0,001	0,002	0,001	0,0005	0,00001	Cu	0,01	0,0001
Zn	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0001	Zn	0,003	0,0005
Bi	0,03	0,02	0,006	0,004	0,0005	Pb	1,8	0.01
As	0,002	0,002	0,0005	0,0005	0,0005	As	0,0002	0,00007
Sn	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	Sn	н/р	н/р
Sb	0,005	0,005	0,001	0,0005	0,0001	Sb	0,005	0,00002
Fe	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0001	Fe	0,001	0,001
Mg					0,0001	Mg		
Ca	0,015	0,003	0,003	0,002	0,0001	Ca	/	
Na					0,0001	Na	н/р	н/р
Tl					0,0001	Tl		
Cd					0,0001	Cd	(0,0001)	0,00005
Al	н/р	н/р	н/р	н/р	0,0005	Al		
Hg	_				0,0001	Hg	н/р	н/р
In					0,0001	In	-	-

Критерии выбора: 1. Влияние примесей в теплоносителе на радиационную обстановку в период эксплуатации РУ. 2. Влияние примесей на ядерно-физические свойства реактора. 3. Интенсивность наработки Ро²¹⁰ из Ві²⁰⁹ и Pb²⁰⁸ и интенсивность миграции Ро²¹⁰ из газового контура РУ. 4. Влияние примесей на коррозию конструкционных материалов. 5. Влияние примесей в стартовом теплоносителе на процесс шлакообразования.

Выбор исходного примесного состава теплоносителя может оказать существенное влияние на условия последующей многолетней его эксплуатации, включая вывод из эксплуатации.





Контролируемые примеси при приемке ТЖМТ на РУ: Ag, Cu, Zn, As, Sb, Sn, Mg, Fe, Tl, Hg, Al, In, Cd, Na, Ca, Ni, Cr, Mn, Te, Co, Au, Bi.

Источники примесей:

- генетические из сырья: Ag, Cu, Zn, As, Sb, Sn, Bi, Fe, Tl, Ni, Mn, Co, Au;
- технологические из реагентов при производстве металла-сырца: Са, Fe, C; Si;
- технологические при очистке металла-сырца: Na, B, F, Cl, Si.




СИСТЕМА ЗАГРУЗКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ





Пример монжусной системы загрузки



Пример системы загрузки с помощью насоса



ДИАГРАММА КИСЛОРОДНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ







ПРОГНОЗИРУЕМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАБОТЫ РЕАКТОРА С ТЖМТ







где:

КОНТРОЛЬ КИСЛОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ТЖМТ



$$a_{[O]} = \frac{C}{C_S}$$
$$lg(C^{Pb-Bi}{}_S, \% \text{mac.}) = 1,2 - 3400/T(\text{K})$$
$$lg(C^{Pb}{}_S, \% \text{mac.}) = 3,44 - 5240/T(\text{K})$$



Зависимость ЭДС (E) гальванической ячейки от изменения термодинамического потенциала

13

Т – температура, К;
а – термодинамическая активность кислорода в
электроде сравнения;
а – термодинамическая активность кислорода.

п – число электронов, участвующих в реакции;

R – универсальная газовая постоянная;

*a*_[*o*] – термодинамическая активность кислорода в исследуемой среде;

С-концентрация кислорода;

F – число Фарадея;

 $E = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \frac{a}{a_{o}},$

Cs – концентрация насыщения кислорода



ДАТЧИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТДА КИСЛОРОДА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ



- Рабочая среда Pb-Bi, Pb;
- Диапазон ТДА кислорода 10⁻⁶ 1;
- Предел допускаемой относительной погрешности ЭДС датчика – 10%;
- Диапазон рабочих температур 350-650°С;
- Рабочее давление 0 1,5 МПа;
- Скорость теплоносителя в основном контуре 0 1 м/с;
- Скорость изменения температуры теплоносителя – до 100°С/с;
- Вибрация и гидроудары;
- Ресурс работы 2 года.

Датчик зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений РФ





Датчики с чувствительными элементами разной конструкции



Датчик кабельный



Датчик с тремя электродами сравнения 14



- С_s концентрация насыщения кислорода;
- S поверхность растворения;

POCATOM

где: К_р – коэффициент скорости растворения;

 $Q = K_{P} \cdot S \cdot (C_{s} - C_{[O]}), K_{P} = f (T, Re, C_{[O]}),$

$\langle PbO \rangle \rightarrow \{Pb\} + [O]$



ТВЕРДОФАЗНЫЙ МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ



 $4[O] + 3 < Fe > \rightarrow < Fe_3O_4 >$ $4[O] + 3[Fe] \rightarrow < Fe_3O_4 >$

ТВЕРДОФАЗНЫЙ МЕТОД ВВОДА РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ТЖМТ





Твердофазный окислитель (PbO): A) – исходный; Б) – после отработки в МА

 $\langle PbO \rangle \rightarrow \{Pb\} + [O],$ где

POCATOM

вид агрегатного состояния реагентов и продуктов реакции: <> - твердое; { } – жидкое; [] - растворенное

Методики расчета производительности засыпки оксида свинца основываются на эмпирических критериальных зависимостях для растворения оксида свинца в ТЖМТ

прохождении теплоносителя через засыпку PbO при 420 °C и разных расходах

Sh = 8,7 · 10⁻⁴ · Re^{1,42} · Sc^{0,83} (для Pb) 16



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ТЖМТ





Система регулирования при стационарных режимах позволяет удерживать заданный уровень концентрации кислорода в теплоносителе на уровнях С_[0] = (10⁻⁸ ÷10⁻¹) %мас.



ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛ ОКСИДА СВИНЦА ДЛЯ ЗАГРУЗКИ В МАССООБМЕННЫЙ АППАРАТ







Изготовление по специальной технологии

Контроль качества партии и фасовка



Виды гранул из оксида свинца (PbO)



ДОЗАТОРЫ КИСЛОРОДА (МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ) ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ



{Pb} + <PbO> → 2 {Pb} + [O] <>-твердое; { } – жидкое; [] – растворенное





Твердофазный окислитель:

- А) исходный;
- Б) в конце отработки



Типы массообменных (МА) аппаратов:

- 1. МА со встроенным электрическим нагревателем;
- 2. МА с собственным механическим насосом;
- 3. МА с собственным электромагнитным насосом;
- 4. МА с газ-лифтным насосом (вариант для
- исследовательских установок).



МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ, РАЗРАБОТАННЫЕ С 2000 Г. ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ НИОКР ПО ТЕМАМ «БРЕСТ-ОД-300» И «СВБР-100»



Turn	Кол-								
ТИП	во, шт.	Стенд (организация)							
МА для циркуляционных стендов									
Конвекционный с одним	16	«СМ-2», «ЦУ-1», «ТТ-1М», «ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ), «Х2», «Х3», «Х5», «Х6»							
внутренним нагревателем		(ЦНИИ КМ «Прометей»)							
Конвекционный с тремя	2	«СМ-2», «ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							
внутренними нагревателями									
Конвекционный	5	«Х5», «Х6» (ЦНИИ КМ «Прометей»), УПСТ (ИРМ), ФК (НИКИЭТ)							
с наружным нагревателем									
С осевым насосом	7	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ), «БРЕСТ» (ЦКБМ)							
Проточный с ручным	2	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							
управлением									
С регулируемым клапаном	1	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							
С дискретной подачей	13	«РУ ТТ-3», «ТТ-2М», «Спрут» (ГНЦ РФ - ФЭИ), «СНІRCE» (ЕNEA, Италия), «ЭУСТ»							
газовой среды		(НИКИЭТ), «БГС» (ЦКБМ), «Х2», «Х3» (ЦНИИ КМ «Прометей»), «ФТ-4» (НГТУ)							
Комбинированнный	1	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							
(внутренний нагреватель									
+ осевой насос)									
С газлифтным насосом	1	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							
МА для статических малообъемных установок									
Капельный	6	«РУ КИ» (НИКИЭТ)							
С газлифтным насосом	3	«РУ ТТ-3» (ГНЦ РФ - ФЭИ)							

С 2000 г. по настоящее время было разработано 57 массообменных аппаратов, которые испытывались и эксплуатировались на циркуляционных стендах (9 типов МА) и статических установках (2 типа МА). 20



ОПЫТ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ТЖМТ ДЛЯ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ



Системы регулирования кислородного потенциала для 4 стендов АО «НИКИЭТ», г. Москва





Измерительноуправляющий комплекс



Погружная часть MA



Системы регулирования кислородного потенциала эксплуатируются на стендах АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (ТТ-1М, ТТ-2М, СМ-1, СМ-2, СПРУТ и др.), выполнена разработка систем для стендов АО «ЦКБМ».

Система регулирования кислородного потенциала для стенда CIRCE ENEA, г. Бразимоне, Италия



Погружная часть МА (модель)







Погружная часть



ДАК





Газовый контур МА

ДАК

Система регулирования кислородного потенциала для 2 стендов ЦНИИ КМ «Прометей», г. С.-Петербург





нагревателя)

Рабочая часть MA

21



ПРИМЕР РЕГУЛИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РЕСУРСЕ НА СТЕНДЕ СМ-2 (ГНЦ РФ – ФЭИ) В 2000 – 2004 г.г.





S_{стенда} = 9,8 м²; m_{PbO} = 1,2 кг; ручное регулирование.



ОЧИСТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИМИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ





Периодическая очистка теплоносителя и поверхностей контура от отложений водородосодержащими газовыми смесями (1 раз в год для реакторных установок с ТЖМТ)

POCATOM

УСЛОВИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ВОДОРОДНОЙ ОЧИСТКИ





Время, ч

Зависимость скорости всплытия от размера газового пузыря

Характерная кривая отработки водорода при поверхностной очистке и в режиме эжекционного впрыска газовой смеси в поток теплоносителя

- Наличие в циркуляционном контуре сепараторов газа (свободный уровень теплоносителя, низкоскоростные течения) значительно затрудняет проведение водородной очистки.
- □ Шлаки на основе PbO могут образоваться в любом участке контура.

Для их удаления эффективным является только одно решение – диспергация газовых пузырей и впрыск в поток ТЖМТ мелкодисперсной газовой фазы.

10.00



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОБОСНОВАН ДИСКОВЫЙ ДИСПЕРГАТОР ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ОЧИСТКИ



ПРЕИМУЩЕСТВА:

- 1. Генерация пузырей очень малого размера (менее 100 мкм) с высокой эффективностью доставки в нужную зону контура.
- 2. Возможность монтажа в контуре любой компоновки.
- 3. Простота конструкции.







фильтра)

ФИЛЬТРАЦИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ Pb, Pb-Bi – НЕПРЕРЫВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ОТ ВЗВЕСЕЙ









ХАРАКТЕРНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ В КОНТУРЕ С ТЖМТ С ФИЛЬТРОМ И БЕЗ НЕГО







ОЧИСТКА ЗАЩИТНОГО ГАЗА ОТ АЭРОЗОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ





ГНЦ РФ – ФЭИ

Дисперсный состав и концентрация аэрозолей Высокотемпературный фильтроматериал



Микрофотографии аэрозольных частиц свинца, уловленных металловойлоком

Низкокотемпературный фильтроматериал





СТЕНДОВАЯ БАЗА ГНЦ РФ - ФЭИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТЖМТ И ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ





Установка поверки датчиков контроля кислорода в ТЖМТ



Установка для фундаментальных исследований физикохимических процессов



Неизотермический циркуляционный стенд TT-2



Неизотермический циркуляционный стенд TT-1

Циркуляционная петля (изотермическая)

Комплекс аналитического оборудования





1. Решение вопросов технологии тяжелых теплоносителей реализуется на всем жизненном цикле реакторной установки. Мероприятия по технологии теплоносителей включают НИОКР по обоснованию, проектированию и созданию методов и средств технологии теплоносителя, а также непосредственное проведение процессов технологии при подготовке теплоносителя, при пуске энергетической установки, при ресурсной ее эксплуатации и при выводе из эксплуатации.

2. Выбор необходимых методов и средств технологии теплоносителей для проектов перспективных ЯЭУ обоснован как с учетом имеющегося 60-ти летнего опыта освоения теплоносителей, так и на основании результатов проводимых проектных НИОКР, учитывающих особенности нового поколения реакторных установок.





3. Разрабатываемые методы и средства технологии теплоносителя включают систему водородной очистки теплоносителя и контура от шлакообразующих примесей, систему регулирования растворенного кислорода в теплоносителе для обеспечения противокоррозионной защиты сталей от коррозии, систему фильтрации теплоносителя и защитного газа, системы контроля теплоносителя как в реакторных, так и в нереакторных условиях, а также другие системы.

4. Разрабатываемые процессы технологии тяжелых теплоносителей предусматривают тщательную подготовку теплоносителей до загрузки и при загрузке в контур РУ, проведение комплекса мероприятий в пусковых режимах и минимальное отвлечение персонала РУ на проведение процессов технологии теплоносителя при ресурсной эксплуатации.





5. Одним из актуальных вопросов, определяющих надежную работу будущих РУ, является подготовка в настоящее время кадров со специализацией по вопросам технологии тяжелых теплоносителей.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Пятая международная конференция «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)»

Экспериментальное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями

А. П. Сорокин, Ю. А. Кузина, А. И. Орлов

Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 8-10 октября 2018 года

Основные направления исследований гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах с жидкометаллическими теплоносителями



Одними из важнейших проблем создания и развития реакторов новых типов всегда являлись вопросы теплофизики – выбор и освоение теплоносителей, изучение теплообмена и гидродинамики.

Это лучше всех понимали И.В. Курчатов, Д.И. Блохинцев и А.И. Лейпунский, по инициативе которых для решения этих задач уже через месяц после пуска Первой АЭС в июле 1954 г. в Лаборатории «В» (в дальнейшем – Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского (ГНЦ РФ – ФЭИ)), под руководством В. И. Субботина был создан теплофизический отдел.

Его создание положило началу формирования научной школы ГНЦ РФ – ФЭИ «Тепломассоперенос, физическая химия и технология теплоносителей в энергетических системах», прошедшей более чем 60-летний путь своего развития.

Основные направления исследований

- обоснование режимов работы действующих и проектируемых реакторных установок
- обоснование инновационных технических решений активной зоны и узлов оборудования для реакторов нового поколения
- оптимизация конструкции реакторных установок
- повышение безопасности, улучшение экономических характеристик, достижение ресурса ~50-60 лет

Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300







Экспериментальная стендовая база ГНЦ РФ - ФЭИ для решения теплофизических проблем ТЖМТ





Первый Pb-Bi стенд (1951 год)



Стенд «TT-1М» с Рb и Рb-Вi для технологических исследований



Аэродинамический стенд «СГДИ»



Стенд «6Б» для теплогидравлических исследований

Потребности развития методов численного моделирования гидродинамики и теплообмена требуют проведения экспериментальных исследований:

- для получения данных по физическим закономерностям и характеристикам гидродинамики и теплообмена в РУ,
- соотношений для замыкания уравнений численных моделей, верификации расчетных кодов.

Для решения этих задач создан комплекс экспериментальных жидкометаллических стендов, разработано оборудование, методы моделирования, методики проведения экспериментов и техника измерений, созданы датчики, средства автоматизации съема и обработки экспериментальной информации.

Задачи теории моделирования теплофизических процессов



При подготовке и проведении теплофизических экспериментов одним из важнейших вопросов является выполнение условий механического, теплового и термодинамического подобия, устанавливающего зависимость физических свойств движущейся теплопроводящей среды от параметров состояния и самые общие зависимости для описания теплопередачи в различных жидкостях при самых разнообразных условиях гидродинамики и теплообмена в исследуемых объектах.

Анализ подобия и следующие из него критерии и асимптотические решения должны применяться в полном объеме. В том случае, когда возможно достаточно полное аналитическое решение или численное исследование математической модели, цель экспериментов – апробация ее основных предпосылок, а также уточнение расчетных коэффициентов.

За последние десятилетия написано немало монографий и учебных пособий на эту тему. Но, как отметил академик С.С.Кутателадзе, «внешняя простота основ этого анализа и все возрастающая многопараметричность задач физико-математического моделирования приводят к недоразумениям и прямым ошибкам».

Целью работы является анализ применения принципов моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в жидкометаллических теплоносителях и теории подобия теплофизических процессов при проведении экспериментальных исследований на моделях с использованием других сред для обоснования гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах с жидкометаллическими теплоносителями и переноса данных на реакторные условия.

Основные характеристики и особенности жидких металлов (1)



Жидкие (расплавленные) металлы с точки зрения теплообмена образуют особый класс теплоносителей, характеризующийся значительной объемной теплоемкостью и высокой теплопроводностью. Коэффициент кинематической вязкости у них намного меньше коэффициента температуропроводности, или, что то же самое, число Прандтля *Pr* << 1

Теплофизические свойства жидких металлов при температуре 500°С

Расплав	Тпл	Ткип	Rnл	Ккип	ρ	Ср	λ	v 10 ⁻⁸ ,	a 10 ⁻⁶ ,	<i>Pr</i> 10 ⁻³
	°C	°C	кДж/кг	кДж/кг	кг/м ³	Дж/(кгК)	Вт/(м К)	м ² /с	м ² /с	
Литий (<i>Li</i>)	180,5	1347	663	19400	486	4178	49,98	59,2	25,6	2,3
Натрий (Na)	97,8	883	113	3870	883	1262	66,34	25,9	62,86	4,624
Калий (К)	63,6	774	61,4	1983	739	763	41,9	24		3,2
Na-K (22%Na	-12,5	784	96	2540	751,9	871,9	26,2	23,4	40,1	5,86
+78%K)										
Na-KCs	-78				1235	384	13,7	15,4		5,3
Цезий (Cs)	28,5	678	15,73	495,9	1597	220	18,5	12,8		2,1
Свинец (Рb)	327,4	1745	25	860	10470	147,3	15,45	17,62	9,82	17,8
Висмут (<i>Bi</i>)	271,4	1533	50,15	857	9854	150	14,2	13		13,5
Pb-Bi (44,5%	125,0	1638	39	860	10050	145	14,2	13,6	9,7	14,7
<i>Pb</i> +55,5% <i>Bi</i>)										
Pb-Li (99,32%Pb	235,0		29,6		9326	175	51	13	9,7	27
+0,68% Li)										
Ртуть (<i>Hg</i>)	-38,9	356,7	1,62	289	12370	139	13,36	6,48	7,78	8,3
Галлий (<i>Ga</i>)	29,8	2403	80,2	3673	5822	380	50,9	15,9		6,9
Индий (In)	156,2	2080	28,47	1972	7010	252	48			

Основные характеристики и особенности жидких металлов (2)



В тепловые молекулярной жидких металлах возмущения, связанные С теплопроводностью, распространяются в глубь потока на значительно большие возмущения поля скоростей, обусловленные действием расстояния. чем молекулярного трения. Динамический пограничный слой «тонет» в тепловом пограничном слое, и понятие теплового пограничного слоя, который распространяется до центра канала, теряет смысл.

Вследствие хорошей теплопроводности, обусловленной электронной проводимостью, жидкие металлы характеризуются высокими коэффициентами теплообмена, что обеспечивает приемлемые температурные режимы работы поверхностей теплообмена при достаточно высокой плотности теплового потока.

Жидкие металлы имеют высокие температуры кипения и не требуют высокого давления для предотвращения их закипания.

Недостатком большинства из жидких металлов является высокая химическая активность при взаимодействии с кислородом воздуха, водой и конструкционными материалами. При определенных условиях это приводит к ухудшению теплообмена.

Особенность, которую следует учитывать при изучении теплообмена в жидких металлах в области теплоотдающей поверхности (теплоотдачи) – поведение примесного состава жидкометаллического теплоносителя при циркуляции жидкого металла у поверхности теплообмена при номинальном режиме и отклонениях от режима нормальной эксплуатации, а также необходимость осуществления контроля за их состоянием.

Принципы и условия физического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена (1)



Прямое физическое моделирование заключается в том, что воспроизводится процесс той же физической природы, что и в натурном образце, но одноименные характеристики процесса изменены (уменьшены или увеличены) на некоторые постоянные множители. Иначе говоря, любые два физически подобные явления могут образовывать пару натурный образец – модель.

Отсюда следует фундаментальное правило моделирования, сформулированное М.В. Кирпичевым и А.А. Гухманом: подобны системы одной физической природы, условия однозначности которых подобны, а одноименные критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы.

Для полного подобия модели натурному образцу должны быть выполнены следующие условия:

a) процесс, воспроизводящийся в модели, относится к тому же классу физических явлений, что и процесс в натурном образце, оба процесса подчиняются одним и тем же уравнениям и характеризуются одинаковыми физическими величинами;

б) модель геометрически подобна натурному образцу;

в) безразмерные краевые условия в натурном образце и модели одинаковы качественно и численно;

г) безразмерные независимые переменные (определяющие критерии), переменные в натурном образце и модели попарно имеют одинаковое численное значение.

При выполнении этих условий моделирование является прямым и полным.

Принципы и условия физического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена (2)



Физическое моделирование с достаточно четко очерченными границами достоверности получаемых с его помощью результатов возможно только на базе некоторой заранее выбранной математической модели.

Практически прямое моделирование может неограниченно применяться лишь для процессов, определяемые числа подобия которых являются функциями только геометрических симплексов системы и одного определяющего критерия. Наличие двух определяющих критериев, как, например, чисел *Re* и *Pr* при теплообмене, заметно осложняет моделирование. При трех определяющих критериях прямое моделирование обычно неосуществимо. В таких случаях необходима постановка систематических многовариантных экспериментов.

Назначением таких моделирующих экспериментов является реальное выявление эффектов, разрешенных весьма общей математической моделью, но не воспроизводимых на современном уровне математических технологий ни аналитически, ни в численных исследованиях. Например, выяснение сложных вихревых структур в потоках вязкой жидкости, получение корреляционных функций для конкретных турбулентных течений и т.д.

В настоящей работе представлены результаты анализа особенностей применения теории подобия теплофизических процессов применительно к моделированию:

- гидродинамики и теплообмена в жидких металлов в каналах сложной формы;
- теплогидравлики в стержневых системах с жидкометаллическими теплоносителями (активная зона, теплообменники);
- полей температуры и скорости в горячей камере реактора в различных режимах работы.

Основные определения в области моделирования теплофизических процессов



энтальпии і или энтропии s через термодинамические параметры p, T). В большинстве случаев параметры движения (скорость w, давление p, плотность p, температура жидкости T) изменяются во времени r.

Уравнения движения и переноса тепла для вязкой и теплопроводящей жидкости обезразмериваются с введением безразмерных переменных, определяемых условиями: $x^* = x_{l_l}, z^* = z_{l_l}, \tau^* = \tau w_0 / w_x = w_x / w_0$,

где / – характерный размер, м; w_0 – характерная скорость, м/с; $T_{cr} - T_0$ – характерная разность температур, °С; **р**_о – характерное давление, Па. Для нестационарных процессов в число безразмерных параметров включается $Fo = at_0/l^2 - число Фурье.$

Величины *I*, *w*₀, *T*_{ст} – *T*₀, v, *a* называются характеристическими, так как они определяют условия, в которых происходит движение жидкости, при этом *I*, *w*₀, *T*ст – *T*₀ – задаются произвольно, *v*, *a* – характеризуют свойства жидкости.

Коэффициент температуропроводности характеризует способность среды реагировать изменением температуры на прохождение потока теплоты. Кинематический коэффициент вязкости характеризует способность реагировать изменением скорости на прохождение потока количества движения.

Комплексы параметров в уравнениях являются безразмерными и называются критериями подобия:

 $Re = w_0 l/v - число Рейнольдса, Pe = w_0 l/a - число Пекле, Ma = w_0/c - число Маха,$

 $E_{u} = \frac{\rho_{o}}{\rho W_{o}^{2}} - число Эйлера, Pr = Pe/Re = v/a - число Прандтля, Nu = al/\lambda - число Нуссельта, <math>Ar = \frac{gl^{3}}{v^{2}} \frac{\Delta \delta}{\rho} - число Архимеда, \quad Ga = \frac{gl^{3}}{v^{2}} - число Галелея, \quad Fr = \frac{W_{o}^{2}}{gl} - число Фруда.$

Критерии подобия устанавливают динамическое или кинематическое подобие, суть которого состоит в том, что при одинаковом значении составляющих критериев отношения двух физических (например, сил) при одинаковой геометрии потоков имеют одно и то же значение. Критерии подобия определяют относительное влияние как действующих в потоке сил, так и происходящих в потоке процессов переноса (перенос импульса вследствие вязкости и перенос теплоты посредством теплопроводности).

Моделирование гидродинамики жидких металлов в каналах (1)



Еще в 30-х годах прошедшего столетия были проведены первые работы, показывающие принадлежность расплавленных металлов к ньютоновским жидкостям. Определяющим критерием моделирования гидродинамических процессов в каналах сложной формы является критерий Рейнольдса. В 1940-х годах в работе М. А. Стыриковича и др. была показана идентичность профилей скорости при течении в трубах ртути и обычных жидкостей. Позднее это подтвердили исследования В. М. Боришанского и С. С. Кутателадзе.

В ЦКТИ им. И. И. Ползунова были получены данные о течении ртути в стеклянных трубах. Отклонения от формулы Блазиуса отмечено не было.

В 1950-х годах были получены аналогичные результаты для ртути и олова, текущих в гладких стальных трубах. Подобные опыты были выполнены с расплавленным железом и чугуном в керамических трубах. Толстой Д. М. теоретически и экспериментально установил, что скольжение при движении ртути имеет место, но оно сказывается только при движении в трубах очень малого диаметра. Так, для трубы с диаметром *d* = 7 микрон объемный эффект скольжения составляет около 28%, а при *d* = 26,6 микрона около 6%.

Опыты показали, что порядок численных значений коэффициентов трения при движении ртути и ртутномагниевой амальгамы в трубах такой же, как и при движении обычных жидкостей.

Высокая теплопроводность и слабая зависимость теплофизических характеристик жидких металлов от температуры приводят к слабой зависимости профиля температуры в потоке жидкости от величины теплового потока. Вследствие этого тепловой поток слабо влияет на гидравлическое сопротивление при течении жидких металлов. Данные для шероховатых труб М. А. Стыриковича и др. также не показали какихлибо особенностей течения жидких металлов.

Это позволяет проводить моделирование динамики жидких металлов на воде и газах.



Сопоставление зависимостей для коэффициентов гидравлического сопротивления трения ξ от режима движения для воды, ртути и ртутно-магниевой амальгамы

Моделирование гидродинамики жидких металлов в каналах (2)







Аэродинамический стенд СГДИ

Техника измерений – гидродинамические зонды, термоанемометры, лазерный доплер-скоростеметр, электромагнитные расходомеры

Профили скорости на нормалях к стенкам сложных каналов при течении жидких металлов описываются универсальным законом Прандтля-Кармана

 $U^{+} = \begin{cases} \eta & npu \ \eta < 5 \\ 5 \ln \eta - 3,05 & npu \ 5 \le \eta \le 30 \\ 2,5 \ln \eta + 5,5 & npu \ \eta \ge 30 \end{cases}$

Гидравлическое сопротивление каналов

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{8} \operatorname{Re} \int_{0}^{1} \left(\frac{R \, dR}{1 + \frac{\varepsilon \, \sigma}{v}} \right) R \, dR$$

Гидравлическое сопротивление пучков стержней





ξ,/



Треугольная решётка гладких твэлов

$$\xi = \frac{0,210}{\text{Re}^{0,25}} \left[1 + (s/d - 1)^{0,32} \right]$$

$$\leq s/d \leq 1,5 \quad 6 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5$$

Квадратная решётка гладких твэлов $\xi/\xi_{\rm Tp} = 0,59 + 0,19 (s/d-1) + 0,52[1 - \exp(-b)]$ b = 10 (s/d-1) $1 \le s/d \le 2$ $10^4 \le {\rm Re} \le 2 \cdot 10^5$

Треугольная решётка с оребрением твэлов «ребро по ребру»


Распределение скорости и касательных напряжений в поперечном сечении пучка стержней



Номинальная геометрия





Деформированная решётка





Гидродинамика входных коллекторов и проточной части реакторных установок





POCATOM

Распределение коэффициента радиальной турбулентной диффузии по нормали к стенке по данным различных авторов Распределение коэффициента азимутальной турбулентной диффузии по нормали к стенке по данным различных авторов Сравнение зависимостей для коэффициента анизотропии турбулентного переноса импульса в треугольных решетках стержней, рекомендованных различными авторами



Закономерности турбулентного переноса в пучках гладких стержней



Наблюдается интенсификация турбулентного переноса импульса во всех каналах по сравнению с круглой трубой, не всегда монотонный характер изменения интенсивности турбулентных пульсаций.

Распределения радиальных касательных напряжений в сборке твэлов отличается от линейного закона распределения в трубе.

Полученные соотношения для коэффициентов турбулентного переноса импульса в решетках твэлов существенно различаются. Расчетные методики предполагают независимость мелкомасштабной турбулентной диффузии и крупномасштабного турбулентного переноса.

Коэффициент анизотропии турбулентного переноса импульса изменяется до 50 раз.

Анализ показывает, что значительная интенсификация турбулентного переноса импульса в периферийной области ТВС и в деформированных решетках твэлов объясняется возникновением интенсивного крупномасштабного переноса импульса (вторичных токов).

Моделирование теплообмена жидких металлов в трубах (1)



При исследовании теплообмена в жидких металлах для установившегося течения используется гипотеза, что в критериальном уравнении *Nu* = *f* (*Re, Pe*) можно приближенно исключить число Рейнольдса. Работы, указывающие на дополнительные погрешности при ее использовании, неизвестны.

Лайон (1951 год) с использованием интегрального метода расчета и условия равенства единице турбулентного числа Прандтля получил теоретическое соотношение для теплоотдачи в трубах

$Nu = 7 + 0,025 * Pe^{0,8}$

Интенсивные исследования теплообмена в жидких металлах начались в 1950-х годах в связи с развитием ядерной энергетики и разработки реакторов на сплаве *Pb-Bi* для подводных лодок. Систематические исследования выполнялись, начиная с 1953 года под научным руководством В.И. Субботина.

В 1956–1959 годах в ФЭИ были созданы крупные экспериментальные стенды, на которых была получено большое количество данных по теплообмену в *Hg, Pb-Bi, Na, Na-K, Li, Cs* и других теплоносителях. Исследования продолжались и в последующий период вплоть до настоящего времени.



до 1965 г.: 1 – Стырикович; 2, 3 – Корнеев; 4 – Михеев; 5 – Кириллов; 6 – Петухова; 7 – Дерюгин; 8, 8а – Дуди, Юнгер; 9, 9а – Джонсон; 10 – Исаков; 11 – Бейли; 12 – Броун; 13 – Боришанский; 14 – Эльзер; 15 – Ушаков Формальное накопление опытных данных мало что дало — на графиках появились «облака» точек. После отбраковки ненадежных и ошибочных данных ясно, что экспериментальные данные по теплоотдаче жидких металлов в трубах группируются между двумя предсказуемыми зависимостями

Для очищенных от примесей ЖМ

$$Nu = 5 + 0,025Pe^{0,8}$$

Ухудшенная теплоотдача примесями в ЖМ Nu =

^a $Nu = 3 + 0,014Pe^{0,8}$

Моделирование теплообмена жидких металлов в трубах (2)



Различие между теоретической формулой Лайона и другими формулами объясняется различием в краевых условиях на поверхности теплообмена (условие г) полного подобия в разделе 1). На границе теплоотдающей поверхности с жидкими металлами наблюдается термическое контактное сопротивление. Его происхождение длительное время оставалась неясным, а результаты измерений были противоречивы.



Данные контрольных измерений теплообмена в ртути и сплаве *Na-K* в круглых трубах: расчет по формуле:

 $1 - Nu = 7 + 0.025 Pe^{0.8}$; $2 - Nu = 5.2 + 0.025 Pe^{0.8}$; $3 - Nu = 4.3 + 0.025 Pe^{0.8}$; 4 - Nu = 5 + 0.014 Pe;

△ – ртуть-никель; ▲ – ртуть-нержавеющая сталь; • – натрий-калий-медь; ○ – ртуть Специальные опыты по теплоотдаче с ртутью в трубах из никеля и сплавом натрий-калий в трубах из меди и нержавеющей стали, выполненные двумя независимыми группами сотрудников ФЭИ в 1962–1965 годах (В. Д. Таланов, И. П. Свириденко) под руководством П. А. Ушакова при более тщательной очистке жидких металлов, дали одинаковые результаты, близкие к расчетам по формуле для очищенных ЖМ.

