

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова»

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

№ 3 (21) 2020

Сосновый Бор
2020

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 3 (21) 2020

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор — В.А. Василенко, профессор, доктор технических наук, генеральный директор ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

- В.Р. Аксенов,** (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- В.И. Альмяшев,** кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.Я. Благовещенский,** доктор технических наук, профессор ВУНЦ-ВМФ «Военно-морская академия», Военно-морской политехнический институт, Санкт-Петербург.
- В.И. Бурсук,** доктор технических наук, директор центра сервиса АО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург.
- В.С. Гурский,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.Л. Дмитриев,** ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.В. Ельшин,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.А. Ефимов,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- В.Н. Зимаков,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Ю.В. Крюков,** (ответственный секретарь), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Ю.А. Мигров,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Л.Н. Москвин,** доктор химических наук, Санкт-Петербургский государственный университет.
- Е.Б. Панкина,** кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- С.А. Петров,** доктор технических наук, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, Санкт-Петербург.
- О.Ю. Пыхтеев,** кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- О.Б. Самойлов,** доктор технических наук, АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород.
- В.Б. Хабенский,** доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

Учредитель: ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова».

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-58865 от 28.07.14.

Адрес редакции: 188540 Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе 72,
ФЯО ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

Телефон: 8 (813-69) 6-01-43 — отв. секретарь редколлегии.
Факс: 8 (813-69) 2-36-72. E-mail: foton@niti.ru; Интернет сайт: www.niti.ru.

Подписной индекс 43300 в объединенном каталоге «Пресса России».

Научно-технический сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 05.14.03 — Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки).

При перепечатке ссылка на периодический рецензируемый научно-технический сборник
«Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» обязательна.

Содержание

Выпуск № 3 (21) 2020

Исследование динамики и создание технологий испытаний объектов с ЯЭУ

Е.Д. Федорович, И.И. Курдюков

Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2 (Современные разработки) 9

Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ

Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко

Расчётные исследования растекания теплоносителя в кольцевой камере реактора ВВЭР при радиальном вводе через патрубок 32

Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования

В.А. Василенко, В.Н. Епимахов, И.В. Мирошниченко, О.Ю. Пыхтеев

Модульная мембранно-сорбционная установка получения обессоленной воды для теплоносителей ЯЭУ 42

Т.В. Воронина

Особенности нормирования и химического контроля теплоносителей тяжеловодных контуров реактора ПИК 53

Влияние объектов атомной энергетики на окружающую среду

С.Х. Газай, Х. Садеги, Е.А. Соколова, Е.Д. Федорович, А. Ширани

О необходимости разработки двухцелевых атомных энерготехнологических комплексов для обеспечения электрической энергией и пресной водой засушливых территорий Ирана 63

Исследование процессов при тяжёлых авариях на объектах атомной энергетики

А.Н. Коваленко, А.О. Коптюхов, Д.К. Мещеряков, А.П. Щуклинов

Численное моделирование термокинетических процессов взаимодействия жертвенного материала и расплава кориума при тяжёлых авариях реакторов на АЭС 76

УДК 621.039.52.034.6

Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем.

Часть 2 (Современные разработки)

¹Е.Д. Федорович, ²И.И. Курдюков

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

²АО «Санкт-Петербургское Морское Бюро Машиностроения «Малахит», Россия

Аннотация

Настоящая статья является продолжением (второй частью) обзора, подготовленного авторами с целью анализа современных тенденций, опыта создания и эксплуатации ядерных энергетических установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (первая часть обзора опубликована в выпуске №2(20)2020 настоящего научно-технического сборника).

В статье приведена информация о современных разработках ядерных энергетических установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в России и других странах: проекты СВБР-100, БРЕСТ-ОД-300, SSTAR, ELFR, URANUS-40, CLEAR, PBWFR, LFR-AS-200, SEALER, Gen4. Представлен краткий анализ технических решений, реализованных в указанных проектах.

