

УДК 621.039.3

Выбор способа кондиционирования тяжелой воды после эксплуатации реактора ПИК

**А. А. Брык, И. А. Алексеев, С. Д. Бондаренко,
Д. А. Кузьмин, О. А. Федорченко**

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина, Россия
bryk_aa@pnpi.nrcki.ru

Как известно, тяжелая вода в ядерных реакторах используется в качестве замедлителя и отражателя потоков нейтронов и в процессе эксплуатации разбавляется. При этом ядерно-физические свойства тяжелой воды ухудшаются. Таким образом, после эксплуатации реакторов требуется производить очистку тяжелой воды.

В работе рассмотрены способы изотопной очистки тяжелой воды от протия на примере слива с бака тяжеловодного отражателя реактора ПИК в 2016 году. Для восстановления изотопного состава тяжелой воды рассмотрены варианты ее переработки методами ректификации воды и изотопного обмена вода-водород (СЕСЕ – технология) на существующих в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ установках.

Введение

На реакторе ПИК, расположенном в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, по завершению эксплуатации тяжеловодного отражателя (далее ТВО) в период с 2010 по 2016 гг. выяснилось, что химическое качество тяжелой воды заметно ухудшилось: практически все показатели выросли в несколько раз, содержание продуктов коррозии превысило установленные нормы. Во время слива воды с бака ТВО произошло разбавление части тяжелой воды в количестве 7800 кг от концентрации дейтерия 99,86 ат. % до 99,58 ат. % [1].

В целях оптимизации стоимости переработки данной воды, кондиционирование (доведение того или иного материала до стандарта, которому он должен соответствовать) тяжелой воды следует проводить непосредственно на месте. В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для этих целей существует две установки, которые успешно эксплуатировались: на основе метода ректи-

фикации воды и изотопного обмена в системе вода-водород (СЕСЕ технология). А также установка извлечения трития (УИТ), которая сооружается специально для изотопной очистки тяжелой воды реактора ПИК.

В данной статье будет рассмотрен процесс депротизации, т. е. цель изотопной очистки тяжелой воды после физического пуска реактора – извлечение протия и получение тяжелой воды с концентрацией атомов дейтерия не ниже 99,8 ат. %. Так как значение концентрации 99,8 ат. % является нижним эксплуатационным пределом для тяжелой воды в ТВО реактора ПИК, то дополнительно рассчитано увеличение содержание дейтерия до концентраций 99,86 ат. % и 99,9 ат. %. В статье приведено описание установок, методика расчета оптимальных режимов работы установок и полученные результаты.

Установка ректификации тяжелой воды КС «ФМ ПИК»

Установка ректификации тяжелой воды критического стенда «физмодель реактора ПИК» (КС «ФМ ПИК») создавалась для поддержания концентрации дейтерия в тяжелой воде отражателя и других тяжеловодных устройств КС «ФМ ПИК» на необходимом уровне (не ниже 99,8 ат. %). Принцип работы основан на использовании метода ректификации воды в насадочных колоннах [2].

Установка состоит из четырех ректификационных колонн высотой 14 м, диаметром 80 мм (рис. 1). Колонны заполнены спирально-призматической насадкой из нержавеющей стали на высоту 10 м.