Результаты работ П. Л. Кириллова и др. и М. Х. Ибрагимова и др., в которых измерялось распределение температуры в потоках *Na-K* и *Pb-Bi*, близки расчетам по формуле Лайона.

Моделирование теплообмена жидких металлов в трубах (3)



Было показано, что на границе раздела теплоноситель – поверхность теплообмена контактное термическое сопротивление отсутствует, когда концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего жидкого металла.

В результате систематических исследований, выполненных в ФЭИ Ю. И. Орловым, М. Н. Ивановским, П. Л. Кирилловым, показано, что основной причиной контактного термического сопротивления является осаждение на поверхностях теплообмена взвешенных в потоке жидких металлов твердых частиц.

Вблизи стенки в области ламинарного подслоя жидкости примеси скапливаются в слой, сцепленный со стенкой и представляющий почти плотную упаковку кристаллов примеси, и в переходной области в слой с переменной концентрацией. В турбулентном потоке концентрация взвешенных примесей в тысячи раз меньше, чем у стенки, и близка к концентрации насыщения.

П. Л. Кирилловым предложена приближенная модель, отражающая влияние контактного термического сопротивления на теплоотдачу.

Предлагается формула (4)

$$\mathbf{N}\mathbf{u} = \frac{\mathbf{N}\mathbf{u}_0}{1 + \mathbf{\phi} \cdot \mathbf{N}\mathbf{u}_0}$$

где φ≅[1600C₀₂ − 5000C²₀₂ − 30]Re^{-0,7} – поправка на контактное сопротивление, зависящая от массовой концентрации кислорода в натрии и числа Re.

Формула носит довольно частный характер, так как относится к случаю нагревания жидкого металла в трубе из нержавеющей стали при условии наличия сформировавшегося слоя примесей у стенки.

Влияние контактного термического сопротивления на теплоотдачу в трубах





Зависимость контактного термического сопротивления в трубах от числа Рейнольдса: расчет по формулам (4) – – – – и (5) – – - –; • – сплав натрий-калий в медной трубе; , • – сплав натрий-калий в молибденовой трубе; ⊗ – литий в молибденовой трубе; □ – по измерениям температуры лития в пристенном слое у стальной трубы; △ – сплав свинец-висмут в стальной трубе

Моделирование теплогидравлики в тепловыделяющих сборках твэлов быстрых реакторов



Поскольку теплообмен в сборках твэлов осуществляется конвективным переносом тепла, высокая теплопроводность жидких металлов не гарантирует отсутствие больших неравномерностей температуры в их конструкциях. Низкое число Прандтля, присущее жидким металлам, не дает какого-либо преимущества в части уменьшения неравномерностей температуры в этих конструкциях по сравнению с водой. Поля температуры определяются степенью подогрева струй теплоносителя, а не коэффициентами теплоотдачи, что существенно повышает требования к организации гидродинамики реакторов.

При постановке задач по конвективному теплообмену В. И. Субботиным и его сотрудниками первостепенное внимание было направлено на развитие теории приближенного теплового моделирования применительно активным зонам реакторов – моделированию твэлов многослойными или однослойными трубками с электрообогревом изнутри.

П. А. Ушаковым было показано, что конвективный обмен в каналах сборки твэлов должен рассматриваться в совокупности с теплопроводностью в стенках, то есть в тепловыделяющих элементах в сборках реакторов решается «сопряженная задача» теплоотдачи от твэлов.

Распределение температуры твэлов в пучке зависит не только от классических критериев подобия, но и от конструкции и теплофизических характеристик элементов твэлов и тепловыделяющей сборки.

Соотношение для температуры теплоносителя принимает вид: $T_f = f_2(\xi, z, \phi, \text{Re}, \text{Pe}, \varepsilon_{k_0})$

Сущность приближенного теплового подобия заключается в учете только основной гармоники в рядах Фурье. Эта величина названа критерием приближенного теплового подобия твэлов. Основными гармониками являются: $k_0 = 6$ для треугольной и $k_0 = 4$ для квадратной решеток, $k_0 = 1$ для эксцентрических кольцевых каналов и твэлов у плоской стенки.

Техника эксперимента по теплообмену в сборках твэлов быстрых реакторов











Теплоотдача в правильных решетках твэлов





А. В. Жуковым и др. рекомендованы обобщенные зависимости для расчета теплоотдачи и температурных полей в каналах сложной формы, учитывающие влияние геометрии и материалов твэлов

Nu = Nu_{лам} +
$$\frac{0,041}{x^2} \left[1 - \frac{1}{\frac{x^{30} - 1}{6} + (1,15 + 1,24\varepsilon_6)^{1/2}} \right]$$
 Pe

$$1 < x = s/d < 2; 1 < Pe < 4000; 0,01 < \varepsilon_6 < \infty$$

 $T^+ = 4,75 \ln \eta - 7,5$

При теплосъеме жидкими металлами подтверждена квазиуниверсальность безразмерного профиля температуры на нормалях к стенкам каналов



Азимутальные неравномерности температуры в правильных решетках твэлов





Межканальный обмен в сборках твэлов (1)



Существенной особенностью теплогидравлики сборок твэлов является влияние на распределение параметров межканального массо- и теплообмена.

Исследования по межканальному обмену в сборках твэлов были инициированы академиком А.И.Лейпунским. Под межканальным обменом понимается явление переноса субстанции между двумя соседними потоками среды в каналах (ячейках).

Для измерения коэффициентов межканального обмена разработаны тепловые и электромагнитные методы, метод фреонового трассера, а также датчики для измерений температуры и расхода теплоносителя по высоте сборки.

Конвективный межканальный перенос в сборках твэлов реакторов с тяжелыми ЖМТ обеспечивается дистанционирующими решетками или дистанционирующими спиральными ребрами с касанием типа «ребро по ребру»





$$\mu_{\kappa}^{M} = \frac{1}{3h} \Phi_{*}(x) \Psi(\text{Re}) \mu \Phi_{*}(x) = A(x) + B - C \exp(-D)$$

1,01 < x < 1,5; $5 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5$; 5 < h/d < 65

Экспериментальные исследования теплогидравлики ТВС активной зоны реактора БРЕСТ на стенде «6Б» (1)



С использованием фирменной методики ГНЦ РФ-ФЭИ получены данные по теплоотдаче и температурным полям на 37-элементной модельной ТВС с шагом 1,33 с гладкими твэлами, с дистанционированием проволочной навивкой и с четырьмя дистанционирующими решетками (моделирующий теплоноситель Na-K)





- Коэффициенты теплоотдачи для «гладкой» области твэлов близки к значениям, ранее рекомендованным для гладких твэлов реакторов с ЖМТ, и намного выше, чем для ранее исследованного дистанционирования типа «ребро по ребру».
- Низкие неравномерности температуры по периметру твэлов.
- В области дистанционирующих решеток наблюдается локальное увеличение теплоотдачи (до 50%) по сравнению с гладкими участками.



Получены данные по теплоотдаче и температурным полям в 37-стержневой модельной ТВС с нестандартной геометрией (зона необогреваемого несущего стержня при дистанционировании решетками).



Наблюдается падение температуры поверхности измерительного имитатора и температуры теплоносителя в ячейках со стороны несущего стержня. Это вызывает увеличение максимальной неравномерности температуры по периметру имитатора по сравнению со сборкой без несущей конструкции почти в 3 раза.

Выявлено некоторое снижение теплоотдачи имитатора, находящегося рядом с несущим стержнем, (около 10%) по сравнению с модельной сборкой без несущей конструкции.

Для всех исследованных величин получены формулы, используемые при теплогидравлическом обосновании активной зоны реактора БРЕСТ и верификации кодов.





Моделирование теплогидравлических процессов в баке быстрых реакторов



Первый контур циркуляции (баковая конструкция) быстрого реактора — это сложное сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов с различной ориентацией в поле тяжести, геометрические характеристики проходных сечений которых резко меняются по ходу движения.

Погрешности моделирования теплогидравлики на фрагментарных секторных моделях с изотермическим потоком во многом связаны с неучетом пространственных 3-мерных эффектов и температурной неоднородности потока.

Теплоноситель всегда неизотермичен из-за неравномерности энерговыделения, перепада температуры между узлами контура циркуляции, особенностей теплосъема в переходных и аварийных режимах работы.

Крупномасштабные стенды для моделирования теплогидравлики САОТ быстрых реакторов



Для изучения теплогидравлических процессов в баках реакторов и элементах САОТ в Германии в рамках проекта Европейского быстрого реактора (EFR) были созданы сложные водяные стенды

- RAMONA (М: 1:20), NEPTUN (1:5), водо-воздушный стенд KIVA (М: 1:10),
- натриево-воздушный стенд ILONA (1:3),
- для обоснования САОТ японского демонстрационного реактора водяные стенды (М: 1:20, 1:6, 1:8),

на которых были получены обширные данные для верификации расчетных кодов.







Рамона

Нептун

Илона

Использование крупномасштабных моделей с натурным теплоносителем приводит к высокой стоимости экспериментальных установок и выполнения исследований.

Моделирование теплогидравлических процессов в баке быстрых реакторов



На мелкомасштабных моделях с натурным теплоносителем (жидким металлом) точное моделирование гидродинамики и теплообмена в баке реактора невозможно из-за невозможности одновременного соблюдения важнейших критериев подобия – чисел Рейнольдса ($Re = w\ell/v$), Пекле ($Pe = w\ell/a$), Фруда ($Fr = w^2/g\beta\Delta T\ell$).

Проведенные исследования показали, что при числе *Re* > 10⁴, размеры застойных и рециркуляционных образований при равных значениях числа Фруда для модели и реактора (*F_{rm}* = *F_{rp}*) не изменяются. Таким образом, моделирования по числу Рейнольдса не требуется.

В данном случае в вязкой жидкости возможно моделирование в режимах принудительной циркуляции по числам Фруда и Пекле без сохранения числа Рейнольдса.

Приближенное моделирование режимов естественной циркуляции обеспечивается консервативным моделированием по числу Эйлера *Eu* = ∆*P*/р*W*².

Модель быстрого реактора с интегральной компоновкой на водяном стенде «В-200»



В ГНЦ РФ – ФЭИ совместно с кафедрой теплофизики НИУ МЭИ и отделом теплообмена ОИВТ РАН были проведены теплогидравлические исследования на водяной модели первого контура в масштабе ~ 1:10 быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем с интегральной компоновкой оборудования





Общий вид экспериментальной модели модели



Внутрибаковое оборудование экспериментальной модели

Экспериментальная водяная модель первого контура реактора с интегральной компоновкой оборудования: *а* – основные элементы первого контура; *б* – внутрибаковое оборудование: *1*, *6* – промежуточный теплообменник; *2* – элеваторная выгородка; *3* – элементы внутрибаковой защиты; *4* – активная зона (имитаторы TBC); *5* – напорная камера; *7* – имитатор ГЦН-1; *8* – автономный теплообменник

Моделирование теплогидравлических процессов в баке реактора на быстрых нейтронах (1)





Распределения полей температуры и скорости теплоносителя по высоте верхней камеры не является изотропным в азимутальном направлении. Вторичные слоистые течения в этих зонах связаны с радиальным градиентом температуры, обусловленным горячим потоком вдоль центральной поворотной колонны и относительно холодной поверхностью промежуточных теплообменников

POCATOM

Моделирование теплогидравлических процессов в баке реактора на быстрых нейтронах (2)



Результаты проведенных на модели экспериментальных исследований показали, что воздействие термогравитационных сил приводит к температурному расслоению с возникновением застойных и рециркуляционных образований, перестройке характера течения и температурного режима.

На стратифицированных границах раздела возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования. Это приводит к термической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования.

Установившийся режим естественной циркуляции характеризуется значительно меньшими градиентами температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами.





Усредненная температура теплоносителя в верхней камере при перемещении подвижных термозондов по высоте в номинальном и установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией

Моделирование теплогидравлических процессов в баке реактора на быстрых нейтронах (3)

Интенсивность пульсаций температуры теплоносителя в верхней камере реактора



Распределение пульсационной температуры по высоте верхней камеры

Распределения осредненной и пульсационной температуры по высоте верхней камеры на расстоянии 125 мм от оси активной зоны

50.0

Турбулентные вихри из верхней горячей и нижней холодной зон с масштабами *I* > ℓ_n подавляются в разделительном слое и создают внутренние волны, вызывающие пульсации температуры в материале стенок оборудования.

POCATOM

-ATO

—ПТО

52.0

Критерии подобия течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя



Критериями, определяющими подобие сложной структуры движения неизотермического теплоносителя в стратифицированных зонах теплоносителя в верхней камере быстрого реактора при принудительной циркуляции, являются числа Фруда (*Fr*), Пекле (*Pe*) и локальное градиентное число Ричардсона (*Ri*), при условии автомодельности по числу *R*е

$$Fr = \frac{W^2}{g\beta\Delta tL}; \quad Pe = \frac{W\cdot L}{a}; \quad R_i = \frac{g\beta(\partial t / \partial z)}{(\partial W / \partial z)^2}; \quad \text{Re} = \frac{W\cdot L}{v};$$

Наиболее употребительной характеристикой стратифицированного течения являются частота Вайсяля-Брента и масштаб плавучести $N^{2} = \frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right); \quad l_{\Pi \Pi} = \rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{-1}$

В устойчиво стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. Поэтому крупномасштабные вихри больше масштаба плавучести подавляются и растекаются вдоль стратифицированной области раздела в виде внутренних волн. Внутренние волны создают пульсации температуры в материале стенок оборудования с частотой *f* ≤ *N*.

В предельном случае, например при срабатывании быстрой аварийной защиты, когда *I*_п < *I*_к, конвективный перенос через поверхность раздела между холодной и горячей областями потока полностью подавляется. Здесь *I*_к = (υ³/ε)^{0,25} – масштаб Колмогорова, *ε* – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

Заключение (1)



При планировании экспериментального исследования, обобщении его результатов, анализ подобия и следующие из него критерии и асимптотические решения должны применяться в полном объеме.

Результаты проведенного исследования показывают:

<u>Гидродинамика ЖМ в каналах</u>: определяющим критерием моделирования гидродинамических процессов в каналах является критерий *Re*. Высокая теплопроводность и слабая зависимость теплофизических характеристик ЖМ от температуры приводят к слабой зависимости профиля температуры от величины теплового потока. Это позволяет моделировать гидродинамику ЖМ на воде и газах.

<u>Теплоотдача в ЖМ для установившегося течения в каналах</u>: в результате выполненного комплекса расчетно-теоретических работ и обобщения экспериментального материала, включая распределение температуры в потоке ЖМ, показано, что на границе раздела теплоноситель – поверхность теплообмена термическое (контактное) сопротивление отсутствует, когда концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего жидкого металла. В этих условиях теплоотдача к жидким металлам *Pb, Pb-Bi, Hg, Na, Na-K, Li* и др. описывается единой критериальной зависимостью от числа *Pe*.

В результате систематических экспериментальных исследований показано, что основной причиной контактного термического сопротивления является осаждение на поверхности теплообмена взвешенных в потоке ЖМ твердых частиц. Установлена зависимость КТС от числа *Re* и содержания кислорода.

Заключение (2)



<u>Гидродинамика и теплообмен в ЖМ в ТВС активной зоны реактора</u>: теплообмен в ТВС осуществляется в основном конвективным переносом тепла, поле температуры в значительной степени определяется подогревом жидкого металла. Распределение температуры зависит как от классических критериев подобия *Re, Pe (Pr), Gr,* так и конструкции и теплофизических характеристик твэлов и ТВС — критерия приближенного подобия твэлов.

<u>Гидродинамика и теплообмен в ЖМ в баке реактора</u>: в режиме принудительной циркуляции моделирование на мелкомасштабных моделях осуществляется по числам *Fr* и *P*е при использовании в качестве моделирующей жидкости воды.

Приближенное моделирование режима естественной циркуляции обеспечивается моделированием по числу Эйлера $Eu = \Delta P / \rho W^2$.

Подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя определяется числами *Fr, P*e и локально градиентным числом Ричардсона $Ri = g\beta(\partial t / \partial z)/(\partial W / \partial z)^2$.

Характеристиками устойчиво стратифицированного течения теплоносителя являются частота Вайсяля – Брента $N^2 = (g/\rho)(\partial \rho/\partial z)$ и масштаб плавучести $I_n = \rho(\partial \rho/\partial z)^{-1}$.

Проведенные с использованием теории физического моделирования гидродинамики и теплообмена в жидких металлах исследования позволили получить данные по физике и характеристикам процессов в реакторах с жидкометаллическим охлаждением. Эти данные являются основой для разработки методов теплогидравлического расчета и трехмерных теплогидравлических кодов.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск



Спасибо за внимание!



МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЯДЕРНЫЙ ЭНЕРГОБЛОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ 75 МВт

Хорасанов Г.Л., Самохин Д.С., Зевякин А.С., ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск Земсков Е.А., АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск Блохин А.И.

ИБРАЭ РАН, Москва

Предисловие (Preface)



- Презентация посвящена не столько энергоблоку, сколько специальному реактору-выжигателю минорных актинидов (МА) с жестким спектром нейтронов (средняя энергия нейтронов Еп средн = 0,87 МэВ) и высокой долей (35%) жёстких нейтронов (Еп>0,8 МэВ).
- Это вызвано тем обстоятельством, что реакторвыжигатель запитывается инновационным топливом с обогащением, превышающим разрешенное для энергоблоков обогащение топлива (19,75%).
- В презентации рассматривается <u>только концепция</u> реактора тепловой мощностью 25 МВт.

Содержание презентации



- Необходимость в реакторах с жестким нейтронным спектром
- Выбор размеров активной зоны
- Выбор топлива
- Выбор теплоносителя
- Конструкционные параметры проекта реактора БРУЦ-25
- Нейтронные характеристики активной зоны реактора БРУЦ-25
- БРУЦ-25 как возможный трансмутатор минорных актинидов
- Выводы

Необходимость в реакторах с жестким нейтронным спектром



- Как известно, ряд важных с практической точки зрения ядерных реакций, таких как (n, f), (n, p), (n, a), для некоторых химических элементов протекают эффективно только в жестких нейтронных спектрах при энергиях нейтронов выше 0,8 МэВ.
- Примерами могут служить реакции деления (n, f) для выжигания актинидов Am-241, Pu-240, Pu-242, реакции (n, p) для получения радиоизотопа P-32 на мишени из S-32, реакции (n, a) для получения радиоизотопа P-33 на мишени из Cl-36.

Необходимость в реакторах с жестким нейтронным спектром



- Как правило, для эффективного протекания указанных реакций в активной зоне реакторов требуются высокие плотности потоков нейтронов, более чем 3·E+15 1/см²·с.
- Такими высокопоточными реакторами являются быстрые натриевые реакторы БН-600, БН-800 и в перспективе БН-1200М, БРЕСТ ОД 300, БР-1200.
- Однако на примере известных нейтронных спектров реактора БН-600 будет показано, что средняя энергия нейтронов в активной зоне быстрых натриевых реакторов <u>не превышает 0,5 МэВ.</u>

Необходимость в реакторах с жестким нейтронным спектром



Подзона БН-600	Средняя энергия нейтронов, МэВ	Доля жестких нейтронов в спектре, %	Среднее сечение деления Am-241, барн	Среднее сечение захвата Am-241, барн	Вероятность деления Ат- 241, Р= O fis/ /(O fis+ O cap), %
3MO	0,425	13,20	0,271	1,751	13,40
3CO	0,462	14,68	0,291	1,630	15,40
МОКС	0,495	15,86	0,318	1,594	16,63
3БО	0,482	14,91	0,317	1,790	14,91

Необходимость в реакторах с жестким нейтронным спектром

- Из приведенной Таблицы следует, что в активной зоне реактора БН-600 средняя энергия нейтронов не превышает 0,5 МэВ, а доля жестких нейтронов (En>0,8 МэВ) в спектре составляет не более 16%.
- При этом максимальное среднее (одногрупповое) сечение деления Am-241 составляет 0,3 барна, что при большом сечении захвата нейтрона без деления (1,7 барна) приводит к вероятности деления не более 17%.
- •В работе поставлена <u>цель</u> получить среднюю энергию нейтронов в АЗ реактора выше 0,5 МэВ, а долю жестких нейтронов в спектре – значительно больше 16%.

Выбор размеров активной зоны



- Первым необходимым условием создания такого реактора является выбор размеров активной зоны, при которых не происходит замедления нейтронов в процессе транспорта нейтронов по зоне.
- Мы полагаем, что предельные высота и эквивалентный диаметр активной зоны не должны превышать <u>0,8 метра.</u> При таких размерах активной зоны тепловая мощность реактора будет не более <u>200 МВт</u>.
- В докладе рассматривается концепция реактора с тепловой мощностью 25 МВт.
- Возможность увеличения мощности реактора до 200 МВт в настоящее время исследуется.

Выбор топлива



- Следующим условием получения жесткого спектра является выбор топлива.
 Это должно быть <u>только</u> металлическое топливо, без легких химических элементов O, N, C.
- Примером такого топлива является топливо состава <u>U-Pu-10Zr</u>, разработанное до высокого уровня технологической готовности, TRL=10, и ныне рекомендуемое как топливо в Европейском быстром натриевом реакторе ABR тепловой мощностью 1000 MBт.
- В докладе с целью достижения повышенной средней энергии нейтронов рассмотрено безурановое плутониевое топливо состава <u>Pu-42Zr</u>, уровень технологической готовности которого пока невысок, TRL=5.
- Из Диаграммы состояния сплава <u>Pu-Zr</u> следует, что при температуре 1400 °C сплав Pu с 42% циркония остается в твердом состоянии.

Выбор топлива




Выбор топлива



Таблица сечений неупругого рассеяния нейтронов интэниях миф

g	Low	High	Inela	Inelastic scattering of neutrons cross section, barn					
ABBN	MeV	MeV	Zr-nat	Pb-nat	U-235	U-238	Pu-238	Pu-239	U-233
1	6,500	<u>10,5</u>	1,55724	2,38149	1,01154	1,01826	0,71642	0,83171	0,61819
2	4,000	6,500	1,65030	1,38157	2,22165	2,66934	1,40124	1,67949	1,43121
3	2,500	4,000	1,56016	0,62579	2,40206	3,09087	1,59455	1,82475	1,54045
4	1,400	2,500	0,72001	0,24467	2,31038	3,16768	1,53693	1,82806	1,42405
5	<u>0,8</u>	1,400	0,20541	0,02520	1,93283	2,52269	1,13524	1,55875	1,07374
Average		<u>1,13</u>	<u>0,93</u>	<u>1,97</u>	<u>2,49</u>	<u>1,27</u>	<u>1,54</u>	<u>1,21</u>	
value:			862	174	569	377	688	455	753

Выбор топлива



Ссечения неупругого рассеяния нейтронов ядрами U-233 и Pu-239



Cross Section (barns)

Выбор теплоносителя



ИАТЭ НИЯУ МИФИ



Конструкционные параметры проекта реактора БРУЦ-25 🧹				
ΠΑΡΑΜΕΤΡ	ЗНАЧЕНИЕ			
Тепловая мощность, МВт	25			
Эквивалентный диаметр и высота АЗ, м	0,4×0,42			
Топливо, вес.%	58Pu-42Zr			
Масса <u>энергетического плуто</u> ния в АЗ, кг	53			
Теплоноситель	Pb-nat			
Температура теплоносителя на вх/вых АЗ, °С	450 / 530			
Теплонапряженность А3, кВт/литр	396,7			
Ср. линейная нагрузка на твэл, кВт/м	67,8			
Температура оболочки твэла, °С	610			

Нейтронные характеристики активной зоны реактора БРУЦ-25



ИФИМ УКИН ЄТАИ

ΠΑΡΑΜΕΤΡ	ЗНАЧЕНИЕ
Плотность потока нейтронов в ц-ре АЗ , 1/см ² ·с	<u>3,4·10¹⁵</u>
Средняя энергия нейтронов в центре АЗ, МэВ	<u>0,869</u>
Доля жестких нейтронов, Е _n >0,8 МэВ, в АЗ, %	<u>34,61</u>
Одногрупповое сечение деления ²⁴⁰ Pu, барны	0,759
Одногрупповое сечение деления ²⁴² Pu, барны	0,599
Одногрупповое сечение деления ²⁴¹ Am, барны	<u>0,640</u>
Одногрупповое сечение захвата ²⁴¹ Ат, барны	0,784
Вероятность деления ²⁴¹ Am, %	<u>44,92</u>

БРУЦ-25 как возможный трансмутатор минорных актинидов



- Как известно, в быстрых реакторах, запитанных МОКСтопливом, <u>постоянно</u> появляется изотоп Am-241. Его источником является <u>Pu-241</u>, доля которого в изотопном векторе энергетического плутония составляет 2-3%. Pu-241 – бета-активен с периодом полураспада 14 лет и продуктом его распада является Am-241 с периодом полураспада 432 года.
- Хранение Am-241 нецелесообразно в силу его высокого тепловыделения, 100 кВт/т, высокой альфа-токсичности и летучести при высоких температурах.
- В настоящее время Am-241 вместе с другими MA и ПД выделяются из OЯT, остекловываются и захораниваются.

БРУЦ-25 как возможный трансмутатор минорных актинидов 됏



- Как было показано, в спектре БН-а Am-241 делится с невысокой вероятностью, не более 17%, а <u>в основном переходит путем захвата нейтрона</u> в Am-242 и Am-242m с последующим быстрым бета-распадом в Cm-242 (83%) и Pu-242 (17%) и далее после цепочки превращений в Cm-244 и Cm-245.
- В проекте реактора БН-1200 предполагается, что если топливо вместе с МА рециклировать в течение <u>60 лет</u>, то МА будут трансмутированы путем захвата нейтронов в МА более высокого и дальнейшего перехода в непороговые делящиеся нуклиды.
- В докладе на примере небольшого свинцового реактора БРУЦ-25 указан путь <u>не к захвату, а к выжиганию Am-241</u> с вероятностью его деления в <u>3 раза большей</u>, нежели в БH-ах, и с сечением деления в Am-241 в <u>2—2,5 раза превосходящим</u> сечение деления этого нуклида в БH-ах.

Выводы



- Высокая средняя энергия нейтронов, <u>0,87 МэВ</u>, в АЗ и доля жёстких нейтронов <u>35%</u>, получены за счёт :
 - размеров активной зоны <u>менее 0,8×0,8 метров</u>,
 - <u>плутониевого топлива без U-238</u> (U-233 без U-238).
 - теплоносителя из природного свинца.
- В случае применения свинца с обогащением по изотопу <u>Pb-208</u> доля жёстких нейтронов возрастает до <u>40—45%</u>.
- Оценки показывают, что за один топливный цикл реактора БРУЦ-25 (<u>2 года</u>) можно выжечь до <u>15% Am-241</u>, закладываемого в АЗ. Для уничтожения большего количества потребуется <u>линейка из нескольких</u> <u>реакторов</u> серии БРУЦ.
- Помимо выжигания МА, такие реакторы могут быть востребованы для получения радиоизотопов, исследований стойкости материалов ЯТ и генерации электроэнергии.

Спасибо за внимание!



КОНФЕРЕНЦИЯ "ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ»

ТОПЛИВНАЯ КОМПАНИЯ РОСАТОМ

r Be



Физико-механические свойства, коррозионная стойкость и технологическое освоение стали ЭП 823-Ш применительно к использованию в реакторной установке **БРЕСТ-ОД-300**

Докладчик - И.А. Науменко

Авторы: Леонтьева-Смирнова М.В., Науменко И.А., Никитина А.А., Скупов М.В.

Обнинск, 8-10 октября 2018 г



Феррито-мартенситная сталь ЭП 823-Ш



Содержание элементов, % масс.												
С	Si	Mn	S	Ρ	Cr	Ni	Мо	w	Nb	V	Се расч.	В расч.
0,14- 0,18	1,0-1,3	0,5-0,8	<0,01	<0,015	10-12	0,5-0,8	0,6-0,9	0,5- 0,8	0,2-04	0,2-0,4	<0,1	<0,006

Осваивается и обосновывается в качестве материала оболочек твэлов, чехлов ТВС, РО СУЗ и др. узлов реакторов БРЕСТ-ОД-300.

Опробована в качестве оболочки экспериментальных твэлов в ЯЭУ с ТЖМТ, шестигранных чехлов ТВС БН-600.

Работы проводятся в направлениях:

- Исследование и обоснование коррозионной стойкости;
- **Обоснования радиационной стойкости;**
- Технологически-конструкторского освоения;
- Исследований структурно-фазового состояния и физико-механических свойств на всех этапах разработки и изготовлении изделий
- Выпуск аттестационного отчета



Свойства металлопродукции по группам



Получены свойства различных полуфабрикатов ЭП 823-Ш по группам:

- Группа 1. Прутки различного диаметра и толстостенные трубы. Структура прутков Ø 13 мм, Ø 205 мм, данные по кратковременным механическим свойствам (σ_B, σ_{0,2}, δ, ψ) в диапазоне температур 20–700 °C для прутков Ø 13 мм, Ø 205 мм и в диапазоне 20–630 °C для труб большого диаметра Ø 168×3 мм и Ø 125×1,5 мм, циклической прочности образцов из прутка Ø 205 мм при комнатной температуре, длительной прочности и термической ползучести образцов из прутка Ø 205 мм (время до разрушения при температурах 500–800 °C) и прутка Ø 13мм при температуре 670 °C.
- Группа 2. Тонкостенные трубы. Структура труб Ø 12,2×0,5 мм, Ø 9,7×0,5 мм, Ø 6,9×0,4 мм, данные по кратковременным механическим свойствам (σ_B, σ_{0,2}, δ) в диапазоне температур 20–900 °C в исходном состоянии для образцов из труб Ø 12,2×0,5 мм, Ø 9,7×0,5 мм.
- Группа 3. Шестигранные трубы и листы. Свариваемость при помощи аргонодуговой ручной сварки и механические свойства сварных соединений при испытаниях на растяжение из пластин толщиной 1,5 и 2,0 мм и на статический изгиб при температуре 20 °C.
- Группа 4. Проволока Ø 1,05 мм. Получены данные по кратковременным механическим свойствам дистанционирующей проволоки из стали ЭП823-Ш в интервале температур 20–700 °C.
- Группа 5. Тонкая лента. Получены данные по кратковременным механическим свойствам ленты толщиной 0,3 мм из стали ЭП823-Ш в интервале температур 20–700 °C.

Всего изготовлено более 35 наименований металлопродукции.



Кратковременные механические свойства различной металлопродукции стали ЭП 823-Ш (группы 1–3)





Кратковременные механические свойства различной металлопродукции стали ЭП 823-Ш (группы 1–3)



Температура ипытаний,С



Кратковременные механические свойства различной металлопродукции стали ЭП 823-Ш (группы 1–3)





Кратковременные механические свойства дистанционирующей проволоки Ø 1,05 мм (группа 4)

Проведены испытания на статическое растяжение проволоки Ø 1,05 мм при 20-950 °C.

С увеличением температуры испытаний предел прочности и текучести уменьшается. Относительное удлинение максимально при 900–950 °C





 вкладыш в виде усеченного конуса, разрезанного по диаметру основания, удерживающий образец; 2 – полый цилиндр, соединяющийся со штоком испытательной машины

Захваты для растяжения образцов проволоки

Уровень механических свойств исследованной проволоки удовлетворяет требованиям ТУ 14-131-1197-2016:

- $\ \sigma_{\rm B}$ = 790 МПа (требование ТУ 14-131-1197-2016 не менее 620 МПа);
- δ_0 = 13 % (требование ТУ 14-131-1197-2016 не менее 5 %);
- количество перегибов составляет 28 29 (требование ТУ 14-131-1197-2016 не менее 10).

Температурные зависимости пределов прочности и текучести дистанционирующей проволоки Ø 1,05 мм из стали ЭП823-Ш



Температурная зависимость общего относительного удлинения дистанционирующей проволоки Ø 1,05 мм из стали ЭП823-Ш



Кратковременные механические свойства плоских образцов ленты толщиной 0,3 мм из стали ЭП823-Ш (группа 5)









Испытания проводились для расширения технических требований для последующего изготовления ленты.

Закономерности по зависимостям пределов прочности и текучести – характерны для стали ЭП 823-Ш.

