

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА И ЕГО ИЗОТОПОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ЯР И ТЯР В УСЛОВИЯХ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

*Ю. Н. Гордиенко, Т. В. Кульсартов, Ю. В. Понкратов, И. Л. Тажибаева,  
В. В. Бакланов, Ж. А. Заурбекова, М. К. Скаков*

Институт атомной энергии Национального ядерного центра, г. Курчатов, Казахстан  
[tima@physics.kz](mailto:tima@physics.kz)

## Введение

В настоящий момент ведутся масштабные исследования по различным аспектам создания и совершенствования ЯР и ТЯР. Крупной областью в таких исследованиях являются материаловедческие испытания. Современное материаловедение решает вопросы, связанные с конструированием современных ядерных и термоядерных установок: с каждым годом увеличивается список свойств материалов, подлежащих изучению, расширяется диапазон действующих параметров, в которых эти свойства должны определяться, и, соответственно, разрастаются и усложняются методики и технические средства для проведения исследований.

В Институте атомной энергии Национального ядерного центра РК на реакторе ИВГ.1М (г. Курчатов) в течение нескольких лет различными методами проводились и проводятся в настоящее время многочисленные работы по исследованию процессов взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами в условиях реакторного облучения [1–11].

Актуальность проводимых исследований связана с проблемой водородопроницаемости конструкционных материалов термоядерных установок, которая возникла и существует в связи с использованием в будущих термоядерных реакторах (ИТЭР и ДЕМО) трития, диффузионные утечки которого создают ряд конструктивных трудностей и потребуют значительных затрат как при защите персонала и окружающей среды, так и при очистке теплоносителя от трития.

Еще одна причина пристального внимания к водородопроницаемости конструкционных материалов обусловлена тем, что концентрация водорода, устанавливающаяся в них при проникновении изотопов водорода, может оказаться близкой к значению, которое является критическим для материала с точки зрения его стойкости к водородному охрупчиванию.

В связи с этим возникает задача по определению основных параметров взаимодействия изотопов водорода с перспективными материалами в условиях комплексного воздействия факторов эксплуатации (температуры, изотопов водорода, нейтронного облучения и др.).

Для решения данной задачи в ИАЭ НЯЦ РК был специально разработан и создан экспериментальный стенд ЛИАНА, который позволяет проводить эксперименты по изучению поведения изотопов водорода (и определению таких параметров взаимодействия как: коэффициенты диффузии, проницаемости, растворимости) в конструкционных материалах ТЯР в условиях, приближенных к условиям их реальной работы, т.е. при одновременном воздействии изотопов водорода, температуры и реакторного излучения.

В качестве источника нейтронного излучения в экспериментах служит исследовательский реактор ИВГ.1М.

### Реактор ИВГ.1М

Реактор ИВГ.1М – исследовательский водо-водяной гетерогенный ядерный реактор корпусного типа на тепловых нейтронах с легководными замедлителем и теплоносителем и бериллиевым отражателем нейтронов (см. рис. 1).

*Технические параметры реактора ИВГ.1М. следующие:*

- тепловая мощность – 72 МВт;
- эффективный размер активной зоны – 548 мм;
- высота активной зоны – 800 мм;
- содержание урана-235 в активной зоне – 4,6 кг;
- плотность потока тепловых нейтронов в центре экспериментального канала –  $3,5 \cdot 10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с).

В табл. 1 приведены значения потока нейтронов при мощности реактора 6 МВт.

Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов, установленных в ячейках трех кольцевых рядов. В центральной части реактора расположен центральный петлевой канал с бериллиевым вытеснителем и корпусом физического экспериментального канала (ФКЭ).

