

ПРОБЛЕМЫ ДЕТРИТИЗАЦИИ НИЗКОАКТИВНЫХ ВОДНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Э. П. Магомедбеков, И. Л. Растунова

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2021 г.

Проблема обращения с водными тритийсодержащими отходами является актуальной для многих стран мира. Основными техногенными источниками трития в настоящее время являются ядерные реакторные установки различного назначения и заводы по переработке отработавшего ядерного топлива. Очистка от трития водных потоков возможна только с использованием физико-химических методов разделения изотопов водорода, наиболее перспективными из которых являются ректификация воды под вакуумом и химический изотопный обмен между водородом и водой. Представлен анализ предлагаемых способов детритизации легкой и тяжелой воды с точки зрения технологических и экологических аспектов.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, тритийсодержащие водные отходы, детритизация, вакуумная ректификация воды, изотопный обмен в системе вода–водород.

Проблема улавливания трития, образующегося при эксплуатации ядерных реакторных установок различного типа, имеет большое экологическое значение. Образование легководных тритийсодержащих отходов происходит как на АЭС, причем их количество напрямую зависит от типа и мощности реактора, так и на заводах по переработке отработавшего ядерного топлива [1, 2]. В настоящее время наиболее остро проблема обращения с тритийсодержащими водными отходами стоит, в частности, перед Японией, где в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. продолжается образование ЖРО, которые после очистки от всех радионуклидов, кроме трития, складировются в специальных емкостях на площадке АЭС. По имеющимся данным, к середине 2019 г. количество таких ЖРО с концентрацией трития в различных емкостях в диапазоне $(2-22) \cdot 10^5$ Бк/кг превышало $1,1 \cdot 10^6$ м³,

а к концу 2020 г. прогнозировалось их увеличение до $1,3 \cdot 10^6$ м³ [3, 4].

В большинстве стран мира концепция снижения воздействия техногенного трития на окружающую среду включает в себя использование систем детритизации водных и газовых потоков с уменьшением объемов тритийсодержащих отходов, подлежащих дальнейшему хранению или захоронению [1, 2, 5].

Очистка водных технологических потоков от трития с его одновременным концентрированием может осуществляться только на основе методов разделения изотопов водорода, наиболее перспективными из которых считаются химический изотопный обмен (ХИО) водорода с водой и вакуумная ректификация воды.

Разделение изотопов водорода методом ХИО между водородом и водой является, пожалуй, наиболее привлекательным способом

вследствие высоких значений коэффициента разделения (например, при $T=333\text{ K}$ для изотопной смеси Н–Т $\alpha=5,18$, а для D–Т $\alpha=1,54$), нетоксичности рабочих веществ и проведения процесса при атмосферном давлении. Разработка гидрофобных катализаторов в ряде стран мира [6–9], в том числе и в России, позволила реализовать данную технологию в виде колонны изотопного обмена с электролизером в качестве нижнего узла обращения потоков (НУОП). Вследствие гидрофобных свойств катализатора колонны ХИО имеют небольшую пропускную способность (обычно линейная скорость водорода не превышает 30 см/с), при этом их диаметр обычно не более 100 мм . Типичные значения высоты эквивалентной теоретической ступени разделения (ВЭТС) для активных катализаторов в колоннах диаметром до 10 см при температурах $333\text{--}345\text{ K}$ лежат в диапазоне $20\text{--}30\text{ см}$ [2, 10–11]. На рис. 1 представлены принципиальные технологические схемы установок ХИО для решения задач детритизации.

