

УДК 621.039.66

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЛИТИЕВОЙ КПС МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОРБЦИИ

Тулубаев Е.Ю., Понкратов Ю.В., Гордиенко Ю.Н., Самарханов К.К.,
Бочков В.С., Заурбекова Ж.А., Прозорова И.В., Мартыненко Е.А.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Настоящая работа посвящена разработке методики проведения реакторных экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с литиевой КПС методом динамической сорбции. В результате проведенных работ была разработана конструкция экспериментального облучательного устройства для проведения реакторных экспериментов. Выполнены нейтронно-физические и теплофизические расчеты с целью обоснования этой конструкции для использования в реакторных экспериментах. Разработана методика проведения экспериментов с образцом литиевой КПС, в результате которой определены методические условия испытаний: температура образца; уровни потоков дейтерия, подаваемых в экспериментальную ячейку; размер образца; условия предварительной обработки образца; режим откачки системы, режим регулировки температуры образца, режим масс-спектрометрических измерений состава газа над образцом. Проведены методические эксперименты по определению температурной зависимости изменения состава газа в камере с литиевой КПС при подаче разных потоков дейтерия. Проведены термодесорбционные эксперименты с образцом литиевой КПС.

ВВЕДЕНИЕ

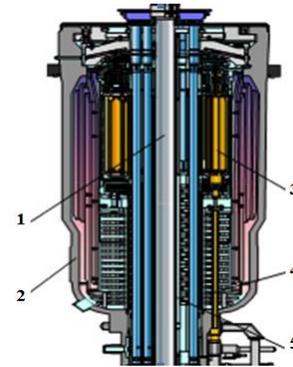
В настоящее время в мире, в ходе реализации международных проектов по созданию термоядерных реакторов ИТЭР и ДЕМО, ведутся масштабные исследования свойств конструкционных материалов. Эксплуатация действующих на сегодняшний момент термоядерных реакторов (ТЯР) показала, что применение вольфрама, бериллия и графита в качестве обращенного к плазме материала (ОПМ) не в полной мере позволяет решить такие проблемы как: деградация ОПМ и разрушение изделий на их основе; загрязнение плазмы продуктами эрозии; накопление трития в конструкционных материалах. Данные проблемы могут быть преодолены путём использования в качестве ОПМ жидких металлов с низким зарядовым числом. По результатам ранее проведенных исследований [1–3], можно сделать вывод, что для использования в качестве конструкционного материала внутрикамерных устройств ТЯР наилучшим является литий. Преимущества использования лития в качестве ОПМ подтверждаются результатами исследований, проводимых на плазмо-физических установках T11-M (Троицк, Россия), FTU (Фраскати, Италия), NSTX (Принстон, США), EAST (Хэфэй, Китай), T-10 (Москва, Россия), TJ-II (Барселона, Испания), КТМ (Курчатов, Казахстан) [4–11]. В большинстве случаев реализация преимуществ лития перед традиционными ОПМ основана на использовании, так называемой литиевой капиллярно-пористой системы (КПС) – принципиально нового материала, в котором жидкий литий за счет капиллярных сил стабилизирован в матрице из твердого пористого материала [12].

На данный момент одной из важных задач в изучении процессов плазма-стенка является исследование процессов взаимодействия изотопов водорода с литиевой КПС в условиях реакторного облучения

[13–15]. В представленной работе решались задачи по разработке методологии проведения сорбционных экспериментов литиевых на уровне давлений дейтерия 0,1–100 Па при температурах образца 100–800 °С.

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В качестве источника нейтронного и гамма-излучений в сорбционных экспериментах с литиевыми КПС будет использоваться исследовательский реактор ИВГ.1М [16]. На рисунке 1 представлена упрощенная конструкция исследовательского реактора.