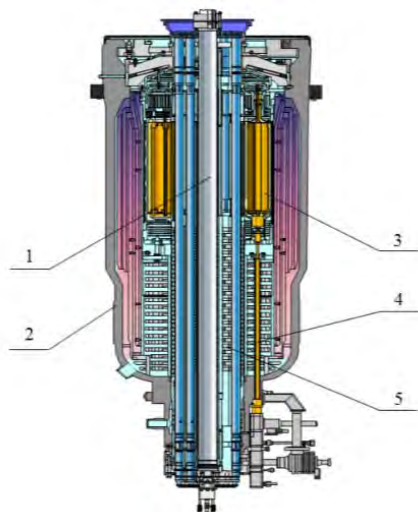


Рис. 1. Реактор ИВГ.1М: 1 – центральный канал; 2 – корпус реактора; 3 – регулирующий барабан (РБ); 4 – привод исполнительного механизма РБ; 5 – железобетонная защита

Таблица 1

Поток нейтронов в центре активной зоны реактора ИВГ.1М при работе на мощности 6 МВт

Энергетическая группа	от 0 до 0,67 эВ	от 0,67 до $0,1 \cdot 10^6$ эВ	от 0,1 до 10 МэВ	Интегральный поток
Нейтронный поток, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	$0,87 \cdot 10^{14}$	$0,42 \cdot 10^{14}$	$0,22 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{14}$

Корпус ФКЭ используется в качестве канала для размещения облучаемого ампульного устройства (АУ).

### Экспериментальный стенд ЛИАНА

Экспериментальный стенд ЛИАНА 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 и входных давлениях изотопов водорода до 10 атм.

Экспериментальный стенд функционально состоит из ампульного устройства (АУ) с диффузионной ячейкой, содержащей образец (см. рис. 2) и рабочего блока (на рисунке он выделен красной пунктирной линией.) На рис.2,*а* представлено ампульное устройство, которое используется в экспериментах, проводимых методом газовой абсорбции и ТДС, а на рис. 2,*б* представлена схема вакуумной системы стенда ЛИАНА с ампульным устройством, используемым в экспериментах по водородопроницаемости конструкционных материалов.

АУ состоит из экспериментальной ячейки с исследуемым образцом, электрического нагревателя, устройства газовой охлаждения, термопар и соединительной трубы с фланцем.

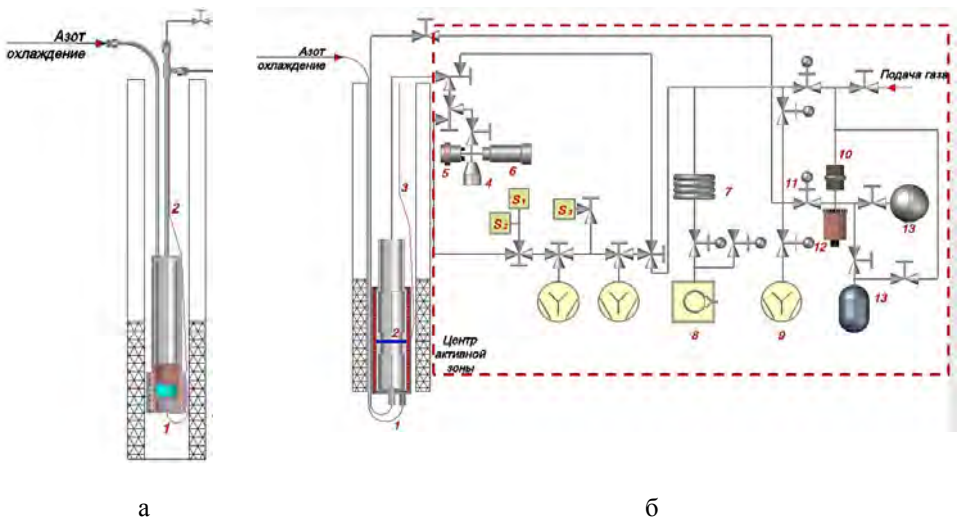


Рис. 2. Схема вакуумной системы стенда ЛИАНА в экспериментах методом ВП и газовой абсорбции: 1 – ампульное устройство с образцом; 2 – исследуемый образец; 3 – термопары; 4 – датчик давления ConvectOrg; 5 – датчик давления ИКД-100; 6 – датчик давления ASG 2; 7 – азотная ловушка; 8 – форвакуумный насос; 9 – высоковакуумный насос; 10 – водородный фильтр; 11 – датчик давления ПМДГ; 12 – вакуумный вентиль; 13 – емкость для спектрально чистого водорода; S1, S2, S3 – масс-спектрометры: ИПДО-1 (с датчиком РМО-13), MX-6407; RGA-100

Рабочий блок в свою очередь функционально состоит из вакуумной системы, системы очистки и напуска изотопов водорода и информационно-измерительного комплекса.