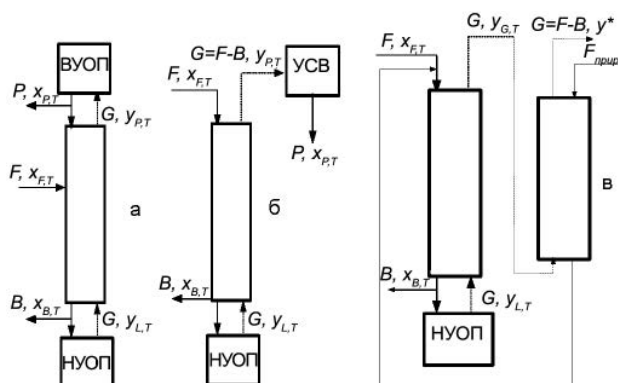


Рис. 1. Принципиальные схемы разделительных установок детритизации методом ХИО в системе вода-водород: а – с верхним узлом обращения потоков, б – с узлом сжигания водорода, в – с дополнительной колонной ХИО

Разделительная колонна на рис. 1а позволяет одновременно проводить очистку питающего потока F от трития и концентрирование радионуклида, причем степени очистки и концентрирования зависят только от высот концентрирующей (от $x_{F,T}$ до $x_{B,T}$) и исчерпывающей (от $x_{F,T}$ до $x_{P,T}$) частей. «Открытая» схема на рис. 1б предназначена для концентрирования тяжелого изотопа, а концентрация трития в очищенном потоке P , выходящем из узла сжигания водорода (УСВ), не может быть меньше, чем $x_{F,T}/\alpha$. Вследствие проблем, связанных с созданием надежного и безопасного аппарата УСВ, в последние годы все большее распространение находит схема (рис. 1в), в которой вторая колонна ХИО, орошаемая природной водой, используется

для извлечения трития и доведения его концентрации в очищенном потоке водорода G до значений, соответствующих сбросным нормам [12–14]. Кроме отмеченной выше проблемы окисления водорода, использование в качестве НУОП электролизера также создает ряд проблем, связанных с высокими энергозатратами, радиационной стойкостью конструкционных материалов и высокой вероятностью авторадииолиза электролита [15, 16]. Несмотря на это, процесс ХИО находит применение в основном для детритизации тяжелой воды [17–19].

Ректификация воды широко используется для решения задач, связанных с разделением изотопов как водорода, так и кислорода [20]. Вследствие близости к единице значений коэффициентов разделения, извлечение при однократном разделительном эффекте малó, что требует переработки больших потоков и значительно числа теоретических ступеней разделения. В связи с этим процесс проводят под вакуумом, обычно при $0,02\text{--}0,03\text{ МПа}$. Основными достоинствами метода являются абсолютная экологическая безопасность организации технологического процесса, отсутствие проблем с коррозией и возможность применения для решения задач, отличающихся по производительности от нескольких килограммов до тонн в год [21]. Разработка высокоэффективных насадочных контактных устройств позволяет существенно сократить высоты колонн, обеспечивая при этом возможность переработки значительно больших потоков по сравнению с методом ХИО [20].

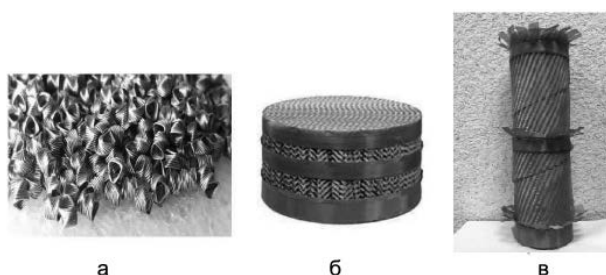


Рис. 2. Некоторые виды насадок: а – нерегулярная спирально-призматическая насадка (СПН), б – регулярная насадка Sulzer CY, в – регулярная рулонная ленточно-винтовая насадка (РЛВН)

Применительно к процессу ректификации воды чаще всего используются насадки из нержавеющей стали, наиболее популярной из которых является спирально-призматическая насадка (СПН) (рис. 2а). В работе [22] представлены результаты исследования СПН с размером элементов от 2 до 10 мм в колоннах диаметром 60 и 120 мм и показано, что при увеличении

размера элемента насадки в 5 раз величина удельной пропускной способности пропорционально возрастает от $L_{уд}^* = 912 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ до $L_{уд}^* = 4600 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ при $P = 0,02 \text{ МПа}$, а ВЭТС повышается более чем в 7 раз (с 1,9 мм до 14,2 см). При этом отмечена крайне слабая зависимость ВЭТС от диаметра колонны.