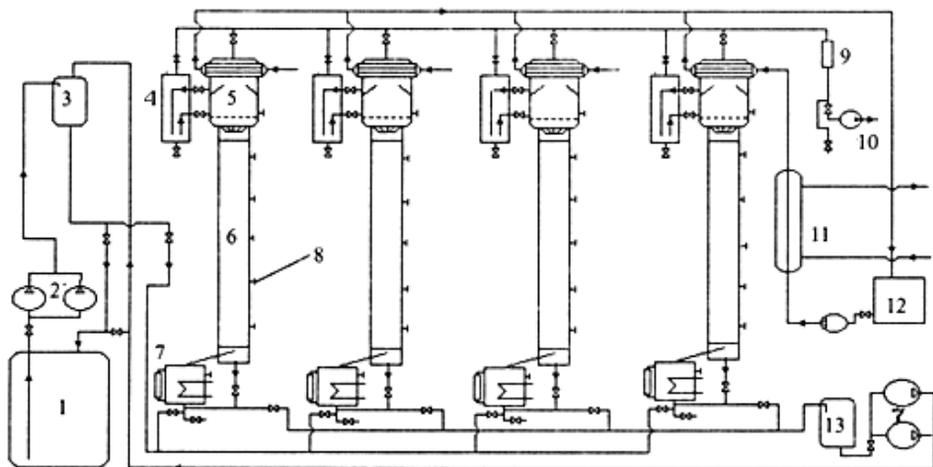


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки ректификации КС «ФМ ПИК»: 1 – бак отражателя; 2 – насосы для подачи тяжелой воды; 3 – емкость с исходной тяжелой водой; 4 – головной резервуар; 5 – конденсатор; 6 – насадочная колонна; 7 – куб-испаритель; 8 – пробоборник; 9 – система осушки; 10 – вакуумный насос; 11 – теплообменник; 12 – бак с деминерализованной охлаждающей водой, 13 – приемная емкость обогащенного продукта

Установка работает при атмосферном или пониженном давлении в различных режимах. Для решения поставленной задачи рассмотрены два режима при атмосферном давлении. В первом вся исходная вода подается из бака тяжеловодного отражателя физмодели реактора ПИК (1) одним из насосов (2) в электронагреватель (на схеме не указан), где нагревается до рабочей температуры и поступает в испаритель (7). На участке между электронагревателем и испарителем установлен мерный бачок (3), позволяющий в период пуска и наладки установки следить за расходом воды.

В испарителе (7), снабженном электрообогревом, исходная вода испаряется и в виде водяного пара поступает в нижнюю часть колонны (6) под насадку. Поднимающийся вверх по колонне пар проходит через насадку и поступает в голову колонны. В голове колонны пар конденсируется на встроенном трубчатом дефлегматоре (5) и конденсат стекает вниз колонны. В таком режиме против непрерывно накапливается в головном резервуаре (4).

Накопленный в испарителях концентрированный по D_2O продукт переливается из одного испарителя в последующий, и только из последнего сливается в бак-сборник готового продукта (13) и насосами возвращается в бак физмодели реактора ПИК. Получается, что вся вода постоянно циркулирует по испарителям, отсюда и название режима – непрерывный с большим кубом.

Во втором режиме организуется подача питания в одну из точек пробоотбора (8) каждой колонны. Кондиционная вода отбирается из куба, а против извлекается из головного резервуара (4) колонн.

Установка ЭВИО

Опытно-промышленная установка ЭВИО (электролиз воды, изотопный обмен) для разделения изотопов водорода на основе методов химического изотопного обмена между водой и водородом и электролиза (рис. 2) используется для получения кондиционной тяжелой воды и газообразного дейтерия, а также для отработки технологии разделения изотопов водорода.

В настоящее время основными частями установки являются: две колонны каталитического изотопного обмена КИО-1 и КИО-2 диаметром 96 мм, общей высотой 7,5 и 6,9 м соответственно и щелочной электролизер. Колонны изотопного обмена заполнены чередующимися слоями гидрофобного катализатора и гидрофильной спирально-призматической насадки из нержавеющей стали. В качестве нижнего узла обращения потоков на установке используется щелочной электролизер ФС-525 с производительностью по водороду до $5 \text{ м}^3/\text{ч}$. В состав установки ЭВИО также входит система поддержания заданной температуры (греющий контур), вспомогательное оборудование, контрольно-измерительные приборы, компьютерная система сбора и хранения информации.