*Вакуумная система экспериментального стенда* позволяет проводить подготовку стенда к работе и создавать необходимые условия для проведения экспериментов. Вакуумная система состоит из форвакуумной и высоковакуумной частей, соединенных между собой трубопроводами с запорной арматурой. Данная система оснащена вакуумным насосом (НВР-5ДМ) с азотной ловушкой и магниторазрядными насосами (НЭМ-300, НОРД-100 и НОРД-250). Насос НВР-5ДМ с азотной ловушкой служит для предварительной откачки всей системы и обеспечивает минимальное давление для начала работы высоковакуумных магниторазрядных насосов. Насосы НЭМ-300, НОРД-100 и НОРД-250 создают необходимые условия (давление) в объеме ампульного устройства, измерительного тракта и в системе напуска изотопов водорода.

*Система очистки и напуска экспериментального стенда* обеспечивает напуск спектрально чистого водорода и его изотопов на входную сторону исследуемого образца. Очистка водорода и его изотопов осуществляется с помощью палладий-серебряного фильтра. Спектрально чистый водород для экспериментов набирается в накопительную емкость до заданного давления. Система очистки и напуска оснащена вакуумными и газовыми трубопроводами, запорной арматурой и вакуумным насосом для обеспечения периодической откачки и напуска водорода на входной стороне образца после цикла измерений.

*Информационно-измерительный комплекс (ИИК)* обеспечивает контроль и управление параметрами стенда в процессе подготовки и проведения научных исследований и масс-спектрометрическую регистрацию проникающих или выделяющихся газов из исследуемого образца.

На рис. 3 представлена структурная схема ИИК стенда ЛИАНА.

ИИК стенда ЛИАНА автоматизирован и представляет собой комплект программных и аппаратных средств, предназначенных для ввода сигналов первичных преобразователей (датчиков) в виде напряжения или тока, обеспечения согласования сигналов, гальванической развязки сигнальных цепей, цифровой передачи, обработки, регистрации и представления данных в единицах физических величин.

В ИИК реализованы следующие виды каналов:

– 8 каналов измерения температуры на основе термоэлектрических преобразователей (термопар) градуировки ХА и ХК, предназначенных для измерения температуры ампульного устройства;

– 1 канал измерения температуры на основе термопреобразователя сопротивления ТСР100, предназначенного для измерения температуры холодного спая;

– 1 канал измерения давления на основе датчика Сапфир-22ДИ, предназначенного для контроля давления в системе охлаждения ампульного устройства;

– 5 каналов измерения разрежения (вакуума), предназначенных для контроля разрежения в измерительном тракте и трубопроводе подачи газа в ампульное устройство и накопительной емкости;

– 7 каналов ввода и регистрации сигналов, соответствующих мощности реактора ИВГ.1М, поступающих от аппаратуры «Карпаты» СУЗ.

Регистрация прохождения изотопов водорода через образец производится с помощью масс-спектрометров, установленных в выходной камере и позволяющих определять парциальные давления остаточных газов с точностью  $\pm 10\%$  в диапазоне давлений от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  Па. Система нагрева ячейки АУ с исследуемым образцом выполнена на базе высокоточного регулятора температуры (ВРТ) и обеспечивает реализацию всех необходимых температурных режимов в проводимых экспериментах с точностью  $\pm 2$  °С. Измерение давления водорода и его изотопов в системах установки производится деформационным газоразрядным вакуумметром ВДГ-1, деформационным датчиком ИКД-100 и терморпарным датчиком Convectom.

