



Коноплев Кир Александрович

Главный технолог реактора



Пикулик Ренард Григорьевич

Главный инженер реактора

Контакты



Илатовский Владимир Алексеевич

Главный инженер реактора ВВР-М

Тел.: +7(813)714-65-03. Факс: +7(813)713-00-55.

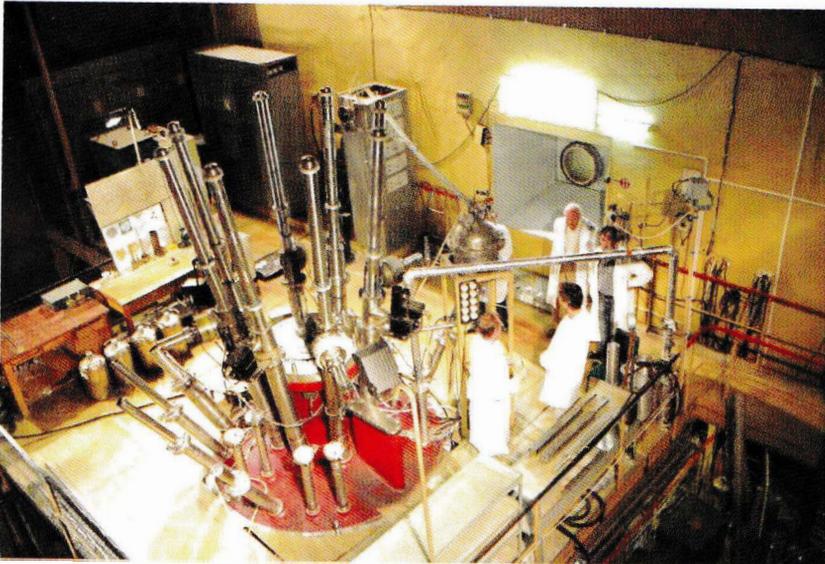
E-mail: ilatovskiy@pnpi.spb.ru

КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНД ФМ ПИК

Критический стенд «Физическая модель реактора ПИК» является полномасштабной копией реактора ПИК и предназначен для выполнения исследований по физике и технике сооружаемого реактора ПИК, обоснования проектных решений и безопасности, проверки и испытаний поставляемых элементов СУЗ, активной зоны, отработки технологии обращения с тяжелой водой, моделирования разрабатываемых экспериментальных устройств. Комплекс критического стенда также используется в учебных целях для подготовки специалистов по эксплуатации реактора ПИК. КС ФМ ПИК мощностью 100 Вт введен в эксплуатацию в 1983 г.

Кроме критического стенда ФМ ПИК, в состав комплекса входят две тяжеловодные технологические установки, предназначенные для исследований технологии производства тяжелой воды и поддержания ее качества в экспериментах на ФМ ПИК:

- опытно-промышленная установка изотопной очистки (депротизации) тяжелой воды (установка УД);
- экспериментальная полупромышленная установка изотопной очистки воды на основе метода изотопного обмена на гидрофобных катализаторах и электролиза воды (установка ЭВИО), где исследуются методы очистки тяжелой воды от изотопов протия и трития.



Общий вид помещения критсборки ФМ ПИК

Комплекс ФМ ПИК размещен на территории реакторного комплекса ВВР-М, и для его эксплуатации используются общие инженерно-технические системы, системы физической защиты, электроснабжения, учета и контроля ядерных материалов, радиационного контроля и противопожарной безопасности.

ФМ ПИК не имеет назначенного срока эксплуатации основного оборудования. При эксплуатации предусмотрена замена съемных узлов: корпуса с активной зоной, практически всех экспериментальных каналов, активной зоны. Выполняются периодические обследования для продления срока службы СУЗ. Срок службы остальных систем, входящих в комплекс реактора ВВР-М (систем электроснабжения, контроля радиационной безопасности, спецвентиляции, зданий и сооружений и т. д.), продлевается в рамках обследования комплекса реактора ВВР-М.