1 – центральный канал, 2 – корпус реактора, 3 – регулирующий барабан (РБ), 4 – привод исполнительного механизма РБ, 5 – железобетонная защита

Рисунок 1. Схема исследовательского реактора ИВГ.1М и его основные характеристики

В таблице 1 представлены основные характеристики реактора. Характеристика реакторного излучения, распределение потока нейтронов и гамма квантов по высоте экспериментального канала (ФКЭ) приведены на рисунках 2–5.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЛИТИЕВОЙ КПС МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОРБЦИИ**

Таблица 1. Характеристики исследовательского реактора ИВГ.1М

Тепловая мощность	6 МВт
Эквивалентный диаметр активной зоны	548 мм
Высота активной зоны	800 мм
Топливо	сплав U и Zr
Обогащение по ²³⁵ U	90%
Загрузка ²³⁵ U	4,6 кг
Теплоноситель	вода

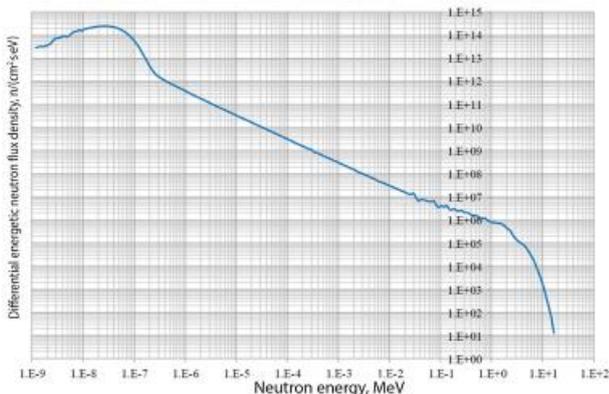


Рисунок 2. Спектр нейтронов

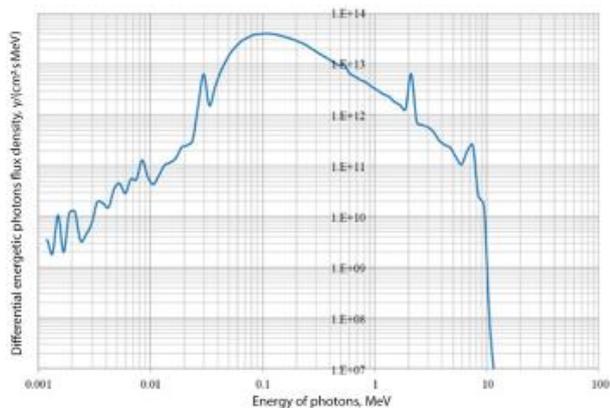


Рисунок 3. Спектр γ -излучения

Реакторные эксперименты будут проводиться, используя экспериментальный стенд ЛИАНА. Экспериментальный стенд ЛИАНА (рисунок 6) [17] позволяет проводить эксперименты по изучению процессов взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами ЯР и ТЯР различными методами (методом водородопроницаемости (ВП); методом газовой абсорбции и методом газовой термодесорбции (ТДС)), при температурах образца от 20 до 1300 °С. Экспериментальный стенд функционально состоит из ампульного устройства (АУ) и рабочего блока. Рабочий блок функционально состоит из вакуумной системы, системы очистки-напуска изотопов водорода в ампулу и информационно-измерительного комплекса.