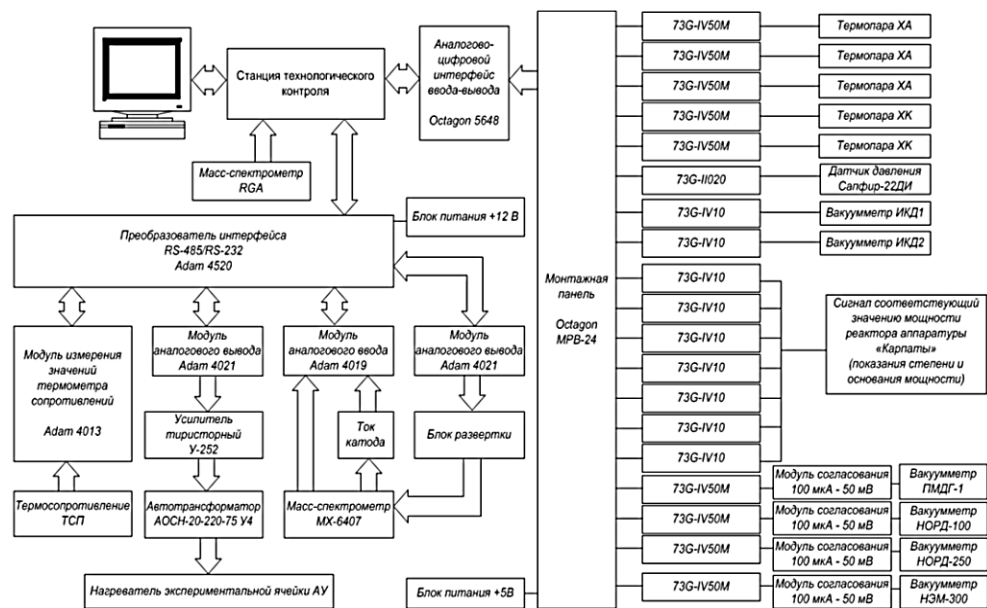


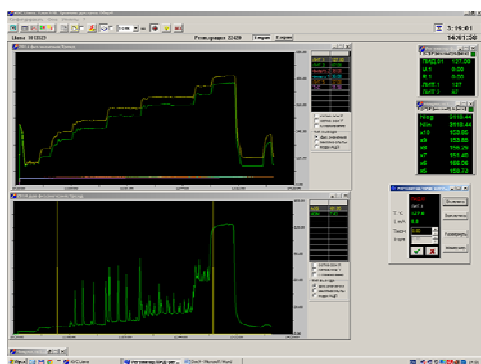
Рис. 3. Схема системы автоматизации, контроля и регистрации экспериментального стенда

Инженерный АРМ (автоматизированное рабочее место) в составе ИИК расположен в помещении, защищенном от излучений реактора (см. рис. 4), и предусматривает режимы функционирования: предпусковой, пусковой и послепусковой обработки. Функции представления оперативной технологической информации, управление режимами наблюдения в реальном времени и регистрации данных реализованы на базе графического компьютерного терминала ПЭВМ IBM PC.

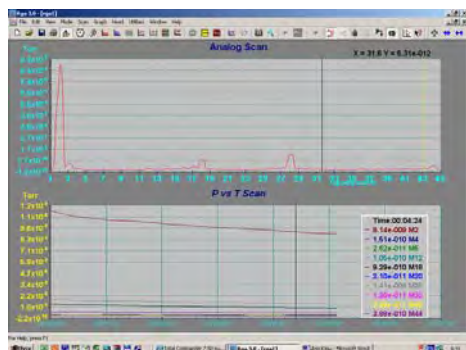
На рис. 5,а представлен вид окна управления ИИК и вид окна программы масс-спектрометрической регистрации ИИК – рис. 5,б.



Рис. 4. Пультавая экспериментального стенда ЛИАНА



а



б

Рис. 5. Вид окна интерфейса рабочей станции ИИК при проведении вне реакторного эксперимента

В ходе многолетних исследований проведенных на стенде ЛИАНА были проведены реакторные эксперименты с большим числом предлагаемых к использованию конструкционных материалов и защитных покрытий. В табл. 1 указан температурный интервал исследуемых образцов кандидатных материалов и изотопы водорода, которые были исследованы в реакторных экспериментах. В экспериментах были получены основные параметры взаимодействия изотопов с кандидатными материалами такие как коэффициенты диффузии, константы проницаемости и растворимости изотопов водорода в исследуемых материалах.