Регулярные насадки характеризуются упорядоченной структурой, обладают существенно большей пропускной способностью и меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с нерегулярными. Широкое применение при разделении смесей с близкими свойствами, в том числе в изотопном производстве, находит насадка Sulzer Mellapak типа CY (рис. 2б). Следует также отметить рулонную ленточно-винтовую насадку (РЛВН), разработанную в РХТУ им. Д. И. Менделеева, отличительной особенностью которой является то, что блоки могут быть изготовлены высотой, соответствующей царге колонны (рис. 2в), в отличие от насадки Sulzer, выпускающейся в виде блоков стандартных размеров. Сравнение с насадкой Sulzer Mellapak 750 CY при давлении 0,02 МПа показало, что значения ВЭТС для РЛВН оказались более чем в 2 раза выше (16 и 8 см соответственно), однако ее пропускная способность, равная $L_{уд}^* = 6600 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$, примерно в 1,5 раза выше и недостижима для насадки Sulzer [23]. На основании этого можно сделать вывод, что, с учетом более высокой пропускной способности и практически полного отсутствия зависимости ВЭТС от потока и диаметра колонны, РЛВН является перспективной для ее использования в процессе разделения изотопов при вакуумной ректификации воды.

Примеры использования ректификации воды для детритизации немногочисленны. В работах [24, 25] представлены расчеты каскадов

депротизации и детритизации тяжелой воды с использованием математической модели, основанной на методе расчета «от ступени к ступени» с учетом гидродинамических и других характеристик контактных устройств. В [26] описана комплексная технология детритизации различных отходов, образующихся при получении меченых тритием препаратов в компании GE Healthcare (Cardiff), с использованием ректификации воды для предварительного концентрирования трития от 3 до 2000 ppm.

В работе [27] предлагается комплексная схема детритизации, включающая в себя ректификацию воды в сочетании с ХИО в системе вода – водород. В работе [28] проводится сравнение методов ХИО и вакуумной ректификации воды на примере установки детритизации производительностью 100 кг/ч воды, в результате которого авторы сделали заключение, что объем ректификационной установки почти в 50 раз превышает объемы требуемой колонны ХИО при сопоставимых энергозатратах. Следует отметить, что, на наш взгляд, данное сравнение не вполне корректно, поскольку возможность использования дешевого низкопотенциального пара на АЭС, а также работы в области рекуперации тепла [29] в случае использования ректификации воды позволят снизить стоимость энергозатрат относительно ХИО, при котором для функционирования НУОП необходима электрическая энергия.

В работе [30] рассмотрен вариант использования каскада колонн вакуумной ректификации воды для детритизации низкоактивных водных отходов на базе атомной электростанции. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 3. Установка рассчитана на переработку 100 кг/ч воды с содержанием трития $3,7 \cdot 10^6 \text{ Бк/кг}$ и обеспечение очистки воды