Требования по микротвердости HV_{0.1}≤250^{±10}



Длительные механические свойства ЭП 823-Ш



Влияние температуры отпуска на длительную прочность стали ЭП823 при температурах испытания 500–650 °C

POCATOM

Значения пределов длительной прочности оболочечных труб Ø 9,7×0,5 мм из стали ЭП823

Температура	σ ₃₀₀₀ ,	σ ₁₀₀₀₀ ,	σ ₂₀₀₀₀ ,
испытания, °С	МПа	МПа	МПа
650	80	65	58
670	51	41.5	36.5
700	47	41	37
750	15,6	12,3	10,8
800	10,8	9	8

Напряжение, МПа	Температура испытания Т, °С	Скорость ползучести %/ч	Время испытания, ч
75	670	6,21 · 10-4	4122
75	650	2,7010-3	546 (испытания продолжаются)

плавка ДШЗ6101 (закалка 1060 °C, 20 мин; отпуск 700 °C, 2 ч (в вакуумной печи VSQ)



Свойства сварных соединений, полученных различными методами сварки, применительно к узлам конструкций из стали ЭП823-Ш



Цаналонованно		T/o , °C	
металлопродукции	ТУ	Закалка/отпуск	
Лист 2 мм Серт. №501086	ТУ 14-123-227-2011	1060±10/710±20	
Лист 1,5 мм Серт. №501086	ТУ 14-123-227-2011	1060±10/710±20	
Лист 5 мм	ТУ 6300-001-	Отжиг 800	
Серт. №2604-1	59532330-2012	OTAMI 000	

Перечень исходной металлопродукции (ТУ, т\о)

Эскиз стыко-замкового соединения



вариант 1: а=100 мм; б=100 мм; в=2 мм; г=2 мм; д=(2 ± 0,5) мм; вариант 2: а=100 мм; б=100 мм; в=1,5 мм; г=1,5 мм; д=(1,5 ± 0,5) мм

Эскиз нахлесточного сварного соединения



вариант 1: а = 50 мм; б = 1,5 мм; в = 10 мм вариант 2: а = 50 мм; б = 2 мм; в = 10 мм

Эскиз сварного соединения сварки пластин встык



Размер а определяется размером полуфабриката

Разработаны режимы сварки

Режимы АДС для листа 1,5 мм ток I=60 A, для 2 мм – I=80 A, а для 5 мм – I=120 A

Режим ЛС для образцов толщиной 1,5 и 2 мм: скорость сварки 10 с/см, напряжение 400 В, частота импульса 2 Гц, диаметр пятна 1,2 мм



Свойства сварных соединений, полученных различными методами сварки, применительно к узлам конструкций из стали ЭП823-Ш

Максимальные нагрузки, приложенные при растяжении к сварным соединениям (АДС) образцов до разрушения

Толщина Вид пластин, сварного		Температура	Максимальная нагрузка, кгс		
пластин, ММ	соединения	°С	Ср. значение	Мин.зн.	
		20	1645,0 (746 МПа)	1644,0	
	Встык	450	826 (561,5 МПа)	778	
1,5		580	476(323,5 МПа)	460	
		630	362,5 (246 МПа)	346	
		20	1325,5	1277,0	
	Devourser	450	902	857	
	Бнахлест	580	471,5	469	
		630	374	351	
		20	2203,0 (749МПа)	2198,0	
	Portug	450	1147 (575 МПа)	1127	
2	БСТЫК	580	732(361,5 МПа)	709	
		630	578,5(293,0MПа)	575	
		20	1405,0	1383,0	
	BUANDACT	450	1133	1133	
	Бнахлест	580	718	684	
		630	452,5	437	

Максимальные нагрузки, приложенные при растяжении к сварным соединениям образцов (АДС стыко-замковое соединение и ЛС стыковое соединение) до разрушения при комнатной температуре

	Максимальная нагрузка, кгс			
Вид сварки	Ср. значение	Мин.зн.		
Лазерная сварка Листы 1,5 мм	1883 (640МПа)	1565		
Лазерная сварка Листы 2 мм	1774,5 (603MПа)	1555		
АДС, стыко-замковое соединение, лист 1,5 мм	1095.5	1056.0		
АДС, стыко-замковое соединение, лист 2,0 мм	1271	1057		

Испытания на **статический изгиб** показали, что на образцах, выполненных встык **АДС**, получен угол изгиба, величиной **более 120**°. Выбранный режим сварки позволяют получить сварной шов с отсутствием хрупкости при комнатной температуре.

На образцах, выполненных **ЛС**, максимальный угол изгиба составил **80**°, вероятная причина – наличие крупнозернистой структуры в сварном шве, концентратором напряжений.

POCATOM

Свойства сварных соединений, полученных различными методами сварки, применительно к узлам конструкций из стали ЭП823-Ш





Температура хрупко-вязкого перехода на образцах сварных соединений составляет 80 °С (на исходных образцах – 20 °С)

Зависимость значений ударной вязкости КСV, построенная по результатам испытаний образцов сварных соединений (АДС встык) из листа толщиной 5 мм



Жидкометаллическая коррозия стали ЭП 823-Ш



Коррозионные испытания проводились в потоке свинцового теплоносителя стенда CM-2 с концентрацией растворенного кислорода C[O]=(1-4)·10⁻⁶ мас. %, длительностью ~15000 часов при температурах 425–670 °C. Работы по исследованию коррозионной стойкости в свинцовом теплоносителе проводились коллегами из АО «ГНЦ РФ –ФЭИ» под руководством Г. А. Биржевого.

РЕЗУЛЬТАТЫ

- □ На всех образцах не обнаружено каких-либо коррозионно-эрозионных повреждений.
- Толщина оксидной пленки не превысила 15 мкм при каждой температуре (по ТТ БРЕСТа не более 50 мкм)
- Жидкометаллической коррозии (коррозии по механизму растворения) не обнаружено ни на одном из исследованных образцов.
- Функцию защитного антикоррозионного барьера, препятствующего развитию жидкометаллической коррозии образцов в свинцовом теплоносителе, выполняет оксидный слой.
- Взаимодействие образцов с теплоносителем не приводит к потере прочностных свойств и охрупчиванию материала оболочек.
- Механические свойства образцов изменяются в пределах, характерных для образцов труб, подвергающихся обычному термическому старению при 650 (670) °C.
- Показана устойчивость модельных образцов с оболочечными трубами из стали ЭП823 и к фреттинг-коррозии при 620°С, ~5000 ч, С[О]=(1–4)·10⁻⁶ мас. %, скорость теплоносителя ~1,6 м/с.





Диаграмма кислородных режимов в свинцовом теплоносителе РУ «БРЕСТ-ОД-300»





Радиационная стойкость стали ЭП823-Ш



В реакторе БН-600 проведены испытания 19 экспериментальных ТВС с чехлом из стали ЭП 823-Ш в штатном режиме эксплуатации, повреждающая доза, достигнутая на чехле ~60 с.н.а., максимальная температура облучения 600 °С.

Замечаний при эксплуатации не зафиксировано.

Условия работы из, БРЕСТ-ОД-300	делий а.з. РУ	Результаты механических испытаний плоских образцов из стали ЭП823-Ш после облучения в БН-600			
Детали ТВС	Оболочка твэла	T _ = 420-485 °C	T - 430-460 °C		
T = 460–580 °C	T = 670 °C	55–75 сна	^г _{обл} = 430–400° С 86–100,3 сна Т _{исп} = 500 °С; σ _в = <u>528 МПа</u>		
50–140 сна	120–150 сна	Т _{исп} = 500 °С; σ _в = 572 МПа			
		Т _{исп} = 690 °С; σ _в = <u>213 МПа</u>			



Материаловедческая сборка с образцами стали ЭП823-Ш



Следующие радиационные исследования стали ЭП823 ориентированы на испытания в реакторе БН-600 материаловедческих сборок с выемным контейнером, использование которых обеспечивает достижение повреждающих доз 140 сна при постоянных рабочих параметрах в диапазоне температур 400—700 °C.

Образцы из стали ЭП 823-Ш (и ДУО стали) для МС-ДУО БН-600:









Плоский (механические свойства, структура) Ударный (ударная вязкость, структура) Цилиндрический (физические свойства, структура)

Трубчатые образцы под внутренним газовым давлением



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Представлены основные тематические направления и результаты работ по разработке и исследованию стали ЭП 823-Ш для активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300.

Показано, что на изделиях из стали ЭП823-Ш одного химического состава стабильно можно получить комплекс механических свойств в широком диапазоне значений, соответствующий техническим требованиям металлопродукции различного сортамента, применяя различные технологии и режимы термической обработки.



Коррозионная стойкость



Исследование зоны коррозионного взаимодействия на образцах труб из тали ЭП823-Ш после коррозионных испытаний в свинце при 420 °С в течение ~ 5000 ч, содержание кислорода в свинце- (1–4)·10⁻⁶ мас. %





а) граница





 в) область 1
с) область 2
Светлопольные ПЭМ-снимки оксидного слоя на стали ЭП823 после коррозионных испытаний, граничная область между Fe₃O₄ и FeCr₂O₄ Методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения установлено, что граница раздела магнетита и железохромистой шпинели неоднородна и может иметь как кристаллическую, так и аморфную структуру. Это будет отрицательно влиять на адгезию поверхностного слоя магнетита к внутреннему оксидному слою, и может приводить к его отслоению с поверхности в процессе эксплуатации в циркулирующем свинцовом теплоносителе.

Экспериментально установлено, что оксидный слой на поверхностно-легированных алюминием образцах имеет значительно меньшую толщину (менее 100 нм), по сравнению с образцами исходной стали (около 3,5 мкм в среднем по поверхности). При этом на границе раздела оксидного слоя и стали не наблюдается дефектов, пор, несплошностей, что свидетельствует о высоких эксплуатационных характеристиках формирующейся в процессе коррозионных испытаний оксидной пленки.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 09Г2С ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БРЕСТ-ОД-300

> АО «НПО «ЦНИИТМАШ» *Логашов С.Ю.,* Орлов А.С., Гаврилов Е.В. , Хаймин С.В.





Настоящая работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» по разработке и изготовлению реакторной установки (далее – РУ) «БРЕСТ-ОД-300».

Бесшовные горячедеформированные трубы из стали марки 09Г2С, сварные соединения стали 09Г2С применяются для изготовления системы разогрева железобетонного корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300.

Целью настоящей работы являлось получение недостающих данных, необходимых для обоснования расчетных характеристик при оценке прочности, надежности и ресурса бесшовных горячедеформированных труб из стали 09Г2С и их сварных соединений, предназначенных для изготовления конструктивных элементов системы разогрева железобетонного корпуса реакторной установки (далее – СРКР).

В настоящей работе для горячедеформированных труб из стали 09Г2С и их сварных соединений проводились испытания по определению пределов длительной прочности и сопротивлению ползучести при различных температурах.



Работа проводилась в соответствии с программой испытаний «Испытания по обоснованию применения труб из стали марки 09Г2С применительно к СРКР РУ БРЕСТ», составленной с учетом требований НП-089-15 [1] и охватывает следующие виды испытаний по определению:

- расчетных значений (средних) физических характеристик: коэффициента линейного расширения, коэффициента теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости, металла труб в рабочем диапазоне температур и при температурах нормальных условий эксплуатации (далее – НУЭ) и аварийного режима;

- расчетных значений кратковременных механических характеристик (R_m, R_{p0,2}, A, Z) для основного металла труб и временного сопротивления (R_m), для сварных соединений в рабочем диапазоне температур и при температурах НУЭ и аварийного режима;

- влияния термического старения на механические свойства металла труб и их сварных соединений на расчетные значения механических характеристик (R_m, R_{p0,2}, A, Z) на ресурс на базе испытаний не менее 20 000 ч (с выемкой материала после 10 000 и 15 000 ч) при рабочих температурах;

- предела длительной прочности (R^T_{mt}) для основного металла труб и их сварных соединений, а также пределов длительной пластичности (A^T_{mt} и Z^T_{mt}), уравнений ползучести и изохронных кривых (деформация до 3%) для основного металла труб на базе испытаний не менее 20 000 ч с экстраполяцией на 260 000 ч при рабочих температурах.

При этом в рамках данной работы проведены испытания на длительную прочность и длительную ползучесть на ограниченной временной базе.



В рамках данной работы была закуплена представительная партия бесшовных горячедеформированных труб из стали 09Г2С тех же типоразмеров, выполненных по тем же нормативным документам, что и полуфабрикаты, предназначенные для изготовления конструктивных элементов системы разогрева железобетонного корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300. В данную партию вошли трубы, изготовленные по ТУ 14-3P-1128-2007 на следующих предприятиях:

- ПАО «Синарский трубный завод и
- ПАО «Северский трубный завод»

Сертификатные данные механических свойств металла представительской партии горячедеформированных труб при комнатной температуре

Предел текучести (R _{P0,2}),	Временное сопротивление	Относительное
H/mm²	(R _m), Н/мм²	удлинение (А ₅),%
385–435	520–565	29–39



Сварные соединения выполнялись полуавтоматической дуговой сваркой в среде защитного газа (аргон). Для сварки использовалась проволока сварочная омедненная HENDERHCW-50AER70S-6 (Св-08Г2С-О) диаметром 0,8 мм по ГОСТ 2246-70. Сварка проводилась в соответствии с инструкцией № ТКДБ.25291.00033

Сертификационные данные по химическому составу сварочной проволоки

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	Ρ
СВ-08Г2С-0	0,08	0,88	1,53	-	-	0,21	0,011	0,011

Сертификатные данные механических свойств сварочной проволоки при комнатной температуре

Марка	Предел	Временное	Относительное	Временное	
	текучести	сопротивление	удлинение (А ₅),	сопротивление	
	(R _{P0,2}), Н/мм ²	(R _m), Н/мм²	%	разрыву, Н/мм²	
	Har	Проволоки			
СВ-08Г2С-0	420–426	540–543	25–27	1000, 1095, 1095	



РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 09Г2С (ТОЛСТОСТЕННАЯ ТРУБА)

Температура	Напряжение, σ,	Время до	Относительное	Относительное	Параметр,
испытания, Т,°С	Н/мм ²	разрушения,	удлинение,	сужение,	P _{CR}
		τ,ч	A, %	Z, %	
Рабочая	50	199	40,7	71,2	18,696
	40	547	50,2	61,2	19,081
	40	418	61,3	68,4	18,978
	30	1048	- Испытания продолжаются		19,327
	35	500			19,046
	35	500			19,046
	25	1044			19,326
	20	496			19,045
	17	1051			19,328
Рабочая + 50	30	116	77,0	82,5	19,506
	30	141	72,0	75,6	19,586
	25	241	55,7	79,6	19,799
	25	269	72,8	82,1	19,844
	17	651	71,1	73,0	20,198
	17	797	60,3	74,7	20,279
	20	520	Испытания продолжаются		20,108
	20	520			20,108
	13	328			19,923



Температура	Напряжение, σ,	Время до	Относительное	Относительное	Параметр
испытания,	Н/мм ²	разрушения,	удлинение,	сужение,	P _{CR}
T, °C		τ,ч	A, %	Z, %	
Рабочая	52	116	18,7	52,0	18,492
	40	339	31,6	80,4	18,899
	40	305	13,9	34,0	18,858
	30	1048	Испытания продолжаются		19,327
	25	1044			19,326
	20	496			19,045
	17	1051			19,328
Рабочая +50	13	328			19,923
	25	126	32,6	46,0	19,541
	25	174	19,9	34,9	19,670



ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 09Г2С ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ДЛЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ





ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 09Г2С ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ +50 °С ДЛЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ




ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 09Г2С ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ДЛЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ





ПРЕДЕЛЫ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ (R^T_{MT}) СТАЛИ 09Г2С В H/MM² (ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ И СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ, ТОЛСТОСТЕННАЯ ТРУБА)

	Пределы длительной прочности (R ^т _{mt}), H/мм²			
Температура, °С	Ресурс, часы			
	104	10 ⁵	2,6·10 ⁵	
Основной металл				
Рабочая	22–23	14–15	11–12	
Рабочая + 50	10	6	3–4	
Сварное соединение				
Рабочая	17-18	9	7	



ОБРАЗЕЦ ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ (ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ, ТОЛСТОСТЕННАЯ ТРУБА)





ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 09Г2С (ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ И СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ, ТОЛСТОСТЕННАЯ ТРУБА)





Температура испытания Т, °С	Напряжение σ, Η/мм²	Время испытания т, ч	Деформация образца ε, %
Рабочая -100	100	1004	5,35
	85	1049	3,12
Рабочая -50	50	1024	7,29
	40	1047	2,45
	30	474	0,68
Рабочая	20	1027	9,55
	17	1025	3,55
	13	300	0,91



ПЕРВИЧНЫЕ КРИВЫЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ: РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА –100 °С





ПЕРВИЧНЫЕ КРИВЫЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ: РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА –50 °С





ПЕРВИЧНЫЕ КРИВЫЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ 09Г2С ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ: РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА





1. Разработана программа испытаний с целью получения дополнительных данных, необходимых для определения значений характеристик, используемых при оценке прочности, надежности и ресурса бесшовных горячедеформированных труб из стали марки 09Г2С и их сварных соединений, предназначенных для изготовления конструктивных элементов СРКР РУ БРЕСТ-ОД-300.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

2. Для проведения испытаний изготовлены сварные соединения труб из стали 09Г2С. Сварные соединения выполнены по штатной технологии – по тем же технологическим документам, что и сварные швы конструктивных элементов системы разогрева железобетонного корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300. При выполнении данных сварных соединений использовались сварочные материалы, поставленные по нормативной документации, идентичной применяемой при выполнении сварных швов конструктивных элементов системы разогрева системы разогрева железобетонного корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300.

3. Проведены испытания на длительную прочность образцов, отобранных от металла толстостенной трубы из стали 09Г2С, при температурах: рабочая температура, рабочая температура+50 °С, а также сварного соединения трубы при рабочей температуре с целью определения предела длительной прочности (R^{T}_{mt}) для основного металла трубы и его сварного соединения, а так же пределов длительной пластичности (A^{T}_{mt} , Z^{T}_{mt}) для основного металла трубы. Построены диаграммы длительной прочности при указанных температурах для основного соединения.

4. На ограниченной временной базе получены диаграммы пределов длительной прочности (R^T_{mt}), на ресурс эксплуатации 10⁴, 10⁵ и 2,6·10⁵ часов при температурах: рабочая температура+50 °C для основного металла трубы.



5. Определены предварительные значения пределов длительной прочности (R_{mt}^{T}), на ресурс эксплуатации 10⁴, 10⁵ и 2,6·10⁵ часов при рабочей температуре для металла сварного соединения. Предел длительной прочности на ресурс эксплуатации 2,6·10⁵ часов при рабочей температуре для основного металла стали 09Г2С составляет 11–12 Н/мм², для сварного соединения около 7 Н/мм². Трубы из стали 09Г2С при температурах: рабочая и рабочая +50°С обладает высоким уровнем пластичности 40–77%.

6. Предел длительной прочности сварного соединения на 25–30% ниже предела длительной прочности основного металла.

7. Трубы из стали 09Г2С характеризуются повышенным окалинообразованием при рабочей температуре.

8. Построены первичные кривые ползучести образцов из стали 09Г2С при температурах: рабочая температура, рабочая температура–50 °С и рабочая температурара+50 °С.

9. Учитывая большое окалинообразование, полученные значения пределов длительной прочности являются достаточно приблизительными, однако позволяют установить предельную рабочую температуру применения труб из стали 09Г2С.

10. По результатам проведенной работы можно сделать выводы о необходимости продолжения работ по выбору и обоснованию работоспособности материалов системы разогрева железобетонного корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300.



СПАСИБО ЗА ВИМАНИЕ!

КОНТАКТЫ:

Заведующий лабораторией АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Сергей Логашов <u>SULogashov@cniitmash.com</u> +7 (495) 675-85-42; +7 (926) 176-79-50



Установка ГЕЗА-4М для электроннопучковой модификации поверхности оболочек ТВЭЛов РУ с ТЖМТ

Энгелько В.И., Павлов Е.П., <u>Ткаченко К.И.</u>, Щеголихин Н.П.

Обнинск ТЖМТ-2018 08-10.10.2018





Формирование обогащенных АІ поверхностных слоев с помощью СИЭП

Для повышения коррозионной стойкости конструкционных сталей, работающих в Pb and Pb-Bi теплоносителях, было предложено модифицировать поверхностные свойства материала алюминием с помощью сильноточных импульсных электронных пучков микросекундного диапазона – СИЭП-МП процесс, или ГЕЗА-процесс





ГЕЗА-процесс был исследован:

- НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Россия;
- Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Россия;
- Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов ПРОМЕТЕЙ, Россия;
- Технологический институт Карлсруэ, Германия.

Цель процесса

- Коррозионная стойкость в Pb и Pb-Bi вплоть до 650°С.
- Отсутствие негативного влияния на механические свойства.
- Самозалечивание механически поврежденных слоев.
- Процесс модификации должен быть реализуем в промышленности.



Оптимальная процедура ГЕЗА + АІ модификации поверхности сталей:

- электрополировка поверхности аустенитных сталей и механическая полировка поверхности феррито-мартенситных сталей перед нанесением предварительного покрытия,
- ультразвуковая очистка и травление ионным пучком поверхности стали,
- толщина предварительного покрытия 5-7 мкм,
- нагрев образцов с предварительным покрытием перед обработкой СИЭП при 200°С в течение 2 часов,
- плотность энергии электронного пучка на поверхности 40-45 Дж/см²,
- количество импульсов электронного пучка 2÷3.





AI

Образец стали Т91 с модифицированной поверхностью (5 мкм AI + ГЕЗА) после коррозионных испытаний в потоке Pb-Bi в стенде ЦУ-2M при T=550°C в течение <u>16547</u> часов и $C_{[O]} = (1-4) \cdot 10^{-6}$ масс %.





Образец стали Т91 в состоянии поставки после коррозионных испытаний в потоке Pb-Bi в стенде ЦУ-2М при T=550°С в течение <u>16547</u> часов и $C_{[O]} = (1-4) \cdot 10^{-6}$ вес.% (хвостовик образца) Al Cr Fe

Распределение элементов в поверхностном слое модифицированного (5 мкм AI + ГЕЗА) образца стали Т91 после коррозионных испытаний в потокеРb-Bi в стенде CU-2M при T=550°C в течение 16547 часов и C_[0]= (1-4).10⁻⁶ масс %.



Модификация поверхности стали EP823 импульсными электронными пучками.

Тестовые параметры: Pb поток, T= 650°C, v=1,5 м/с, C_{IOI}=(5-8)·10⁻⁵ масс %

Не модифицированный Кислородная коррозия

Модифицированный Нет коррозии



1000 ч





3000 ч

5000 ч



Технические требования к промышленной установке

Параметры ТВЭЛа:

трубы сделаны из стали EP823 Ø10.5 (9.7) мм, толщина стенки 0,5 мм, общая длина 2140 мм, длина контакта с Pb 1100мм.





Основные технические параметры напылительной установки:

- количество магнетронов 4-6;
- площадь напыления Ø10.5 (9.7) мм, длина до 2140 мм;
- количество одновременно напыляемых ТВЭЛов 25;
- длительность производственного цикла (загрузка-откачка-покрытиевыгрузка) для толщины покрытия 5 мкм
 потребляемая мощность
 210 кВт.

Основные технические параметры электронно-пучковой установки:

- энергия электронов	до 120 кэВ;
- плотность энергии пучка на мишени	40 — 45 Дж/см2
- длительность импульса	30 – 80 мкс;
- длина пучка	70 - 80 см;
- частота повторения	0,033 1/c
- потребляемая мощность	20 кВт



НТЦ «Лазерные комплексы и технологии»

Составные части модуля модификации поверхности оболочек ТВЭЛов



Электронно-пучковая установка



Установка нанесения предварительных покрытий

НТЦ «Лазерные комплексы и технологии»





Параметры источника

Напряжение на аноде, кВ	U _A = 0
Напряжение на катоде, кВ	U _c = - 120
Напряжение на сетке, кВ	U _g = - (97 ÷ 95)
Радиус катода, м	R _c = 0,15
Радиус сетки, м	R _g = 0.1
Радиус анода, м	R _A = 0.005
Длина катода, м	L _c = 0,95

www.niiefa.spb.su



Схемы подачи потенциалов на электроды источника



Потенциалы катода, разрядных промежутков и управляющей сетки задаются делителем R₁-R₆, который подключается к выходу генератора импульсных напряжений (ГИН)



Используется 5-ти каскадный ГИН. Каскад, подключенный к разрядным промежуткам, имеет автономную цепь зарядки, что позволяет регулировать амплитуду разрядного тока независимо от ускоряющего напряжения



Составные части электронно-пучковой установки



Общий вид ГИНа



Общий вид электронного источника



Типичные осциллограммы импульса электронного пучка



- а ускоряющее напряжение U_k
- б разрядные токи I_{pB} и I_{pH}
- в анодный ток (ток на мишень) І_а напряжение между подложкой и поджигающими электродами U_р

НТЦ «Лазерные комплексы и технологии»





Типичная картина распределения температуры и плотности анодного тока на 1-метровой мишени



Выводы

1. Максимальное значение плотности энергии пучка, достигнутое на мишени диаметром 10 мм, составило 30 Дж/см² на центральной части мишени ~ 50 см.

2. Для повышения тока пучка и, соответственно, плотности энергии пучка предполагается:

- изолировать стабилизирующую сетку от конструктива катода и оптимизировать ее потенциал;

- установить перед мишенью на расстоянии 1,5 см от оси дополнительную сетку с высокой прозрачностью, чтобы ликвидировать виртуальный катод.

Контактная информация

Ткаченко Константин Иванович, начальник группы, к.т.н.

НИО ЛК-2 НИЛ КЛ-5

+7 (812) 464-5864

ktkachenko@mit.niiefa.spb.su

www.niiefa.spb.su





ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ — ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Результаты исследования начального этапа окисления аустенитной стали 12X18H10T в водяном паре

Иванов К. Д., Ниязов С.-А. С., Гурбич А. Ф.

Целью настоящей работы являлось изучение начального этапа развития окислительного процесса взаимодействия сталей в водяном паре.

Основные трудности такого рода исследований связаны с тем, что результаты взаимодействия достаточно трудно идентифицировать традиционными методами исследований (по привесам образцов или по толщинам сформированных оксидных пленок).

По этой же причине существуют определенные ограничения в проведении исследований в области относительно низких температур.

Объектом исследований являлась аустенитная 18% хромистая сталь 12Х18Н10Т, которая является одной из конструкционных сталей, используемых в реакторных установках с ТЖМТ в области относительно низких (Т≤350°С) температур. В испытательных стендах и экспериментальных установках температурная область использования этой стали значительно шире.

С учетом сказанного, исследование окисляемости данной стали, в том числе при различных способах предварительной подготовки ее поверхности, **представляет научный и практический интерес, особенно в области относительно низких температур**, где имеющиеся экспериментальные данные крайне ограничены либо вообще отсутствуют.

Установка для проведения исследований

Исследования окисляемости стали 12Х18Н10Т в увлажненном аргоне проводились на лабораторной установке, схема которой приведена ниже.



Установка была снабжена электрическими нагревателями, средствами контроля и поддержания температуры, а также датчиками контроля парциального давления кислорода в газовой среде, которые располагались на входе в реакционную ёмкость и на линии сброса газа в атмосферу.

Методика проведения исследований

Образец стали 12Х18Н10Т в виде пластины длиной **260 мм** (1) точечной лазерной сваркой крепился на штоке (2), который был выполнен в виде заваренной с одного конца трубы.

Внутри штока размещалась перемещаемая термопара (3) для измерения распределения температур по высоте образца.

Одна сторона образца **подвергалась процессу шлифовки наждачной бумагой М40**, а другая оставалась в состоянии поставки.

Обезжиривание поверхностей после монтажа образца осуществляли их протиркой этиловым спиртом.

Методика проведения исследований (продолжение)

Процесс оксидирования образца проводился следующим образом:

- Перед разогревом установки образец размещался в верхней камере установки, организовывался расход аргона через реакционную ёмкость, минуя увлажнитель, в котором поддерживалась постоянная температура воды.
- После разогрева её до рабочей температуры шток с образцом перемещался в нижнее положение и осуществлялась подача аргона в реакционную ёмкость через увлажнитель.



Изменения в ходе эксперимента основных параметров, характеризующих окислительный процесс (температуры и показаний газовых датчиков парциального давления кислорода в газовой среде).

Дважды осуществлялись измерения распределения температуры по длине образца.

Подготовка образцов к дальнейшим исследованиям

Суммарное время экспозиции образца составило 3,5 часа. После оксидирования пластина была разрезана на 26 частей.

Ниже приведены значения рабочей температуры для каждого из образцов.

Далее каждый из образцов анализировался на предмет определения содержания в его поверхностном слое кислорода. Для этого применялся метод анализа с использованием ионных пучков, основанный на спектрометрии продуктов ядерных реакций, вызываемых дейтронами с энергией порядка 1 МэВ, с ядрами ¹⁶О.



Внешний вид пластины после окисления в водяном паре



а) полированная поверхность



б) состояние поставки

Методика обработки полученной информации

Исходная информация в виде распределения атомной доли кислорода по глубине проникновения пучка, выраженная в количестве атомов (на единицу площади пучка), прошедших пучком до его взаимодействия с кислородом, сначала преобразовывалась в зависимость от глубины проникновения пучка, выраженной в единицах длины.

При этом считалось, что плотность среды соответствует плотности оксида (5,2 г/см³) при максимальном содержании кислорода, а в области пониженных содержаний кислорода — средней плотности между сталью (7,8 г/см³) и оксидом, которая вычислялась по формуле:

$$\rho_{\rm cp} = \rho_{\rm okc} \left(\frac{C_{\rm O}}{C_{\rm O}^{\rm Makc}} \right) + \rho_{\rm ct} \left(1 - \frac{C_{\rm O}}{C_{\rm O}^{\rm Makc}} \right)$$

- атомная концентрация кислорода в произвольном сечении образца;

макс – атомная концентрация кислорода в оксидном слое.

Методика обработки полученной информации (продолжение)

Пример обработки исходной информации

Использование указанной ранее процедуры позволило для каждого образца из исходных данных (левый рисунок) рассчитать интегральное содержание кислорода (правый рисунок).

В результате получен набор численных значений этого параметра для всех проанализированных образцов, который при постоянном времени экспозиции пропорционален скорости окисления.


Полученные результаты

Ниже в аррениусовых координатах представлены зависимости скорости окисления (в виде логарифма суммарного количества кислорода) от обратной температуры для образцов с предварительно шлифованной поверхностью.



Полученные результаты (продолжение)

Аналогичные данные для образцов, не подвергавшихся предварительной шлифовке.



Полученные результаты

(продолжение)

Окисление стали 12Х18Н10Т в начальный период характеризуется следующими особенностями:

1. Существенным разбросом результатов для поверхности в состоянии поставки вследствие её неоднородности;

2. Значительным проникновением кислорода в матрицу стали для обеих поверхностей

Максимальная глубина проникновения составляет:

t ≈ 620 °C ~2 *мкм* – для поверхности в состоянии поставки при толщине оксидного слоя ~0,2 мкм ~0,12 мкм – для шлифованной поверхности при толщине оксидного слоя ~0,04 мкм

Минимальная глубина проникновения составляет:

t ≈ 360 °C ~0,2 *мкм* – для поверхности в состоянии поставки при толщине оксидного слоя ~0,03 *мкм* ~0,07 *мкм* – для шлифованной поверхности при толщине оксидного слоя ~0,01 *мкм*

3. Скорости окисления поверхности в состоянии поставки превышают соответствующие скорости шлифованной поверхности:

- при *t* ≈ 620 °С примерно в 12 раз;
- при *t* ≈ 360 °С примерно в 3 раза.

4. Наиболее значительное влияние температурного фактора на скорость окисления наблюдается в области температур 480–570 °C.