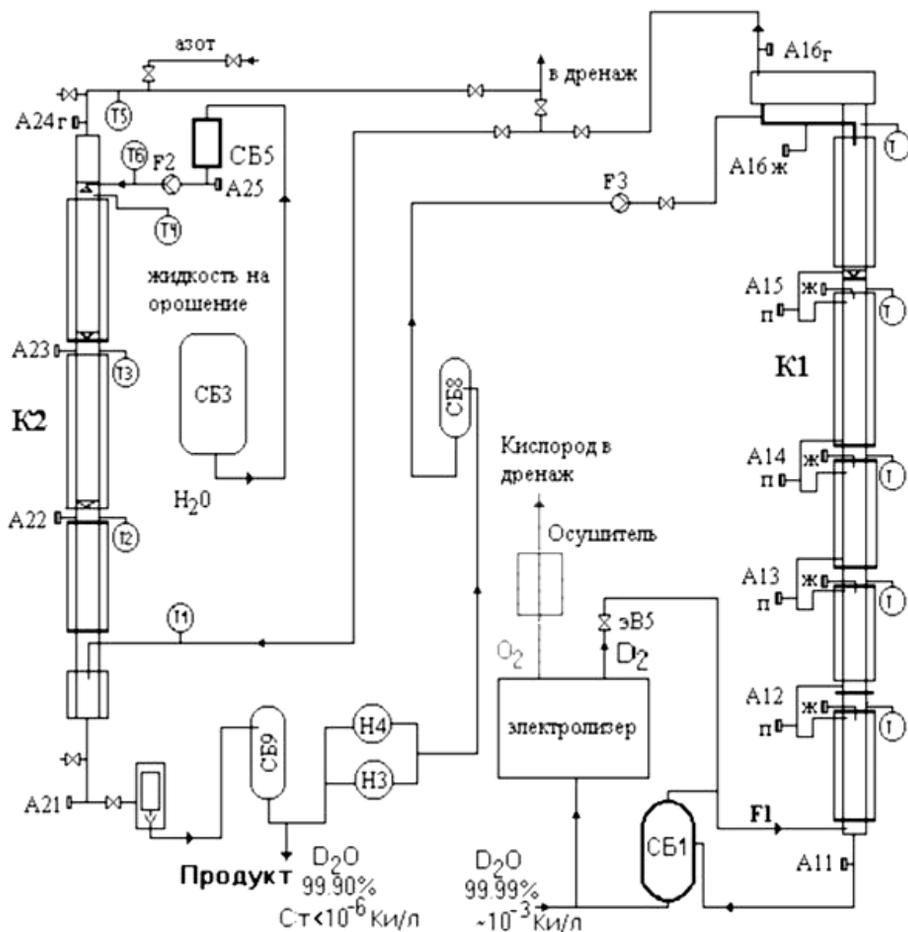


Рис. 2. Принципиальная схема установки ЭВИО: К1, К2 – колонны каталитического изотопного обмена; СБ1 – емкость для тяжелой воды; СБ3, СБ5 – емкости для дистиллированной воды; СБ8, СБ9 – емкости для тяжелой воды; Н3, Н4 – насосы; А – точки пробоотбора; F1, F2, F3 – расходомеры для газа и воды

Колонны изотопного обмена состоят из секций (царг), между которыми расположены перераспределители орошения. Каждая секция имеет греющую рубашку для поддержания температуры колонны в диапазоне 300–360 К. Рабочее давление в колоннах – 0,13–0,4 МПа. Секции колонн соединены на фланцах, что позволяет при необходимости извлекать катализатор и насадку. [3].

Установка извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК

Для извлечения трития и протия из тяжелой воды реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ создается специальная установка извлече-

ния трития (УИТ). Принципиальная схема установки для переработки разбавленной тяжелой воды представлена на рис. 3, подробное описание остальных узлов представлено в [4].