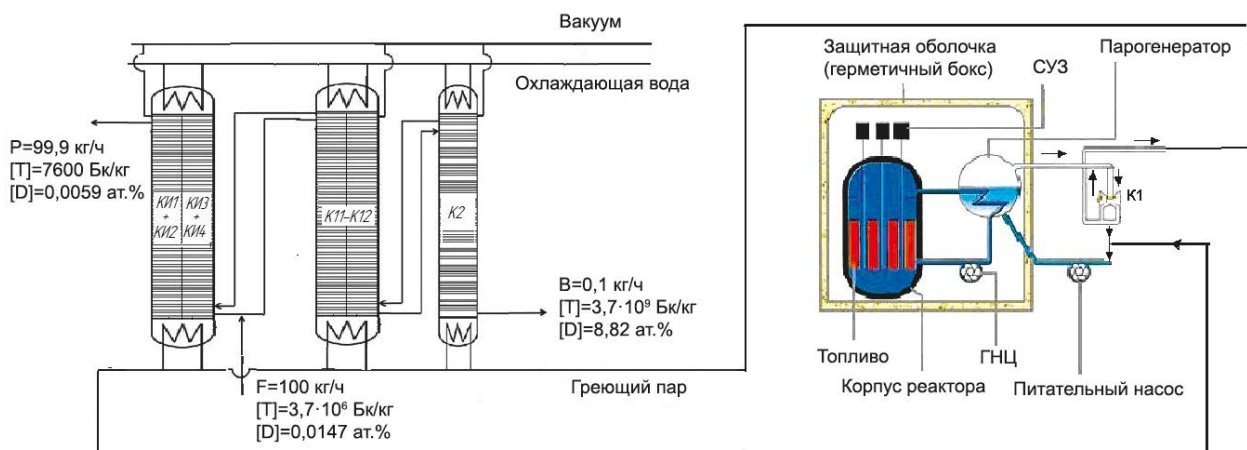


Рис. 3. Принципиальная схема установки детритизации низкоактивных тритийсодержащих водных отходов на базе АЭС

до уровня $7,6 \cdot 10^3$ Бк/кг, соответствующего российским нормам по сбросным водам. Установка представляет собой каскад ректификационных колонн с исчерпыванием, который включает в себя концентрирующую (двухступенчатый каскад с сокращением потоков) и исчерпывающую части.

В заключение следует отметить, что в настоящее время разработаны различные технологии разделения изотопов водорода, которые могут быть использованы для решения задач очистки от трития водных технологических потоков и водных тритийсодержащих радиоактивных отходов. При этом выбор технологии будет определяться условиями конкретной задачи с учетом необходимой производительности, привязки к объекту и требований к массогабаритным характеристикам разделительного оборудования. По мнению авторов, для решения крупномасштабных задач детритизации воды, таких как очистка тритийсодержащих технологических потоков АЭС или ликвидация накопленной низкоактивной воды на АЭС «Фукусима-1», наиболее целесообразно использовать вакуумную ректификацию воды в колоннах больших диаметров с регулярной насадкой.