Таблица 1

## Исследуемые материалы

Материалы	Температура, °С	Изотопы
Ванадий V	от 20 до 700	H, D
Ванадиевый сплав $V_4Cr_4Ti$	от 20 до 700	H, D
Нержавеющие стали: 12X18H10T, MANET, F82H (с/без покрытия), SS316IG (ITER Grade), никель Ni	от 300 до 700	H, D, T
Сплав CuCrZr и медь Cu	от 400 до 700	H, D
Литиевые материалы: керамика $Li_2TiO_3$ (96 % $^6Li$ ), свинцово- литиевая эвтектика $Pb_{83}Li_{17}$ , литий и литиевые КПС	от 300 до 1000	H, D, T
Бериллий TV-56	от 50 до 900	H, D
Вольфрам W	от 700 до 1000	D

## Реакторные облучательные устройства для проведения экспериментов

Для реализации реакторных экспериментов по исследованию процессов взаимодействия изотопов водорода с различными материалами были сконструированы и изготовлены специальные облучаемые ампульные устройства (см. рис. 6). Ампульное устройство создавалось, исходя из задач исследования и характера технического обслуживания, связанного с этими задачами.

АУ обеспечивает размещение исследуемого образца на уровне центра активной зоны реактора ИВГ.1М. внутри корпуса физического экспериментального канала (ФКЭ), откачку объемов экспериментальной ячейки, подачу водорода и его изотопов в объем ячейки с образцом, регулировку и поддержание исследуемого температурного режима образца.

АУ включает в себя: экспериментальную ячейку, в которой размещался исследуемый образец; омический нагреватель (провод КТМС ХК), предназначенный для нагрева исследуемого образца; термопар для контроля и регистрации температуры образца и корпуса АУ; устройство газового охлаждения в виде одетого на экспериментальную ячейку кожуха охлаждения для поддержания исследуемой температуры образца при проведении реакторных экспериментов.

Ниже представлены технические характеристики ампульного устройства.

Габаритные размеры ампульного устройства:

- длина 2300 мм;
- диаметр не более 60 мм.

Габаритные размеры экспериментальной ячейки:

- длина 120 мм;
- диаметр 28 мм.

Геометрия и размеры образца:

- образец типа круглой мембраны: диаметр 25 мм, толщина от 1 до 2 мм;

– образец трубчатый: трубка диаметром от 10 до 12 мм с толщиной стенки 1 мм и длиной 120 мм.

Мощность электрического нагревателя: от 400 до 600 Вт.

Максимальный расход газа в системе охлаждения: 60 г/с.

Термопары: хромель-алюмель (ХА), хромель-копель (ХК).

Температурный интервал образца: от 27 до 927 °С.

Рабочее давление газов:

– на входной стороне образца от 100 до 105 Па;

– на выходной стороне  $10^{-5}$  Па.