Основные технические характеристики КС ФМ ПИК

Мощность, Вт	100
Замедлитель	H ₂ O
Отражатель	D ₂ O
Тип топлива	UO ₂ в медно-бериллиевой матрице
Обогащение, %	90
Удельная концентрация ²³⁵ U в объеме ТВС, г/л	до 600
Время жизни нейтронов с извлеченными РО СУЗ, с	6,7·10 ⁻⁵
Температурный коэффициент реактивности при имитации средней температуры замедлителя в реакторе (70 °С) в зависимости от положения РО СУЗ, β _{эфф} /°С	(-0,014)–(-0,019)
Эффективная доля запаздывающих нейтронов для различных состояний критсборки, % Δ	0,748–0,767
Максимальный запас реактивности (для активной зоны с алюминиевым корпусом), β _{эфф}	14

Максимальная возможная реактивность (компенсируется РО СУЗ и дополнительными средствами), $\beta_{эфф}$	23
Коэффициент размножения при полном осушении активной зоны	0,52

Характеристики ядерного топлива

В активной зоне КС ФМ ПИК расположены 18 разборных ТВС. Двенадцать из них имеют неправильную шестигранную форму и содержат максимально 241 твэл и 6 вытеснителей. Остальные 6 ТВС квадратного сечения содержат максимально по 161 твэлу и 14 вытеснителей в каждой ТВС.

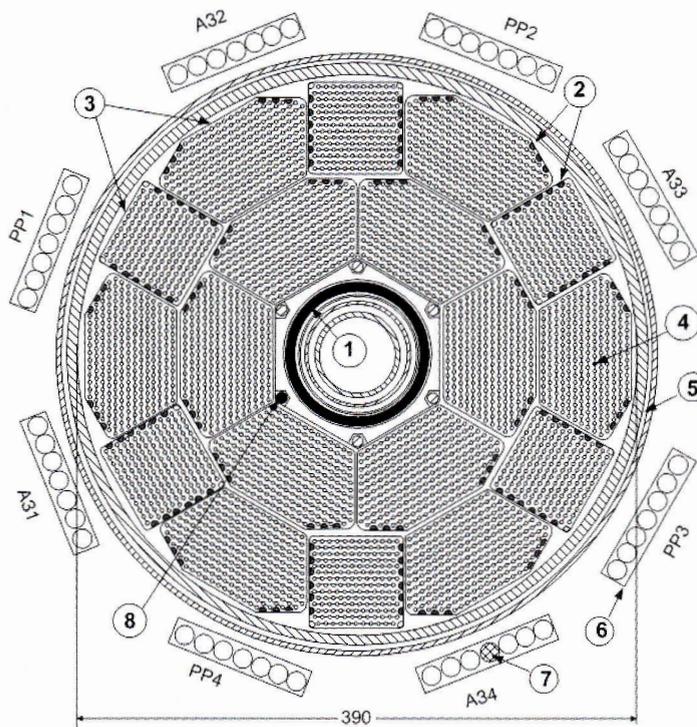
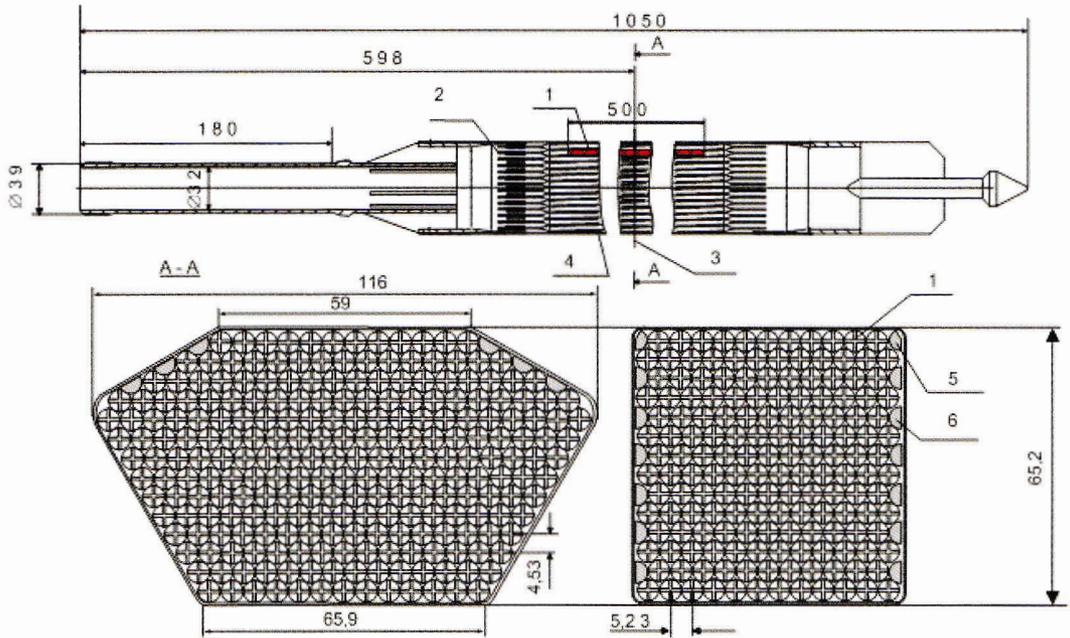