Литература

1. Fairlie I. Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities. Greenpeace. June 2007. 92 p.
2. DOE Handbook: Tritium Handling and Safe Storage. DOE-HDBK-1129-YR. U.S. Department of Energy. Washington. D.C.20585. 2008. 149 p.
3. Song J., An S., Kim T., Ha K. Post-fukushima challenges for the mitigation of severe accident consequences//Nuclear Engineering and Technology. 2020. Vol. 52. Pp. 2511–2521. DOI: 10.1016/j.net.2020.04.031.
4. Yamanishi T., Kakiuchi H., Tauchi H., et al. Discussions on Tritiated Water Treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station // Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. Pp. 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
5. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты российской Федерации».
6. Bruggeman A. E., Leysen R. F. R., Vermeiren P., Monsecour M. A process for the preparation of a catalyst for an isotopic exchange column, and thus prepared catalyst : Belgian Patent No. 893715, 1982.
7. Ionita G., Peculea M. Preparation of Hydrophobic Platinum Catalyst : Romanian Patent No. 107842, 1991.
8. Izawa H., Isomura S., Nakane R. Gaseous Exchange Reaction of Deuterium between Hydrogen and H. Water on Hydrophobic Catalyst Supporting Platinum // Journal of Nuclear Science and Technology. 1979. Vol. 16. Pp. 741–749.
9. Способ приготовления платинового гидрофобного катализатора изотопного обмена водорода с водой : пат. 2307708 Российская Федерация / Сахаровский Ю. А., Никитин Д. М., Магомедбеков Э. П., Пак Ю. С., Асновский В. Н., Баранов С. В., Глазков С. П., Суслов А. П. ; патентообладатели ФГУП «ПО «Маяк», РХТУ им. Д. И. Менделеева. — № 2006102805/04 ; заявл. 31.01.2006 ; опубл. 10.10.2007. Бюл. № 28. 5 с.
10. Андреев Б. М., Магомедбеков Э. П., Розенкевич М. Б., Сахаровский Ю. А. Гетерогенные реакции изотопного обмена трития. — М. : Эдиториал УРСС, 1999. 208 с.
11. Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Fedorchenko O. A., et al. Fifteen Years of Operation of CECE Experimental Industrial Plant in PNPI // Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 60. No. 4. Pp. 1117–1120. DOI: 10.13182/FST60-1117.
12. Boniface H. A., Castillo I., Everatt A. E., Ryland D. K. A Light-Water Detritiation Project at Chalk River Laboratories // Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 60. Pp. 1327–1330. DOI: 10.13182/FST11-A12674.
13. Perevezentsev A. N., Rozenkevich M. B., Subbotin M. L. Concept of the Fuel Cycle of the IGNITOR Tokamak // Physics of Atomic Nuclei. 2019. Vol. 82. № 7. Pp. 1055–1059. DOI: 10.1134/S1063778819070093.
14. Fedorchenko O. A., Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Vasyanina T. V. Light water detritiation // Fusion Science and Technology. 2015. Vol. 67. № 2. Pp. 332–335. DOI: 10.13182/FST14-T23.
15. Thomson S. N., Carson R., Ratnayake A., et al. Characterization of commercial proton exchange membrane materials after exposure to beta and gamma radiation // Fusion Science and Technology. 2015. Vol. 67. № 2. Pp. 443–446. DOI: 10.13182/FST14-T50.
16. Suppiah S., McCrimmon K., Lalonde S., et al. Tritium Handling Experience at Atomic Energy of Canada Limited // Fusion Science and Technology. 2015. Vol. 67. № 3. Pp. 588–591. DOI: 10.13182/FST14-T86.
17. Song K. M., Sohn S. H., Kang D. W., et al. Installation of liquid phase catalytic exchange column for the Wolsong tritium removal facility // Fusion Engineering and Design. 2007. Vol. 82. № 15–24. Pp. 2264–2268. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.07.026.
18. Miller J. M., Graham W. R. C., Celovsky S. L., et al. Design and operational experience with a pilot-scale CECE detritiation process // Fusion Science

- and Technology. 2002. Vol. 41. № 3. Pp. 1077–1081. DOI: 10.13182/fst02-a22749.
19. Bondarenko S. D., Alekseev I. A., Fedorchenko O. A., Vasyanina T. V. The Current Status of the Heavy Water Detritiation Facility at the NRC (Kurchatov Institute) – PNPI // Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76. Pp. 690–695. DOI: 10.1080/15361055.2020.1766275.
20. Магомедбеков Э. П., Растунова И. Л., Кулов Н. Н. Ректификация воды как метод разделения изотопов водорода и кислорода: состояние и перспективы // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 1. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0040357121010097.
21. Андреев Б. М., Магомедбеков Э. П., Розенкевич М. Б. и др. Разделение изотопов биогенных элементов в двухфазных системах. — М. : ИздАТ, 2003. 376 с.
22. Магомедбеков Э. П., Белкин Д. Ю., Селиваненко И. Л., Растунова И. Л. Массообменные характеристики спирально-призматической насадки в колоннах изотопного обмена при ректификации воды под вакуумом // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 5. С. 502–507. DOI: 10.7868/S0040357116050067.
23. Магомедбеков Э. П., Белкин Д. Ю., Селиваненко И. Л., Растунова И. Л. Массообменные характеристики регулярной рулонной ленточно-винтовой насадки в колоннах изотопного обмена при ректификации воды под вакуумом // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 4. С. 408–413. DOI: 10.7868/S0040357116040096.
24. Магомедбеков Э. П., Белкин Д. Ю., Растунова И. Л. и др. Математическое моделирование и оптимизация каскада депротизации тяжеловодного замедлителя // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 2. С. 131–139. DOI: 10.7868/S0040357117020051.
25. Магомедбеков Э. П., Белкин Д. Ю., Растунова И. Л. и др. Ректификация воды как метод детритизации тяжеловодного замедлителя // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 4. С. 376–383. DOI: 10.7868/S0040357117040066.
26. Bonnet I., Busigin A., Shapiro A. Tritium Removal and Separation Technology Developments // Fusion Science and Technology. 2008. Vol. 54. Pp. 209–214. DOI: 10.13182/FST08-A1797.
27. Сумченко А. С., Букин А. Н., Марунич С. А. и др. Влияние способа запуска насадочной колонны на эффективность процессов ректификации воды и детритизации газов методом фазового изотопного обмена // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 3. С. 267–276. DOI: 10.7868/S0040357115030136.
28. Kveton O. K., Yoshida H., Koonce J. E., et al. Design of the water detritiation and isotope separation systems for ITER // Fusion Technology. 1995. Vol. 28. Pp. 636–640. DOI: 10.13182/FST95-A30475.
29. Разумовский Г. Н., Селиваненко И. Л. Применение компрессионного теплового насоса для рекуперации энергии в процессе ректификации воды под вакуумом // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 2. С. 17–26.
30. Магомедбеков Э. П., Растунова И. Л. Обращение с тритийсодержащими водными отходами // Химическая промышленность сегодня. 2019. № 3. С. 62–68.