В УИТ используется комбинация методов:

– каталитического изотопного обмена в системе «жидкая вода-водород» на гидрофобном катализаторе для извлечения протия и трития из тяжелой воды, и предварительного концентрирования трития;

– криогенной дистилляции дейтерий-тритиевой смеси для конечного концентрирования трития.

Переработку имеющейся разбавленной тяжелой воды возможно провести на УИТ с использованием колонн КИО (LPCE#1 и LPCE#2), электролизной установки и систем обращения с тяжелой водой. Блок криогенной дистилляции для выполнения поставленной задачи использоваться не будет.

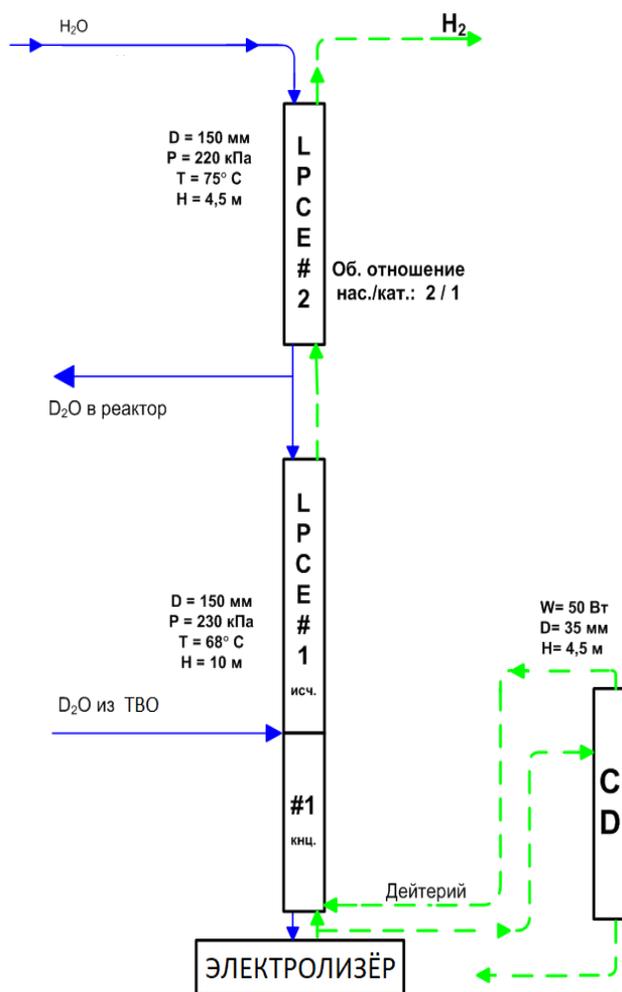


Рис. 3. Принципиальная схема УИТ: LPCE – колонны изотопного обмена, CD – криогенная дистилляция

Методика и основные результаты расчета

Расчет и сравнение установок изотопной очистки тяжелой воды проводился по двум параметрам: время работы, необходимое для достижения заданной концентрации дейтерия в перерабатываемой воде, и материальные затраты, которые складывались из потребления электроэнергии и охлаждающей воды. Приняли, что количество отвального продукта не должно превышать 2 % от исходного количества воды.

Последовательность расчета:

1. Выбор условий работы установок и оптимальной точки питания.

Выбор условий работы установок ректификации тяжелой воды и ЭВИО производили на основании большого опыта их эксплуатации, использовали уже отработанные оптимальные режимы работы, а для УИТ приняты проектные данные. Для выбора оптимальной точки питания установок строили профили концентраций по имеющимся данным запусков установок.

Для установки ректификации тяжелой воды КС «ФМ ПИК», с количеством ступеней разделения в каждой колонне $N = 300$, для режима с питанием оптимальная точка подачи некондиционной воды соответствует 125 ступени (высота одной из точек пробоотбора колонн). Поток охлаждающей технической воды для 4-х колонн составляет 4700 кг/ч. Потребляемая электрическая мощность приведена в табл. 1.