Схема активной зоны критстенда ФМ ПИК: 1 — поглощающие шторки (Eu_2O_3 или Hf); 2 — макеты СВП $\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$; 3 — ТВС; 4 — твэлы, извлекаемые ($N_{\text{макс}} = 3858$ шт.); 5 — полость жидкостного компенсатора; 6 — поглощающие стержни РР и АЗ в нижнем положении; 7 — поглощающий элемент стержня (Eu_2O_3); 8 — нейтронный источник (^{252}Cf)

Разборные ТВС позволяют легко изменять состав активной зоны. Часть твэлов заменяется геометрически подобными имитаторами поглощения нейтронов в уране. Имитаторы выполнены из аналогичных конструкционных материалов, а поглощающая примесь B_4C распределена в медной матрице. Благодаря такому способу снижения реактивности возможно изменение критического положения органов регулирования СУЗ, что важно при исследовании влияния их положения на физические характеристики моделируемого реактора.

Подача замедлителя (H_2O) в активную зону обеспечивается пневмогидравлической системой (ПГС), которая используется в качестве системы безопасности (дополнительной защиты) за счет быстрого слива замедлителя по аварийным сигналам. Подготовка эксперимента с нахождением людей в помещении критсборки выполняется только со слитым замедлителем, что обеспечено необходимыми блокировками. Изменение температуры производится за счет предварительного внешнего электронагрева.

Разборные ТВС позволяют также обрабатывать новые конструкционные решения по активной зоне. Вблизи нейтронной ловушки могут устанавливаться твэлы с уменьшенным содержанием топлива, обеспечивая необходимое топливное профилирование. В ТВС входят 144 вытеснителя из нержавеющей стали, которые могут быть заменены циркониевыми вытеснителями или макетами стержней выгорающего поглотителя (СВП) с различным содержанием гадолиния. В ТВС применяются чехлы из нержавеющей стали 08X18H9Т или сплава Э-110 (Э-125). Длина ТВС — 1050 мм. Кроме специальных разборных ТВС, в экспериментах используются также комплекты штатных ТВС реактора ПИК.