- 1. Разработана методика исследования начального этапа окисления сталей в водяном паре, основанная на анализе продуктов ядерных реакций при взаимодействии кислорода с ускоренными ионными пучками.
- 2. Методика опробована при изучении начального этапа окисления стали 12Х18Н10Т с различным исходным состоянием ее поверхности.
- 3. В результате экспозиции образцов данной стали в потоке увлажненного аргона в течение 3,5 часов при температурах от 350 до 620 °С на поверхностях образцов были сформированы тонкие оксидные пленки толщиной от ~10 нм до ~2 мкм.
- 4. Показано, что начальный этап окисления стали в водяном паре характеризуется:
 - значительным проникновением кислорода в матрицу стали,
 - возрастанием скорости окисления с ростом температуры.
 При этом установлено, что степень влияния данного параметра на скорость окисления различна и является максимальной в области температур ~ 480–570 °C.
- 5. Сравнение результатов окисления рассматриваемой стали показало, что использование предварительной шлифовки поверхности при прочих равных условиях снижает скорость окисления данной стали в несколько раз.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!







БЕЗОПАСНОЕ КОНТРОЛИРУЕМОЕ ХРАНЕНИЕ ОЯТ СВБР-100 В СРЕДНЕСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ

С.А. Григорьев², А.В. Дедуль², О.Г. Комлев², И.В. Тормышев¹, <u>Г.И. Тошинский</u>^{1,2} ¹АО ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, ²АО «АКМЭ-инжиниринг», Москва

5-ая конференция

«Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях ТЖМТ-2018»

8-10 октября 2018 года, Обнинск, Россия

Содержание

- Введение
- 1 Проблемы обращения с ОЯТ
- 2 Подходы к обращению с ОЯТ
 - 2.1 ОЯТ радиоактивный отход ЯЭ
 - 2.2 Контролируемое хранение ОЯТ
 - 2.3 Замыкание ЯТЦ
- 3 Возможная продолжительность временного хранения ОЯТ до переработки
- 4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100
 - Заключение

Введение (1)

- Реактор СВБР-100 спроектирован таким образом, что без изменения конструкции может работать на различных видах топлива как в открытом ядерном топливном цикле (ЯТЦ) с отложенной переработкой отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), так и в замкнутом ЯТЦ. Выбор топлива и типа ЯТЦ определяется экономической целесообразностью и технологической освоенностью топлива и топливного цикла.
- Можно ожидать, что на первом, ближнесрочном, этапе внедрения быстрых реакторов (БР) в ядерную энергетику (ЯЭ) в условиях низких цен на природный уран и услуг по его обогащению, работа реактора СВБР-100 на оксидном урановом топливе в открытом ЯТЦ с отложенной переработкой ОЯТ будет экономически более целесообразной, чем в замкнутом ЯТЦ, несмотря на значительно более высокое (примерно в 2 – 2,5 раза по сравнению с ВВЭР-1000) удельное (на один кВт-час) потребление природного урана.

Введение (2)

- Использование этого топлива при обогащении ниже 20 %
 с отложенной переработкой ОЯТ является наиболее целесообразным
 и по соображениям нераспространения, что важно при поставках таких
 реакторов на экспорт в развивающиеся страны.
- При увеличении цены природного урана и затрат на хранение ОЯТ, станет экономически целесообразным переход к замкнутому ЯТЦ.
 При этом реакторы СВБР-100 будут работать в режиме топливного самообеспечения с коэффициентом воспроизводства (КВ) слегка превышающим единицу.
- Однако работа БР с отложенной переработкой ОЯТ потребует решения вопроса безопасного контролируемого и экономичного хранения ОЯТ с сохранением возможности его использования при замыкании ЯТЦ.

1 Проблемы обращения с ОЯТ (1)

- Проблема обращения с ОЯТ АЭС до настоящего времени • не решена в полном объеме ни в одной стране мира, что является вызовом современной ЯЭ и создает озабоченность у части населения и правительств ряда стран в связи с высокой долгоживущей радиоактивностью, накопленной в ОЯТ. Это в числе других причин (безопасность, экономика, нераспространение) тормозит развитие ЯЭ. Для стимулирования решения этой отложенной проблемы МАГАТЭ был выдвинут моральный принцип: «не перекладывать бремя нерешенных проблем ЯЭ на плечи будущих поколений» (radioactive waste shall be managed in such a way that will not impose undue burdens on future generations).
- Хотя принципиальные научные пути решения этой проблемы в общих чертах ясны, реализация её на практике потребует от ядерной отрасли проведения соответствующих НИОКР, демонстрации полного цикла обращения с ОЯТ и гармонизации национальных стратегии и политики в области ядерного топливного цикла в мире.

1 Проблемы обращения с ОЯТ (2)

- Это связано с тем, что ядерное сообщество не обладает в • настоящее время необходимыми знаниями, опытом и возможностями для безопасного и экономически эффективного решения этой сложной проблемы. При разработке способов обращения с ОЯТ необходимо учитывать, что при существующих технологиях его переработки разрушаются два первых барьера безопасности: топливная матрица и оболочка твэла, а топливо, содержащее огромную радиоактивность, переводится из твердого в жидкое (или газообразное для газофторидной технологии) состояние, когда выход радиоактивности в окружающую среду более вероятен.
- Кроме того, в процессе переработки ОЯТ затрудняется учет и контроль ядерных делящихся материалов (ЯДМ), что увеличивает риск их несанкционированного распространения.

2 Подходы к обращения с ОЯТ 2.1 ОЯТ – радиоактивный отход ЯЭ

- ОЯТ рассматривается как радиоактивный отход ЯЭ, подлежащий окончательному захоронению в глубоких геологических формациях с гарантированной изоляцией, содержащихся в ОЯТ радиоактивных веществ в течение сотен тысяч лет.
- Такой подход рассматривался в США на протяжении последних 30-40 лет, где в горах штата Невада (Yucca Mountain) построено геологическое хранилище для окончательного захоронения упаковок с отработавшими тепловыделяющими сборками (OTBC) после их многолетней выдержки в пристанционных хранилищах (XOЯT) для спада радиоактивности и, соответственно, тепловыделения. ОТВС должны размещаться в канистрах, оснащенных многобарьерной защитой.
- В настоящее время этот подход признан не соответствующим требованиям развития крупномасштабной ЯЭ, и ввод в эксплуатацию геологического хранилища приостановлен.

2.2 Контролируемое хранение ОЯТ (1)

Длительное (десятки лет) контролируемое хранение ОЯТ в пристанционных или централизованных ХОЯТ, которое сегодня реализуется практически во всех странах. Такой способ обращения с ОЯТ является в настоящее время наиболее дешевым, удовлетворяет требованиям нераспространения плутония, т.к. последний находится в ОТВС под защитой мощного гаммаизлучения продуктов деления, что облегчает учет и контроль ЯДМ, а также сохранят возможность использования ОЯТ в замкнутом ЯТЦ, когда для этого созреют экономические условия.

2.2 Контролируемое хранение ОЯТ (2)

- Вместе с тем, на конференции МАГАТЭ (Вена, 2003),
 где рассматривались вопросы хранения ОЯТ энергетических
 реакторов, некоторые государства выразили желание продлить сроки
 хранения отработавшего топлива до 100 лет и более ввиду задержек
 в осуществлении программ по захоронению в геологических
 хранилищах.
- Кроме того, существенное продление срока хранения ОЯТ
 в «сухих» хранилищах позволяет сэкономить финансовые ресурсы на сооружение геологического хранилища. Отсутствие общественного согласия в ответе на вопрос, как следует рассматривать ОЯТ
 в качестве отхода или топливного ресурса для будущей ЯЭ, а также недостаток политической воли в выборе площадок для строительства геологических хранилищ, приводит ряд государств к выводу о целесообразности продления сроков «сухого» хранения ОЯТ.

2.3 Замыкание ЯТЦ (1)

- Организация замкнутого ЯТЦ с вводом БР и крупномасштабной переработки ОЯТ тепловых и быстрых реакторов в едином ЯТЦ.
 В этом случае продукты деления выделяются для последующей их иммобилизации и окончательной изоляции (собственно радиоактивные отходы).
- Оставшийся уран и накопленный плутоний используются для изготовления свежего топлива. Одновременно решается задача значительного сокращения объемов хранящегося ОЯТ и разгрузки хранилищ.

2.3 Замыкание ЯТЦ (2)

- Для решения задачи сжигания МА исследуются различные способы ядерной трансмутации МА в быстрых критических или подкритических (управляемых ускорителем) реакторах.
 В таких реакторах долгоживущие МА делятся быстрыми нейтронами и превращаются (трансмутируют) в сравнительно короткоживущие продукты деления. Эти продукты деления после необходимой выдержки в контролируемом хранилище можно остекловывать, как и продукты деления урана и плутония, и безопасно захоранивать в геологических хранилищах
- Реализация такого подхода требует введения в структуру ЯЭ значительной доли БР, позволяющих примерно в сто раз увеличить эффективность использования энергетического потенциала природного урана по сравнению с ТР.

3 Возможная продолжительность временного хранения ОЯТ до переработки (1)

- В настоящее время трудно достаточно точно определить период времени, когда переработка ОЯТ с рециклированием плутония и МА, выделением продуктов деления и их окончательной изоляцией станет экономически целесообразной.
- Этот период зависит от удельного расхода природного урана существующими ТР и его вклада в топливную составляющую себестоимости электроэнергии, прогноза ресурсов природного урана и зависимости ресурсов от цены природного урана, эскалации цен на природный уран (в настоящий период времени эти цены не растут), прогноза темпов роста ЯЭ в текущем столетии, стоимости хранения ОЯТ и его переработки, стоимости изготовления рефабрицированного топлива, экономических показателей тепловых и быстрых реакторов, стоимости окончательной изоляции долгоживущих РАО.

3 Возможная продолжительность временного хранения ОЯТ до переработки (2)

- Сравнительный экономический анализ открытого ЯТЦ с отложенной переработкой ОЯТ и замкнутого ЯТЦ для условий США был выполнен в известных отчетах МІТ для предварительного выбора вариантов ЯТЦ будущей крупномасштабной ЯЭ. В этих работах показано, что тепловые реакторы, работающие в открытом ЯТЦ не потеряют свою конкурентоспособность из-за удорожания природного урана до конца текущего столетия.
- Однако, поскольку коммерческие БР, работающие в замкнутом ЯТЦ, еще не действуют, то оценки экономических показателей имеют большую неопределенность. Это касается как экономических характеристик БР, так и экономических показателей переделов замкнутого ЯТЦ. Всё это будет влиять на прогнозную оценку периода времени экономически целесообразного замыкания ЯТЦ. То же относится и к оценке экономически доступных ресурсов природного урана, и к темпам развития ЯЭ.

3 Возможная продолжительность временного хранения ОЯТ до переработки (3)

 При суммарной мощности реакторов СВБР-100 10 ГВт-э
 (сто реакторов) для их работы в открытом ЯТЦ с отложенной переработкой, если это будет рентабельным, потребуется 280 тысяч тонн природного урана.

Поэтому можно ожидать, что продолжительность периода хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 до начала вовлечения ОЯТ в замкнутый ЯТЦ может составить десятки лет.

• В связи с этим разработка концепции достаточно продолжительного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 представляется целесообразной.

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (1)

- При разработке проекта опытно-промышленного энергоблока (ОПЭБ)
 с РУ СВБР-100 был принят вариант покассетной выгрузки ОТВС
 с последующим размещением их в пеналах со свинцом и длительным
 хранением в пристанционном хранилище с естественным воздушным
 охлаждением, обеспечивающим отвод остаточного тепловыделения.
- Вместе с тем, опыт эксплуатации реакторных установок (РУ) со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) показал, что перегрузка топлива может быть проведена безопасно и в сжатые сроки, если заменять активную зону целиком при использовании комплекта специального перегрузочного оборудования. При этом расхолаживание и длительное хранение ОЯТ после выгрузки из реактора осуществлялось в баках длительного хранения (БДХ), заполненных жидким СВТ с последующим его затвердеванием. Отвод остаточного тепловыделения производился через корпус БДХ атмосферным воздухом при его естественной циркуляции (ЕЦ).

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (2)

- Достигнутый к настоящему времени срок хранения составляет около 50 лет без следов выхода радиоактивности. Подобная технология упрощает технологический процесс перегрузки топлива, сокращает его продолжительность, позволяет уменьшить здание главного корпуса и снизить его стоимость.
- Однако для РУ СВБР-100 остаточное тепловыделение на момент выгрузки через месяц после остановки реактора составляет около 500 кВт. Это требует размещения отработавшего блока выемного (ОБВ) – корзины реактора, в которой находятся ОТВС, в бак временного хранения (БВХ), заполненный жидким СВТ, где созданы условия ЕЦ и отвода тепла через корпус бака в систему водяного охлаждения. После снижения остаточного тепловыделения до необходимого уровня возможны два варианта обращения с ОЯТ:

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (3)

 1) Транспортировка транспортно-упаковочных контейнеров (ТУКов) на Производственное объединение (ПО) «Маяк», где производится выгрузка ОБВ (корзины) из БВХ и их разборка для последующей переработки ОЯТ. Этот вариант может быть реализован, если по истечении 10 лет хранения ОЯТ на площадке АС будет организована переработка ОЯТ на ПО «Маяк».

 2) Транспортировка ТУКов на специальный полигон, где после перегрузки ОБВ в БДХ, заполненные быстро затвердевающим жидким свинцом, где БДХ хранятся требуемое время. Остаточное тепловыделение через десять лет выдержки составляет около 25 кВт и легко отводится при ЕЦ атмосферного воздуха при температуре стенки БДХ, не превышающей 200 °С, обеспечивающей затвердевание свинца. Таким способом осуществляется контролируемое хранение БДХ в течение нескольких десятилетий до периода времени, когда переработка ОЯТ и замыкание ЯТЦ станут экономически целесообразными.

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (4)

- При таком хранении формируются четыре барьера безопасности на пути выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду: топливная матрица, оболочка твэла, твердый свинец и стальной корпус БДХ. Замена СВТ на свинец, кроме снижения стоимости, обеспечивает более надежную защиту ОБВ от экстремальных внешних воздействий в связи с более высокой температурой затвердевания свинца 327 °C. Дополнительной защитой, в том числе и от внешних воздействий, служит железобетонный колпак (ЖБК) с необходимой толщиной стенок, которым закрывается каждый БДХ.
- Разделение функций транспортировки ОБВ в дорогостоящих ТУКах, количество которых сравнительно невелико, и длительного хранения БДХ, защищенных от внешних воздействий сравнительно дешевыми ЖБК, может оказаться экономически более целесообразным, чем использование большого количества двухцелевых контейнеров, стоимость которых достигает около 2 млн \$ за каждый.

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (5)

- Подобная практика временного контролируемого хранения ОЯТ тепловых реакторов в железобетонных контейнерах на открытой площадке реализуется в США (см. рисунок на следующем слайде). Стоимость такого хранения увеличивает себестоимость электроэнергии всего на 1-2 % при плотности хранения ОЯТ 0,5 тонны тяжелого металла на квадратный метр.
- На полигоне площадью 200×200 м² при такой плотности хранения может быть размещено для безопасного контролируемого хранения 13000 тонн ОЯТ СВБР-100 (около 1500 БДК с ОВЧ), что соответствует суммарной мощности АС СВБР-100 около 10 ГВт-э, работающих 100 лет.

4 Концепция безопасного контролируемого хранения ОЯТ реакторов СВБР-100 (6)



Хранение ОЯТ на открытой площадке в США

Заключение (1)

- 1 Обращение с ОЯТ относится к числу отложенных проблем ЯЭ, которые до конца ещё не решены ни в одной стране мира. Наиболее полного решения этой проблемы можно ожидать при замыкании ЯТЦ и ввода в структуру ЯЭ значительной доли БР.
- 2 В настоящее время трудно достаточно точно оценить период времени, когда ввод БР, работающих в замкнутом ЯТЦ, станет экономически целесообразным. Этот период времени определяется экономически доступными ресурсами природного урана и экономическими характеристиками БР и переделов замкнутого ЯТЦ. В связи с этим повсеместно практикуется хранение ОЯТ в водных бассейнах выдержки, а затем в «сухих» хранилищах на площадках АЭС или в централизованных хранилищах.

Заключение (2)

- 3 Для эксплуатировавшихся реакторов с СВТ хорошо зарекомендовало себя хранение ОЯТ в баках длительного хранения, заполненных затвердевшим СВТ, при котором формируются четыре защитных барьера в глубину для выхода радиоактивности в окружающую среду: топливная матрица, оболочка твэла, твердый СВТ и корпус бака, что обеспечивает высокую безопасность хранения.
- 4 Аналогичное решение целесообразно рассмотреть для реактора СВБР-100 с заменой СВТ на свинец, обеспечивающий более надежную защиту в связи с более высокой температурой плавления. Продолжительность периода такого хранения может составить несколько десятилетий, когда реализация замкнутого ЯТЦ станет экономически эффективной. На полигоне площадью 200 × 200 м может быть размещено около 13000 тонн ОЯТ, что соответствует суммарной мощности АС СВБР-100 около 10 ГВт-э, работающих 100 лет.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ



ИНЖИНИРИНГ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основные результаты обоснования проектных пределов для материала оболочек твэлов РУ СВБР-100

Петроченко В.В., Григорьев С.А., Дедуль А.В., Комлев О.Г., Кондауров А.В. *АО «АКМЭ-инжиниринг», г. Москва, A.Dedul*@svbr.org

ТЖМТ – 2018, 8-10 октября 2018, Обнинск

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ПРЕДЕЛОВ В ПРОЕКТЕ РУ СВБР-100

В соответствии с п. 1.1.2 «ОБЩИХ ПОЛОЖЕНИЙ Упрощенная схема для проектных пределов в соответствии с ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ требованиями Российских норм и правил в области безопасности СТАНЦИЙ« (НП-001-15): «Общие положения устанавливают цели и основные критерии Область работы локализующих систем Аварии безопасности атомных станций ... Объем реализации этих Максимальный безопасности принципов и мер должен соответствовать федеральным проектный предел Предаварийная нормам и правилам в области использования атомной энергии. При отсутствии необходимых нормативных Область работы систем безопасности ситуация правовых актов предлагаемые конкретные технические решения обосновываются в соответствии с современным Предел безопасной уровнем развития науки, техники и производства.» Эксплуатация с отклонениями с эксплуатации Для наиболее распространенных типов РУ пределы Область действия аварийной защиты (елнн) повреждения твэлов и требования к коэффициентам реактивности реакторов АС установлены в Приложении к ПБЯ Эксплуатационный РУ АС (НП-082-07). Для новых проектов, к которым предел Область действия предупредительной зашиты эксплуатация относится проект РУ СВБР-100 основные критерии Нормальная безопасности, в том числе и значения проектных Пределы и условия нормальной эксплуатации пределов, должны обосновываться в проекте (п. 1.1.2 ОПБ).

Высокая температура кипения, химическая инертность теплоносителя свинец-висмут обеспечивая повышение безопасности исключают простое определение предельных технологических параметров опасных с точки зрения целостности барьеров безопасности (топливной композиции и оболочки твэла). Тем не менее такие параметры в соответствии с общепринятыми подходами к обоснованию безопасности должны быть определены



ТЖМТ – 2018, 8-10 октября 2018, Обнинск

УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ (ТВЭЛОВ) РУ СВБР-100

Хвостовик верхний	Отражатель	Топливный сердечник	Отража	атель	Газос	борник	Хвостовик нижний	
Условия работы твэлов РУ СВБР-100					Классический твэл			
Характеристика					ние	 Контейнерного типа Особенности: оболочка из бесшовной холоднодеформированной трубы со спиральными ребрами усовершенствованное оксидное топливо молибденовая фольга в зазоре между топливом и оболочкой для обеспечения повышенной маневренности 		
Температура теплоносителя на входе в активную зону, ^о С					+9 -28			
Температура теплоносителя на выходе из а.з. (твэльная часть), ^о С					⊦14 -33			
Максимальная (с учетом факт. перегрева) температура оболочки, ^о С					0			
Скорость теплоносителя, м/с, не более					5			
Максимальная линейная нагрузка на твэл, Вт/см					0			
Флюенс нейтронов с E>0,1 МэВ для оболочки максимальный, н/см ²					0 ²³			
Повреждающая доза на оболочку, сна, максимальная					,			
Выгорание топлива, % т.а., максимальное локальное)			
Кампания активной зоны, эфф.ч.					00			
Тип топлива					2			



3

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛИ ЭП-823Ш



- Суммарное время за 12 кампаний ресурсных коррозионных испытаний при температуре 600 °C составило 50 135 часов, т.е. соответствовало предусмотренному для реактора СВБР-100 ресурсу эксплуатации
- В результате коррозионных испытаний, оболочки макетов твэлов из стали ЭП823-Ш (как в состоянии поставки, так и предварительно оксидированными по ранее принятому для твэлов РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем технологическому процессу) не подверглись каким-либо коррозионно-эрозионным повреждениям. Не было обнаружено ни жидкометаллической коррозии, ни признаков развития щелевой коррозии в местах дистанционирования образцов в перфорированных решетках рабочих участков, ни развития коррозионно-эрозионных повреждений дистанционирующих ребер трубчатых образцов
- Нанесенные искусственные дефекты риски с полным удаление «защитной оксидной пленки» после 25 269 часов эффективно «самозалечивались» без развития дополнительных коррозионно-эрозионных повреждений

ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ ПРИ НАРУШЕНИЯХ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ КОНТУРЕ



--- область (термодинамически) допустимых значений;
 ---- принятая для параметров РУ СВБР-100 область (50 000 часов испытаний)

- области исследованные на временной базе от 6000 до 25000 часов

О - области исследованные на временной базе от 9860 до
 29530 часов в условиях реакторных петлевых испытаний

 область испытаний экстремальных значений концентрации кислорода на временной базе около 500-600 часов

- Средняя скорость окисления металла составила 0,14 мм/год на временной базе 635 часов. Следов развития жидкометаллической коррозии или существенных повреждений образцов не обнаружено
- Очаговые коррозионно-эрозионные повреждения глубиной до 0,42-0,43 мм на гладкой части образцов и до 1,5-2 мм на хвостовиках макетов. Максимальная скорость жидкометаллической коррозии составила около 0,68 мкм/час на временной базе 580 часов.



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТОВ ТВЭЛОВ ПРИ ПЕРЕГРЕВАХ

Характерные результаты разрушающих испытаний трубчатых образцов стали ЭП823-Ш, нагруженных внутренним газовым давлением (конец кампании)

Nº	Температура	Время до
образца	испытаний, °С	разрушения, мин
44	900	5,1
40	850	9,5
45	800	60
46	750	900



Характерный внешний вид образцов после испытаний (Образец №40 – t=850°С, σ=60 МПа, т=9,5мин)

При моделировании аварийных перегревов разгерметизация всегда* происходила по характерному сценарию:

- Значительная пластическая деформация (вздутие и утонение оболочки в области максимальных температур)
- Продольная трещина между ребрами
- Раскрытия трещины и разгерметизация

*Примечание: однократно после значительного деформирования (до формирования продольной трещины) — трещина в сварном шве приварки хвостовика (дефект сварного шва)



ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ «АВАРИЙНЫХ» ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РУ СВБР-100





- ---- температура теплоносителя на выходе из твэльной части активной зоны
- — температура теплоносителя на выходе из наиболее энергонапряженной части активной зоны
- – среднесмешанная температура теплоносителя на выходе из активной зоны
- ---- температура теплоносителя на входе в активную зону
- максимальная температура оболочки максимально напряженного твэла
- ---- максимальная температура среднего по энергонапряженности твэла



ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ПРОЕКТНЫХ ПРЕДЕЛОВ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ПОЛНОМ ОБЕСТОЧИВАНИИ



На основе имеющейся базы данных по испытаниям на длительную прочность и скорость ползучести выполнена оценка для максимальной величины остаточной деформации оболочки максимально напряженного твэла, которая составила приблизительно 0,24%, что, по-видимому, не представляет опасности для работоспособности твэла и активной зоны в целом


- Предлагаемый подход, а именно, определение предельно допустимых температурно-временных зависимостей и/или расчетных значений остаточных деформаций оболочек твэлов, к формулированию ключевых критериев безопасности для реакторных установок с теплоносителем свинец-висмут представляется приемлемым для разработчиков и достаточно удобным для практического применения
- Предварительные результаты НИОКР полностью подтвердили приемлемость проектных основ РУ СВБР-100, обеспечивающих высокий уровень безопасности



Спасибо за внимание !



ТЖМТ – 2018, 8-10 октября 2018, Обнинск



Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Разработка технологии получения свинца с измененным изотопным составом для перспективных ядерных установок на быстрых нейтронах

Бортнянский А.Л., Демидов В.Л., Мотовилов С.А., Подтыкан Ф.П., Юдин А.М.

Докладчик: Юдин Александр Михайлович, Начальник отдела ЛК -2, НТЦ «ЛК и Т» АО «НИИЭФА»

+7 (812) 464-51-77 yudin@mit.niiefa.spb.su

ТЖМТ – 2018 г. Обнинск



Длительное облучение свинцового теплоносителя в спектре ЯЭУ приводит к наработке в нем чрезвычайно опасных альфа- и гамма-радионуклидов, в том числе Ро-210 и Ві-207.

Их образование в теплоносителе связано с большим содержанием изотопа Pb-208 в природном свинце. В свинцовом теплоносителе, обогащенном по изотопу Pb-206 (~95%), нарабатывается значительно меньше (в 10³-10⁴ раз) радионуклидов Ро и Ві, нежели в природном свинце.

NBOLOLI	204	205	207	203	
Природный свинец	1.4%	24.1%	22.1%	52.3%	
Продукт	0.1%	95.0%	3.4%		

Pb-nat isotopical contents



Накопление радионуклидов Bi-207, Bi-208 и Ро-210 при облучении свинца Pb-208 в реакторе на быстрых нейтронах



Накопление радионуклида Pb-205 при облучении изотопа Pb-206 в реакторе на быстрых нейтронах





www.niiefa.spb.su

Separation circuit of Pb isotopes



1- Pb reservoir, 2 - interaction chamber 3- interaction zone,
4 - Ar supply, 5 - reagent gas supply, 6 - reciprocal mirror,
7 - probing laser radiation, 8 - collector chamber



Оптическая схема установки



Т

Схема нижних рабочих уровней конфигурации Pb np2





www.niiefa.spb.su

Контуры коэффициентов поглощения изотопов свинца



Схема сепараторной системы



Конструкция сепараторной системы



Блок схема установки

60 W 120 W Cooled Tuning Mirror ... Laser Diode Diode module Diode module lens Focusing Focusing System System Dye cell Dye cell 40 W 100 W Replaceable 5 mW 1 W module Focusing Focusing System Holographic Grating Coupling System Coupling Lens Amplifier Lens **Tunable Diode Laser** Diode module **Diode module** 120 W 60 W Separator system Purifier $1 \text{ m}^3/\text{s}$ CH2Cl2 CH₂Cl₂ Crucible Pb as flov T=1000°K Mixing Pb, CH₂Cl₂ P=100 Pa zone Irradiation 206 Pb*, CH2Cl2 zone Zone of $^{206}\mathrm{Pb}\,\mathrm{Cl}_2,\mathrm{CH}_2,^{208}\mathrm{Pb},\mathrm{CH}_2\mathrm{Cl}_2$ chemical reaction 208 Pb Pb || Absorption ²⁰⁶PbCl₂ zone Pump 8 **Utilization** Pb CH2Cl2,CH2 ▲3 1/h Heat insulator pumpind out Liquid nitrogen trap CH_2Cl_2 Vacuum pump $N_2 =$ S Utilization CH_2Cl_2 5

Laser system

www.niiefa

Общий вид лазерной установки



Cost of producing Pb-206





www.niiefa.spb.su

Проект МНТЦ № 2573

"Исследование процессов высокоэффективного лазерного разделения изотопов свинца с помощью селективных фотореакций для целей создания экологически чистых ядерно-энергетических установок следующего поколения"

Коллабораторы:

- Исследовательский центр Карлсруэ, Германия
- Исследовательская лаборатория Ядерных Реакторов Токийского технологического института

Участники:

- ФГУП «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»
- Институт физики полупроводников СО РАН
- ФГУП ГНЦ РФ ФЭИ

Контактная информация

Юдин Александр Михайлович

+7 (812) 464-51-77

yudin@mit.niiefa.spb.su

www.niiefa.spb.su





ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Измерение расхода ТЖМТ

Кебадзе Б.В., Лагутин А.А., Шурупов В.А., Генералов Е.В., Фомин А.Н. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск, Россия)





Технические трудности, возникающие при измерении расхода свинца традиционными расходомерами:

- Наличие контактного сопротивления на границе «жидкий металл – стенка трубопровода»;
- Высокие рабочие температуры (до 600 °С);
- Отсутствует база для метрологических испытаний на свинце с расходами G≥100 м³/ч.

Измерительный участок бесконтактного корреляционного расходомера (БКР)





Непосредственно измеряемым БКР параметром является время транспорта гидродинамических неоднородностей (вихрей) между двумя измерительными сечениями [1, 2].

Генерация сигнала БКР





Источник сигнала для БКР – пульсации индуцированного

магнитного поля,

- В₀ постоянное магнитное поле (МП)
- ω завихренность
- В' пульсации индуцированного МП

Преимущества бесконтактных корреляционных расходомеров (БКР)



Характеристики БКР не зависят от:

- проводимости и температуры жидкого металла,
- наличия примесей,
- контактного сопротивления на границе жидкий металл стенка трубопровода,
- старения магнитной системы.

Монтаж датчиков на измерительном участке контура не требует сварки.



Параметры теплоносителя и измерительных участков БКР на свинцовом стенде:

- диапазон расходов 0÷72 м³/ч;
- диапазон температур 200÷550 °С;
- диаметр трубопровода Dy92.

Компоненты системы БКР:

- измерительный участок с генератором вихрей в виде гиба
- первичные преобразователи (магнитные системы с приемными катушками);
- вторичная аппаратура.







Состав аппаратуры

Подсистема нормирующих преобразователей:

- усилители шумового сигнала,
- модули преобразования сигналов термопар,
- преобразователи аналогового сигнала в стандартные сигналы постоянного тока 4–20 мА.

Блок цифровой обработки:

- промышленный компьютер,
- плата АЦП,
- ПO.



$$G_{\mu cr} = k_c G_{cor}$$

$$G_{cor} = V/\tau$$

- V объем участка между измерительными сечениями,
- τ среднее время транспорта вихрей.
- **Цель градуировки** определение коэффициента k_c.
- **Объект градуировки** система БКР с натурным измерительным участком, включая гиб.
- **Средство градуировки** установка поверочная натриевая ИРС-М, аттестованная на расход до 100 м³/ч.

Измерительный участок со стандартным гибом

POCATOM

Генератор вихрей — стандартный крутоизогнутый гиб, R_{гиба}= 1,5Ду

Диаметр измерительного участка Ду50

Диапазон изменения расходов 5—70 м³/ч.

Отстояние первого датчика от гиба, диапазон: ЗДу—12 Ду.

Расстояние между измерительными сечениями: 3Ду; 4Ду





Зависимость поправочного коэффициента k_c

от числа Рейнольдса: a) R_{гиба}~3,5 Ду; б) R_{гиба}=1,5 Ду

Re-10-4	6,68	8,68	10,84	13,13	15,50	16,73	21,98	27,88	38,33	44,29	54,64	65,26	76,62	86,38
k _c	0,917	0,926	0,933	0,934	0,936	0,939	0,948	0,947	0,953	0,952	0,957	0,961	0,963	0,966

a)

Re-10-4	9,09	18,06	28,84	36,82	46,64	55,67	64,96	74,39	82,33	92,37	101,6	109,4	119,6	128,7
k _c	1,050	1,019	1,009	1,005	1,004	1,003	1,003	1,001	1,000	0,998	0,999	0,999	0,998	0,998

б)

При измерении расхода свинца использовалась аппроксимационная зависимость $k_c = k_c$ (Re).

Поправочные коэффициенты для плавного (а) и стандартного крутоизогнутого (б) гибов



Примечание: Стандартный крутоизогнутый гиб R = 1,5 Dy, ГОСТ 17375-2001 POCATOM





Корреляционная функция, расход свинца ~ 30 м³/ч



Основа для аттестации БКР для ТЖМТ для G > 100 м³/ч – физическое моделирование с соблюдением геометрического и гидродинамического (Re = idem) подобия.

Расширенный диапазон расходов установки ИРС-М – 385 м³/ч. Установка предварительно аттестована на этот диапазон.

Пример возможности градуировки на основе моделирования: расход натрия G=385 м³/ч при диаметре модельного измерительного участка Ду 100 обеспечивает градуировку **БКР ТЖМТ** для измерительного участка Ду 300 в диапазоне до **600 м³/ч**.