Таблица 1

Режимы работы установки ректификации КС «ФМ ПИК»

Режимы работы установки при атмосферном давлении	Описание режима	Мощность, потребляемая оборудованием за 1 ч работы установки, кВт
С большим кубом	Работа 4-х ректификационных колонн, количество ступеней разделения в каждой колонне $N = 300$	50
С подачей питания	Питание отдельно в каждую из 4-х колонн на высоту $N = 125$ и непрерывным отбором из испарителя и конденсатора	48

На установке ЭВИО: депротизацию тяжелой воды проводим при давлении 160–170 кПа, при токе через электролизер 340 А ($4,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ по H_2), температура в колоннах 72–75 °С, температура газа и конденсата 12 °С между колоннами. Мощность, потребляемая оборудованием за 1 ч работы установки 45,5 кВт. Поток охлаждающей воды электролизера составляет 800 кг/ч, на охлаждение конденсаторов колонн подается 700 кг/ч воды. Итого технической охлаждающей воды установка ЭВИО использует $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Питание подается на высоту засыпки 2000 мм, что соответствует верху второй царги колонны К1.

Для УИТ принята производительность электролизера по водороду $10 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для расчета принято, что УИТ потребляет проектные 400 кВт·ч электроэнергии. Материальные затраты учитывают только расходы на электро-

энергию без учета времени на накопление дейтерия в электролизере и расходов на охлаждающую воду (так как контур охлаждения замкнут). В выполненном расчете не учитывается время на начальное накопление дейтерия в электролизере. Питание подается в точку на высоте 7000 мм от низа первой колонны

2. Расчет времени работы установки, необходимого для решения поставленной задачи.

Расчет времени работы установки, необходимого для достижения поставленной задачи, производился с помощью ранее разработанных математических моделей. Программы «Dynamic Separation RK4» и «EVIО-5» были разработаны в ОФТР ЛРИВ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Первая для моделирования работы ректификационной колонны, а вторая для моделирования работы опытно-промышленной установки «ЭВИО», она подходит и для расчета УИТ [5–7].

3. Экономический расчет: энергозатраты и затраты на охлаждающую воду.

Исходя из времени работы установок, потребляемой ими мощности электроэнергии и расхода охлаждающей технической воды, с учетом установленной для НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ стоимости электроэнергии, технической воды и ее сбросов в канализацию, была рассчитана стоимость переработки некондиционной воды рассмотренными способами.

Результаты расчетов кондиционирования 7800 кг разбавленной тяжелой воды на установках ректификации тяжелой воды КС «ФМ ПИК», ЭВИО и УИТ приведены в табл. 2, а их графическое представление на рис. 4.

Обсуждение результатов

Как видно из табл. 2 установка ЭВИО быстрее справится с поставленной задачей очистки тяжелой воды, слитой с бака ТВО реактора ПИК, при этом материальные затраты на электроэнергию и охлаждающую воду как минимум в десять раз меньше, чем те же затраты установки ректификации тяжелой воды КС «ФМ ПИК». На УИТ поставленная задача может быть решена быстрее, чем на других установках, но потребует больших материальных затрат по сравнению с установкой ЭВИО.

На основании сравнения результатов расчета материальных затрат и времени необходимого для кондиционирования тяжелой воды методами ректификации воды и химического изотопного обмена в системе вода-водород показаны преимущества метода химического изотопного обмена в системе вода-водород: переработка этим методом осуществляется намного быстрее и дешевле.