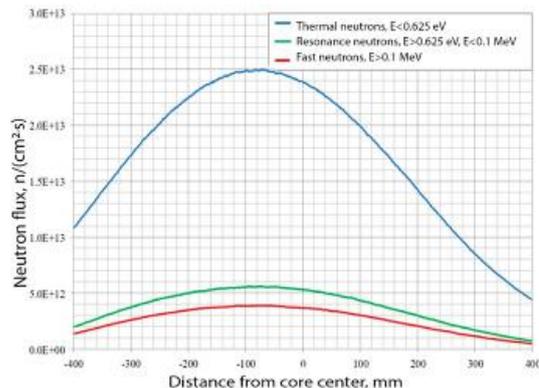


Рисунок 4. Распределение потока нейтронов по высоте ФКЭ

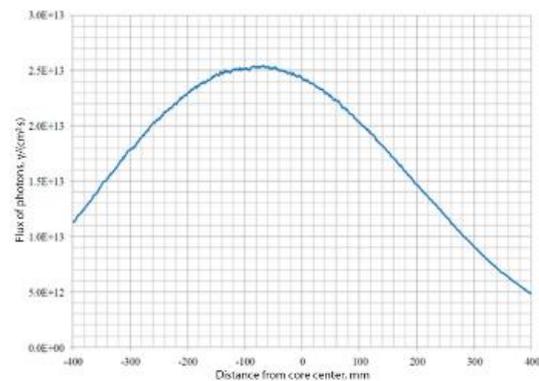
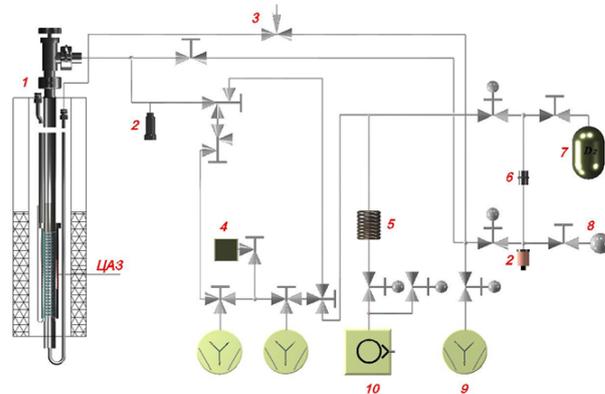


Рисунок 5. Распределение потока γ -излучения по высоте ФКЭ



1 – ампульное устройство, 2 – датчики давления, 3 – регулятор подачи газа (натекатель), 4 – масс-спектрометр, 5 – азотная ловушка, 6 – палладий-серебряный фильтр, 7 – баллон с газом, 8 – емкость со спектрально чистым газом, 9 – высоковакуумные насосы, 10 – форвакуумный насос

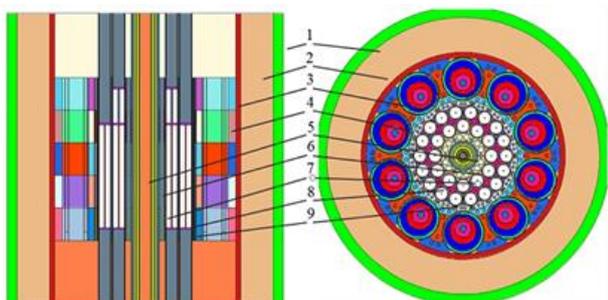
Рисунок 6. Схема экспериментального стенда ЛИАНА

2 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

В ходе разработки экспериментального ампульного устройства были проведены нейтронно-физические и теплофизические расчеты предложенной конструкции экспериментального устройства (ЭУ).

Для проведения нейтронно-физических расчетов была разработана модель активной зоны реактора. Графическое представление модели активной зоны

(АЗ) реактора приведено на рисунке 7. Расчетная модель построена с помощью программы MCNP5 с библиотеками констант ENDF/B-5,6. В ходе проведения расчетов была выполнена оценка влияния количества ${}^6\text{Li}$ на реактивность реактора, результаты которой приведена на рисунке 8.



1 – внешний корпус; 2 – боковые экраны; 3 – отражатель; 4 – регулирующие барабаны (РБ); 5 – ФКЭ; 6 – центральная сборка; 7 – стержни компенсации реактивности (СКР); 8 – твэлы; 9 – каналы ВОТК