Разработан и предварительно испытан на установке ИРС-М образец **вихретокового расходомера** с двумя катушками возбуждения и одной приемной катушкой.

Питание катушки возбуждения – импульсы длительностью (0,1–5 мс).

Сочетание установленных последовательно в контуре ТЖМТ бесконтактных корреляционного и вихретокового расходомеров позволяет расширить диапазон измерений. Применение БКР облегчает задачу бездемонтажной поверки.

Первичный преобразователь токовихревого

расходомера





Выходной сигнал токовихревого расходомера





Зависимость амплитуды сигнала от расхода




ЗАКЛЮЧЕНИЕ



- Разработана, изготовлена и испытана на стенде со свинцовым теплоносителем система измерений на основе бесконтактных корреляционных расходомеров.
- Предложена методика градуировки БКР для свинца на натриевой установке поверочной с использованием геометрического и гидродинамического подобия (Re = idem).
- Экспериментально определены градуировочные характеристики для нескольких видов источника вихреобразования (R_{гиба} ~ 3,5 Ду; R_{гиба} = 1,5 Ду).
- Испытан образец токовихревого расходомера с импульсным питанием.

Список литературы



1. Кебадзе Б.В., Типикин В.Н., Комиссаров О.Ю., Адамовский Л.А., Голованов В.В., Инкин Ю.Н. Изучение вихревой структуры потока и корреляционные измерения расхода с помощью бесконтактных магнитных датчиков // Магнитная гидродинамика. 1988. № 4. С. 105–109.

2. Кебадзе Б.В., Комиссаров Ю.О., Типикин В.Н., Гулевский В.А. и др. Бесконтактные методы измерения расхода свинца и его сплавов // Сб. трудов межотрасл. конф. «Использование жидких металлов в народном хозяйстве» (Теплофизика - 91). – Обнинск, 1993 г. – С. 151 – 155.

3. Генералов Е.В., Ковалев Д.М., Стефани А.Г., Фомин А.Н., Шурупов В.А. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск, Россия), Крылов С.Г., Лавренов Р.Н., Лемехов Ю.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия) Разработка и применение бесконтактных расходомеров на установке со свинцовым теплоносителем // Сб. докладов конф. молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». – Москва: АО «НИКИЭТ», 23–24 мая 2017. – С. 597 – 605.



Спасибо за внимание



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

> RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES Nuclear Safety Institute (IBRAE)

Использование кода ЕВКЛИД/V2 для расчета задач по росту оксидного слоя на поверхности нержавеющей стали в потоке ТЖМТ

Докладчик: к.т.н. Усов Э.В. Кудашов И.Г., Мосунова Н.А., Сорокин А.А., Чухно В.И.

Актуальность и цели работы

Разработка второй версии интегрального кода ЕВКЛИД/V2, способного моделировать окислительновосстановительные процессы в ТЖМТ, перенос ПА, ПК, ПД по контуру РУ с ТЖМТ.

Создание математических моделей для:

- Моделирования рост и разрушение оксидного слоя на поверхности стали в ТЖМТ
- Расчет выхода и транспорта в 1-ом контуре РУ примесей(магнетит, кислород, ПД и ПА)
- Коагуляция примесей в потоке теплоносителя
- Осаждение примесей на стенку



Основные моделируемые процессы

Формирование пленки. Двухслойная модель

В предложенной модели основными моделируемыми динамическими переменными являются толщина слоев магнетита δ_m и железо-хромистой шпинели δ_s .

$$\begin{cases} \rho_{ox} \frac{d\delta_m}{dt} = J_{Fe}^{ox} + J_O^{ox} - k_{rem}, \\ \rho_s \frac{d\delta_s}{dt} = J_O^s + J_{Fe}^s + J_{Cr}^s, \end{cases}$$

*

где ${}^{**}k_{rem}$ (кг/м²с) есть скорость эрозии оксидного слоя в результате взаимодействия с потоком теплоносителя.

*В.В. Алексеев, Е.А. Орлова, Ф.А. Козлов, И.Ю. Торбенкова, А.С. Кондратьев. Расчетно-теоретический анализ процесса оксидирования стали в свинцовом теплоносителе // ВАНТ, сер.: Ядерные константы, вып. 1-2, 2010, с. 56-66. **Mikityuk K. Analytical model of the oxide layer build-up in complex lead-cooled systems // Nuclear

Engineering Design, Vol. 240. – Pp.3632-3637, 2010.

Двухслойная модель оксидной пленки

В соответствии с данной схемой потоки, затрачиваемые на образование слоев магнетита J_X^{ox} и шпинели J_X^s , определяются соотношениями:

$$\begin{split} J_O^{ox} &= J_O^T - J_O^{difm}, \ J_{Fe}^{ox} = J_{Fe}^{difm} - J_{Fe}^T, \\ J_O^s &= J_O^{difm}, \ J_{Cr}^s = J_{Cr}^{difs}, \\ J_{Fe}^s &= J_{Fe}^{difs} - J_{Fe}^{difm}. \end{split}$$

5

В соответствии со стехиометрией реакций образования магнетита и шпинели выполняются соотношения:

$$\begin{split} J_{O}^{ox} &= \frac{4m_{O}}{3m_{Fe}} J_{Fe}^{ox}, \ J_{O}^{s} = \frac{4m_{O}}{2.64m_{Fe}} J_{Fe}^{s}, \ J_{O}^{s} = \frac{4m_{O}}{0.36m_{Cr}} J_{Cr}^{s}; \\ 3Fe + 4PbO \Leftrightarrow Fe_{3}O_{4} + 4Pb, \ a_{O}^{w} = \left[K_{eq}^{ox} \left(a_{Fe}^{w} \right)^{3} \right]^{-1/4}, \ K_{eq}^{ox} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{R}^{ox}}{RT} \right), \ \Delta G_{R}^{ox} = \Delta G_{Fe_{3}O_{4}}^{0} - 4\Delta G_{PbO}^{0}, \\ Fe + 2Cr + 4O \Leftrightarrow FeCr_{2}O_{4}, \ a_{O}^{s} = \left[K_{eq}^{s} a_{Fe}^{s} \left(a_{Cr}^{s} \right)^{2} \right]^{-1/4}, \\ K_{eq}^{s} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{R}^{s}}{RT} \right), \ \Delta G_{R}^{s} = \Delta G_{FeCr_{2}O_{4}}^{0} \ ^{*}\Delta G_{R}^{ox} = -292100 + 0, 6T, \\ ^{*}\Delta G_{R}^{s} = -574330 - 69.6T; \end{split}$$

*В.В. Алексеев, Е.А. Орлова, Ф.А. Козлов, И.Ю. Торбенкова, А.С. Кондратьев. Расчетно-теоретический анализ процесса оксидирования стали в свинцовом теплоносителе // ВАНТ, сер.: Ядерные константы, вып. 1-2, 2010, с. 56-66.

Перенос примеси в ТЖМТ. Схема "против потока"

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

Схема с разностями против потока:



Плюсы:

- Монотонность
- Свойство транспортивности

Минусы:

• Аппроксимационная диффузия

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \implies \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} = -v \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{v \Delta z}{2} \frac{\partial^2 C}{\partial^2 z}$$



Использование схемы высокого порядка точности. Разностная схема "КАБАРЕ"

Плюсы:

- Бездиссипативность
- *Свойство транспортивности Минусы:
- Второй порядок аппроксимации (утрата свойства монотонности)



Решение: Процедура нелинейной коррекции



*V. M. Goloviznin, S. A. Karabasov. Nonlinear correction of Cabaret scheme// Matem. Mod., Vol. 10, Number 12,1998.

Расчет коагуляции частиц

Уравнение коагуляции частиц:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = L_{coag}(v) + S(v,t) - R(v,t)C + L_{cond}(v)$$
$$L_{coag}(v) = \frac{1}{2}\int_{0}^{v} K(u,v-u)C(u,t)C(v-u,t)du - C(v,t)\int_{0}^{\infty} K(v,u)C(u,t)du$$

Численный вид:

$$\begin{cases} \frac{dN_{i}}{dt} = \left(\frac{m_{ox}}{m_{i} - m_{i-1}}\right) \left[K_{i-1}N_{i-1}N_{ox} - E_{i}N_{i}\right] - \left(\frac{m_{ox}}{m_{i+1} - m_{i}}\right) \left[K_{i}N_{i}N_{ox} - E_{i+1}N_{i+1}\right] + \\ + N_{i-1}\sum_{j=1}^{i-1} f_{i-1,j} \left(\frac{m_{j}}{m_{i} - m_{i-1}}\right) K_{i-1,j}N_{j} - N_{i}\sum_{j=1}^{i-1} f_{ij} \left(\frac{m_{j}}{m_{i+1} - m_{i}}\right) K_{i,j}N_{j} - N_{i}\sum_{j=i+1}^{j\max} K_{i,j}N_{j} - \\ - N_{i}\sum_{jc=1}^{j\max} K_{i,jc}^{corr}N_{jc}, \\ \frac{dN_{ox}}{dt} = \sum_{i} E_{i}N_{i} - N_{ox}\sum_{i} K_{i}N_{i} \end{cases}$$

Cousin F., Dieschbourg K., Jacq F. New capabilities of simulating fission product transport in circuits with ASTEC/SOPHAEROS v.1.3. Nuclear Engineering and Design, 238, 2430-2438, 2008.

Аналитический тест по коагуляции

Коагуляция с постоянным коэффициентом коагуляции



Сравнение результатов для функции распределения частиц по радиусу с точным решением

Аналитический тест по росту оксидной пленки

Уравнение роста оксидного слоя

$$\rho_{ox}\frac{d\delta}{dt}=J_{Fe}^{ox}+J_{O}^{T},$$

Связь диффузионных потоков

$$\frac{J_O^T}{4m_O} = \frac{J_{Fe}^{ox}}{3m_{Fe}}, \ J_{Fe}^{ox} = J_{Fe}^{dif} - J_{Fe}^T,$$

$$J_{Fe}^{dif} = K_{pr} \frac{a_{Fe}^m - a_{Fe}^w}{\delta}, \ K_{pr} = 10^{-1.722-9600,0/7}$$





Зависимость толщины оксидного слоя от времени

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{da_{Fe}^{w}}{dt} \frac{K_{pr}}{\frac{3m_{Fe}}{4m_{O}}h_{O}C_{O}^{sat}\left[a_{O}^{T} - \left(K_{eq}^{ox}\left(a_{Fe}^{w}\right)^{3}\right)^{-0.25}\right] + h_{Fe}C_{Fe}^{sat}\left(a_{Fe}^{w} - a_{Fe}^{T}\right)}{\frac{da_{Fe}^{w}}{4m_{O}}h_{O}C_{O}^{sat}\left[a_{O}^{T} - \left(K_{eq}^{ox}\left(a_{Fe}^{w}\right)^{3}\right)^{-0.25}\right] + h_{Fe}C_{Fe}^{sat}\left(a_{Fe}^{w} - a_{Fe}^{T}\right)}{\frac{da_{Fe}^{w}}{4m_{O}}h_{O}C_{O}^{sat}\left[a_{O}^{T} - \left(K_{eq}^{ox}\left(a_{Fe}^{w}\right)^{3}\right)^{-0.25}\right] + h_{Fe}C_{Fe}^{sat}\left(a_{Fe}^{w} - a_{Fe}^{T}\right)}{\frac{da_{Fe}^{w}}{4m_{O}}h_{O}C_{O}^{sat}\left[a_{O}^{T} - \left(K_{eq}^{ox}\left(a_{Fe}^{w}\right)^{3}\right)^{-0.25}\right] + h_{Fe}C_{Fe}^{sat}\left(a_{Fe}^{w} - a_{Fe}^{T}\right)}}{\frac{da_{Fe}^{w}}{4m_{O}}h_{O}C_{O}^{sat}\left[a_{O}^{T} - \left(K_{eq}^{ox}\left(a_{Fe}^{w}\right)^{3}\right)^{-0.25}\right] + h_{Fe}C_{Fe}^{sat}\left(a_{Fe}^{w} - a_{Fe}^{T}\right)}}$$



H Glasbrenner, J Konys, G Mueller, A Rusanov, Corrosion investigations of steels in flowing lead at 400°C and 550°C. // Journal of Nuclear Materials. v. 296. i. 1. 2001. pp. 237-242.

11

Расчет эксперимента по росту оксидной пленки на поверхности стали в свинцовом теплоносителе(ГНЦ РФ ФЭИ)



В. Алексеев, Е.А. Орлова, Ф.А. Козлов, И.Ю. Торбенкова, А.С. Кондратьев. Расчетно-теоретический анализ процесса оксидирования стали в свинцовом теплоносителе // ВАНТ, сер.: Ядерные константы, вып. 1-2, 2010, с. 56-66.

Расчет эксперимента по росту оксидной пленки на поверхности стали в свинцово-висмутовом теплоносителе



Масса кислорода в теплоносителе -0,068

Зависимость толщины оксидного слоя от времени

Machut M., K. Sridharan, N. Li, S. Ukai, T. Allen. Time dependence of corrosion in steels for use in lead-alloy cooled reactors. Journal of Nuclear Materials. // Journal of Nuclear Materials. v. 371. i. 1–3. 2007. pp. 134-144.

Заключение

- В составе ЕВКЛИД/V2 создан код, позволяющий рассчитывать окислительно-восстановительные процессы в ТЖМТ, перенос продуктов ПК, ПА и ПД по контуру РУ и их коагуляцию
- Проведены тестовые и верификационные расчеты по переносу, коагуляции частиц и росту оксидного слоя на поверхности стали в ТЖМТ

Структурные свойства и корреляции пульсаций температуры и активности кислорода в расплавах тяжелых металлов

Осипов А.А. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

osipov177@yandex.ru

"С помощью скейлинга мы можем объяснить всё

не понимая ничего"

Крейчнан Р.

Скейлинг (от англ. scale – масштаб) - симметрия уравнений относительно масштабных преобразований

Масштабная инвариантность уравнений Навье-Стокса

$$r \to \lambda r, t \to \lambda^{1+h}t, v \to \lambda^{-h}v$$

Коэффициенты переноса зависят от параметра *h* – Гёльдеровская экспонента

 $h = rac{\partial au(q)}{\partial a}, \quad au(q)$ - скейлиговая экспонента h(1) = HИндекс Херста Скейлинг ⇒ Коэффициенты переноса Пульсации $\sim t^H$ 0.8 Формулы Грина - Кубо 0.6 0.4 $D \sim \int_{0}^{\infty} C(\tau) d\tau \approx \int_{0}^{\iota_{cor}} (1 - \tau^{2H}) d\tau$ ഗ്<u>റ</u> 0.2 0 Гипотеза скейлинга -0.2 -6 -0.4 $Nu \sim Pe^{f(H)}$ -0.6 -8 -3 -2 500 0 1000

Математический аппарат

Скейлинг может изучается с помощью структурных функций **S**_q или вейвлет-преобразований *W*(*a*,*b*).

$$S_{q} = \left\langle (x(t+l) - x(t))^{q} \right\rangle \sim l^{\tau(q)} \qquad Z_{q} = \sum_{b(a)} |W(a,b(a))|^{q} \sim a^{\tau(q)}$$

Нормальная диффузия h=1/2 $\tau(q) = \frac{q}{2}, h = \frac{1}{2}, \sqrt{\langle x(t)^{2} \rangle} = \sqrt{2Dt} \sim t^{1/2}$

σ

1941 Модель изотропной однородной турбулентности (К41)

Турбулентный каскад может быть описан фракталом: энергия передаётся по фрактальному дереву, состоящему из иерархической структуры вихрей разных масштабов

$$S_2(r) = <(\upsilon(r'+r) - \upsilon(r'))^2 > ~ r^{2/3}$$

Закон Ричардсона

 $D(l) \sim l^{4/3}$

1949 Обухов

$$S_2(r) = \langle (t(r'+r) - t(r'))^2 \rangle \sim r^{2/3}$$

Фрактальные структуры масштабно инвариантны и описываются степенными законами, что соответствует свойствам турбулентности

Изучение фрактальных свойств турбулентности **турбулентность** привело к созданию мультифрактальных моделей: К62, логпуассоновской и др.

$$r(q) = \frac{q}{3}, h = \frac{1}{3}$$
 Колмогоровская
турбулентность -
монофрактал К41

Гипотеза Тейлора – замороженная турбулентность



Генерация

Диссипация

RIP

Спектральные и структурные функции пульсаций однородной изотропной турбулентности К41



Вейвлет структура. Локальный спектр энергии и мера локальной перемежаемости



Эксперимент 1. Статический режим



Термопара ХА, толщина 1мм, изолированный спай, постоянная времени 0.1-0.2 сек, Частота дискретизации 1 сек



Амплитуды пульсаций температуры в жидком висмуте оказались на порядок меньше пульсаций температуры в газовой фазе и составили порядка 1 - 2 °C и 10 -20 °C соответственно.

Вейвлет структура.



Картина локальных максимумов вейвлет коэффициентов в обоих случаях имела ярко выраженный ветвящийся, древообразный вид, характерный фрактальным структурам.

Эксперимент и модель



Вейвлет структура. Мера локальной перемежаемости, структурная и корреляционная функции



Однако в случае пульсаций в газе ветвящийся вид линий локальных максимумов вейвлет коэффициентов наблюдался на существенно меньших масштабах. Аналогичным свойством обладали автокорреляционные и структурные функции пульсаций температур.



Взаимные корреляции.



Анализ взаимных корреляционных функций выявил высокий уровень корреляций, как в газовой фазе, так и в жидком висмуте. В случае пульсаций в жидком висмуте наблюдался закономерный сдвиг максимумов взаимных корреляций, чего не наблюдалось в газовой фазе, что могло быть связано как с более интенсивным движением в газовой фазе, так и с гораздо меньшим масштабом корреляций.



Схема (сечение трехмерной модели) рабочего участка стенда TT-2M

1 – корпус; 2 – вытеснитель; 3 – монтажный патрубок ДАК;4 – ДАК; 5 – нижняя решетка; 6 – верхняя решетка; 7 – входной патрубок;8 – выходной патрубок.

Эксперимент 2. Динамический режим

Измерения температур проводили на входе и выходе из рабочего участка стенда«TT-2M» расстояние между термопарами составило порядка 2 м. Измерения проводили термопарами хромель-алюмель, толщиной 0.5 мм с изолированным спаем. Термопары располагались в стальных чехлах с толщиной стенки 2 мм, чехлы были введены в поток теплоносителя. Показания термопар фиксировались 3 раза в секунду.



Вейвлет структура. Мера локальной перемежаемости

Амплитуда пульсаций слабо зависела от условий эксперимента и составляла порядка 0.2 ^оС (пред. слайд).



Картина локальных максимумов вейвлет коэффициентов в обоих случаях имела ярко выраженный ветвящийся, древообразный вид, характерный фрактальным структурам.

Вейвлет структура. Мера локальной перемежаемости



Структурные функции и линии локальных максимумов вейвлет коэфф.



Однако в случае пульсаций в режиме эжекции водорода степенная зависимость структурной функции наблюдалась на меньших временных масштабах, особенно на выходе из рабочего участка, что могло быть связано с повышенным газосодержанием в верхней части рабочего участка. Индекс Херста Н составил 0.67 и 0.38 для пульсаций (на выходе из рабочего участка) в режиме эжекции водорода и неизотермической циркуляции соответственно Эжекция водорода. Показания датчиков активности кислорода

Косвенным признаком повышенного газосодержания в верхней части рабочего участка был значительный рост амплитуды пульсаций датчиков активности кислорода в режиме эжекции водорода (датчики были расположены по вертикали рабочего участка)



Взаимные корреляции.

Уменьшение временного масштаба корреляций приводило к потере или существенному снижению корреляций температур на входе и выходе из рабочего участка в режиме эжекции водорода. В режиме неизотермической циркуляции анализ взаимных корреляций температуры на входе и выходе из рабочего участка показал высокий уровень корреляций вплоть до значений 1 (в зависимости от масштаба возмущений) при этом характерное время запаздывания составило порядка 20 секунд, стабильно наблюдаемое на масштабах тепловых возмущений вплоть до 0.1 – 0.2 °C. Характерное время запаздывания 20 секунд примерно соответствовало гидродинамическим характеристикам рабочего участка.



Связи между процессами в разных диапазонах времени положительная могут различаться, например, корреляция одном В интервале может отрицательной При компенсироваться В другом. близких к единице значениях корреляции также остается неопределенность: процессы коррелированы, но в каких временных диапазонах — неясно. Вейвлетпреобразование разлагает одномерный сигнал на составляющие его компоненты разного масштаба. Найдя корреляции между этими компонентами можно получить распределение корреляционной функции одновременно временному и по СДВИГУ, ΠО И временному масштабу. Возможно, что распределенная по масштабам функция корреляции позволит более детально изучить структуру сложных мультимасштабных процессов.

$$C_{xy}^{W}(a,\tau) = \frac{1}{T} \int W_{x}(a,t) W_{y}(a,t-\tau) dt.$$

Заключение

- В данной работе исследованы временные структурные свойства пульсаций температуры в тяжелых жидких металлах (висмут, свинец-висмут) в статических и динамических режимах.

- Показано, что в статических условиях пульсации температуры обусловлены конвективным (свободным) движением металла.

- Определены структурные и корреляционные функции пульсационного поля температуры при свободном и вынужденном движении металла.

-В эксперименте наблюдается масштабная инвариантность пульсационных полей температуры в жидком металле.

-Модельные расчеты показали хорошее совпадение с экспериментом.

-Показано, что пульсации температуры в жидком металле характеризуются фрактальными свойствами и длинными корреляциями, которые могут зависеть от внешних условий.

Спасибо за внимание!
Пульсации температуры и активности кислорода в эвтектике Pb-Bi



Корреляция температуры и ЭДС



Термодинамика нестехеометрических соединений и фаз переменного состава в ТЖМТ

Осипов А.А., Иванов К.Д. Лаврова О.В. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск osipov@ippe.ru

Введение

Теория диссоциации соединений лежит в основе всех физико-химических процессов, поскольку степень диссоциации соединений является мерой их прочности или термодинамической устойчивости. В классической теории термической диссоциации соединений рассматривают переход компонентов конденсированного соединения в газовую фазу. Возникает вопрос о применимости такого подхода к рассмотрению процессов, протекающих при взаимодействии конденсированных соединений с другими конденсированными фазами. В частности, применительно к перспективным ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) актуальными являются вопросы о процессах диссоциации и образования оксидов на поверхностях сталей и в объеме ТЖМТ.

$$\frac{P_{\Sigma A}}{P_{\Sigma B}} = \frac{n}{m}, \ P_{A_n B_m} = P_{A_n B_m}^{\circ}$$

$$P_{\Sigma A} = P_A + 2P_{A_2} + P_{AB} + 2P_{A_2 B} + \dots,$$

$$P_{\Sigma B} = P_B + 2P_{B_2} + P_{AB} + P_{A_2 B} + \dots,$$

$$\frac{w_{\Sigma A}}{w_{\Sigma B}} = \frac{n}{m}, \quad w_i = \alpha_i P_i \sqrt{2\pi M_i RT},$$
$$w_{\Sigma A} = w_A + 2w_{A_2} + w_{AB} + 2w_{A_2B} + \dots$$
$$w_{\Sigma B} = w_B + 2w_{B_2} + w_{AB} + w_{A_2B} + \dots,$$

Очевидно, что в ряде случаев, среда, в которой находится соединение, не является ни газообразной, ни инертной по отношению к компонентам химического соединения, а конгруэнтность перехода может и не выполняться. Поэтому в данных случаях необходима другая, более общая модель.

Построение модели. Постановка задачи

$$n_{A} = nz_{A_{n}B_{m}} + \sum in_{A_{i}B_{j}}$$
$$n_{B} = mz_{A_{n}B_{m}} + \sum jn_{A_{i}B_{j}}$$

Задача определить измеряемые и не измеряемые (например, концентрацию фазы, её состав и др.) в эксперименте (процессе) величины как функции от количества молей nA, nB, температуры T и давления P. Или по измеряемым в эксперименте величинам определить nA, nB и другие неизвестные величины.

Пример. Конгруэнтная диссоциация фазы известного и постоянного состава в инертную газообразную фазу

$$\begin{aligned} nz'_{A_nB_m} &= nz_{A_nB_m} + \Sigma iP_{A_iB_j} \\ mz'_{A_nB_m} &= mz_{A_nB_m} + \Sigma jP_{A_iB_j} \\ \Rightarrow \frac{\Sigma iP_{A_iB_j}(a_A, a_B)}{\Sigma jP_{A_iB_j}(a_A, a_B)} = \frac{n}{m}, \ + \frac{1}{a_A^n a_B^m} = e^{-\frac{\Delta G_{A_nB_m}^\circ}{RT}} \\ \Rightarrow a_{A,B} &= a_{A,B}(T, P) \end{aligned}$$

Построение модели. Система уравнений

$$\frac{1}{a_A^n a_B^m} = \exp\left(\frac{-\Delta G_{A_n B_m}^\circ}{RT}\right)$$

$$\frac{1}{a_A a_B^{\beta}} = \exp\left(\frac{-\Delta G_{AB_{\beta}}^{\circ}}{RT}\right)$$

$$n\left(\frac{\partial\mu_A}{\partial m}\right)_{T,P} + m\left(\frac{\partial\mu_B}{\partial m}\right)_{T,P} = 0$$

$$\ln a_{B} = \frac{1}{RT} \frac{\partial \Delta G_{AB_{\beta}}^{\circ}}{\partial \beta}$$

$$m_{B} + \frac{M_{B}m}{M_{A_{n}B_{m}}} m_{A_{n}B_{m}} = m_{\Sigma B} \qquad c_{B} + \frac{\beta M_{A} / M_{B}}{1 + \beta M_{A} / M_{B}} \left(\frac{m}{m_{f}} - 1\right) = c_{\Sigma A} \frac{m}{m_{f}}$$

 $a_B = a_B(n_A, n_B, T)$

Построение модели. Концепция нестехиометрии соединений и фаз переменного состава

 Концепция нестехиометрии и фаз переменного состава позволяет определить химический потенциал соединения как непрерывную функцию его состава, т.к. концентрация дефектов в структуре непосредственно связана с химическим составом соединения. Следовательно, и стандартная энергия Гиббса образования A_nB_m соединения будет непрерывной функцией состава, т.к.

$$\Delta G^{\circ}_{A_n B_m} = \mu^{\circ}_{A_n B_m} - n \mu^{\circ}_A - m \mu^{\circ}_B$$

 Важное свойство непрерывной функции – дифференцируемость, потребуется при рассмотрении уравнения Гиббса-Дюгема.

Стандартная энергия Гиббса как функция состава



Стандартная энергия Гиббса как функция состава

$$\Delta G_{AB_{\beta}}^{\circ}(\beta) = G_1 \frac{\beta}{1+\beta} + G_2 \left(\frac{\beta}{1+\beta}\right)^2 + G_2 \left(\frac{\beta}{1+\beta}\right)^3 \qquad \Delta G_{AB_{\beta}}^{\circ}(\beta) = G_0 + G_1 \beta + G_2 \beta^2$$
$$G_i = k_i T + b_i$$



Пример. Диссоциация магнетита в газовую фазу



Методы определения стандартной энергии Гиббса как функция состава

$$\Delta G_{FeO_{\beta}}^{\circ} = \mathbf{G}_{0} + \mathbf{G}_{1}\beta + \mathbf{G}_{2}\beta^{2} + \mathbf{G}_{3}\beta^{3},$$
$$\ln P_{O_{2}} = \frac{2}{RT} \left(\frac{\partial \Delta G_{FeO_{\beta}}^{\circ}}{\partial \beta} \right)_{\beta=4/3} = \frac{2}{RT} \left(\mathbf{G}_{1} + 2\mathbf{G}_{2}\frac{4}{3} + 3\mathbf{G}_{3}\left(\frac{4}{3}\right)^{2} \right)$$

 $G_0 = 2,53419 \cdot 10^6 - 3000,27T, \quad G_1 = -6,08074 \cdot 10^6 + 7123.37T,$ $G_2 = 4,39858 \cdot 10^6 - 5503,21T, \quad G_3 = -1,10298 \cdot 10^6 + 1429,77T,$



Методы определения стандартной энергии Гиббса как функция состава. Конгруэнтный расчет по одной точке



Пример. Диссоциация и образование нестехиометрических оксидов железа в системе железо - жидкий свинец кислород 1.45 1.40 $(E_2 - E_1)/(T_2 - T_1)$ 0.0 E, mV ⁹/₀/_{1.35} -O- s_{FeO}/s_{Fe}=0.007 $s_{FeO}/s_{Fe}=0.07$ -0.5 $s_{FeO}/s_{Fe}=0.7$ 1.30 200 s_{FeO}/s_{Fe}=2 -1.01.25 200 250 300 350 450 500 400 450 500 550 600 150 200 250 300 350 400 E_2 , mV E,mV t,℃ 1.0 Модель FeO_β Эксперимент ТТ-2М 0 $(E_2 - E_1)/(T_2 - T_1)$ 0.5 $a_{O} = a_{O}(c_{\Sigma O}, c_{\Sigma Fe})$ 0.0 A CONTRACT -0.5-1.0∟ 200 250 300 350 450 500 **400**

 E_2 , mV

Заключение

- Рассмотрены существующие подходы к расчетам результатов диссоциации (образования) сложных соединений переменного и нестехиометрического состава. Показано, что использование имеющихся подходов ограничено отсутствием данных о связи изобарно-изотермического потенциала образования таких соединений с их составом.
- Предложен способ учета влияния состава соединений на данный параметр, основанный на анализе имеющихся экспериментальных данных по стехиометрическим соединениям.
- На примере двухкомпонентного соединения рассмотрена система основных и дополнительных уравнений связи термодинамических параметров, описывающих равновесное состояние термодинамической системы при термической диссоциации соединения. Приведены условия, позволяющие получить решения данной системы.
- Для двухкомпонентной системы железо-кислород выполнены численные расчеты парциальных давлений кислорода как функции температуры и продемонстрированы возможности совершенствования модели путем использования допущения о конгруэнтном характере процесса диссоциации соединения.

Благодарю за внимание!





МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО КИНЕТИКЕ ОКИСЛЕНИЯ СТАЛЕЙ В ТЖМТ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

АВТОРЫ: О.В. Лаврова, К.Д. Иванов, А.Ю. Легких

V международная научно-техническая конференция Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018) 8-10 октября 2018 года Обнинск, Россия





Марка рассматриваемой стали: ЭП 79 (15ХСМФБ)

Химический состав

Элемент	Cr	Ni	Si	С	Mn	S	Р
Концентрация, % вес.	1.41	0.14	0.89	0.15	0.32	0.005	0.007

Элемент	Nb	V	В	Мо	W	Ti	Al	Ν
Концентрация, % вес.	0.25	0.24	-	0.51	-	0.1	0.03	-

Среда, в которой проводилось оксидирование стали: свинец - висмут

Условия и результаты оксидирования образцов стали



№ опыта	t, ºC	τ, час	С, % мас.	δ, мкм	Стенд
1	620; 550; 390	400	~ 2· 10 ⁻⁶	35 – 40; 15 – 20; ~ 2	СИП
2	620; 570; 450	400	∼ 5· 10 ⁻⁵	70 – 80; ~ 30; ~ 6	СИП
3	620; 580 ; 350	400	~ 1· 10 ⁻⁷	8 – 10; ~ 10; ~ 1	СИП
4	450	790	~ 1· 10 ⁻⁷	2 - 3	ЦУ-2М
5	580; 400	1500	~ 2· 10 ⁻⁶	~ 30; ~ 3	ЦУ-2М
6	550; 450	1230	(1÷2)·10⁻ ⁶	~ 16; ~ 4	СВР
7	570; 510; 390	2300	(1÷2)·10⁻ ⁶	~ 40; ~ 20; ~6	ЦУ-1М
8	570; 510; 390	2500	$4 \cdot 10^{-6} \div 8 \cdot 10^{-7}$	25 – 35; 18 – 20; ~ 2	ЦУ-1М
9	600; 510; 410	2100	(1÷ 2)· 10⁻ ⁶	~ 10; ~ 20; ~ 6	ЦУ-1М
10	465; 270	3140	~ 5·10 ⁻⁷	~ 10; 1 - 2	СИП
11	620; 580	400	~ 1. 10-7	~ 25; ~ 10	ЦУ-2М
12	550; 420; 350	6130	∼ 8· 10 ⁻⁶	40 – 60; 20 – 25; 12 - 15	СВР
13	620; 580; 350	2300	$1.10^{-5} \div 2.10^{-6}$	~ 80; 30 – 45; ~ 1	ЦУ-1М
14	620; 550; 450	440	~ 2· 10 ⁻⁶	30 – 36; 15 – 20; 6	СИП





ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

$$\delta = \varphi(T) \cdot \vartheta(C_O) \cdot \zeta(\tau)$$
$$\ln \overline{\delta} = -\frac{A}{T} + B$$

Законы окисления

Координаты линеаризации

Простой параболический закон

$$\delta = \kappa \tau^{\frac{1}{2}}$$

$$ln\delta = f(ln\tau)$$

Сложный параболический закон

$$a\delta^2 + e\delta = c\tau \quad \tau/\delta = f(\delta)$$

Степенной закон $\delta = a \tau^n$ $\ln \delta = f (\ln \tau)$







от температуры в различных опытах

Обработка расширенной матрицы по сложнопараболическому закону кинетики окисления

POCATOM





Проверка соответствия кинетики окисления стали ЭП 79 в расплаве свинец-висмут сложной квадратичной зависимости

 $a\delta^2 + e\delta = c\tau$







Обработка расширенной матрицы по степенному закону $\,\delta=a\, au^n\,$







Температурные зависимости параметров линейного уравнения Inδ = a·Inτ + b

Результат обработки данных
$$\ln \delta_{pacy.} = -\frac{12387}{T} + 15,869 + \left(\frac{778,63}{T} - 0,6274\right) \ln \tau$$

Отклонение экспериментальной толщины оксидной пленки от расчетного значения в зависимости от концентрации кислорода

POCATOM





режима теплоносителя. Расчет выполнялся по степенной зависимости

 $In\delta_{3\kappa c \pi} - In\delta_{pac 4} = φ \cdot InC_{0} + η$

Температурные зависимости параметров уравнения

$$\ln \delta_{_{\mathcal{JKCII.}}} - \ln \delta_{_{pacy.}} = \varphi \ln C_O + \eta$$

POCATOM







Температурные зависимости параметров линейного уравнения $ln(\delta_{_{\mathfrak{P}KCN}}/\delta_{_{pac4}}) = \varphi \cdot lnC_O + \eta$





Сопоставление экспериментальной толщины оксидных пленок на стали ЭП 79 и расчетных значений



Итоговая расчетная зависимость толщины оксидной пленки от температуры, времени экспозиции и концентрации кислорода в теплоносителе имеет вид:

$$\ln \delta_{pac4.} = -\frac{20280}{T} + 28,173 + \left(-\frac{603,94}{T} + 0,9414\right) \ln C_{O} + \left(\frac{778,63}{T} - 0,6274\right) \ln \tau$$





- Предложенная методика позволила в условиях ограниченного набора экспериментальных данных с вероятностью более 90 % описать данные по окислению низколегированной стали ЭП79 общей зависимостью толщины оксидной пленки от температуры, времени экспозиции и концентрации кислорода в расплаве свинцависмута.
- 2. Из результатов обработки следует, что окисление стали ЭП-79 в условиях неизотермических контуров с тяжелым теплоносителем в общем случае не подчиняется простой параболической зависимости. Показатель степени α при времени τ закономерно изменяется с температурой по закону Аррениуса и составляет α ~ 0,62 при 350°C и α ~ 0,35 при 620°C; α = ½ только при температуре ~ 417,6°C. Одним из возможных объяснений этому факту является потеря железа в теплоноситель при повышенных температурах и рост пленок за счет конденсации оксидов железа из теплоносителя при низких температурах.
- 3. Кажущаяся энергия активации процесса изменяется со временем, а также зависит от концентрации кислорода в теплоносителе. Это свидетельствует об изменении качества образующихся оксидных покрытий во времени, а также об изменении контролирующей стадии процесса массопереноса компонентов при изменении концентрации кислорода.
- 4. Полученная зависимость может быть использована в качестве реперной при анализе результатов окисления легированных сталей.





РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАССООБМЕННОГО АППАРАТА ЗА СЧЕТ РАСХОДОВАНИЯ ЗАПАСА КИСЛОРОДА

АВТОРЫ: Р.Ш. Асхадуллин, <u>А.Ю. Легких</u>

V международная научно-техническая конференция Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018) 8-10 октября 2018 года Обнинск, Россия







Для защиты конструкционных сталей от коррозии в РУ с ТЖМТ рекомендуется кислородная технология, которая заключается в формировании на поверхностях сталей оксидных пленок.

Для обеспечения целостности защитных оксидных пленок в процессе эксплуатации РУ необходимо поддержание заданного кислородного режима теплоносителя.

Избыток кислорода в тяжелом теплоносителе приводит к образованию шлаковых отложений на теплообменных поверхностях контура и оборудования.

Малое содержание кислорода в теплоносителе при эксплуатации РУ приведет к развитию коррозионных процессов.



Характерное изменение концентрации растворенного кислорода в ТЖМТ при эксплуатации контура



Режим без регулирования концентрации кислорода не обеспечивает надёжную защиту сталей от коррозии 🔨





Твердофазный метод ввода кислорода в тяжелый теплоноситель





Твердофазный метод регулирования основан на растворении твердофазного оксида при взаимодействии с теплоносителем

 $\langle PbO \rangle \rightarrow \{Pb\} + [O]$

<>- твердое; { } - жидкое; [] - растворенное

Поток растворенного кислорода с поверхности:

 $J_{[O]} = K \cdot C_s \cdot (1 - a_{[O]}) \cdot S_p, c_{[O]}/4$

где:

К – коэффициент скорости растворения, г_[0] /(см^{2·}ч);

*C*_s – концентрация насыщения теплоносителя кислородом, массовые доли;

*а*_[0] – ТДА кислорода в теплоносителе;

*S*_p – площадь поверхности растворения, *см*².

 $K = f(T, w, S_p, D)$

- Т температура, К;
- *w* скорость обтекания, m/s;
- D коэффициент диффузии кислорода, m/s².



Типы конструкций массообменных аппаратов, устройств для реализации твердофазного метода ввода кислорода в тяжелый теплоноситель











- 1. Растворение оксида свинца в теплоносителе рассматривается как процесс физического растворения твердого тела, при котором критическим является диффузионный отвод кислорода от поверхности растворения через пограничный слой в объем жидкого металла
- 2. За стандартное состояние выбрано состояние насыщения, т.е. состояние в котором достигнута предельная растворимость кислорода в теплоносителе.
- 3. Связь ТДА и концентрации кислорода, растворенного в теплоносителе, выражается соотношением:

$$a_{[O]} = C/C_s$$

где: С – концентрация растворенного кислорода в ТЖМТ;

*C*_s – растворимость кислорода в ТЖМТ.

- 4. Гранулы PbO не изменяют своей формы в процессе растворения.
- 5. В одном отдельном цикле работы МА влияние изменения размера гранул PbO на другие параметры является незначительным и им можно пренебречь.
- 6. Поверхность в каждой точке реакционной емкости МА равнодоступная, т. е. растворение в каждой точке оксида одинаково









(для гранул,

входа в МА)

(для гранул,

расположенных у

расположенных у выхода из МА)



Радиус гранул для массообменных аппаратов с непрерывным расходом теплоносителя





r — средний радиус гранул;

 $\Delta \tau$ – время работы MA;

а_[O] — ТДА кислорода;

*К*_Р — коэффициент скорости растворения;

µ_O ,µ_{PbO} – молярные массы кислорода и оксида свинца, соответственно;







- 1. Расчет термодинамической активности на выходе из МА в исходном состоянии
- 2. Расчет производительности МА в исходном состоянии
- Расчет изменения гранул на входе и на выходе MA за время dτ (шаг по времени)
- 4. Расчет термодинамической активности на выходе из MA через время dτ
- 5. Расчет производительности МА через время dт
- 6. Дальнейшее построение итерационного процесса до достижения значения производительности q < q_{min}

q_{min} – минимальное значения производительности, при достижение которого массообменный аппарат считается выработавшим свой ресурс
Примеры расчета изменения производительности





Пример изменения концентрации кислорода по высоте слоя засыпки

POCATOM

Пример изменения производительности от времени

POCATOM

Характерная зависимость ресурса МА от потребления кислорода контуром







Зависимость ресурса МА от постоянной интенсивности потребления кислорода контуром

Характерное изменение производительности и интенсивности потребления кислорода контуром в режиме эксплуатации

Ресурс массообменного аппарата и скорость изменения его производительности значительно зависят от интенсивности потребления кислорода циркуляционным контуром





- В процессе эксплуатации изменяется производительность массообменного аппарата за счет уменьшения размера гранул твердофазного окислителя.
- 2. Уменьшение размера гранул происходит неравномерно по высоте слоя засыпки: на входе в засыпку скорость уменьшения гранул выше, чем на выходе из нее.
- 3. Критерием окончания эксплуатации массообменного аппарата является минимальное значение производительности, при достижение которого массообменный аппарат считается выработавшим свой ресурс.
- Ресурс массообменного аппарата и скорость изменения его производительности значительно зависят от интенсивности потребления кислорода циркуляционным контуром.
- 5. Созданная расчетная методика позволяет прогнозировать изменение производительности массообменного аппарата в процессе эксплуатации.





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



«Исследование кинетики восстановления оксидов висмута и свинца водородом применительно к технологии ТЖМТ»

Авторы: <u>И.И. Иванов</u>, В.М. Шелеметьев, Р.Ш. Асхадуллин, Д.А. Скобеев *АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск*

E-mail: iivanov@ippe.ru

Информация о кинетике водородного восстановления оксидов свинца и висмута необходима для оптимизации следующих процессов:

-водородная очистка циркуляционных контуров с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями от шлаковых отложений на основе оксидов свинца;

-удаление водорода, оставшегося после проведения водородной регенерации, а также трития из защитного газа первого контура.

Водородная очистка ТЖМТ

В процессе эксплуатации контуров с ТЖМТ за счёт взаимодействия теплоносителя с кислородом воздуха формируются шлаковые отложения, ухудшающие теплообмен и циркуляцию теплоносителя.

Для очистки контуров от шлаковых отложений в поток теплоносителя и защитный газ вводятся пароводородные смеси. Очистка достигается за счёт двух факторов:

- механического (дробящего) воздействия двухфазного потока;
- химического взаимодействия водорода с оксидом свинца, в ходе которого свинец восстанавливается до металла, а образующийся водяной пар сепарируется и конденсируется в холодной зоне газового контура.

Дожигание водорода и трития

Оставшийся после проведения водородной регенерации водород необходимо удалять из газового контура, так же как и представляющий большую опасность тритий.

С этой целью выполняется проектирование специального устройства (дожигателя), основным элементом которого является разогретая камера, наполненная реагентом (оксидом свинца или висмута). При взаимодействии водорода и трития с оксидами образуется вода, конденсирующаяся в холодной зоне газового контура, откуда она дренируется на утилизацию.

Исследуемые реакции:

$Bi_2O_3 + 3H_2 = 2Bi + 3H_2O$	(1)

$$PbO + H_2 = Pb + H_2O \tag{2}$$

Основные характеристики кинетики восстановления:

- Кинетическое уравнение (зависимость степени восстановления или скорости реакции восстановления от времени, при постоянных значениях других параметров);
- Зависимость скорости реакции от температуры;
- Зависимость скорости реакции от парциального давления водорода.



Рис. 1. Схема установки для исследования кинетики восстановления оксидов водородом: 1 - реакционная камера; 2 - хроматограф; 3 - обогреваемая газовая линия; 4 - блок регистрации сигнала; 5 - печь; 6 - лодочка с образцом и термопара; 7 - кварцевый поршень; 8 - баллон с водородом

Метод обработки кинетических кривых аффинным преобразованием по времени



Рис. 2. К пояснению метода аффинного преобразования по времени.

Этот метод состоит в изменении масштаба по оси времени для каждой кинетической кривой с целью совмещения всех кинетических кривых. Для каждой кривой k при фиксированном значении степени восстановления а, может быть рассчитан коэффициент аффинного преобразования $f_{i,k}$. Более правильно использовать среднее значение коэффициента f для данной кривой, что и было сделано в этой работе. Величина f прямо пропорциональна удельной скорости реакции. 7

Кинетика восстановления оксида висмута водородом

$$\alpha(t) = 100 \cdot \frac{m_{Me_x O_y}(t)}{m_{Me_x O_y}^0} \tag{1}$$

$$\alpha(t) = 100 \cdot (1 - \exp[-k \cdot t]) \tag{2}$$

$$k = f(T, c_{H_2}) \tag{3}$$

Величина *k* прямо пропорциональна удельной скорости реакции, равной общей скорости реакции, делённой на площадь свободной поверхности образца.



Рис. 3. Зависимости степени восстановления висмута от времени, полученные при температурах восстановления 425, 450, 475 и 500 °C и совмещённые аффинным преобразованием по времени. Сплошная линия – аппроксимация полученных зависимостей экспоненциальной функцией.

Кинетика восстановления оксида висмута водородом

$$k = b \cdot \exp\left(\frac{-92800}{R \cdot T}\right) \tag{4}$$

$$b = f(c_{H_2}) \tag{5}$$



Рис. 4. Зависимость ln(*k*) от 1/*RT* для восстановления порошка оксида висмута водородом. *Т* - в кельвинах

Кинетика восстановления оксида висмута водородом



Рис. 5. Зависимость коэффициента аффинного преобразования *k* от объёмной концентрации водорода (в %) при температуре восстановления оксида висмута 500 °C

(6)

Кинетика восстановления оксида свинца водородом

Рис. 6. Зависимость скорости образования воды при восстановлении свинца из его оксида ромбической модификации от степени восстановления при 500 °C

Кинетика восстановления оксида свинца водородом



Рис. 7. Зависимость ln(*f*) от 1/*RT* для восстановления порошка оксида свинца водородом. *T* – в кельвинах

Основные особенности водородного восстановления оксидов свинца и висмута

Обобщённое кинетическое уравнение имеет следующий вид:

$$\alpha(t,T,c_{H_2}) = 100 \cdot (1 - \exp\left[-d \cdot c_{H_2} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R \cdot T}\right] \cdot t\right]),$$

где *d* — постоянная для данного образца оксида величина, зависящая от его удельной поверхности и дефектности структуры, *E_a* — энергия активации, равная 92,8 кДж/моль для оксида висмута и 97,2кДж/моль — для оксида свинца. Эти данные позволяют сформулировать следующие рекомендации по проведению процессов восстановления:

— Восстановление оксидов свинца и висмута водородом целесообразно вести при температуре, близкой к максимально допустимой для конкретной технологической операции (например, при водородной регенерации жидкометаллического контура температура восстановления лимитируется коррозионной стойкостью стали, а при водородной регенерации оксидного компонента электрода сравнения датчика кислорода – температура размягчения ситалла (700 °C), используемого для герметичного соединения твёрдоэлектролитной керамики с корпусом датчика кислорода).

 – Для регенерации нужно использовать газовую смесь с максимально допустимой концентрацией водорода.

Влияние конструктивного исполнения электрода сравнения

на метрологические характеристики твердоэлектролитного датчика кислорода

Шелеметьев Василий Михайлович. АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Телефон: 8 (48439) 9-42-77. Эл. почта: shelemetev@ippe.ru



Высокотемпературные датчики контроля кислорода и водорода в газовых и жидких средах



1

Конструкция и принцип действия твердоэлектролитного датчика кислорода в газах и ТЖМТ



1 – керамический чувствительный элемент; 2 – корпус, ферритно-мартенситная сталь; 3 – электрод сравнения, металл (Bi); 4 – источник кислорода для электрода сравнения, оксид металла (Bi₂O₃);
5 – высокотемпературный герметик; 6 – герметизирующая пробка; 7 – измерительный электрод;
8 – потенциалосъемный вывод



*PO*_{2 сравн}, *PO*₂ – парциальное давление кислорода в электроде сравнения и анализируемой среде соответственно

Сравнительные характеристики твердоэлектролитных датчиков кислорода в газах и ТЖМТ с электродом сравнения Bi-Bi₂O₃ и In-In₂O₃ с молибденовыми потенциалосъемниками

Опыт эксплуатации датчиков с электродом сравнения Bi-Bi₂O₃ и In-In₂O₃ с молибденовыми потенциалосъемниками продемонстрировал существенные отличия метрологических характеристик датчиков:

- Более выраженный (в несколько раз) дрейф показаний у датчика с электродом сравнения Bi-Bi₂O₃;
- Более выраженная поляризуемость электрода сравнения в случае использования системы Bi-Bi₂O₃;
- Резкая смена уровня сигнала, при неизменных параметрах анализируемой среды (состав, температура, давление), например при вибрационном воздействии;
- Несовпадение экспериментально определяемой разницы показаний датчиков с теоретическим значением, определяемым из термодинамического расчета, на величину до нескольких десятков мВ.

В ходе исследований выдвинуто предположение, что причиной вышеперечисленных эффектов является окисление Мо потенциалосъемника при взаимодействии с насыщенным по кислороду Bi.

Термодинамика системы $In-In_2O_3 - Mo u Bi-Bi_2O_3 - Mo$

В рамках теоретического обоснования предположения, рассмотрена возможности окисления Мо оксидом In до низшего оксида *MoO*₂ по реакции:

 $2In_2O_3 + 3Mo = 3MoO_2 + 2In$

и окисления Мо оксидом Ві до высшего оксида *МоО*₂ по реакции:

 $Bi_2O_3 + Mo = MoO_3 + 2Bi$

Результаты термодинамического расчета приведены в таблице:

Температура, °С	∆G _{In₂O3} , Дж/моль	∆ <i>G_{MoO2},</i> Дж/моль	ΔG ₍₂₎ , Дж/моль	∆ <i>G_{Bi₂O3},</i> Дж/моль	∆ <i>G_{MoO3},</i> Дж/моль	ΔG ₍₃₎ , Дж/моль
400	-702484	-459947	25126	-392849	-583683	-190834
500	-671735	-443327	13488	-363614	-559092	-195478
530	-662511	-438341	9997	-354843	-551714	-196871

Из таблицы видно что реакция окисления Мо оксидом In не происходит самопроизвольно, следовательно, на поверхности Мо не образуется слой оксида.

В противоположность этому, Мо окисляется оксидом Ві до высшего оксида МоО₃. Это означает возможность формирования оксидов молибдена с низшей валентностью, а также смешанных оксидов молибдена и висмута.

Состав оксидной пленки на границе раздела Bi-Bi₂O₃ - Мо

Обширное исследование [1], посвящённое изучению фазового состава системы Ві-Мо-О, выявило при температуре 500 °С (выдержка образцов 960 часов) существование четырёх различных оксидов, содержащих молибден: MoO₂, Bi₂MoO₆, Bi₂Mo₃O₁₂. Также, согласно фазовой диаграмме Bi₂O₃ -MoO₃ [2] существуют оксиды Bi₆Mo₂O₁₅, Bi₆MoO₁₂ и Bi₁₄MoO₂₄.

Другие смешанные оксиды Мо и Ві, могущие входить в состав оксидной пленки на границе раздела Ві-Мо, могут быть также определены из фазовой диаграммы системы МоО₃-Ві₂О_{3.}



- Aiswarya P.M., Ganesan R., Rajamadhavan R., Gnanasekaran T. Partial phase diagram of MoO₃ rich section of the ternary Bi-Mo-O system // Journal of Alloys and Compounds, 2018. Vol. 745. P. 744-752.
- 2. Egashira M., Matsuo K., Kagawa S., Seiyama T. // Journal of catalysis, 1979. Vol. 58. P. 409-418.

Экспериментальное обоснование влияние оксидного слоя на поверхности Мо потенциалосъемника на метрологические характеристики датчика

Изготовлен датчик с электродом сравнения Ві-Ві₂О₃ и двумя потенциалосъемниками: Bi₂O₃ и Мо. Результаты приведены на рисунке. Видна четкая разница показаний, полученных с разных потенциалосъемников: выраженный дрейф показаний, скачки ЭДС, существенное расхождение показаний (до нескольких десятков мВ) в случае Мо потенциалосъемника. Аналогичная разница проявлялись в случае системы In-In₂O₃-Mo.



Основные причины нестабильности показаний датчика на основе системы Bi-Bi₂O₃-Mo

- Частично ионная проводимость оксидного слоя на Мо, вносящая дополнительный вклад в общую величину ЭДС датчика;
- Изменение фазового состава оксидного слоя во времени, приводящее к изменению величины вклада в ЭДС датчика и, как следствие, к дрейфу сигнала датчика;
- Периодическое отслаивание растущего оксидного слоя (в частности, в результате механического воздействия на датчик), приводящее к резкому изменению ЭДС датчика;

Экспериментальное обоснование влияние оксидного слоя на поверхности W потенциалосъемника на метрологические характеристики датчика

Аналогичная нестабильность показаний получена с помощью датчика основе системы Bi—Bi₂O₃ – W.

По литературным данным, вольфрам часто используется в качестве потенциалосъемника датчиков с электродом сравнения Bi–Bi₂O₃.

Изменение ЭДС и внутреннего сопротивления

твердоэлектролитного датчика кислорода в газах с электродом сравнения Bi/Bi₂O₃ и вольфрамовым потенциалосъёмником при кратковременном вибрационном воздействии. Высоты пиков прямо пропорциональны величине внутреннего сопротивления датчика.



Термодинамика системы Bi-Bi₂O₃

Для успешной интерпретации показаний датчика важно знать температурную зависимость стандартной энергии Гиббса реакции (реакции образования α-Bi₂O₃):

$$4Bi + 3O_2 = 2Bi_2O_3.$$

Эта зависимость была получена ранее в ряде работ методом измерения ЭДС с применением твёрдого электролита на основе диоксида циркония, однако во всех случаях для измерения ЭДС в жидкий висмут погружали потенциалосъёмники из материалов, о химическом взаимодействии которых с висмутом и его оксидом нет точных данных. Поэтому было осуществлено определение зависимости стандартной энергии Гиббса реакции от температуры с применением электрохимической ячейки, конструктивно исполненной как обычный твердоэлектролитный датчик кислорода в газе на основе системы $Bi-Bi_2O_3$ с потенциалосъемником из Bi_2O_3 .

Зависимость ЭДС датчика на основе системы Bi-Bi₂O₃ с потенциалосъемником из Bi₂O₃ от температуры

Термодинамика системы Bi-Bi₂O₃

Результирующее выражение для зависимости стандартной энергии Гиббса (кДж/моль) реакции от температуры:

$$\Delta G^0_{Bi_2O_3} = -584.032 \pm 0.426 + (0.2961 \pm 0.006) \cdot T$$

Температурная зависимость стандартной энергии Гиббса (кДж/моль) образования α- Bi₂O₃ по данным разных авторов:

Источник	Уравнение зависимости	Температурный интервал, К
Jacob et al. 2016	−584.235 + 0.28928·T	800-1002
Aspiala et al. 2014	−591.511 + 0.2934·T	572–988
Ganesan et al. 2003	-583.40 + 0.2938·T	572–988
Kulicov, 1986	-591.885+0.29259·T	544.5-1090
Schaefer et al. 1984	−581.994 + 0.2928·T	740–976
Fitzner et al. 1980	−605.283 + 0.31442·T	951–997
Ramana Rao et al. 1979	-629.608 + 0.3345·T	773–978
Isecke et al. 1979	−583.592 + 0.2939·T	823–980
Mehrotra et al. 1976	−600.900 + 0.3152·T	885–991

Полученное выражение с хорошей точностью коррелирует с данными, полученными в последнее время.

Термодинамика системы Bi-Bi₂O₃

По результатам анализа условий эксперимента сделан вывод: Δ*G*⁰_{*Bi*₂*O*₃} = −584.032 ± 0.426 + (0.2961 ± 0,006) · *T* Температурная зависимость стандартной энергии Гиббса (кДж/моль) образования α- Bi₂O₃ по данным разных авторов:

Источник	Уравнение зависимости	Температурный интервал, К	Используемая керамика	Состав электрода сравнения	Потенциалосъёмник, контактирующий с жидким висмутом
Jacob et al. 2016	-584.235 + 0.28928·T	800–1002	$ZrO_2-Y_2O_3$	Pt, O ₂	Os
Aspiala et al. 2014	−591.511 + 0.2934·T	572–988	$ZrO_2-Y_2O_3$	Pt, O ₂	Cr ₂ O ₃
Ganesan et al. 2003	-583.40 + 0.2938∙T	572–988	ZrO ₂ -CaO	Pt, O ₂	W
Kulicov , 1986	-591.885+0.29259T	544.5-1090	?	?	?
Schaefer et al. 1984	-581.994 + 0.2928T	740–976	ZrO ₂ -CaO	Cu, Cu₂O	W
Fitzner et al. 1980	-605.283 + 0.31442T	951–997	?	Ni, NiO	?
Ramana Rao et al. 1979	-629.608 + 0.3345·T	773–978		Fe, FeO	?
Isecke et al. 1979	-583.592 + 0.2939T	823–980	ZrO ₂ -CaO	Рt, воздух	?
Mehrotra et al. 1976	-600.900 + 0.3152T	885–991	?	?	?

Полученное выражение с хорошей точностью коррелирует с данными, полученными в последнее время.

Исходя из имеющихся данных можно сделать вывод, что наилучшая сходимость имеет место в работах, где в качестве электрода сравнения использовалась система Pt, O₂ и Pt, воздух, как и в текущей работе, поскольку в этом случае погрешность, связанная с неточностью измерения температуры, — минимальна.

Между материалом потенциалосъемника и сходимостью данных разных авторов не выявлено однозначной связи, возможно из-за малой длительности времени экспериментов, за которое поверхности потенциалосъемников не успели окислиться.

Термодинамика системы Pb-PbO

Также была определена энергия Гиббса для реакции образования оксида свинца:

 $Pb + 0.5O_2 = PbO.$

Для эксперимента использовался датчик на основе системы Pb-PbO с потенциалосъемником на основе PbO.

Полученное уравнение имеет следующий вид:

 $\Delta G_{PbO}^0 = -218434 \pm 439 + (98,8 \pm 0,6) \cdot T$

Уравнение хорошо согласуется с данными других авторов.

Зависимость ЭДС датчика на основе системы Pb-PbO с потенциалосъемником на основе PbO от температуры

Выводы

- В результате проведенных исследований доказано, что оксидный слой на поверхности молибденового потенцисъёмника электрода сравнения Bi/Bi₂O₃ существенно ухудшает метрологические характеристики датчика (вызывает дрейф сигнала, резкую смену показаний, особенно при механическом воздействии на датчик – удары, вибрация, и усиливает поляризуемость электрода сравнения).
- Вышеперечисленные негативные эффекты исчезают при использовании в качестве электрода сравнения системы In-In₂O₃ или Bi-Fe-Fe₃O₄, поскольку молибден не окисляется в данных условиях. Другой вариант устранения проблемы использование оксидного потенциалосъемника: PbO в случае системы Pb-PbO, Bi₂O₃ в случае системы Bi-Bi₂O₃. Результаты совместных испытаний твердоэлектролитных датчиков кислорода в газе с молибденовым потенциалосъемником и потенциалосъемником из Bi₂O₃ в случае системы Bi-Bi₂O₃ в качестве электрода сравнения подтвердили выводы на практике.
- С применением датчиков кислорода в газах с электродами сравнения Bi/Bi₂O₃ (потенциалосъёмник из Bi₂O₃) и Pb/PbO (потенциалосъёмник из PbO) были получены зависимости величин энергии Гиббса образования оксидов висмута и свинца от температуры (для интервала температуры 698-803 К).
- Полученные зависимости с высокой точностью коррелируют с данными полученными зарубежными и отечественными авторами.



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES URAL BRANCH INSTITUTE OF HIGH TEMPERATURE ELECTROCHEMISTRY

РАВНОВЕСНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ОКСИДА СВИНЦА(II) В ЭКВИМОЛЬНОМ РАСПЛАВЕ КС1-РЬС12

<u>Першин П. С.</u>, Батухтин В. П., Ткачева О. Ю., Архипов П. А., Зайков Ю. П.

Екатеринбург 2018

<u>Цель работы:</u>

Определение активности и коэффициентов активности PbO в эквимолярной смеси хлоридов калия и свинца в зависимости от температуры и концентрации оксида.

Расчет парциальных и интегральных термодинамических функций растворения PbO в расплаве KCl-PbCl₂.

<u>Гальванический элемент для измерения ЭДС:</u> -(СУ)Pb|(1-N)·KCl-PbCl₂+N·PbO|ZrO₂(Y₂O₃)|O₂(1атм)(Pt) +

Интервал температур: 738-863 К

Мольно-долевые концентрации PbO: от 0,0016 до 0,0732.