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, свинцово-висмутовый теплоноситель, атомная подводная лодка, ядерная энергетическая установка.

УДК 532.542:004.942

Расчётные исследования растекания теплоносителя в кольцевой камере реактора ВВЭР при радиальном вводе через патрубок

Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

На основе расчёта простых тестов с помощью кода КОРСАР/CFD продемонстрировано анизотропное растекание теплоносителя в кольцевой камере реактора ВВЭР при радиальном вводе через патрубок. Поток распространяется по окружности кольцевой камеры в азимутальных направлениях. В осевом направлении камеры происходит загибание потока. В статье предлагается объяснение причины анизотропного растекания жидкости, формирующего трёхмерную картину течения в кольцевой камере реактора ВВЭР, которая, в свою очередь, определяет пространственное распределение температуры теплоносителя и концентрации борной кислоты на входе в тепловыделяющие сборки активной зоны.

Ключевые слова: реакторная установка, кольцевая камера, патрубок, расчётный код, расчётная сетка, вычислительная гидродинамика, растекание теплоносителя.

УДК 621.182.12 + 628.165

Модульная мембранно-сорбционная установка получения обессоленной воды для теплоносителей ЯЭУ

В.А. Василенко, В.Н. Епимахов, И.В. Мирошниченко, О.Ю. Пыхтеев

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

В статье приведено описание разработанной и изготовленной в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» автоматизированной модульной мембранно-сорбционной установки получения воды высокой чистоты для первичного заполнения и подпитки водного теплоносителя первых контуров ядерных энергетических установок (ЯЭУ) транспортного назначения. В работе установки реализована усовершенствованная четырёхступенчатая технология водоподготовки, позволяющая использовать в качестве исходной как хозяйственно-питьевую воду, так и солоноватые воды Балтийского моря.

Приведены результаты ресурсных испытаний установки, изложены внедренные усовершенствования базовых технологий водоподготовки: подщелачивание, цитратные промывки, трилонные обработки мембран, термическая декарбонизация сорбентов. Отмечается, что результаты ресурсных испытаний подтверждают перспективность перехода от традиционных методов дистилляции и ионного обмена к мембранно-сорбционной технологии приготовления воды высокой чистоты, используемой в качестве теплоносителей не только ЯЭУ транспортного назначения, но и промышленных энергоблоков АЭС, что подтверждено результатами ресурсных испытаний опытного образца установки на ЛАЭС-2.

Ключевые слова: вода высокой чистоты, теплоноситель ЯЭУ, фильтрация, обратный осмос, термическая декарбонизация, мембранно-сорбционная водоподготовка.

УДК 621. 039.534

Особенности нормирования и химического контроля теплоносителей тяжеловодных контуров реактора ПИК

Т.В. Воронина

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина Ленинградской области, Россия

Аннотация

На реакторе ПИК (НИЦ КИ – ПИЯФ) по проекту предусмотрены две тяжеловодные системы: контур жидкостного регулирования и контур тяжеловодного отражателя. При нормировании показателей качества теплоносителей таких систем необходимо учитывать, что физико-химические свойства тяжёлой воды отличаются от лёгкой.

В статье предложена методика и рассчитана величина удельной электропроводимости идеально чистой тяжёлой воды. Рекомендован перечень контролируемых показателей качества теплоносителей тяжеловодных контуров реактора ПИК.

Ключевые слова: реактор ПИК, химический контроль, тяжелая вода, дейтерий, водно-химический режим, методика, расчёт показателей качества, контур жидкостного регулирования, контур тяжеловодного отражателя.