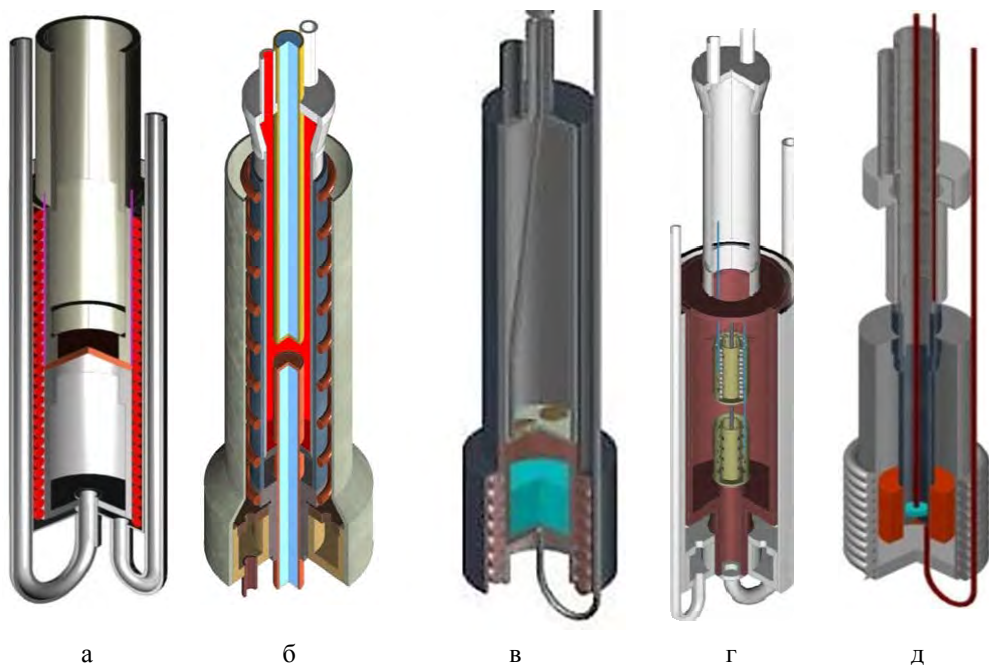


Рис. 6. Экспериментальные облучательные ампульные устройства: *a* – эксперименты по водородопроницаемости (V, V4Cr4Ti, 12X18H10T, SS316IG, Ni, CuCrZr, Cu); *б* – эксперименты по проницаемости трития сквозь образец без покрытия и с покрытием (MANET, F82H); *в* – эксперименты по генерации и выделению трития из литий содержащих материалов (Li, Pb<sub>83</sub>Li<sub>17</sub>, литиевая КПС); *г* – эксперименты по энерговыделению литий содержащих материалов (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>); *д* – эксперименты по термодесорбции (Be, литиевая КПС)

### Результаты некоторых экспериментов, которые были проведены на экспериментальном стенде ЛИАНА

В экспериментах по исследованию процессов взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами, проводимых на экспериментальном стенде ЛИАНА, фиксировалась кинетика проникновения (выделения) изотопов водорода в КМ в условиях реакторного излучения и без, определялись основные параметры взаимодействия. При обработке во многих случаях



оказывалось, что эффект влияния реакторного излучения на параметры взаимодействия изотопов водорода с исследуемыми материалами является значительным. В каждом из проведенных исследований факторами, приводящими к изменению параметров взаимодействия изотопов водорода с материалами, являются различные физические процессы, которые характерны для исследуемого материала при данных условиях.

Особо значимые эффекты влияния излучения на поведения изотопов водорода в испытуемых материала, выявленные в экспериментах, приведены ниже:

- при исследовании водородопроницаемости нержавеющей стали SS316 IG было зафиксировано, что при температурах ниже 450 °С поток дейтерия сквозь исследуемый образец уменьшается, а время наступления стационарного потока сквозь образец увеличивается (см. рис. 7 и 8) [4];
- исследования водородопроницаемости бескислородной меди показали, что при температуре образца ниже 450 °С реакторное излучение ускоряет диффузию дейтерия сквозь медь (см. рис. 9), причем с уменьшением температуры этот эффект становился все более заметным [6].
- в экспериментах по исследованию взаимодействия водорода с литием был зафиксирован эффект влияния реакторного излучения на скорость взаимодействия изотопов водорода с жидким литием. (см. рис. 10 и 11) [5, 11].

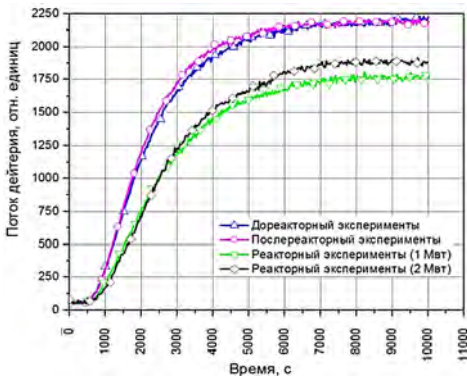


Рис. 7. Кинетика проникновения дейтерия сквозь сталь SS316IG, на разных этапах эксперимента (при  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P_{вх} = 500\text{ Па}$ )

Рис. 8. Температурные зависимости коэффициента диффузии в нержавеющей стали SS316 IG

Эксперименты по проницаемости трития сквозь образец стали МАНЕТ без покрытия и с покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , нанесенного на образец различными способами, показали, что покрытие на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученное методом опускания в раствор; более чем в 100 раз более эффективно, чем покрытие, полученное методом газофазного осаждения. В течение эксперимента не наблюдалось деградация покрытий [1].