Рисунок 7. Расчетная модель реактора ИВГ.1М

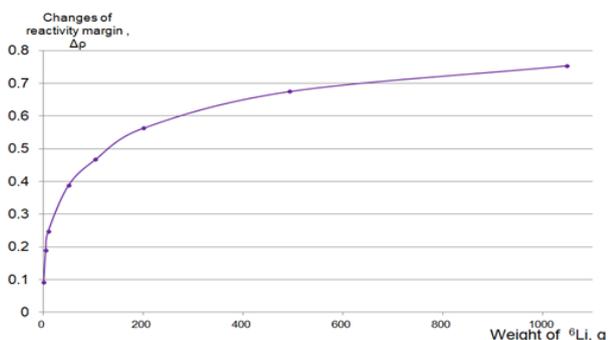


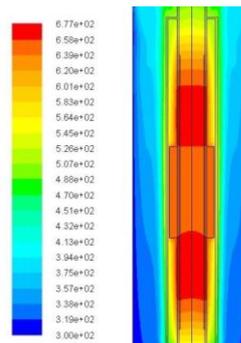
Рисунок 8. Изменение запаса реактивности реактора в зависимости от массы образца ${}^6\text{Li}$

Анализируя полученные данные, следует отметить, что зависимость реактивности от массы образца нелинейная, и как таковая, масса не значительно влияет на реактивность.

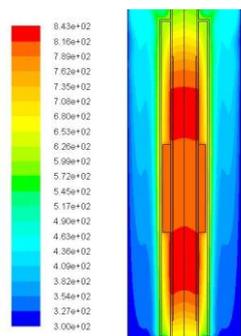
Тепловые расчеты ЭУ проведены с использованием программного комплекса ANSYS Fluent v.14, основанного на методе конечных объемов и позволяющего рассчитывать тепловые и гидродинамические параметры рассматриваемой системы. В ходе проведения теплофизических расчетов было рассчитано температурное поле активной ячейки ЭУ с литиевой КПС для условий проведения реакторных экспериментов с исследуемым образцом на уровнях стационарной мощности 1, 2 и 6 МВт. Результаты расчетов приведены на рисунке 9.

По результатам расчетов можно сказать, что при проведении реакторных экспериментов для данной конструкции АУ градиент температур по образцу литиевой КПС при тепловой мощности реактора 1 МВт, 2 МВт, 6 МВт практически идентичен. Однако, стоит отметить, что, как и следовало ожидать, с увеличением мощности реактора увеличивается мак-

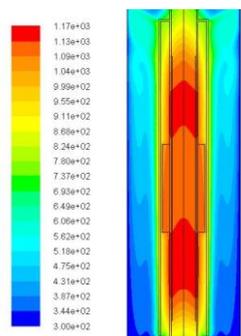
симальная температура экспериментальной ячейки, которая, в свою очередь, составила 677 °С, 843 °С, 1170 °С для 1 МВт, 2 МВт и 6 МВт соответственно. Также с увеличением мощности реактора, а, соответственно, и потока тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале, замечено небольшое изменение профиля температурного поля экспериментальной ячейки, что, скорее всего, обусловлено конвективными переносами тепла, связанными с увеличением вклада в общий тепловой баланс энергии ядерной реакции взаимодействия тепловых нейтронов с ${}^6\text{Li}$.



а) мощность реактора 1 МВт



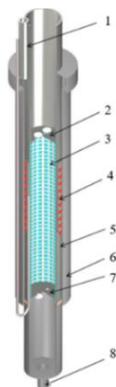
б) мощность реактора 2 МВт



в) мощность реактора 6 МВт

Рисунок 9. Температурное поле модели ЭУ при различных режимах работы ИВГ.1М

На основании вышеуказанных расчетов было разработано уникальное экспериментальное устройство с образцом литиевой КПС. 3D-модель ампульного устройства приведена на рисунке 10.



1- тракт охлаждения; 2 - верхний экран; 3- КПС; 4 - нагреватель; 5 – корпус ампулы; 6 – кожух охлаждения; 7 – нижний экран; 8 – тракт подачи изотопов водорода

Рисунок 10. 3D-модель ампульного устройства

Следует отметить, что образец имеет форму полового цилиндра, так как данная форма наиболее лучшим образом позволяет реализовать реакторные сорбционные эксперименты с литневой КПС.