Информация об авторах

Магомедбеков Эльдар Парпачевич, кандидат химических наук, доцент, директор Института материалов современной энергетики и нанотехнологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., д. 9), e-mail: magomedbekov.e.p@muctr.ru.

Растунова Ирина Леонидовна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., д. 9), e-mail: rastunova.i.l@muctr.ru.

Библиографическое описание статьи

Магомедбеков Э. П., Растунова И. Л. Проблемы детритизации низкоактивных водных радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 17–24. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-17-24.

ISSUES ASSOCIATED WITH THE DETRITIATION OF LOW-LEVEL AQUEOUS RADIOACTIVE WASTE

Magomedbekov E. P., Rastunova I. L.

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Article received on November 24, 2021

Management of aqueous tritium-containing waste is viewed as a relevant challenge for many countries of the world. At present time, nuclear reactors designed for various purposes and spent nuclear fuel reprocessing plants are considered as key man-made sources of tritium waste. Tritium can be removed from water streams solely via physicochemical methods providing the separation of hydrogen isotopes. Two methods are considered as most promising in this respect, namely, water rectification under vacuum and chemical isotope exchange between hydrogen and water. The paper evaluates engineering and environmental aspects associated with the proposed methods providing light and heavy water detritiation.

Keywords: radioactive waste, tritium-containing water waste, detritiation, vacuum rectification of water, isotope exchange in the water-hydrogen system.