ТВС КС ФМ ПИК: 1 — твэл или имитатор; 2 — дистанционирующие обоймы; 3 — центр по топливу; 4 — чехол ТВС; 5 — вытеснитель угловой; 6 — вытеснитель основной или СВП

В ТВС обоих комплектов применяются крестообразные твэлы, установленные по треугольной решетке с шагом 5,23 мм. Длина активного слоя — 500 мм. Оболочки твэлов выполнены из коррозионностойкой стали 06X16H15M3Б. Топливо — диоксид урана 90% обогащения, диспергированный в медно-бериллиевой матрице. Максимальное общее число твэлов в активной зоне — 3858 штук. Максимальная загрузка по ^{235}U — до 27,5 кг.

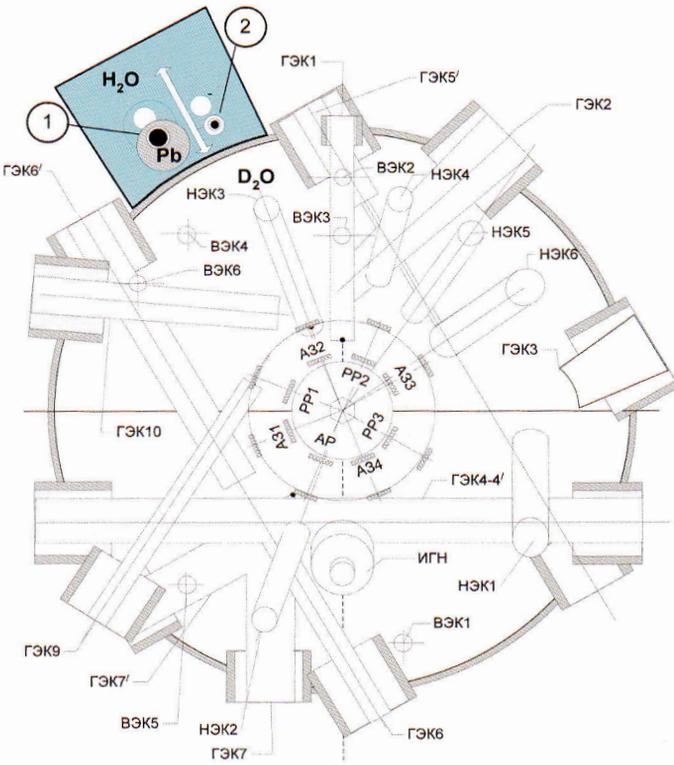
ТВС центрируются в гнездах опорной решетки с помощью хвостовиков. Материал остальных конструкционных деталей — сталь 08X18H10Т.

Распределение скорости реакции деления и мощность критсборки определяется по активности продуктов деления. В качестве детекторов используются облученные извлекаемые твэлы. Мощность критсборки определяется по методике измерения активности ^{140}La . Созданы подробные потвэльные картограммы распределения скорости деления и определены объемные коэффициенты неравномерности KV активной зоны для различных состояний реактора.

В экспериментах по верификации программ расчета критических параметров вместо использования разборных ТВС ФМ ПИК допускается использование неразборных штатных ТВС реактора ПИК. При загрузке активной зоны неразборными ТВС с целью снижения реактивности в замедлитель вводится борная кислота.

Экспериментальные возможности

Используемые средства компенсации реактивности и наличие дополнительной защиты на основе слива воды позволяют работать ФМ ПИК с большими запасами реактивности, которые соответствуют проектным показателям моделируемого реактора.



Экспериментальные каналы ФМ ПИК: 1 и 2 — перемещаемые детекторы при испытании аппаратуры СУЗ реактора ПИК

Исследования критических параметров с полным числом ТВС при любом заданном положении РО СУЗ обеспечиваются замещением части твэлов имитаторами. Эта особенность позволяет определять распределение мощности с учетом влияния РО СУЗ. На крит-стенде возможно исследовать взаимную интерференцию РО СУЗ при любом сочетании их положений, измерять эффекты реактивности, связанные с задачами эксплуатации реактора. Эксперименты с неполным числом ТВС используются с целью обоснования физического и энергетического пусков реактора.