Процессы в гальваническом элементе: на свинцовом электроде: $Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2\bar{e},$ на кислородном электроде: $0,5O_2 + 2\bar{e} \rightarrow O^{2-}.$

<u>Потенциалопределяющая реакция:</u> Pb + $0,5O_2 \rightarrow PbO_{p-p}$ в (KCl-PbCl₂)

<u>Схема ячейки:</u>



- 1 трубка подачи Ar
- 2 фторопластовая крышка
- 3 алундовая трубка (экран)
- 4 кислородный электрод
- 5 термопара ППр
- 6 Pt-наконечник
- 7 СУ токоподвод
- 8 Pb(ж)
- 9 отверстия в крышке
- 10 электролит KCl-PbCl₂-PbO
- 11 тигель из ВеО
- 12 огнеупорная подставка

Мол.% РЬО 0,16 0,38 0,76 1,56 3,06 5,24 7,32



Экспериментальные значения ЭДС Е эксп

$$\varepsilon_{3\kappa c \Pi} = \varepsilon_{T \exists JC} + \varepsilon_{PbO \ m}^{0} - \frac{RT}{2F} \ln a_{PbO}$$



Теоретическое напряжение разложения PbO: $\Delta_{f}G^{0}{}_{PbO(m)} = -185497 + 69,26 \cdot T, Дж \cdot моль^{-1} (1159 - 1775 K),$ $\Delta_{f}G^{0}{}_{PbO(m)} = -2F\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)}$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T, B$ $\varepsilon^{0}{}_{PbO(m)} = 0,9612 - 0,359 \cdot 10^{-3} \cdot T,$

0,648

874
$$\varepsilon = -\frac{RT}{2F} \ln a_{PbO} = \varepsilon_{3\kappa c \pi} - \varepsilon_{T 3 J C} - \varepsilon_{PbO *}^{0}$$

Величины экспериментально измеренных ЭДС (Е эксп) и величины ЭДС (Е) для расчета активности

	776 K		821 K		874 K	
N _{PbO} ·10 ²	<i>Е</i> _{эксп} , В	<i>ε</i> , В	<i>ɛ</i> _{эксп} , В	<i>ɛ</i> , В	<i>ɛ</i> _{эксп} , В	<i>ɛ</i> , В
0,16	0,942±0,003	0,254	0,932±0,004	0,259	0,922±0,001	0,267
0,39	0,911±0,003	0,223	0,900±0,005	0,227	0,888±0,001	0,233
0,78	0,888±0,001	0,200	$0,875\pm0,005$	0,202	0,862±0,002	0,207
1,56	0,866±0,001	0,178	0,851±0,002	0,178	0,837±0,001	0,182
3,06	0,843±0,002	0,155	0,827±0,002	0,154	0,811±0,002	0,156
5,24	0,825±0,003	0,137	0,808±0,001	0,135	0,791±0,001	0,136
7,32	0,814±0,002	0,126	0,796±0,001	0,123	0,779±0,001	0,124

Формулы расчета термодинамических величин

$$a_{PbO} = exp\left[\frac{-2F\varepsilon}{RT}\right]$$

$$\Delta \overline{G}_{PbO_{p-p}} = RT \ln a_{PbO_{p-p}}$$

$$\gamma_{PbO} = a_{PbO} \cdot N_{PbO}^{-1}$$

$$\Delta G_{PbO}^{u36} = RT \ln \gamma_{PbO}$$

Значения ЭДС Е и рассчитанные из нее значения активностей и коэффициентов активности PbO в растворе KCl-PbCl₂ при 776К

N _{PbO} ·10 ²	ε,B	$a_{\rm PbO}$. 10 ²	Ŷрьо	$\Delta \overline{G}_{PbO},$ кДж/моль
0,16	$0,254 \pm 0,003$	$0,05 \pm 0,01$	$0,317 \pm 0,020$	$-48,96 \pm 0,02$
0,39	$0,223 \pm 0,003$	$0,13 \pm 0,01$	$0,328 \pm 0,020$	$-42,97 \pm 0,08$
0,76	$0,200 \pm 0,001$	$0,25 \pm 0,01$	$0,326 \pm 0,012$	$-38,54 \pm 0,07$
1,56	$0,178 \pm 0,001$	$0,\!49 \pm 0,\!02$	$0,315 \pm 0,023$	$-34,29 \pm 0,10$
3,06	$0,155 \pm 0,002$	$0,\!98 \pm 0,\!01$	$0,320 \pm 0,012$	$-29,85 \pm 0,03$
5,24	$0,137 \pm 0,003$	$1,68 \pm 0,03$	$0,320 \pm 0,003$	$-26,38 \pm 0,03$
7,32	$0,126 \pm 0,002$	$2,33 \pm 0,03$	$0,318 \pm 0,007$	$-24,26 \pm 0,06$

Значения ЭДС Е и рассчитанные из нее значения активностей и коэффициентов активности PbO в растворе KCl-PbCl₂ при 821 К

N _{PbO} ·10 ²	arepsilon , B	$a_{\rm PbO}$. 10 ²	γ _{PbO}	$\Delta ar{G}_{PbO},$ кДж/моль
0,16	$0,259 \pm 0,004$	$0,07 \pm 0,01$	0,413 ± 0,016	$-49,98 \pm 0,46$
0,39	$0,227 \pm 0,005$	0,16 ± 0,01	0,419 ± 0,016	$-43,81 \pm 0,01$
0,76	$0,202 \pm 0,005$	$0,33 \pm 0,01$	$0,424 \pm 0,010$	$-38,98 \pm 0,11$
1,56	$0,178 \pm 0,002$	$0,65 \pm 0,01$	$0,418 \pm 0,021$	$-34,35 \pm 0,06$
3,06	$0,154 \pm 0,002$	$1,29 \pm 0,01$	$0,420 \pm 0,012$	$-29,72 \pm 0,05$
5,24	$0,135 \pm 0,001$	$2,20 \pm 0,01$	$0,420 \pm 0,003$	$-26,05 \pm 0,04$
7,32	$0,123 \pm 0,001$	$3,09 \pm 0,01$	$0,422 \pm 0,003$	$-23,74 \pm 0,07$

Значения ЭДС Е и рассчитанные из нее значения активностей и коэффициентов активности PbO в растворе KCl-PbCl₂ при 863 К

N _{PbO} ·10 ²	ε,B	$a_{\rm PbO}$. 10 ²	Ύрьо	$\Delta \overline{G}_{PbO},$ кДж/моль
0,16	$0,267 \pm 0,001$	$0,08 \pm 0,01$	$0,518 \pm 0,019$	$-51,56 \pm 0,21$
0,39	$0,233 \pm 0,001$	$0,20 \pm 0,03$	$0,524 \pm 0,063$	$-45,00 \pm 0,10$
0,76	$0,207 \pm 0,002$	$0,41 \pm 0,02$	$0,523 \pm 0,028$	$-39,98 \pm 0,39$
1,56	$0,182 \pm 0,001$	$0,79 \pm 0,06$	$0,508 \pm 0,056$	$-35,16 \pm 0,04$
3,06	$0,156 \pm 0,002$	$1,58 \pm 0,07$	$0,516 \pm 0,035$	$-30,14 \pm 0,04$
5,24	$0,136 \pm 0,001$	$2,69 \pm 0,13$	$0,513 \pm 0,023$	$-26,28 \pm 0,01$
7,32	$0,124 \pm 0,001$	3,69 ± 0,12	$0,505 \pm 0,017$	$-23,97 \pm 0,09$



Зависимость активности РЬО от состава раствора и температуры

Т, К	776	821	874
γ _{PbO}	0,321	0,419	0,515
$\Delta \overline{G}_{PbO}^{u_{36}}$ кДж/моль	-7,34	-5,60	-4,82

Парциальные молярные энтропии и энтальпии PbO в растворе:

N _{PbO} ·10 ²	$\Delta \overline{S}_{PbO}$	$\Delta \overline{H}_{PbO}$		
0,16	-26,68	-28,19		
0,39	-20,73	-26,85		
0,76	-14,89	-26,90		
1,56	-9,05	-27,15		
3,06	-3,10	-27,35		
5,24	0,83	-26,92		
7,32	2,74	-26,24		



 $\Delta \overline{S}_{PbO}$ от концентрации PbO в растворе

$$a_{\rm R} = N_{\rm R} \quad \Delta \overline{G}_{\rm R} = {\rm RT} \cdot {\rm ln} N_{\rm R}$$
$$\Delta G = N_{PbO} \cdot \Delta \overline{G}_{PbO} + (1 - N_{PbO}) \cdot \Delta \overline{G}_{\rm R}$$

Величины интегральной энергии Гиббса (-∆G, кДж/моль раствора) для разбавленного раствора

T II	Мол.% РbО в растворе						
1, K	0,16	0,38	0,76	1,56	3,06	5,24	7,32
776	0,089	0,193	0,351	0,635	1,108	1,711	2,230
874	0,094	0,204	0,368	0,661	1,141	1,748	2,266

Парциальные энтропии и энтальпии растворителя (KCl-PbCl₂)=R и интегральные энтропии и энтальпии раствора (KCl-PbCl₂)+ PbO: $\Delta H, \Delta \overline{H}_R$ в Дж/моль и $\Delta S, \Delta \overline{S}_R$ в Дж/моль К

			-				
$N_R \cdot 10^2$	99,84	99,62	99,24	98,44	96,94	94,76	92,68
$\Delta \overline{S}_{R}$	0,0133	0,0325	0,0651	0,1307	0,2584	0,4475	0,6320
$\Delta \overline{H}_{R}$	0,022						
ΔS	-0,029	-0,048	-0,052	-0,013	0,156	0,468	0,786
ΔH	-45	-105	-210	-423	-837	-1411	-1921



2Pb²⁺ + O²⁻+ Cl⁻ - Pb²OCl⁺

Flengas S.N., Hacetoglu A. Thermodynamic behavior of molten metal oxychlorides: the PbO-PbCl₂ system. *Can. J. Chem.* 1990, v. 68, p. 236-242.



Dracopoulos V., Kastrissios D.Th., Papatheodorou G.N. Raman spectra and structure of PbCl2–ACl (A = K, Cs) melts. *Polyhedron*, 24 (2005) p. 619–625.

По нашему мнению, растворение оксида свинца в хлоридном расплаве можно представить гипотетической реакцией:

 $2K^{+} + [Pb_{2}Cl_{6}]^{2-} + 2PbO \leftrightarrow \{K^{+}[Cl_{3}Pb-O-PbCl_{3}]K^{+}\}^{2-} + [Pb-O-Pb]^{2+}$



Концентрация кислорода в свинце в течение 20 ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Методом ЭДС измерены равновесные потенциалы свинца в расплаве (KCl-PbCl₂)+PbO в зависимости от концентрации PbO при температурах 776, 821 и 874 К относительно твердоэлектролитного кислородного электрода сравнения.

Из величин ЭДС рассчитаны активности, коэффициенты активности и парциальные и интегральные термодинамические функции компонентов раствора (KCl-PbCl₂)+PbO.

Установлены умеренные отрицательные отклонения активности PbO в разбавленных растворах KCl-PbCl₂ от законов идеальных растворов.

Получены значения по растворимости кислорода в жидкометаллическом свинце при температуре 540 °С – максимальное значение концентрации составило 0,039 мас. %

Спасибо за внимание!



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Особенности гидродинамики проточных частей различных типов коллекторных систем ядерных энергетических установок



АО «ГНЦ РФ – ФЭИ имени А. И. Лейпунского»

Дельнов В.Н.

09-11.10.2018



Цель работы – выявление неизвестных ранее особенностей гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС ЯЭУ с различными условиями подвода и отвода теплоносителя.

Принципиальные схемы характерных вариантов РКС





Конструкции характерных вариантов РКС:

а и б – РКС цилиндрического и плоского типов с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя, соответственно; в и г – РКС цилиндрического и плоского типов с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя, соответственно; 1 – боковой входной канал; 2 – боковой канал; 3 – боковой кольцевой канал; 4 – выходная камера; 5 – выходной канал; 6 – диафрагма; 7 – дистанционирующая вставка; 8 – днище; 9 – канал системы пластин; 10 – коллектор; 11 – корпус; 12 – обечайка; 13 – обтекатель; 14 – пластины решетки; 15 – решетка; 16 – распределитель; 17 – система пластин; 18 – стенка выходного канала; 19 – ступень; 20 – торцевая часть стенки выходного канала; 21 – трубка; 22 – трубная доска; 23 – трубный пучок; 24 – центральная труба; 25 – центральный канал.



На гидродинамику проточных частей различных типов РКС влияют гидродинамические и конструктивные характеристики.

1. Гидродинамические характеристики:

- массовый расход и средняя скорость теплоносителя в отверстиях выходного элемента;

- коэффициенты гидравлического сопротивления элементов проточных частей РКС;

- плотность теплоносителя;

- режим течения теплоносителя.



2.1. Конструктивные характеристики проточной части РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя: радиусы нижней и верхней частей корпуса; внутренний и наружный радиусы центральной трубы, высота коллектора и высота входа в него, расстояние от днища до ступени на корпусе, радиус верхней части корпуса, радиусы нижнего и верхнего оснований распределителя, выполненного в виде усеченного конуса, положение распределительных решеток относительно торцевой части центральной трубы и относительно друг друга (при наличии двух и более решеток) (рис. а).

2.2. Конструктивные характеристики проточной части РКС плоского типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя: ширина нижней и верхней части корпуса (при наличии ступени на корпусе); наружная и внутренняя ширина центрального канала, высота коллектора и высота входа в него, расстояние от днища до ступени на корпусе (рис. б).



2.3. Конструктивные характеристики РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя без дистанционирующей вставки: максимальный радиус перфорированной части решетки, высота коллектора и высота входа в него, число отверстий в решетке и их радиус, максимальный радиус перфорированной части решетки, внутренний и наружные радиусы цилиндрической обечайки и внутренний радиус корпуса.

Для подобной РКС при наличии дистанционирующей цилиндрической вставки в коллекторе кроме перечисленных ранее факторов существенную роль играют дополнительные факторы: минимальный радиус перфорированной части решетки, радиус цилиндрической вставки. (рис. в).

2.4. Конструктивные характеристики проточной части РКС плоского типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя без дистанционирующей вставки: максимальный радиус перфорированной части решетки, высота коллектора и высота входа в него, число отверстий в решетке и их радиус, максимальный радиус перфорированной части решетки, внутренний и наружный радиусы цилиндрической обечайки и внутренний радиус корпуса (рис. г). Результаты исследования характера течения в проточной части РКС плоского типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя при Re=3,26·10⁴⁻⁻4,62·10⁴





 \widetilde{H} и \widetilde{h} - высота коллектора и высота входа в него; \widetilde{a} - вылет центрального канала ;

 $arphi_p$ — - угол одностороннего раскрытия распределителя

Типичные конструкции и схемы течения в проточных частях осесимметричных РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя





а и б – сверхзатеснённые РКС без вылета центральной трубы из трубной доски при отсутствии и наличии распределителя, соответственно; в – затесненная РКС без вылета центральной трубы из трубной доски и с затеснённым входным участком коллектора; г – затеснённая РКС при наличии распределителя и вылета центральной трубы из трубной доски; ∂ и е – затеснённые РКС с распределителем, вылетом центральной трубы из трубной доски и затесненными выходной частью и входным участком коллектора, соответственно;

1 – центральная труба; 2 – трубная доска; 3 – трубка пучка; 4 – корпус; 5 – ступень; 6 – днище; 7 – коллектор; 8 – боковой кольцевой канал, 9 – распределитель

Особенности течения во входной части РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя



Круглая затопленная струя из центральной трубы попадает на центральные части днища или застойной зоны соответственно в затеснённой и свободной РКС со свободным входным участком коллектора.

В коллекторе с затесненным входным участком (F₀/F₁ ≥ 1) происходит поджатие теплоносителя, сопровождающееся увеличением ее скорости.

В коллекторе со свободным входным участком (F_O/F₁<1) площадь f₁ примерно равна максимальной площади поперечного сечения круглой затопленной струи во входной части коллектора.

В коллекторе с затеснённым входным участком площадь f₁ примерно равна (0,7 – 0,8) F₁, где f₁ - площадь поперечного сечения струи

Особенности течения в основной части РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя



В свободной или затеснённой РКС со свободным входным участком коллектора образовавшаяся при повороте цилиндрическая (усечённая коническая) полузатопленная струя движется в направлении корпуса соответственно вдоль средних частей днища и застойной зоны.

В затесненной РКС с затеснённым входным участком коллектора полузатопленная цилиндрическая (усеченная коническая) струя движется в направлении корпуса вдоль средней части днища.

В свободной РКС с а ≥ 0 и свободным входным участком коллектора установка на днище (в застойной зоне) распределителя, имеющего относительно малую высоту h₁ по сравнению с высотой h, практически не оказывает влияния на профиль расхода на выходе из коллектора.

Особенности течения в основной части РКС цилиндрического типа с центральным подводом и боковым отводом теплоносителя



В основной части коллектора при вылете **a** \geq **0** и различных отношениях F_0/F_1 течение имеет вид кольцевой полузатопленной струи на стенке корпуса и внутренней поверхности боковой стенки распределителя, параллельной продольной оси симметрии, кольцевых затопленных струй после выхода из распределителя и ступени в месте стыка торцевых частей днища эллиптического радиального профиля и корпуса, цилиндрической и усечённой конической полузатопленных струй соответственно вдоль днища плоской и эллиптической форм.

Во входной части кольцевого канала при а > 0 в направлении трубной доски имеют место три варианта течения:

- течение кольцевой затопленной струи;

- движение теплоносителя с одновременным касанием внутренней и наружной боковых поверхностей соответственно корпуса и центральной трубы;

- течение кольцевой полузатопленной струи вдоль внутренней или наружной боковых поверхностей соответственно корпуса или центральной трубы.



В результате обратного пространственного поворота осесимметричная круглая затопленная струя в нижней и верхней частях распределителя преобразуется соответственно в полузатопленную и затопленную струи. Первая из них располагается на внутренней поверхности боковой стенки распределителя, а вторая – в его верхней части.

При взаимодействии затопленной струи с верхней частью распределителя происходит отклонение направления ее движения относительно боковой стенки распределителя в сторону периферии.

При **a** >0 во входной части кольцевого канала имеет место течение кольцевой затопленной струи, движение потока с касанием внутренней и наружной боковых поверхностей корпуса и центральной трубы, течение кольцевой полузатопленной струи вдоль внутренней или наружной боковых поверхностей соответственно корпуса или центральной трубы.

В РКС течение теплоносителя характеризуется наличием застойных и (или) вихревых зон, а также изменением профиля скорости в струях.



Места встречи теплоносителя с трубной доской:

кольцевые затопленная или полузатопленная струи попадают под прямым углом на периферийную и (или) среднюю части трубной доски.

Особенности выхода теплоносителя из коллектора:

- выход теплоносителя через периферийную часть трубной доски при движении цилиндрической полузатопленной струи вдоль ее средней и (или) центральной частей с раздачей расхода по пути;

- выход теплоносителя через центральную часть трубной доски при движении цилиндрической полузатопленной струи вдоль ее средней и (или) периферийной части с раздачей расхода по пути;

- выход теплоносителя через среднюю часть трубной доски сочетается с движением цилиндрических полузатопленных струй с изменением расхода по пути вдоль ее периферийной и центральной частей.

Результаты исследования гидродинамики проточной части РКС с боковым подводом и центральным отводом



- $\widetilde{\mu}_{\mathbf{u}} = \widetilde{h}_{\mathbf{h}}$ относительные высота коллектора и входа в него;
- arphi угол среза торцевой части боковой стенки; $\,\widetilde{\delta}_{_{1}}\,$ толщина боковой стенки;
- \widetilde{a} относительное смещение решетки от торцевой части боковой стенки;

Типичные конструкции и схемы течения в проточных частях осесимметричных РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя





а, б – затеснённая РКС со смещенной решеткой и со свободным и затесненным входными участками коллектора, соответственно; в, г – затесненные РКС со смещённой решеткой, при наличии вставки, затеснённым входным участком коллектора и затеснённой и свободной входными частями, соответственно при затеснённом и свободной входными частями, соответственно при затеснённом и свободном выходе теплоносителя в коллектор; д, е – сверхзатеснённые РКС соответственно при наличии и отсутствии вставки: 1 – кольцевой канал; 2 – коллектор; 3 – центральная обечайка; 4 – решетка; 5 – днище; 6 – вставка; 7 – корпус



В затесненной или свободной РКС при а ≥ 0 и свободном входном участке коллектора (F₀/F₁<1) затопленная струя попадает на периферийные части соответственно днища и застойной зоны.

В затесненной входном участке коллектора (F₀/F₁ ≥ 1) происходит поджатие теплоносителя, сопровождающееся увеличением ее скорости.

В коллекторе со свободным входным участком площадь f₁ примерно равна максимальной площади поперечного сечения полузатопленной кольцевой струи на стенке корпуса во входной части коллектора.

В коллекторе с затеснённым входным участком площадь f₁ примерно равна (0,7 – 0,8) F₁, где f₁ - площадь поперечного сечения струи.

Особенности течения в основной части РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя



В свободной или затеснённой РКС с коллектором со свободным входным участком образовавшаяся в результате поворота цилиндрическая (усечённая коническая) полузатопленная или затопленная струи движутся в направлении центра коллектора соответственно вдоль средних частей днища и застойной зоны.

В затесненной РКС с затеснённым входным участком коллектора образовавшаяся в результате поворота полузатопленная цилиндрическая (усеченная коническая) струя движется в направлении центра коллектора вдоль средней части днища.

В РКС при а ≥ 0 цилиндрическая (усечённая коническая) полузатопленная и затопленные струи в результате поворота в основной части коллектора преобразуются в центре коллектора в круглую затопленную струю, движущуюся в направлении решетки.

При **a** > 0 во входной части центральной обечайки возможно течение круглой затопленной струи, движение теплоносителя с касанием внутренней поверхности боковых стенок центральной обечайки и цилиндрической вставки и течение теплоносителя вдоль боковой стенки цилиндрической вставки.

Для течение в проточной части РКС характерны наличие застойных и (или) вихревых зон и перераспределение профиля скорости теплоносителя в различных типах струй.

Особенности течения в выходной части РКС цилиндрического типа с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя



Места встречи теплоносителя с решеткой в затеснённой и свободной РКС:

Круглая затопленная струя, кольцевая затопленная и полузатопленная струи попадают на центральную и (или) среднюю части решетки.

Особенности выхода теплоносителя из коллектора в затеснённой и свободной РКС: :

- выход теплоносителя через центральную часть решетки при движении цилиндрической полузатопленной струи вдоль средней и (или) периферийной частей решетки с раздачей потока по пути;

- выход теплоносителя через центральную и среднюю части решетки при движении плоской полузатопленной струи вдоль ее периферийной части с раздачей потока по пути;

- выход теплоносителя через среднюю часть решетки при движении цилиндрических полузатопленных струй с раздачей потока по пути вдоль ее периферийной и центральной частей;

В сверхзатеснённой РКС при а=0 и F₀/F₁≥1 теплоноситель движется к центру коллектора в щелевом канале между днищем и решеткой с раздачей потока по пути через отверстия средней и (или) центральной части решетки.



Характерные участки проточной части РКС

В РКС различных типов с различными условиями подвода и отвода теплоносителя общими характерными участками проточной части являются входная, основная и выходная части коллектора.

Свойство подобия гидродинамики в проточной части РКС

В результате сравнительного анализа установлено неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом теплоносителя при различных местах подвода и отвода теплоносителя.

Указанное свойство основано:

- на наличии в проточной части указанных РКС струйно-вихревого течения теплоносителя, затопленных и полузатопленных струй;

- универсальности свойств течения теплоносителя;

- идентичности механизмов преобразования одних типов струй в другие;

- влиянии на профиль массового расхода (средней скорости) на выходе из коллектора отдельных гидродинамических характеристик падающей на выходной элемент струй и его коэффициента гидравлического сопротивления.



Рассматриваемое свойство обусловлено (начало текста):

- увеличением площади поперечного сечения и, соответственно, уменьшением средней скорости теплоносителя по ходу затопленной и полузатопленной струй при их торможении;

- течением затопленных и полузатопленных струй с углом одностороннего расширения равным 12°;

- преобразованием затопленных струй в полузатопленные струи и наоборот;

- изменением местоположения максимума скорости в поперечном сечении струи при изменении направления её движения в коллекторе при повороте;

- совпадением между собой местоположений максимальной скорости теплоносителя в падающей на выходной элемент струе и массового расхода теплоносителя на выходе из него;

- наличием застойной зоны в свободной РКС;

- наличием вихревых циркуляционных зон в коллекторе;



Рассматриваемое свойство обусловлено (окончание текста):

- поджатием теплоносителя и, соответственно, увеличением скорости течения теплоносителя во входной части коллектора при затеснённом входном участке коллектора;

- входом одной части теплоносителя в отверстия (каналы) выходного элемента, расположенные в месте встречи струи, и растеканием другой части теплоносителя вдоль остальной части выходного элемента с раздачей потока по пути;

- прямо пропорциональной зависимостью максимального массового расхода (средней скорости) потока в каналах выходного элемента от средней скорости струи в месте её встречи с ним;

- обратной степенной зависимостью коэффициента неравномерности распределения массового расхода теплоносителя в каналах выходного элемента от ее коэффициента гидравлического сопротивления в РКС цилиндрического типа.

Отличия конструкции проточных частей РКС

В РКС цилиндрического и плоского типов в качестве выходного элемента используют соответственно трубную доску и систему пластин, а на выходе из выходного элемента определяют соответственно распределение массового расхода теплоносителя и ее среднюю скорость.

Отличия гидродинамики проточных частей РКС

РКС цилиндрического типа имеют место осесимметричная круглая, цилиндрическая, усеченная коническая и кольцевая струи, а для РКС плоского типа характерны струи с прямоугольным (квадратным) поперечным сечениями.

В РКС цилиндрического типа по ходу потока один тип струй преобразуется в другой тип, а в РКС плоского типа общая струя делится на отдельные части или отдельные части струи сливаются в общую струю.

РКС с различными местами подвода и отвода теплоносителя различаются последовательностью преобразования одних типов струй в другие.

Перечисленные отличия не ставят под сомнение факта установления неизвестное ранее свойство подобия гидродинамики РКС различных типов с обратным поворотом теплоносителя при различных местах подвода и отвода теплоносителя.

POCATOM
Закономерность распределения теплоносителя на выходе из РКС





Экспериментальным и расчетно-аналитическим путем установлена неизвестная ранее закономерность распределения теплоносителя на выходе из осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом потока в коллекторе.

Указанная закономерность заключается в следующем:

- профиль массового расхода (средней скорости) теплоносителя на выходе три характерные осесимметричные коллектора имеет **U3** 30ны. соответствующие местам встречи струй с выходным элементом, движения вдоль выходного полузатопленных струй элемента раздачей С теплоносителя по его по каналам и попадания их на корпус или центральный канал;

- местоположение характерных зон и профиль массового расхода (средней скорости) на выходе из коллектора переменны.

Закономерность распределения теплоносителя на выходе из проточных частей РКС



(продолжение)

Рассматриваемая закономерность обусловлена следующими гидродинамическими эффектами:

- наличием в коллекторе вихревых и застойных зон, свободной затопленной и полузатопленной струй;

- преобразованием при повороте в основной части коллектора свободных затопленных струй в полузатопленные струи и наоборот;

- зависимостью профиля массового расхода (средней скорости) теплоносителя в выходной части коллектора от его конструкции, режима течения теплоносителя и места его подвода во входную часть коллектора, и гидравлического сопротивления выходного элемента;

- попаданием струи на днище коллектора;

- поджатием струи во входной части коллектора с затесненным входным участком коллектора;

- поворотом струи на днище и на его стыке с боковой стенкой;

- увеличением поперечного сечения и, соответственно, уменьшением средней скорости по ходу свободной затопленной струи в основной части коллектора и полузатопленной струи на днище и боковой стенке, происходящими в результате торможения указанных струй;

...

Закономерность распределения теплоносителя на выходе из проточных частей РКС



POCATOM

- изменением положения максимума профиля скорости в поперечном сечении струи при изменении направления ее движения в коллекторе при повороте;

- положением и площадью места встречи струи с выходным элементом;

- попаданием струи под прямым углом на выходной элемент;

- соответствием положений максимальных массового расхода (средней скорости) в каналах выходного элемента и скорости в струе в месте её встречи с выходным элементом;

- прямо пропорциональной зависимостью максимального расхода теплоносителя в каналах выходного элемента от средней скорости струи в месте ее встречи с выходным элементом;

- превышением массовых расходов теплоносителя в каналах выходного элемента, расположенных в месте встречи с ним падающей струи, над массовыми расходами в остальных каналах указанного элемента;

- движением теплоносителя вдоль выходного элемента с раздачей массового расхода теплоносителя по пути за пределами места встречи струи с ним;

- прямо пропорциональной зависимостью максимальной неравномерности распределения массового расхода (скорости) теплоносителя на выходе из коллектора от отношения местных гидравлических сопротивлений выходного элемента и проточной части коллектора.



1. Выявлены особенности гидродинамики проточных частей осесимметричных РКС цилиндрического и плоского типов с обратным поворотом теплоносителя при различных сочетаниях мест подвода и отвода теплоносителя.

2. Установлены неизвестные ранее свойство подобия гидродинамики проточных частей указанных РКС и закономерность распределения теплоносителя на выходе из них.

3. Информация об особенностях гидродинамики проточных частей РКС позволяют с относительно высокой точностью прогнозировать характер течения теплоносителя в проточной части коллектора и получать полуэмпирические соотношения для расчета распределения массового расхода (скорости) теплоносителя на выходе из РКС.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Государственная корпорация «Росатом»

Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского

ВЫХОД ПОЛОНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ ИЗ ТЖМТ ГАЗОВУЮ ФАЗУ

Н.Á. Гончар, Д.Á. Панкратов

Для РУ с ТЖМТ характерна наработка альфа-излучателей **Bi-210m, Po-209 и Po-210**, образующихся в результате активации Pb и Bi. Из них наиболее радиотоксичен Po-210 T_{1/2} =138,4 сут, Eα=5,3 MэBÈ

Ро-210 имеет слабое гамма-излучение и как внешний излучатель не представляет особой опасности. Он безопасен при сохранении герметичности первого контура. Но при проектировании газовой системы и систем перегрузки ТВС необходимо учитывать наличие в первом контуре альфа-активности с высокой энергией. Наибольшее поражение организма вызывает поступление Ро-210 перроральным и ингаляционным путём, опасно попадание на слизистые оболочки и кожу. В результате аварий, связанных с разгерметизацией газовой системы или проливом ТЖМТ, возможно образование альфа-активных аэрозолей в воздухе РП и высокоактивных поверхностных загрязнений после их осаждения. Для разработки мер и средств защиты персонала нужна проверенная по экспериментальным данным модель миграции Ро-210 в нормальных условиях эксплуатации и в условиях, приводящих к аварии.

При моделировании миграции полониевой активности и разработке мер и средств защиты особое внимание уделяют аэрозолям, парам и ГСП – РоН₂ Ключевое звено модели миграции полониевой активности – выход полония из ТЖМТ в газовую фазу.

Скорость испарения полониевой активности

 Скорость теплового испарения активности і-го изотопа, Бк/с, можно вывести из уравнения Ленгмюра и закона Рауля

$$Q_{i}^{ucn} = 4,38 \cdot 10^{-3} a_{i} M_{0} S \beta \cdot \sum_{j} \frac{P_{ij}^{sat}(T)\xi_{j}}{\sqrt{M_{ij}T}}$$

 В ТЖМТ полоний может присутствовать в нескольких химических формах: Ро, Ро₂, РbРо, BiPo и PoO₂. Надо знать долевое распределение его химических форм в зависимости от температуры или КТА(Т)

$$p_i^{\flat \phi \phi} = p_i^{\text{sat}} \cdot \gamma \cdot \mathbf{X}$$

Исследования выхода Ро210 из облучённых образцов ТЖМТ. ГНЦ РФ-ФЭИ, 1995 г.

- Образцы: СВЭ, свинец, СЛЭ
- Температура: 300, 500 и 800 °С
- Среда испарения: вакуум (0,1÷1 Па) и Ar (1,33·10⁴ и 8,65·10⁴ Па)
- Экспозиция: 8 часов
- Измерялось количество испарившейся из образца активности Ро-210, Бк
- Исходные данные: масса и активность образца, площадь испарения, измеренное количество испарившейся активности. Атомная доля Ро в образцах Pb – (2,7÷3,7)·10⁻¹¹, CBЭ – 2,7·10⁻⁸

Оценка эффективной скорости испарения и КТА полония в ТЖМТ

По измеренному количеству А_{исп} испарившейся в вакуум за время t_{эксп} активности Ро-210 определена эффективная скорость испарения Q_{Po-210},

Бк/с, $Q_{Po-210} = \frac{A_{ucn}}{t_{_{ЭКСП}}}$

Массовый поток Ро-210 с поверхности расплава, кг/м²/с, равен

$$G_{Po-210} = \frac{Q_{Po-210}}{\lambda \cdot S} \cdot \frac{10^{-3} \cdot M_{Po-M}}{N_A}$$

Испарение происходит в вакуум. Выражение для эффективного давления Ро-210 над расплавом $P_{Po-210}^{\circ\phi\phi} = rac{G_{Po-210}}{4,38\cdot 10^{-3}\sqrt{M_{Po-M}}/T}$

Эффективное давление полония над расплавом системы М-Ро равно $p_{Po}^{\phi\phi\phi} = p_{Po}^{\mathrm{sat}} \cdot \gamma_{Po/M} \cdot X_{Po}$

Оценка КТА полония в ТЖМТ по экспериментальным данным ГНЦ РФ - ФЭИ

• Испарение в аргоновую атмосферу

$$Q_{\flat\phi\phi}^{k} = Q_{k}/\beta_{k}$$
 $\beta = v_{k}/v_{vac}$ $v_{k} = Q_{k}/A_{k}^{ucx}$

• Получены КТА полония

• в свинце
$$Lg(\gamma_{Po/Pb}) = -0.0946 - \frac{2401}{T}$$

• B CB
$$Lg(\gamma_{Po/Pb-Bi}) = 0,788 - \frac{2568}{T}$$

• в СЛЭ
$$Lg(\gamma_{Po/Pb-Li}) = 3,062 - \frac{5299}{T}$$

Экстраполяция Р_{эфф}(Ро/СВЭ), отнормированного на атомную долю Ро, по данным различных исследователей



Аномально высокая скорость выхода Ро из ТЖМТ при низких температурах отмечена многими исследователями

В экспериментах ФЭИ при T=300 °C также выявлена аномально высокая скорость выхода Ро. Для свинца (твёрдый) Q_{изм}/Q_{расч} - 100÷200; для СВЭ от 0,8 до 3,6. Возможные причины: механизм отдачи (разбрызгивание); саморазогрев; диффузия полония к границам, образование РоН₂ при взаимодействии с влажным воздухом. Также возможно содержание в образцах заметной доли чистого полония. Принято, что из расплавов, содержащих свинец, полоний испаряется в виде PbPo. Его образование начинается при 350 °C, а химическое разложение при 600 ^оС.А́Виттеман)

Давление насыщенных паров Ро и РbРо (экстраполяция по формулам Абакумова)



 При T=300 °С и ниже наличие в ТЖМТ 1 % полониевой активности в виде чистого Ро увеличит скорость её испарения на порядок. Пусть в образцах доля чистого полония – Х, о доля PbPo – 1-Х, тогда уравнение скорости ленгмюровского теплового испарения

$$Q_{i}^{ucn} = 4,38 \cdot 10^{-3} a_{i} M_{0} S \beta \cdot \sum_{j} \frac{P_{ij}^{sai}(T) \xi_{j}}{\sqrt{M_{ij}T}}$$

превратится в уравнение с одним неизвестным.