References

1. Fairlie I. Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities. Greenpeace. June 2007. 92 p.
2. DOE Handbook: Tritium Handling and Safe Storage. DOE-HDBK-1129-YR. U. S. Department of Energy. Washington. D.C.20585. 2008. 149 p.
3. Song J., An S., Kim T., Ha K. Post-Fukushima challenges for the mitigation of severe accident consequences. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, vol. 52, pp. 2511–2521. DOI: 10.1016/j.net.2020.04.031.
4. Yamanishi T., Kakiuchi H., Tauchi H., et al. Discussions on Tritiated Water Treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Fusion Science and Technology*, 2020, vol. 76, pp. 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
5. Federal'nyy zakon ot 11 iyulya 2011 g. No. 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmeneniy v ot del'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii" [Federal Law of the Russian Federation of July 11, 2011 No. 190-FZ On the Management of Radioactive Waste and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation].
6. Bruggeman A. E., Leysen R. F. R., Vermeiren P., Monsecour M. A *Process for the preparation of a catalyst for an isotopic exchange column, and thus prepared catalyst*. Belgian Patent No. 893715, 1982.
7. Ionita G., Peculea M. *Preparation of Hydrophobic Platinum Catalyst*. Romanian Patent No. 107842, 1991.
8. Izawa H., Isomura S., Nakane R. Gaseous Exchange Reaction of Deuterium between Hydrogen and H. Water on Hydrophobic Catalyst Supporting Platinum. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1979, vol. 16, pp. 741–749.
9. *Sposob prigotovleniya platinovogo gidrofobnogo katalizatora izotopnogo obmena vodoroda s vodoy* [Method Used to Produce Platinum Hydrophobic Catalyst for Isotopic Hydrogen Exchange with Water]: Pat. No. 2307708 Russian Federation. Sakharovskiy Yu. A., Nikitin D. M., Magomedbekov E. P., Pak Yu. S., Asnovskiy V. N., Baranov S. V., Glazkov S. P., Suslov A. P. Patentee FSUE PA Mayak, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, no. 2006102805/04; application date 31.01.2006; publication date 10.10.2007. Bul. No. 28. 5 p.
10. Andreyev B. M., Magomedbekov E. P., Rozenkevich M. B., Sakharovskiy Yu. A. *Geterogennyye reaktsii izotopnogo obmena Tritiya* [Heterogeneous Tritium Isotope Exchange Reactions]. Moscow, Editorial URSS Publ., 1999. 208 p.
11. Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Fedorchenko O. A., et al. Fifteen Years of Operation of CECE Experimental Industrial Plant in PNPI. *Fusion Science*

- and Technology*, 2011, vol. 60, no. 4, pp. 1117–1120. DOI: 10.13182/FST60-1117.
12. Boniface H. A., Castillo I., Everatt A. E., Ryland D. K. A Light-Water Detritiation Project at Chalk River Laboratories. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, pp. 1327–1330. DOI: 10.13182/FST11-A12674.
13. Perevezentsev A. N., Rozenkevich M. B., Subbotin M. L. Concept of the Fuel Cycle of the IGNITOR Tokamak. *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, vol. 82, no. 7, pp. 1055–1059. DOI: 10.1134/S1063778819070093.
14. Fedorchenko O. A., Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Vasyanina T. V. Light water detritiation. *Fusion Science and Technology*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 332–335. DOI: 10.13182/FST14-T23.
15. Thomson S. N., Carson R., Ratnayake A., et al. Characterization of commercial proton exchange membrane materials after exposure to beta and gamma radiation. *Fusion Science and Technology*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 443–446. DOI: 10.13182/FST14-T50.
16. Suppiah S., McCrimmon K., Lalonde S., et al. Tritium Handling Experience at Atomic Energy of Canada Limited. *Fusion Science and Technology*, 2015, vol. 67, no. 3, pp. 588–591. DOI: 10.13182/FST14-T86.
17. Song K. M., Sohn S. H., Kang D. W., et al. Installation of liquid phase catalytic exchange column for the Wolsong tritium removal facility. *Fusion Engineering and Design*, 2007, vol. 82, no. 15–24, pp. 2264–2268. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.07.026.
18. Miller J. M., Graham W. R. C., Celovsky S. L., et al. Design and operational experience with a pilot-scale CECE detritiation process. *Fusion Science and Technology*, 2002, vol. 41, no. 3, pp. 1077–1081. DOI: 10.13182/fst02-a22749.
19. Bondarenko S. D., Alekseev I. A., Fedorchenko O. A., Vasyanina T. V. The Current Status of the Heavy Water Detritiation Facility at the NRC (Kurchatov Institute) – PNPI. *Fusion Science and Technology*, 2020, vol. 76, pp. 690–695. DOI: 10.1080/15361055.2020.1766275.
20. Magomedbekov E. P., Rastunova I. L., Kulov N. N. Rektifikatsiya vody kak metod razdeleniya izotopov vodoroda i kisloroda: sostoyaniye i perspektivy [Water Rectification as a Method Providing the Separation of Hydrogen and Oxygen Isotopes: State-of-Art and Development Prospects]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.31857/S0040357121010097.
21. Andreyev B. M., Magomedbekov E. P., Rozenkevich M. B., et al. *Razdeleniye izotopov biogennykh elementov v dvukhfaznykh sistemakh* [Separation of Biogenic Element Isotopes in Two-phase Systems]. Moscow, IzdAT Publ., 2003. 376 p.
22. Magomedbekov E. P., Belkin D. Yu., Selivanenko I. L., Rastunova I. L. Massoobmennyye kharakteristiki spiral'no-prizmaticheskoy nasadki v kolonnakh izotopnogo obmena pri rektifikatsii vody pod vakuuumom [Mass Transfer Characteristics of Spiral-Prismatic Packing in Isotope Exchange Columns During Water Rectification Under Vacuum]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 502–507. DOI: 10.7868/S0040357116050067.
23. Magomedbekov E. P., Belkin D. Yu., Selivanenko I. L., Rastunova I. L. Massoobmennyye kharakteristiki regul'yarnoy rulonnoy lentchno-vintovoy nasadki v kolonnakh izotopnogo obmena pri rektifikatsii vody pod vakuuumom [Mass Transfer Characteristics of Regular Rolled Tape-Screw Packing in Isotope Exchange Columns During Water Rectification Under Vacuum]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 408–413. DOI: 10.7868/S0040357116040096.
24. Magomedbekov E. P., Belkin D. Yu., Rastunova I. L., et al. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya kaskada deprotizatsii tyazhelovodnogo zamedlitelya [Mathematical Modeling and Optimization of a Heavy Water Moderator Deprotization Cascade]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 131–139. DOI: 10.7868/S0040357117020051.
25. Magomedbekov E. P., Belkin D. Yu., Rastunova I. L., et al. Rektifikatsiya vody kak metod detritizatsii tyazhelovodnogo zamedlitelya [Water Rectification as a Heavy-Water Moderator Detritiation Method]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 376–383. DOI: 10.7868/S0040357117040066.
26. Bonnet I., Busigin A., Shapiro A. Tritium Removal and Separation Technology Developments. *Fusion Science and Technology*, 2008, vol. 54, pp. 209–214. DOI: 10.13182/FST08-A1797.
27. Sumchenko A. S., Bukin A. N., Marunich S. A., et al. Vliyaniye sposoba zapuska nasadochnoy kolonny na effektivnost' protsessov rektifikatsii vody i detritizatsii gazov metodom fazovogo izotopnogo obmena [Influence of the Packed Column Method Starting on the Efficiency of Water Rectification and Gas Detritiation via Phase Isotope Exchange]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*,