3 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

С целью отработки методики проведения реакторных экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с литневой КПС методом динамической сорбции было изготовлено экспериментальное устройство (ЭУ) с образцом литневой КПС (рисунок 11).

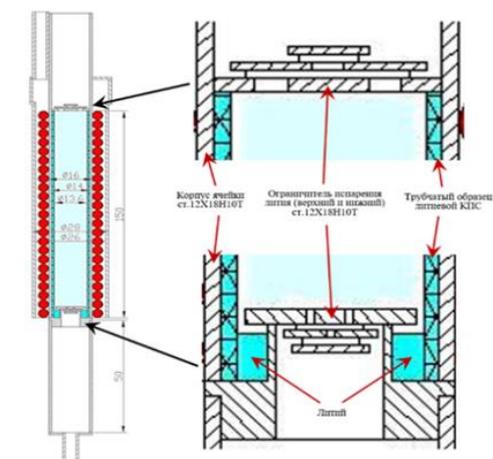


Рисунок 11. Ампульное устройство с образцом литневой КПС

Конструкция экспериментального устройства имеет следующие особенности: для достижения более равномерного нагрева исследуемого образца и минимизации градиентов температуры по высоте литневой КПС внешний нагреватель установлен по всей высоте трубчатого образца; для увеличения сорбционной емкости литневой КПС по отношению к изотопам водорода, а также создания подпитки образца на случай испарения литня из капиллярно-пористой структуры при долгосрочных экспериментах на высоких температурах в конструкции предусмотрено место для размещения дополнительного количества литня; для уменьшения вероятности миграции паров литня из экспериментальной ячейки предусмотрена система ограничителей из нержавеющей стали, установленных в верхней и нижней частях ячейки.

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

После монтажа ЭУ в вакуумную систему стенда ЛИАНА и проведения технологических процедур и проверок всех систем стенда была проведена серия методических экспериментов, целью которых являлись отработка методики реакторных экспериментов и получение временных зависимостей изменения парциального давления дейтерия в объеме ЭУ, над литневой КПС, при стационарном потоке спектрально чистого дейтерия через исследуемый образец, на различных температурах.

Процедуры проведения методических экспериментов были следующими: предварительно ампула непрерывно откачивалась до давления остаточных газов менее 10^{-6} торр, в процессе откачки велась непрерывная регистрация спектра газовой фазы в камере; далее в ампулу подавался поток дейтерия, таким образом чтобы уровень парциального давления его составлял порядка 10^{-5} – 10^{-3} торр; при данном уровне потока дейтерия образец последовательно нагревался до температур в диапазоне от 250 до 550 °С. Исследовалось несколько температурных полок, при этом в реальном времени регистрировалось изменение парциального давления дейтерия в ампуле, после чего образец последовательно охлаждался до комнатной температуры с теми же температурными полками и регистрировалось изменение парциального давления дейтерия в ампуле. На заключительном этапе эксперимента образец в условиях непрерывной откачки нагревался до температуры 700 °С.

Результаты методических экспериментов по сорбции дейтерия литневой КПС приведены на рисунках 12 и 13.

На рисунке 14 приведены результаты методических экспериментов по термодесорбции дейтерия из литневой КПС.

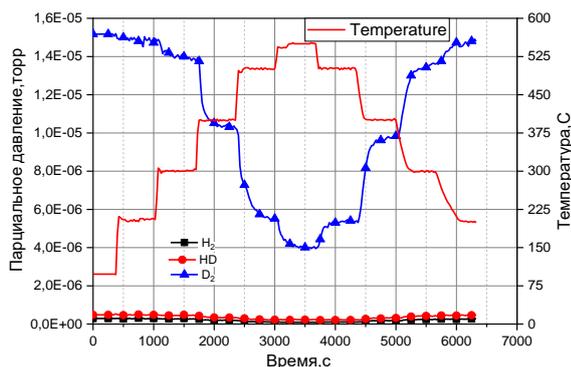


Рисунок 12. Зависимость изменения парциального давления дейтерия в ампуле от температуры образца, при стационарном потоке дейтерия $\sim 2,7 \cdot 10^{-11}$ моль/с