Для верификации и аттестации программных средств используются специальные эксперименты с применением удобных для расчета средств компенсации реактивности. К ним относятся: введение гомогенных поглотителей в активную зону, нейтронную ловушку, полость на границе активная зона — отражатель, эксперименты с неполным числом ТВС, набранных без использования дополнительных поглотителей.

На стенде используются привода и рабочие органы СУЗ, разработанные для высокопоточного реактора. Длительный опыт эксплуатации учитывается при доработке их конструкции для повышения надежности при эксплуатации в реакторе.

Стенд оснащен современной гамма-спектрометрической установкой Canberra с HPGe детектором. Методика измерения мощности основана на измерении общей активности продуктов деления и активности реперных нуклидов в составе топлива после облучения. В ка-

честве детекторов для определения скорости реакции деления используются сами твэлы из состава разборных ТВС, что обеспечивает высокую достоверность определяемых параметров распределения мощности и радиационных характеристик, нормированных на значение мощности.

Предусмотрена возможность замены корпуса активной зоны на алюминиевый макет с аналогичными габаритными характеристиками для исследований по программам улучшения эксплуатационных параметров реактора.

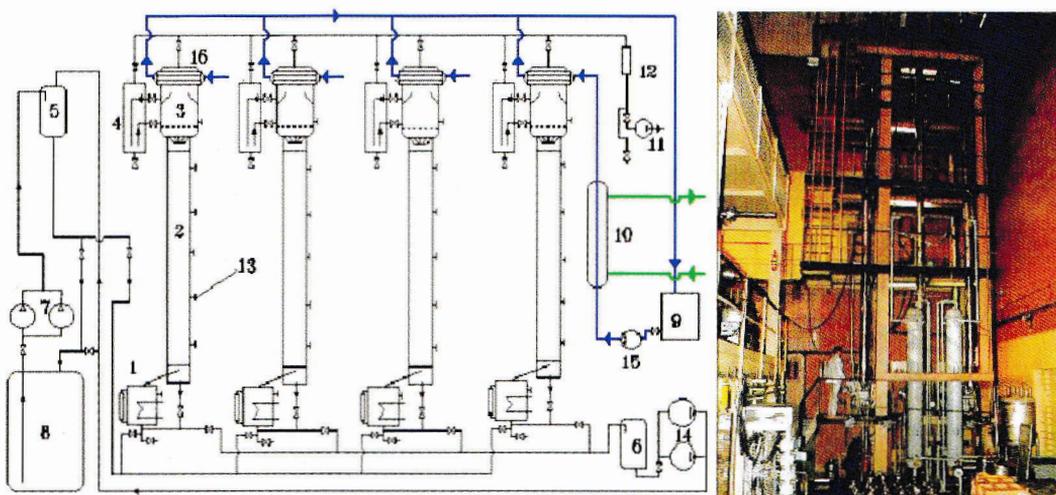
Критсборка используется для испытаний новых рабочих органов и аппаратуры СУЗ, имеет устройство для испытания блоков детектирования с имитацией их размещения в блоке железобетонной защиты.

Практически все экспериментальные каналы съемные. На критстенде проходят испытания макетов каналов из различных материалов, каналы имеют различную форму и размеры. Тяжеловодный отражатель (ТВО) оборудован системами удаления и подачи D_2O , газовой и вакуумной сушки, что упрощает размещение макетов различных экспериментальных устройств в баке ТВО и проведение периодических обследований.

Установка депротизации (УД)

Критстенд оснащен установкой депротизации, поддерживающей высокую концентрацию D_2O (выше 98,86% ат.). Принятые конструктивные меры по предотвращению разбавления тяжелой воды и тщательное соблюдение персоналом инструкций по работе с тяжелой водой позволили практически исключить снижение концентрации тяжелой воды за более чем 35 лет эксплуатации критстенда.

В соответствии с планом работ в режиме длительного останова на 2015 г. критстенд подготовлен к сливу тяжелой воды отражателя на длительное хранение. Отбор проб подтверждает сохранение высокой концентрации тяжелой воды (99,85±0,01)% и возможность продолжения экспериментов без дополнительных затрат на подключение установки депротизации.