Оценённая таким образом доля чистого полония в образцах свинца зависит от принятого в расчётах значения Р_{sat} чистого полония, значения которого при низких температурах имеют заметный разброс

Давление насыщенных паров полония по различным источникам



Выводы

- В модели миграции полония по первому контуру РУ с ТЖМТ основным фактором является скорость выхода полония из теплоносителя в газовую систему.
- При рабочих температурах ТЖМТ выход полония в защитный газ первого контура можно рассматривать как тепловое испарение полонида свинца. Для расчёта выхода полония из застывающего ТЖМТ, например, при оценке возможных последствий аварии с проливом теплоносителя, следует учитывать долю элементарного полония и химическое взаимодействие его соединений с атмосферой реакторного помещения.
- Оценённая по результатам экспериментов ФЭИ доля чистого полония в образцах свинца при T=300 °C составила от 3 до 9 %, в зависимости от принятого в расчётах значения Psat (Po). В образцах СВЭ – 10⁻² %. При T=500 °C полониевая активность испаряется из свинца в форме PbPo.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!





ТЖМТ - 2018

Свинецсодержащие теплоносители в перспективных технологиях переработки твердого, жидкого и газообразного сырья

В.В.Ульянов, Р.Ш.Асхадуллин, В.П.Мельников,

В.А.Гулевский, М.М.Кошелев, А.Н.Стороженко

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского» 8 – 10 октября 2018 г.



Первый опыт освоения ТЖМТ в России



Первая подводная лодка «К-27» (проект 645) с ТЖМТ РЬ-Ві. Пуск в эксплуатацию – 1963 г. Авария – 1968 г.

Причина – плавление ТВЭЛ реактора из-за ухудшения теплообмена, вызванного отложениями шлаков. Типичные примеры отложений шлаков на начальном этапе освоения теплоносителя Pb-Bi (1968–1972 гг.)





Отложения шлаков на внутренней поверхности трубы

Отложения шлаков в теплообменной сборке

	Состав шлаков, %					
	Bi	Pb	O ₂	Ni	Cr	Fe
6	14÷46	47÷76	0,9÷2,4	2.10 ⁻⁴ ÷0,2	2·10 ⁻⁴ ÷1,7	4·10 ⁻⁴ ÷6,9
тепл						



Отложения шлаков на теплообменных трубах рекуператора



${Pb} + \frac{1}{2}(O_2) \rightarrow {PbO} >$

А) без удаления ТЖМТ из циркуляционного контура – минимальное накопление шлаков

образования шлаков на основе оксида PbO.

Б) при удалении ТЖМТ из циркуляционного контура – максимальное накопление шлаков

M_{PbO}/M_{TЖMT} ~ 10⁻³÷10⁻⁴ %_{мас.} М_{PbO} (при А) << М_{PbO} (при Б) М_{PbO}/M_{TЖMT} ~ 10⁻²÷ 5 %_{мас.}





Термодинамика взаимодействия ТЖМТ со смесями «H₂-H₂O»



 $(\mathsf{H}_2\mathsf{O}) + \{\mathsf{Pb}\text{-}\mathsf{Bi}\} \leftrightarrow (\mathsf{H}_2) + [\mathsf{O}] + \{\mathsf{Pb}\text{-}\mathsf{Bi}\}$

Диаграмма Е – Т – С – рн₂о/рн₂

для расплава Pb-Bi

 $E(V) = 0,13 - 1,5.10^{-5} \cdot T \cdot (1+6,6.1ga_{O}) - Pb$

 $E(V) = 0.09 - 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot (1+5.6 \cdot Iga_0) - Pb-Bi$



$$\mathbf{C}_{\mathsf{O}} = \mathbf{f} \left(\mathsf{V}_{\mathsf{T}\mathsf{X}\mathsf{M}\mathsf{T}}, \, \mathsf{V}_{\mathsf{rasa}}, \, \mathsf{T}_{\mathsf{X}\mathsf{o}\mathsf{n}}, \, \mathsf{T}_{\mathsf{\Gamma}\mathsf{o}\mathsf{p}}, \, \mathsf{F}_{\mathsf{X}\mathsf{o}\mathsf{n}}, \, \mathsf{F}_{\mathsf{\Gamma}\mathsf{o}\mathsf{p}}, \, \ldots \right)$$

Термодинамические свойства «H₂ – H₂O» и ТЖМТ различаются. При их совместном транспорте по различным температурным зонам циркуляционного тракта возможны разные сценарии взаимодействия (окисление, раскисление, равновесие)



Водородная очистка контуров петлевой компоновки

$\begin{array}{l} (\mathsf{H}_2) + <\!\!\mathsf{PbO}\!\!> \rightarrow (\mathsf{H}_2\mathsf{O}) + [\mathsf{Pb}] \\ (\mathsf{H}_2) \!+\! [\mathsf{O}] \rightarrow (\mathsf{H}_2\mathsf{O}) \end{array}$





1 – а.з.; 2 – ГЦНА; 3 – ПГ; 4 – ВЦНА; 5 – БЕ; 6 – вентили



Участок контура до очистки



Участок контура после очистки



Реактор усовершенствованной петлевой конструкции



1 – а.з.; 2 – ПГ; 3 – ГЦНА; 4 – уровень теплоносителя



$(H_2) + \langle PbO \rangle \rightarrow (H_2O) + \{Pb\}$



В конструкциях реакторов могут быть участки, способствующие сепарации газа. Они рассчитаны на удаление пузырей водяного пара из контура. Это мешает проведению водородной очистки. Шлаки на основе PbO могут образоваться в любом участке контура. Для их удаления возможно только одно решение – диспергация газовых пузырей и введение в объем ТЖМТ мелкодисперсной газовой фазы. Для конструкции реальной реакторной установки или стенда требуется свой принцип

ввода газа



4 – нагреватели; 5 – вентиль

Механический диспергатор газа и стенд его испытаний



после очистки

POCATOM

Термодинамика взаимодействия Pb-Bi со смесями «H₂–H₂O»



Зона I – оптимальные условия для работы прямоконтактных парогенераторов.

Зона III – оптимальное содержание кислорода для генерации водорода



$(\mathsf{H}_2\mathsf{O}) + \{\mathsf{Pb}\text{-}\mathsf{Bi}\} \rightarrow (\mathsf{H}_2) + [\mathsf{O}] + \{\mathsf{Pb}\text{-}\mathsf{Bi}\}$



При работе в «зоне III» вода взаимодействует с Pb-Bi с образованием H₂ и увеличением содержания растворенного кислорода. Кислородный насос непрерывно «откачивает» растворенный кислород из теплоносителя, раскисляя его. На внутренней полости насоса образуется высокочистый кислород.

POCATOM

Оксидная конверсия углеводородов в системе «Pb-PbO»

Зона 1: 4Pb+2O₂=4PbO+Q₁ Подача метана (СН4) Зона 2: 4PbO+CH₄=4Pb+CO₂+2H₂O+Q₂ Выход Зона 3: 3CH₄+CO₂+2H₂O+Q₃=4CO+8H₂ азота (N₂) Газовый Газовый фильтр фильтр Катализатор Зона З Зона 1 – разделитель воздуха. паровой и углекислотной, Зона 2 – окислитель конверсии метана органического сырья. CO₂,H₂C N₂ N_2 Зона 3 – корректор состава IIII синтез-газа. К СО₂ и Н₂О PbO UID 111D Зона 2 добавляется метан. 1111 ann На катализаторе они Подача Подача am органического 0 взаимодействуют с воздуха a сырья (СН4) $(N_2 + O_2)$ Pb получением синтез-газа. Зона Реакция проходит с поглощением тепла, 4CO+8H2 выделяемым в зоне 1 и зоне 2 t=1000°C на Синтез (суммарная реакция – Pb, Катализатор Фишера-Тропша экзотермична). $2O_2 + 4CH_4 = 4CO + 8H_2 + Q$ $4CO+8H_2=2C_2H_4$ +4H2O+Q_{сфт}

Термодинамика взаимодействия Pb-Bi со смесями «H₂–H₂O»

POCATO



Зона I – оптимальные условия для работы прямоконтактных парогенераторов. Зона III – оптимальное содержание кислорода для генерации водорода 💫 Прямоконтактная дистилляция воды без предварительной подготовки



При работе в «зоне I» Pb-Bi химически инертен по отношению к воде, являясь лишь высокоэффективным теплоносителем. Прямоконтактная дистилляция воды до сухого остатка перспективна для месторождений сланцевых углеводородов и как финишная ступень опреснения совместно с обратным осмосом.



Определяемый показатель	Единицы измерения	Исходная вода	Вода после дистилляции	Гигиенический норматив
Водородный показатель	рН	6,01±0,20	5,2±0,20	от 6 до 9
Щелочность	ммоль/дм ³	0,40±0,05	< 0,1	от 0,5 до 6,5
Жесткость общая	°Ж	0,50±0,08	< 0,1	< 7,0
Железо (Fe суммарно)	мг/дм ³	0,29±0,06	< 0,1	< 0,3
Фториды (F ⁻)	мг/дм ³	0,93±0,13	< 0,1	< 1,5
Сульфаты (SO ²⁻ ₄)	мг/дм ³	11±2	< 10	< 500
Марганец (Mn суммарно)	мг/дм ³	0,035±0,0009	< 0,01	< 0,1
Свинец	мг/дм ³	-	0,025±0,003	< 0,03

Результаты исследований проб воды в центре гигиены и эпидемиологии, г. Обнинск



Жидкометаллический пиролиз отработавших автошин

Жидкие прод	цукты пи	ролиза	автошин,	%мас.
-------------	----------	--------	----------	-------

Пиролиз	Традиционный
в свинце	пиролиз в газе
5,3	0,3
25,4	29,9
0,3	3,3
0,2	6,7
18,3	18,2
50,5	41,6
	Пиролиз в свинце 5,3 25,4 0,3 0,2 18,3 50,5

Дипентен после первичной отгонки, %мас.

Температура,	При традиционном	При пиролизе
°C	пиролизе в газе	в свинце
340	-	17,4
370	0,4	22,7
400	0,6	25,2
420	0,7	26,1
450	0,9	25,8







Получение оксидных наноматериалов в жидких металлах





1 стадия. Растворение в жидком металле (матрице) металла (реагента), **{Ме'}+ [Ме"]**

2 стадия. Окисление растворенного металла водяным паром : {Me'}+ [Me'']+H₂O = ={Me'}+<Me''_xO_v > +H₂
Влияние добавок аэрогеля AlOOH в порошки Si₃N₄ (A) и SiC (Б) на свойства получаемых керамических материалов

POCATO











Пропитанные образцы анодов

Пропитывающие органические жидкости:

- ≻ битум,
- ≻ композиции марки «Силор Ультра»,
- карбидо фенолформальдегидные,
- > эпоксидные, полиэфирные смолы



Образец анода после пиролиза в раскисленном Pb-Bi



Образец анода после пиролиза в окисленном Pb-Bi

POCATOM

Жидкометаллический котел – иммобилизатор отходов



POCATOM

Установка прямоконтактной переработки нефтепродуктов



В России глубина переработки нефти не превышает 68-70%, против 90% в США и 80% в Евросоюзе. Увеличение глубины переработки с 65% до 70% обеспечивает экономию 30 млн т нефти. Российская нефть содержит много серы, что делает ее менее ценной.

Проведены расчетные и экспериментальные исследования. Создан технический проект Установки прямоконтактной переработки нефтепродуктов, применительно к условиям конкретных нефтеперерабатывающих заводов.



Трубчатая печь используется в нефтеперерабатывающей промышленности. Она предназначена для нагрева нефтепродуктов до температур 350-500°С. Обогрев труб происходит за счет сгорания жидкого или газообразного топлива в топочной камере.



Проблема: необходимость равномерного (по сечению теплообменной трубы) нагрева сырья для недопущения локального коксообразования.







Предлагаемая конструкция теплообменной трубы для печей огневого нагрева нефти



Утилизация тепла кристаллизаторов стали

Кристаллизатор служит для охлаждения жидкой стали. Поток отводимого тепла составляет 430 МДж на 1 т жидкой стали. Используемый теплоноситель – вода. Температура воды на входе 20-45°С, на выходе 60-95°С.

Переход на свинецсодержащий теплоноситель в кристаллизаторах позволит осуществлять паросиловой цикл для генерации электроэнергии при сохранении минимального давления в кристаллизаторе.







- Для поддержания чистоты первых контуров реакторных установок и исследовательских стендов со свинецсодержащими теплоносителями обосновано применение водородосодержащих газовых смесей.
- Наибольшая эффективность очистки достигается при вводе газовых смесей в объем теплоносителя. Обоснованы конструкции устройств ввода газа в объем теплоносителя для различных конструкций реакторных установок и исследовательских стендов.
- Научный задел, созданный при обосновании технологии свинецсодержащих теплоносителей, позволил перейти к разработке новых технологий переработки твердого, жидкого и газообразного органического сырья при его непосредственном контакте со свинецсодержащим расплавом.
- 4) Обоснована перспективность жидкометаллических технологий дистилляции воды без предварительной подготовки, термоэлектрохимического разложения воды, получения синтез-газа из органического сырья, создания наноматериалов, переработки нефтепродуктов, пиролиза твердых органических отходов.
- 5) Изучена возможность применения промежуточных жидкометаллических теплообменников в кристаллизаторах стали и на нефтеперерабатывающих заводах.

Спасибо за внимание



V международная научно-техническая конференция Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2018)



Применение ТЖМТ в технологии переработки металлических радиоактивных отходов

Авторы: <u>Воронин И.А.</u>, Мельников В.П., Ягодкин И.В., Посаженников А.М., Легких А.Ю., Николаев А.Н.

г. Обнинск 9-11 октября 2018 г.



Цель и задачи



Апробация метода пирометаллургической переплавки МРО на экспериментальном плавильном агрегате.



Актуальность

В процессе эксплуатации объектов ядерной энергетики образуются материалы, содержащие радиоактивные вещества, в том числе различные металлические конструкции. При этом отнесение материала к радиоактивным отходам исключает повторное использование, и такие материалы подлежат захоронению.

На АЭС при штатном режиме работы накапливается примерно 1-2 тыс. т металлических радиоактивных отходов (МРО) в год. Они образуются также при выводе энергоблоков из эксплуатации, при этом их объем при выводе из эксплуатации одного энергоблока мощностью 1000 МВт составляет не менее 15 тыс. т. Кроме того, при проведении ремонтных работ и работ по модернизации действующих объектов также образуется значительное количество МРО.

К настоящему времени на предприятиях атомной энергетики накоплено примерно 600 тыс. т MPO.

Основная доля радионуклидов ⁵⁴Mn, ⁵¹Cr, ⁵⁹Fe, определяющих радиационную обстановку, сосредоточена в продуктах коррозии, покрывающих внутренние поверхности контура. При поврежденных твэлов в реакторе типа ВВЭР активность поверхностей будет в основном определяться нуклидами осколочного происхождения (⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁰Ba и др.)



АО «ЭКОМЕТ-С» (г. Сосновый бор) используется комплекс по переработке и утилизации металлических РАО на основе индукционной печи, производственная мощность до 6000 т/год. НИЦ «Кристалл» (г. Красноярск) разработан проект опытнопромышленного комплекса на основе газлифтной технологии, производительность до 2080 т/год

В ФГУП «Радон» (г. Москва) разработана установка плазменной переработки РАО сложного состава «Плутон», производственная мощность до 200-250 кг/ч. В ООО ПК «КППТ» (г. Москва) предложена пирометаллургическая установка по дезактивации МРО на основе топливнокислородных горелок, расчетная производительность 50-250 т/год. (Индустриальный партнер по Соглашению с Минобрнауки 2014-2016 гг.) Обоснование возможности применения тяжелого жидкометаллического теплоносителя для охлаждения корпуса плавильного агрегата

Схема охлаждения стального корпуса плавильного агрегата СВТ



Для охлаждения плавильного агрегата используется жидкометаллический теплоноситель, например эвтектика свинец-висмут.

Преимущество применения:

- данный теплоноситель является эффективным, позволяющим отводить тепло при высоких температурах и малых давлениях.
- высокая температура кипения (~ 1670 °С) практически исключены кризис теплосъема и опасные ситуации, связанные с паровыми взрывами;
- свинцово-висмутовый теплоноситель взрыво- и пожаробезопасен ввиду его химической инертности по отношению к воде и воздуху;
- имеет сравнительно невысокую температуру плавления (~ 125 °C)

Расчетные оценки распределения температур при охлаждении плавильного агрегата



Распределение температуры поверхности внутреннего корпуса



1. Выполнены расчетные оценки распределения температур при охлаждении плавильного агрегата свинцововисмутовым теплоносителем.

2. При охлаждении стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем обеспечивается возможность поддержания температуры на внутренней поверхности корпуса в допустимом диапазоне значений.

Система газоочистки

Наиболее применяемые в металлургии методы очистки газовых сред можно разделить на механическую очистку, сорбционную, электростатическую и очистку с помощью звуковой и ультразвуковой коагуляции.

Характеристика устройств газоочистки применяемых на металлургических предприятиях

Аппарат	Размеры	Эффективность	Верхний предел
	улавливаемых	очистки, %	температуры
	частиц, мкм		газов, °С
Пылеосадительные	5 - 20000	40-70	350-550
камеры			
Центробежные	3 - 100	45-85	350 - 550
пылеосадители			
Электрофильтры	0,005 - 10	86-99	300-450
Гидравлические	0,01 - 10	85-99	350 - 500
пылеуловители			
Карманные фильтры	2-10	85-99	до 150
Высокоэффективные	0,3	99,95	до 150
аэрозольные фильтры			

Для удержания радиоактивных аэрозолей, содержащихся в отходящих газах, необходимо применять многокомпонентную систему очистки, составляющие которой работают на различных принципах.

Экспериментальная установка



Результаты испытаний

№ п/п	Изотоп	Удельная активность/ категория MPO, Бк/г	Удельная активность/категория дезактивированного металла, Бк/г	Коэффициент дезактивации
1	Cs-137	216/OHAO	≤0,1	≥2160
2	Am-241	68,6/HAO	≤0,1	≥686
3	U-235	20/OHAO	≤0,1	≥200
	Общая	322/OHAO	≤0,1	≥3220

На выходе из плавильного агрегата температура газовой среды составляла не менее 1600°С, на выходе из фильтра высокоэффективной очистки не более 130°С, при этом эффективность фильтра финишной очистки составила 99,95%

Экспериментально показана реализация режима переработки МРО, позволяющего обеспечить коэффициент сокращения объема – 5,35 и коэффициент дезактивации 3220, что превышает проектные значения

Заключение

- 1. Подтверждена возможность применения ТЖМТ в технологии охлаждения корпуса плавильного агрегата для пирометаллургической переработки металлических радиоактивных отходов.
- Экспериментально показана реализация режима переработки МРО, позволяющая обеспечить коэффициент сокращения объема – 5,35 и коэффициент дезактивации 3220, что более чем в 3 раза превышает проектные значения.
- 3. Показано, что при использовании охлаждения корпуса плавильного агрегата эвтектикой свинец-висмут, средняя температура на поверхности стали со стороны теплоносителя не превысит 600°С в рассматриваемом диапазоне расходов теплоносителя.
- 4. Разработана система газоочистки, позволившая обеспечить охлаждение отходящих газов с температурой 1600-1900°С до 130°С.
- 5. Эффективность системы газоочистки составила 99,95% по наиболее проникающим частицам (0,3 мкм).

В работе использован материал, полученный в рамках проекта Минобрнауки России по теме «Разработка технологии утилизации металлических радиоактивных отходов на основе плавильных агрегатов с жидкометаллическим отводом тепла». Уникальный идентификатор ПНИЭР – RFMEFI62614X0002.

Благодарю за внимание





Иммобилизация зольного остатка, полученного от переработки радиоактивных ионообменных смол в расплаве свинца

Скоморохова С.Н., Трифанова Е.М., <u>Ситников И.В.</u>, Николаев А.Н., Асхадуллин Р.Ш.



«Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2018)

8-10 октября 2018 года, г. Обнинск

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского»

<u>Актуальность</u>



Ежегодно с 1МВт 60-70 л. ИОС



Всего накоплено р/а ИОС – 28 664 м³, что составляет 65% от проектного объема существующих хранилищ.

В среднем за 5 последних лет на АЭС ежегодно образуется 617 м³ р/а ИОС.

Потребление ИОС в ГК «Росатом» в 2012 году – 1780 т/год, в 2016–2020 гг. – 3500 т/год.

Заполнение хранилищ жидких р/а отходов



Массовое размещение ИОС на станции уже создает дополнительные издержки, связанные с обслуживанием временных хранилищ. При выводе из эксплуатации ИОС подлежат переработке в соответствии с критериями приемлемости.



Основные способы переработки ИОС

- Цементирование;
- Включение в матричные материалы:
- Включение в полимерную матрицу;
- Дезактивация.

• Пиролиз;

Разрушающие способы переработки: Сушка;
Сверхкритичное водное окисление.

- В качестве основного метода переработки в настоящее время принято прямое отверждение отработанных ИОС путем цементирования или битумирования.
- Предпочтение отдаётся цементированию в связи с высокой радиационной стойкостью и негорючестью цементных вяжущих материалов и цементной матрицы.
- К числу основных недостатков прямого цементирования ИОС на основе традиционных вяжущих систем обычно относят сравнительно невысокую степень включения (обычно не более 10 мас.% по сухой смоле для портландцементных матриц), что приводит к увеличению объема отвержденных продуктов, поступающих на хранение.

Переработка ИОС в расплаве тяжелых металлов

1.Пиролиз

 ✓ поэтапный процесс удаления несвязанной и связанной воды, деструкция, пиролиз ИОС;
✓ дожиг в присутствии оксида свинца углеводородов в отходящем газе с получением углекислого газа и воды;
✓ после накопления достаточного количества металлического свинца на поверхности гранул оксида свинца
проводят регенерацию засыпки оксида свинца потоком воздуха

2.Газоочистка

Очистка отходящих газов и конденсата от радионуклидов и токсичных примесей



3. Отверждение

Зола, вместе с потоком воздуха транспортируется в смеситель. При заполнении смесителя добавляют шлакощелочные вяжущие и воду. Полученный раствор вымешивают и направляют в емкость для

отверждения и последующего долговременного хранения.

Условия переработки в расплаве тяжелых металлов и их оксидов ускоряют химические процессы деструкции полимеров за счет плотного контакта реагентов и устойчивого теплообмена в реакционной массе.

Химическая инертность свинца к воде, содержащейся в ИОС в значительных количествах (до 50-60 мас.%), позволяет максимально эффективно отделять воду и в виде пара удалять в систему кондиционирования.

Термическая деструкция ИОС с применением оксидов тяжелых металлов в качестве окислителя и в отсутствии контакта с воздухом обеспечивает сокращение объема газовых выбросов, содержащих токсичные и радиоактивные вещества, подлежащие очистке.

5

Шлакощелочные вяжущие (геоцементы) – новый тип вяжущих, главной особенностью которых являются их высокие физикомеханические и эксплуатационные свойства.

Основные компоненты:

- металлургические гранулированные шлаки (доменные, цветные, сталеплавильные; золы и шлаки ТЭС...)
- соединения Na и K,

Основные отличия от портландцементных вяжущих:

- большая степень включения отходов;
- набор прочности не только на этапе отверждения, но и в течение всего срока эксплуатации;
- радионуклиды Cs и Sr изоморфно входят в структуру матрицы;
- устойчивость во влажной среде.









Использовали модельный состав отработанных ИОС АЭС, подготовленный на основе смол КУ-2-8 и AB-17 переведением их в соответствующие солевые формы (Na⁺-и NO₃⁻-формы, а также K⁺-, NH₄- и BO₃³⁻-формы) по стандартным методикам путем обработки катионита КУ-2-8 в H⁺-форме и анионита AB-17 в OH⁻-форме насыщенным раствором соответствующей соли.

Для иммобилизации зольного остатка в шлакощелочной цементный компаунд были разработаны рецептуры и подготовлена партия материалов для приготовления двух типов шлакощелочных вяжущих систем – на основе доменного шлака (шлак гранулированный доменного производства) и шлакопортландцемента (ПЦ-500) с повышенным содержанием шлака.

Результаты испытаний на механическую прочность

Синтезированные образцы на основе двух типов шлакощелочных вяжущих систем характеризуются механической прочностью на сжатие, значительно превышающей нормативное значение (≥5МПа). Механическая прочность образцов с наибольшей достигнутой емкостью по зольному остатку 46,4 и 45,6 мас.% характеризуется значениями 18,1 и 13,5 МПа соответственно.



Скорость выщелачивания

Результаты измерений скорости выщелачивания ¹³⁷Сs из образцов шлакощелочных компаундов двух типов с наибольшей исследуемой емкостью по зольному остатку (45,6 и 46,4 мас.%) отражают высокую водоустойчивость синтезированных компаундов, которая характеризуется величинами ≤1·10⁻³ г/см²·сут уже в четвертой экспериментальной точке (после 10 суток выдержки в контактном растворе), что соответствует нормативным требованиям.

Nº	№ 8 на основе	№ 11 на основе
образцов и	гранулированного	шлако-портландцемента
рецептуры	шлака	(46,4 мас.% золы)
	(45,6 мас.% золы)	



Скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из образцов двух типов шлакощелочных компаундов

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ имени А. И. Лейпунского»

Результаты испытаний на водостойкость

Водостойкость образцов после 90 дней выдержки в воде соответствует нормативным требованиям и характеризуется значениями механической прочности на сжатие, в 1,5-4 раза превышающими нормативное значение.



Радиационная устойчивость

Для проведения испытаний на радиационную устойчивость образцы шлакощелочных цементных компаундов, включающие зольный остаток от переработки ИОС характеризующиеся механической прочностью ≥5 МПа (после 28 суток твердения), были размещены в рабочей камере установки «Кинетик» для облучения источником ⁶⁰Со мощностью 25 рентген /сек до дозы 10⁶ Гр.





Термоциклирование

- Для проведения испытаний на устойчивость к термическим циклам по ГОСТ 10060.1-95 изготовлены специальные лабораторные образцы шлакощелочных водоустойчивых компаундов (№ 5, 8 и 11), характеризующиеся наибольшим достигнутым наполнением по зольному остатку от переработки ИОС.
- Изготовленные образцы для набора прочности выдержаны в нормально-влажностных условиях 28 суток (температура 20-25°С, относительная влажность 100%).



Образцы серии № 8 не прошли испытание на термоциклирование в связи с их разрушением (осыпание граней образцов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты проведенных испытаний показывают, что применение шлакощелочных компаундов двух испытанных типов в качестве матричного материала для иммобилизации зольного остатка от переработки отработанных ИОС АЭС в расплаве свинца обеспечивает высокое наполнение компонентами РАО и повышенное качество компаундов, что позволяет рекомендовать разработанные рецептуры для дальнейшей разработки и испытаний по иммобилизации радиоактивной золы от переработки ИОС.

2. Синтезированные образцы отвержденных компаундов с наибольшей емкостью по зольному остатку (43,4 и 46,4 мас.%) соответствуют основным нормативным показателям качества компаундов, предназначенных для долговременного хранения.

3. Метод переработки ИОС и разработанные рецептуры шлакощелочных компаундов для иммобилизации зольного остатка позволяют значительно сократить объем конечного кондиционированного продукта: достигнуто суммарное сокращение от переработки пульпы ИОС и иммобилизации зольного остатка в шлакощелочной компаунд в 13,5 раз по объему и 6,2 раз по массе.

4. По результатам расчетной оценки, в 1 м³ шлакощелочного компаунда разработанного и испытанного состава на основе доменного мелкомолотого гранулированного шлака может быть включено 0,97 т зольного остатка от переработки ИОС в расплаве свинца.



Спасибо за внимание!







ТЖМТ - 2018

Перспективы использования тяжелых жидкометаллических теплоносителей в высокоэнергонапряженных теплообменных аппаратах

<u>М. М. Кошелев</u>, В. В. Ульянов, М. А. Коновалов, В. А. Гулевский, С. Е. Харчук

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского» 2018 г.

Этапы развития технологии ТЖМТ

История применения расплавов тяжёлых жидких металлов в качестве теплоносителей насчитывает +5,0 25500 более 60 лет. 0,00 <u>-5,00</u> Этап №2 Этап №1 Этап №3 (1968 - 1995)(1951 - 1968)(1995 - 2020)Водородная энергетика Перспективные теплообменные аппараты Опреснительные системы Утилизация ЖРАО Переработка нефтепродуктов ТЖМТ - 2018





Трубчатая печь используется в нефтеперерабатывающей промышленности и предназначена для нагрева углеводородного сырья (до температур 350–500 °C), путем открытого огневого обогрева трубчатого змеевика газами в топочной камере от сгорания жидкого или газообразного топлива.

Существует проблема при их эксплуатации – неравномерный обогрев теплообменной трубы. Как следствие возникают участки локального перегрева. Градиент температуры на внутренней поверхности – <u>до 12 ° C</u>



<u>Проблемы огневого обогрева</u> (Теплообменная труба печи огневого нагрева в разрезе)







Условия расчётов





Теплообменная труба с кольцевым зазором, заполненным свинец-висмутом (a), и без кольцевого зазора (б, в) в поле силы тяжести

Условия расчёта:

Скорость нефти на входе – 0,1 м/с

Температура на входе – 423 К

Плотность теплового потока – 4,4 кВт/м²




Распределение скорости теплоносителя (м/с) в кольцевом зазоре



Распределение температур теплоносителя (К) в кольцевом зазоре





Распределение температур по угловой координате на поверхности контакта нефти со сталью:

- 1 теплообменная труба с кольцевым зазором, заполненным свинец-висмутом
- 2 теплообменная труба из стали 16 мм
- 3 теплообменная труба из стали 6 мм







Проведённые исследования показали:

- Предложенная конструкция теплообменной трубы может позволить снизить коксообразование в печах огневого нагрева нефтепродуктов за счёт выравнивания температурных полей по сечению теплообменной трубы.
- Важным фактором выравнивания температуры по сечению теплообменной трубы является осуществление устойчивой естественной циркуляции в кольцевом зазоре.
- Конструкция вносит дополнительное термическое сопротивление в величину коэффициента теплопередачи от пламени к нефтепродуктам, сравнимое с термическим сопротивлением ~10 мм стали.
- Для реализации определенных конструкторских решений необходимо продолжение исследований в части экспериментальных испытаний на малогабаритных моделях.

Спасибо за внимание

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ КОНФЕРЕНЦИИ «ТЖМТ—2018»

(принят на итоговой сессии 10.10.2018 г.)

1. В период 8—10 октября 2018 г. в Обнинске (Россия) прошла пятая конференция «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ—2018), организованная АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» при финансовой поддержке РФФИ и ЭНИМЦ «Моделирующие системы».

2. Конференция приурочена к 60-летию пуска в ФЭИ первого в мире реактора с теплоносителем свинец-висмут — стенда 27/ВТ. В связи с этим на конференции была организована специальная мемориальная сессия.

3. В конференции приняли участие многие российские специалисты, а также 24 представителя зарубежных стран и международных организаций. В их числе: Китай, Бельгия, Италия, Республика Корея, Польша, Швейцария, Нидерланды, а также МАГАТЭ. Все эти страны продолжают развивать программы в области ТЖМТ-систем.

4. На конференцию был представлен 61 устный доклад, посвященный различным аспектам исследований и использования ТЖМТ.

5. Активное участие известных ученых и организаций из различных стран показывает возрастающий интерес к технологиям ТЖМТ. Это связано с тем, ЧТО ТЖМТ обладают уникальными природными свойствами, позволяющими вывести будущую крупномасштабную ядерную энергетику на базе реакторов большой средней и малой мощности на новый уровены безопасности, практически исключить выбросы радиоактивности, требующие Кроме того, ТЖМТ эвакуации населения. использование является эффективным в ускорительно-управляемых системах для трансмутации долгоживущих радиотоксичных нуклидов.

6. Для обмена информацией и координации усилий участники конференции предлагают внести в повестку рабочей группы МАГАТЭ по быстрым реакторам (TWG-FR) тематику по тяжелым жидкометаллическим теплоносителям. Участникам конференции рекомендуется обратиться к представителям стран-участниц МАГАТЭ с предложением обсуждения данного вопроса на следующем совещании рабочей группы в 2019 г.

7. Участники конференции также рекомендуют рассмотреть возможность проведения международных симпозиумов по ТЖМТ в промежутках между конференциями «ТЖМТ в ядерных технологиях» в рамках направления LFR Gen-IV.