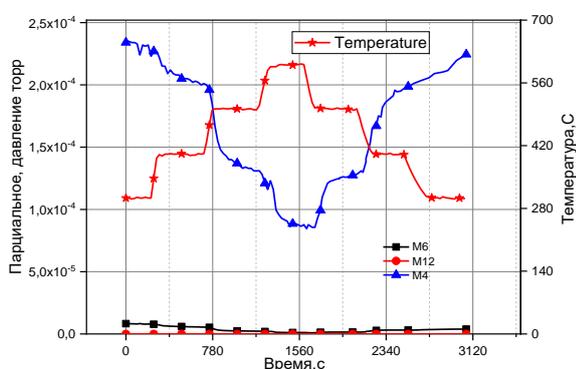


Рисунок 13. Зависимость изменения парциального давления дейтерия в ампуле от температуры образца, при стационарном потоке дейтерия $\sim 4,5 \cdot 10^{-10}$ моль/с

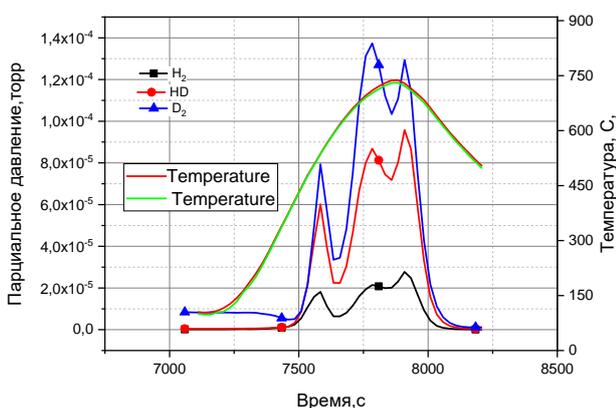


Рисунок 14. Зависимость выхода дейтерия в процессе ТДС эксперимента из образца литиевой КПС

Проанализировав данные, полученные в сорбционных экспериментах, можно сказать, что:

- наблюдалась ожидаемая картина снижения парциального давления дейтерия в непрерывно откачиваемой камере при повышении температуры литиевой КПС (при стационарном уровне потока дейтерия в ампулу);
- время установления равновесного давления дейтерия в ампуле зависит от температуры литиевой КПС и снижается при повышении температуры литиевой КПС;
- наблюдается повторяемость экспериментов для всех исследованных уровней потоков дейтерия в камеру (для более чем 10 циклов экспериментов);
- методически наиболее удобным для реакторных экспериментов является поток дейтерия в камеру в диапазоне от 10^{-11} моль/с до 10^{-10} моль/с (соответствующий давлению дейтерия в камере 10^{-5} – 10^{-4} торр).

По предварительной оценке данных, полученных в термодесорбционных экспериментах, стоит отметить, что:

- при нагреве литиевой КПС после экспериментов по насыщению наблюдается сложная картина выделения молекул H_2 , D_2 и HD , состоящая из трех пиков. Характер и температура пиков выделения для разных молекул совпадает;
- самый большой пик выделения дейтерия (при температуре ~ 820 °C), вероятно, связан с моментом начала распада LiD .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы были проведены нейтронно-физические и теплофизические расчеты и выбран режим реакторных экспериментов. Разработана новая конструкция экспериментальной ячейки, позволяющая проводить эксперименты по генерации и выделению трития из литиевой КПС в условиях реакторного облучения при температуре выше 500 °C, также были проведены предварительные эксперименты по определению температурной зависимости изменения состава газа в камере с литиевой КПС при подаче разных потоков дейтерия. В последующем с использованием разработанной методики будут проведены реакторные эксперименты, в которых, помимо решения задачи о влиянии облучения на процессы сорбции дейтерия, будет получена картина выделения генерируемого в литии трития в виде тритийсодержащих молекул DT , T_2 .