Технологическая схема УД ФМ ПИК: 1 — испаритель; 2 — насадочная колонна; 3 — конденсатор; 4 — головной резервуар; 5, 6 — емкости с тяжелой водой; 7, 14 — насосы для подачи тяжелой воды; 8 — монжус КС; 9 — бак с деминерализованной охлаждающей водой; 10 — теплообменник; 11 — форвакуумный насос; 12 — система осушки; 13 — пробоотбор; 15 — циркуляционный насос охлаждающего контура с деминерализованной водой

Установка ЭВИО

Опытная установка ЭВИО для отработки технологии разделения изотопов водорода на основе методов химического изотопного обмена между водой и водородом и электролиза воды (СЕСЕ процесса) создана в ПИЯФ РАН в сотрудничестве с ЗАО «ДОЛ» и РХТУ им. Д. И. Менделеева. Установка работает с 1995 г.

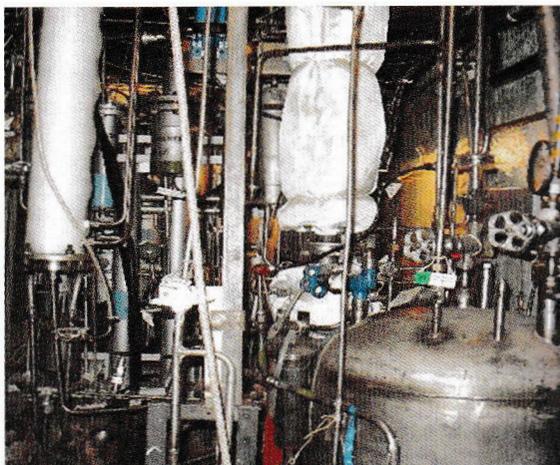
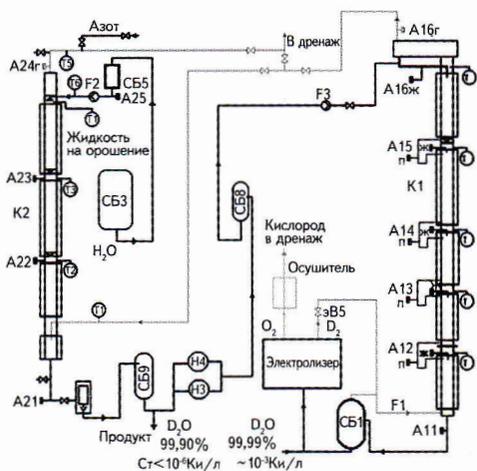


Схема установки ЭВИО (при работе в режиме детритизации тяжелой воды): К1, К2 — колонны каталитического изотопного обмена; СБ1 — емкость для тритийсодержащей тяжелой воды; СБ3, СБ5 — емкости для дистиллированной воды; СБ8, СБ9 — емкости для безтритиевой тяжелой воды; Н3, Н4 — насосы; А — точки пробоотбора; F1, F2, F3 — расходомеры для газа и воды

Наряду с отработкой СЕСЕ процесса установка используется для переработки тритированных отходов тяжелой воды.

Основные режимы работы установки в соответствии с научными и производственными задачами:

- получение кондиционной (>99,8% по дейтерию) тяжелой воды из тяжеловодных отходов (с содержанием дейтерия 10–85%);
- режим очистки тяжелой воды от трития до уровня ниже 74 кБк/кг;
- экспериментальные пуски для отработки технологии и исследования СЕСЕ процесса.