2015, vol. 49, no. 3, pp. 267–276. DOI: 10.7868/S0040357115030136.

28. Kveton O. K., Yoshida H., Koonce J. E., et al. Design of the water detritiation and isotope separation systems for ITER. *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, pp. 636–640. DOI: 10.13182/FST95-A30475.

29. Razumovskiy G. N., Selivanenko I. L. Primeneniye kompressionnogo teplovogo nasosa dlya rekuoperatsii energii v protsesse rektifikatsii vody pod vakuomom [Compression Heat Pump Application

for Energy Recovery in the Process of Water Rectification Under Vacuum]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya — Chemical Industry Today*, 2017, no. 2, pp. 17–26.

30. Magomedbekov E. P., Rastunova I. L. Obrashcheniye s tritiysoderzhashchimi vodnymi otkhodami [Management of Tritium-Containing Aqueous Waste]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya — Chemical Industry Today*, 2019, no. 3, pp. 62–68.

Information about the authors

Magomedbekov Eldar Parpachevich, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Materials of Modern Energy and Nanotechnology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russia), e-mail: magomedbekov.e.p@muctr.ru.

Rastunova Irina Leonidovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Isotope Technology and Hydrogen Energy, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russia), e-mail: rastunova.i.l@muctr.ru.

Bibliographic description

Magomedbekov E. P., Rastunova I. L. Issues Associated with the Detritiation of Low-Level Aqueous Radioactive Waste. *Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 17–24. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-17-24. (In Russian).