Работа выполнена в рамках реализации НТП КТМ по теме «Испытания и отработка режимов работы макета литиевого дивертора на основе капиллярно-пористой системы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazzitell, G. FTU results with a liquid lithium limiter / G. Mazzitelli [et al.] // Nuclear Fusion. – Vienna: IAEA, 25 May 2011. – Vol. 51, № 7.
2. Kugel, H.W. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor. / H.W. Kugel [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 10 October 2012. – Vol. 87. – P. 1724–1731.

3. Mirnov S.V. Recent lithium experiments in tokamak T-11M / S.V. Mirnov [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– July 2013.– Vol. 438, Supplement.– P. S224–S228.
4. Zharkov, M.Yu. Development of Lithium CPS Based Limiters for Realization of a Concept of Closed Lithium Circulation Loop in Tokamak / M.Yu. Zharkov [et al.] // Physics Procedia. – 2015.– Vol. 71.– P. 47–51.
5. Mirnov, S.V. Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T-11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady-state fusion neutron source / S.V. Mirnov [et al.] // Nucl. Fusion.– 2015. – 55 123015 doi:10.1088/0029-5515/55/12/123015.
6. Mazzitelli, G. Experiments on FTU with an actively water cooled liquid lithium limiter / G. Mazzitelli, [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1152–1155.
7. Scotti, F. Lithium sputtering from lithium-coated plasma facing components in the NSTX divertor / F. Scotti [et al.] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1165–1168.
8. Chen, Zhaoxi Preliminary design and performance study of EAST liquid lithium limiter based on CPS / Zhaoxi Chen [et al.] // Fusion Engineering and Design.– 11 November 2014.– Vol. 89. – P. 2685–2690.
9. Lyublinski, I. E. Development of lithium and tungsten limiters for test on T-10 tokamak at high heat load condition / I. E. Lyublinski, A. V. Vertkov, M. Yu. Zharkov, V. A. Vershkov and S. V. Mirnov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.– 2016.– Vol.130.– 012019 doi:10.1088/1757-899X/130/1/012019.
10. Tabarés, Francisco L. First liquid lithium limiter biasing experiments in the TJ-II stellarator / Francisco L. Tabarés, [et al. TJ-II Team] // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1142–1146.
11. Lyublinski, Igor E. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak / Igor E. Lyublinski [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 2013. – October. – Vol. 88, Issues 9-10. – P. 1862–1865.
12. Lyublinski, I. Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium / I. Lyublinski, A. Vertkov, S. Mirnov, V. Lazarev // Journal of Nuclear Materials.– August 2015.– Vol. 463.– P. 1156–1159.
13. Tazhibayeva, Irina. Results of reactor irradiation of liquid lithium saturated with deuterium / Irina Tazhibayeva, Yuriy Ponkratov, Timur Kulsartov, Yuriy Gordienko, Mazhyn Skakov, Zhanna Zaurbekova, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov, Giuseppe Mazzitelli // Fusion Engineering and Design.– April 2017.– Vol. 117.– P. 194–198.
14. Kulsartov, T. Investigation of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS under reactor irradiation // T. Kulsartov, I. Tazhibayeva, Yu. Ponkratov, Yu. Gordienko, Zh. Zaurbekova, V. Baklanov, Ye. Chikhray, M. Skakov, Ye. Koyanbayev, A. Korovikov, E. Nesterov // Fusion Eng. Des. (2017).
15. Ponkratov, Yuriy. Determination of tritium generation and release parameters at lithium CPS under neutron irradiation / Viktor Baklanov, Mazhyn Skakov, Timur Kulsartov, Irina Tazhibayeva, Yuriy Gordienko, Zhanna Zaurbekova, Yevgeniy Tulubayev, Yevgeniy Chikhray, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov // Fusion Engineering and Design.– 2016.– V. 109-111.– P. 52–56.
16. Sadvakassova A.O. et. al. Research of reactor radiation influence upon processes of hydrogen isotopes interaction with materials of the fusion facility. Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 60. P. 9–15. <https://doi.org/10.13182/FST11-A12398>
17. Гордиенко Ю.Н., Применение метода водородной проницаемости в реакторных экспериментах по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами / Ю.Н. Гордиенко, Т.В. Кульсартов, Ж.А. Заурбекова, Ю.В. Понкратов, В.С. Гныря, Н.Н. Никетенов. // Известия Томского Политехнического Университета: Математика и механика. Физика [Бюллетень Томского Политехнического Университета: Математика и механика. Физика] 324 (2014) 149–162.