Основные направления исследований

На ФМ ПИК проводятся:

- исследования физических характеристик реактора ПИК;
- обоснование изменений конструкции активной зоны и отражателя для улучшения технических характеристик реактора;
- исследования радиационных характеристик проектируемых экспериментальных устройств и установок, размещаемых в активной зоне и тяжеловодном отражателе, и обоснование их безопасности;
- верификация программных средств для расчета нейтронно-физических параметров;
- разработка методик нейтронной дозиметрии и методик измерения реактивности при сопровождении экспериментов на реакторе ПИК;

- разработка промышленных методов переработки тяжеловодных отходов с получением тяжелой воды, в том числе очищенной от трития и газообразного дейтерия;
- создание установки извлечения трития из тяжелой воды для реактора ПИК.

Наиболее значимые работы

Эксперименты на ФМ ПИК позволили обосновать безопасность реактора ПИК и возможность улучшения его технических характеристик:

- для увеличения максимальной длительности кампании реактора с 15 до 30 суток стальные полуцилиндрические вытеснители в ТВС заменены на стержни выгорающего поглотителя (СВП) с гадолинием в циркониевой оболочке;
- для увеличения выгорания топлива на 15% от первоначального значения вместе с заменой стальных вытеснителей на СВП стальные кожуха ТВС были заменены на циркониевые того же размера;
- выбрано оптимальное профилирование топлива для снижения неравномерности энерговыделения;
- обоснован выбор материала деталей направляющих штоков и тяги верхней шторки. Для увеличения запаса реактивности на ФМ ПИК используется алюминий, а на реакторе — циркониевый сплав;
- поглощающие элементы штоков на основе оксида европия (Eu_2O_3) в стальных оболочках заменены на более надежные элементы из гафния. На ФМ ПИК выполнены подробные исследования штоков с элементами на основе Eu_2O_3 в сравнении со шторками на основе металлического гафния. Гафниевые шторки имеют, безусловно, лучшие технологические характеристики и практически не уступают по эффективности шторкам на основе Eu_2O_3 ;
- в конструкцию зоны включены две квадратные ТВС с полостями для облучения образцов-свидетелей материала корпуса с опережением набора флюенса быстрых нейтронов на корпусе в 1,7 раза. В случае использования малопоглощающих конструкционных материалов в ТВС возможно увеличение числа ТВС с полостями для расширения программ по реакторному материаловедению. Зарубежные аналоги высокопоточных пучковых реакторов, как правило, лишены такой возможности;
- система двух штоков с одним приводом в реакторе заменена на 2 независимые шторки с приводами, обеспечивающими быструю аварийную защиту. Изменены функции стержней в отражателе. Число стержней аварийной защиты в отражателе сокращено с четырех до двух, что увеличивает запас реактивности;
- для целей верификации расчетных программ на ФМ выполнены специальные эксперименты с борным отравлением замедлителя и эксперименты по уточнению размеров и состава различных элементов и узлов активной зоны, корпуса и отражателя;
- на ФМ ПИК освоена дополнительная методика по измерению температурного коэффициента реактивности (ТКР). Показано, что во всем диапазоне эксплуатационных температур ТКР отрицателен, что играет важную роль при обосновании внутренней безопасности реактора. В зависимости от положения штоков его значение при средней рабочей температуре составляет от $-1,4(2)$ до $-1,9(2)$ центов/ $^{\circ}\text{C}$;
- на критстенде исследованы пусковые активные зоны с неполной загрузкой ТВС и алюминиевыми имитаторами ТВС. Проверена новая аппаратура канала измерения мощности реактора ПИК и отработаны процедуры физпуска реактора при размещении детекторов в реальных условиях (в макете железобетонной защиты). Измерена эффективность