Таблица 2

Сравнение времени переработки и затрат на обогащение разбавленной тяжелой воды различными методами

Способ депротизации	Концентрация дейтерия в продукте, ат. %	Время работы установок, ч	Материальные затраты, млн. руб.	Стоимость переработки кг некондиционной воды, руб./кг
Установка депротизации тяжелой воды КС «ФМ ПИК»	99,8	5 600 (7,7 мес.)	3,049	394
	99,86	8 400 (11,5 мес.)	4,574	591
Непрерывный режим с большим кубом	99,9	11 200 (15,3 мес.)	6,099	788
	99,8	4 830 (6,6 мес.)	2,580	334
Установка депротизации тяжелой воды КС «ФМ ПИК»	99,86	6 787 (9,3 мес.)	3,625	469
	99,9	9 018 (12,4 мес.)	4,816	624
Режим с питанием	99,8	1 570 (2,2 мес.)	0,515	67
	99,86	2 526 (3,5 мес.)	0,829	107
Установка ЭВИО	99,9	3 555 (5 мес.)	1,167	151
	99,8	667 (0,9 мес.)	1,416	183
УИТ	99,86	1 070 (1,5 мес.)	2,238	290
	99,9	1 504 (2,1 мес.)	3,146	407

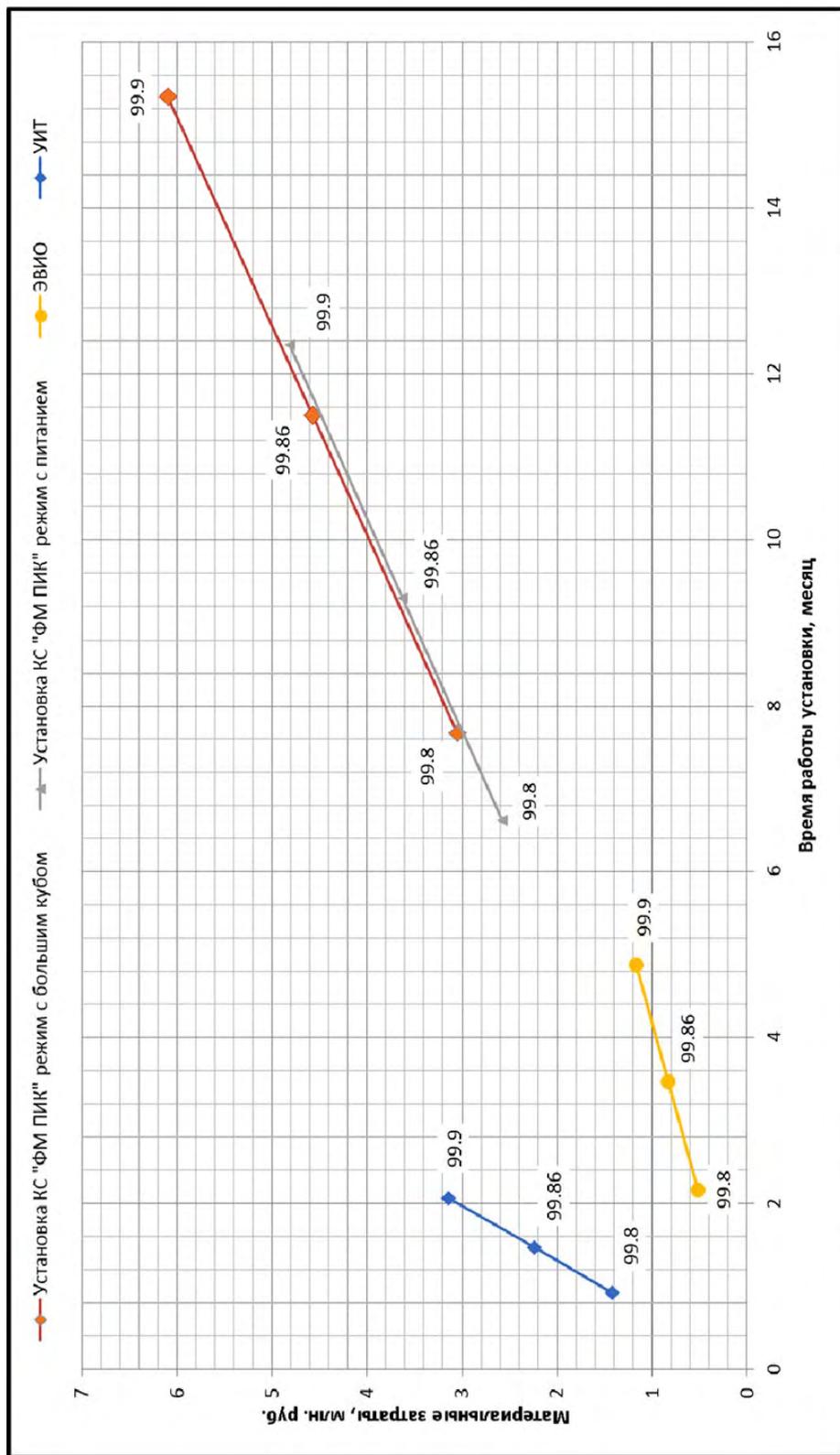


Рис. 4. График сравнения материальных затрат и времени на переработку некондиционной тяжелой воды

Список литературы

1. Бондаренко С. Д., Воронина Т. В., Захаров А. С., Коноплев К. А., Машетов В. П., Переверза Г. И., Тищенко В. Н., Тугушева Д. Ю. Опыт эксплуатации тяжеловодного отражателя реактора ПИК в период с 2010 по 2016 гг. Материалы VIII научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике «АТОМЭНЕРГОАНАЛИТИКА» – г. Сосновый Бор, 2017.
2. Alekseev I. A., Baranov I. A., Bondarenko S. D., Chernoby S. N., Fedorchenko O. A., Sukhorukova G. A., Trenin V. D., Uborski V. V. Full-scale experimental studies of the various type mass exchange packings by water distillation. *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, N 3, p. 1579.
3. Алексеев И. А., Архипов Е. А., Бондаренко С. Д., Васянина Т. В., Коноплев К. А., Федорченко О. А., Уборский В. В. Получение тяжелой воды и дейтерия методом изотопного обмена вода-водород в ПИЯФ РАН. Перспективные материалы. Специальный выпуск (8), 2010, с. 203.