УДК 621.039.577:628.165

О необходимости разработки двухцелевых атомных энерготехнологических комплексов для обеспечения электрической энергией и пресной водой засушливых территорий Ирана

¹С.Х. Газаи, ¹Х. Садеги, ¹Е.А. Соколова, ¹Е.Д. Федорович, ²А. Ширани

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

² Университет имени Шахида Бехешти, Тегеран, Иран

Аннотация

Ядерная энергия обладает по сравнению с другими энергоисточниками опреснительных установок (ОУ) многими преимуществами, и, в частности, практическим отсутствием вредных выбросов газов в окружающую среду. Принимая во внимание тот факт, что проблема обеспечения пресной водой является ключевой для многих стран мира, развитие технологий опреснения морской воды представляется необходимым для её решения. Опреснительные производства являются энергоёмкими и это обстоятельство дополнительно подчеркивает преимущества их интеграции с атомной электростанцией. Растущий спрос на электроэнергию и пресную воду в Иране вынуждает эту страну искать альтернативные существующим и имеющим многие недостатки варианты сочетания (coupling) энергетических опреснительных производств. В качестве подходящей альтернативы может быть применение ядерно-опреснительных комплексов (ЯОК), в которых отборный пар турбин АЭС используется в системах термического опреснения, а электрическая энергия используется в опреснительной системе, действующей по технологии обратного осмоса. В настоящей статье описывается состояние действующих опреснительных установок Ирана. Предлагается несколько возможных схем сочетания АЭС с опреснительными установками. Представлены результаты технико-экономического анализа вариантов двухцелевых комплексов применительно к потребностям Республики Иран. Результаты расчётов свидетельствуют о конкурентоспособности предлагаемых комплексов в сравнении с опреснительными установками, работающими с использованием ископаемого топлива.

Подчеркивается и обосновывается необходимость разработок ЯОК в Российской Федерации, обладающей существенными конкурентными преимуществами при выходе на мировые рынки атомного опреснения.

Актуальность темы настоящей статьи определяется как необходимостью выполнения разработок двухцелевых ядерно-опреснительных комплексов для использования их в Иране, так и тем, что Российская Федерация может такие комплексы разрабатывать и поставлять – как в Иран, так и в другие страны, нуждающиеся в опресненной морской воде.

Практическая значимость настоящей статьи определяется тем, что в ней даются рекомендации по выбору схем и состава оборудования двухцелевых комплексов применительно к потребностям Ирана.

Ключевые слова: опреснение морской воды; ядерно-опреснительный комплекс; дефицит пресной воды в Иране; экономический анализ АЭС, действующей совместно с опреснительной установкой.

УДК 544.45 + 621.039.58

Численное моделирование термокинетических процессов взаимодействия жертвенного материала и расплава кориума при тяжёлых авариях реакторов на АЭС

¹А.Н. Коваленко, ²А.О. Коптюхов, ³Д.К. Мещеряков, ⁴А.П. Щуклинов

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина Ленинградской области, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

⁴ АО Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Представлена пространственная 3D модель и результаты расчётов изменения теплового и фазового состояния структурного элемента жертвенного материала при его взаимодействии с расплавом активной зоны в охлаждаемой подреакторной ловушке тигельного типа. Модель базируется на обобщенной формулировке задачи Стефана со свободными границами раздела фаз, учитывающей остаточное радиоактивное тепло-выделение кориума, тепловые эффекты плавления жертвенного материала и химических реакций восстановления его оксидов при окислении недоокисленных элементов расплава, теплоперенос естественной конвекцией в расплаве, теплопередачу охлаждающей воде через стенки корпуса и тепловое излучение во внутреннем пространстве. Для её решения используются численные методы программного пакета COMSOL Multiphysics, позволившего унифицировать дискретизацию расчётной области и автоматизировать условия сопряжения тепловых, гидродинамических и химических компонентов модели, обеспечить их сквозной счёт для снижения общей неопределенности моделирования и детализации термокинетических характеристик процессов при разработке ловушек.

Ключевые слова: тяжёлые аварии, расплав кориума, подреакторная ловушка тигельного типа, жертвенный материал, тепловое и фазовое состояние, численное моделирование, термокинетические процессы, задача Стефана, пространственная 3D модель