- поглощающих шторок на основе металлического гафния в составе реальных конструктивных узлов, которые будут переданы в монтаж на реактор;
- в 2009 г. получен аттестационный паспорт НТЦ ЯРБ для использования ПС МСНР на ИЯУ НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИЯФ», что обеспечило необходимый задел для обеспечения работ по вводу в эксплуатацию реактора ПИК. При аттестации ПС использованы результаты многолетних экспериментов, выполненных на критическом стенде ФМ ПИК. В 2010 г. работники критстенда участвовали в подготовке документов и оборудования к физическому пуску реактора ПИК. В марте-апреле 2011 г. выполнены эксперименты по программе физического пуска реактора ПИК с участием персонала критстенда;
 - выполнены критические эксперименты с целью обоснования конструкции ТВС с различными вариантами полостей для испытания образцов свидетелей в реакторе ПИК;
 - предложены варианты возможных конструктивных изменений эксплуатационного комплекта ТВС, направленные на более эффективное применение твэлов с повышенной загрузкой топлива;
 - на установке депротизации ФМ ПИК отработана технология получения воды, обедненной по дейтерию до уровня 1–2 ppm;
 - на установке ЭВИО выполнены эксперименты с целью отработки технологии разделения изотопов водорода методом изотопного обмена в системе *вода-водород* на гидрофобном катализаторе;
 - результаты отработки технологии разделения изотопов водорода на установке ЭВИО использованы при разработке проекта установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК;
 - на установке ЭВИО организовано производство тяжелой воды и газообразного дейтерия путем переработки тяжеловодных отходов.

Перспективы использования ФМ ПИК

В 2014 г. критический стенд ФМ ПИК в связи с завершением цикла экспериментальных работ и необходимостью обеспечения дальнейших работ по продлению срока эксплуатации критического ядерного стенда был переведен в режим длительного останова. Все ядерные материалы были переданы в хранилище свежего топлива реакторного комплекса ВВР-М.

По итогам обследования в 2013 г. срок эксплуатации СУЗ критического стенда продлен до 30.12.2016 г.

В соответствии с планом работы в режиме длительного останова необходимо завершение работ на остальных системах и оборудовании, важных для безопасности КС ФМ ПИК.

Согласование программы комплексного обследования, проведение работ по выявлению соответствующих дефицитов безопасности, выпуск отчета по результатам комплексных испытаний должны быть завершены в 2015 г.

Работа в рамках программы по подготовке критического ядерного стенда «Физическая модель реактора ПИК» к продлению эксплуатации и перевод в режим пуска и работы на мощности планируется в 2016 г.

На установке ЭВИО продолжится производство тяжелой воды и газообразного дейтерия путем переработки тяжеловодных отходов для Госзапаса специальных материалов и нужд российских предприятий и организаций.

Международное сотрудничество

Характеристики получаемой продукции изотопов водорода находятся на уровне мировых стандартов и отвечают потребностям отечественных и зарубежных потребителей. Производственная программа, реализуемая на установке ЭВИО, позволяет обеспечить потребности российских предприятий и организаций в тяжелой воде и дейтерии, а также экспортировать часть продукции (Швейцария, США, Китай, Южная Корея, Австралия, Германия).

Персоны

Среди специалистов, внесших значительный вклад в развитие комплекса с критическим ядерным стендом ФМ ПИК, необходимо упомянуть К. А. Коноплева, В. Д. Тренина, С. Л. Смольского, И. А. Алексеева, С. Д. Бондаренко. В настоящее время с 1993 г. начальником КС ФМ ПИК является Захаров А.С.

Тяжеловодные технологические установки, предназначенные для исследований технологии производства тяжелой воды и поддержания ее качества, находятся под научным руководством заведующего Лабораторией разделения изотопов водорода И. А. Алексеева.



Коноплев Кир Александрович

Главный научный сотрудник, чл.-корр. АИН РФ



Алексеев Иван Александрович

Заведующий лабораторией разделения изотопов водорода

Тел.: +7(813)713-19-85. Факс: +7(813)713-19-85.

E-mail: aleksiv@pnpi.spb.ru

Контакты



Захаров Александр Сергеевич

Начальник критического стенда ФМ ПИК

Тел.: +7(813)714-64-18. Факс: +7(813)713-22-41.

E-mail: zakharov@pnpi.spb.ru