4. Алексеев И. А., Бондаренко С. Д., Васянина Т. В., Федорченко О. А. Установка для очистки тяжелой воды от трития и протия. Патент на полезную модель № 174132. Роспатент, Бюл. № 28, 2017.
5. Федорченко О. А., Алексеев И. А., Тренин В. Д. Исследование нестационарного процесса разделения бинарных смесей в колонне (закрытая схема с двумя резервуарами) в широком диапазоне концентраций. Теоретические основы химической технологии, 1997, т. 31, 1, с. 28.
6. Fedorchenko O. A., Alekseev I. A., Trenin V. D., Uborski V. V. Computer Simulation of the Water and Hydrogen Distillation and CECE Process and Its Experimental Verification. *Fusion Technology*, 1995, vol. 3, p. 1485.
7. Fedorchenko O. A., Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Vasyanina T. V. Recent Progress in the Experimental Study of LPCE Process on «EVIO» Pilot Plant. *Fusion Science and Technology*, 2017, vol. 71, N 4, p. 432.

Selection of the method of conditioning heavy water after operation of the PIK reactor

A. A. Bryk, I. A. Alekseev, S. D. Bondarenko, D. A. Kuzmin,
O. A. Fedorchenko

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI, Gatchina, Russia
bryk_aa@pnpi.nrcki.ru

In nuclear reactors, heavy water is used as a moderator and reflector of neutron fluxes. The water is diluted during the operation. This leads to the deterioration of the nuclear-physical properties of heavy water. It is necessary to clean heavy water after operating the reactors.

The article deals with the methods of isotopic purification of heavy water from protium on the example of discharge from the tank of the heavy water reflector of the PIK reactor in 2016. We used the methods of water rectification and water-hydrogen isotope exchange (CECE technology) to restore the isotopic composition of heavy water at the facilities of the NRC «Kurchatov Institute» – PNPI.