ДИНАМИКАЛЫҚ СОРБЦИЯ ӘДІСІМЕН СУТЕГІ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ ЛИТИЙЛІ КПС-пен ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЗЕРТТЕУ БОЙЫНША РЕАКТОРЛЫҚ ТӘЖІРИБЕЛЕРДІ ЖҮРГІЗУ ӘДІСТЕМЕСІ

Е.Ю. Тулубаев, Ю.В. Понкратов, Ю.Н. Гордиенко, К.К. Самарханов,
В.С. Бочков, Ж.А. Заурбекова, И.В. Прозорова, Е.А. Мартыненко

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл мақалада динамикалық сорбция әдісімен сутегі изотоптарының литийлі КПС-пен өзара әрекеттесуін зерттеу бойынша реакторлық тәжірибелерді жүргізу әдістемесі келтірген. Жүргізілген жұмыстар нәтижесінде реакторлық тәжірибелерді жүргізу үшін эксперименттік сәулендіру құрылғысының конструкциясы әзірленді. Реакторлық тәжірибелерде қолданылатын конструкцияны негіздеу мақсатында нейтрондық-физикалық және жылу-физикалық есептеулер орындалды. Литийлі КПС үлгісімен реакторлық тәжірибелер жүргізу әдістемесі әзірленді. Әдістеме нәтижесінде сынақтардың әдістемелік шарттары анықталды, яғни: үлгі температурасы; эксперименталды ұяшыққа берілетін дейтерий ағыны; литийлі КПС үлгісінің өлшемі; үлгіні алдын ала өңдеу шарттары; ЛИАНА стендінің газ-вакуумдық жүйесінің сорып алу режимі, үлгінің температурасын реттеу режимі, үлгінің үстінен масс-спектрометриялық әдісімен газдың құрамын өлшеу режимі. Дейтерийдің әртүрлі ағындарын берілуі кезінде литийлі КПС-пен камерадағы газ құрамының өзгеруінің температуралық тәуелділігін анықтау бойынша әдістемелік тәжірибелер өткізілді. Литийлі КПС үлгісімен термодесорбциялық тәжірибелер жүргізілді.

**REACTOR EXPERIMENTS TECHNIQUE ON STUDYING
THE INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES WITH LITHIUM CPS
BY DYNAMIC SORPTION METHOD**

**E.Yu. Tulubaev, Yu.V. Ponkratov, Yu.N. Gordienko, K.K. Samarkhanov,
V.S. Bochkov, Zh.A. Zaurbekova, I.V. Prozorova, E.A. Martynenko**

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This work is devoted to the development of a methodology for conducting reactor experiments to study the interaction of hydrogen isotopes with lithium CPS by the dynamic sorption method. As a result of the work the design of an experimental irradiation device for conducting reactor experiments was developed. Neutron-physical and thermophysical calculations were performed to justify this design for use in reactor experiments. A technique was developed for conducting experiments with a sample of lithium CPS as a result of which the methodological conditions of the tests were determined: sample temperature; levels of deuterium flux supplied to the experimental cell; sample size; sample pretreatment conditions; system pump out mode, sample temperature adjustment mode, mass spectrometric measurements of the gas composition above the sample. Methodical experiments were carried out to determine the temperature dependence of the gas composition change in the chamber with a lithium CPS when various deuterium flows were applied. Thermal desorption experiments with a sample of lithium CPS were carried out.