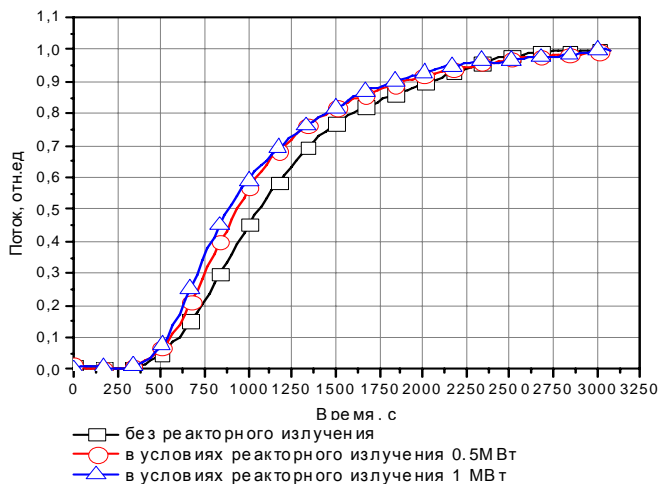


Рис. 9. Нормированная на максимальный поток кинетика проникновения дейтерия сквозь образец меди, при температуре образца температуре 350 °С



Рис. 10. Нормированный график изменения давления водорода в ампульном устройстве при температуре образца 200 °С, при уровне давления 130 Па и мощности реактора 3 МВт

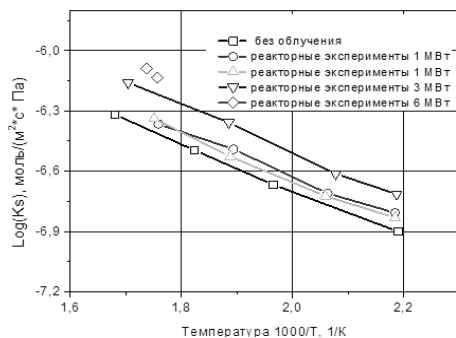


Рис. 11. Температурные зависимости константы взаимодействия изотопов водорода с жидким литием в абсорбционных экспериментах

## Заключение

В настоящей работе представлено описание экспериментального стенда ЛИАНА и конструкций различных ампульных устройств, которые были специально разработаны и созданы для проведения реакторных экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами. Опыт эксплуатации экспериментального стенда показал возможность проведения на нем экспериментов по определению параметров взаимодействия изотопов водорода с материалами ЯР и ТЯР в условиях реакторного облучения и позволил зафиксировать эффект влияния реакторного облучения на процессы взаимодействия изотопов водорода с исследуемыми конструкционными материалами.

## Список литературы

1. Изучение особенностей проникания смеси изотопов водорода через низкоактивируемую сталь F82H / Т. В. Кульсартов и др. // Ядерная и радиационная физика: Материалы IV междунар. конф., Алматы, 15–17 сент. 2003.– Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2003.
2. Investigation of hydrogen isotope permeation through F82H steel with and without a ceramic coating of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> including CrPO<sub>4</sub> (out-of-pile tests) / E. A. Kenzhin, T. V. Kulsartov, Y. V. Chikhray // Fusion Engineering and Design. – 2006. – Vol. 81, Issues 1–7. – P. 701–705.
3. Studies of reactor irradiation effect on hydrogen isotope release from vanadium alloy V4Cr4Ti /Т. V. Kulsartov, I. L. Tazhibaeva, V. P. Shestakov // Journal of the Nuclear Materials. – 2007. – Vol. 367–370, № 2. – P. 844–847.
4. Влияние реакторного излучения на процессы проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь SS316IG / Е. А. Кенжин, И. Л. Тажибаева, Т. В. Кульсартов, Е. В. Чихрай, В. П. Шестаков // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2008. – Вып. 2. – С. 36–40
5. Temperature Dependence of Rate Constant of Hydrogen Isotopes Interaction with Lithium Capillary-Porous System under Reactor Irradiation / I. Tazhibayeva, T. Kulsartov, Yu. Gordienko, A. Mukanova, Yu. Ponkratov, N. Barsukov, E. Tulubaev, E. Platadis, E. Kenzhin // Fusion Engineering and Design.– 2013.– Vol. 88, Issues 9–10.– P. 1731–1734.
6. Research of reactor radiation influence upon the processes of hydrogen isotopes interaction with materials of the fusion facility /А. О. Sadvakassova, T. V. Kulsartov, Ye. Yu. Tulubaev // Fusion Energy: Synopsis Book of 1st International Young Conference, Daejeon, Republic of Korea, 2010. – P. 28.
7. Исследование процессов проникновения дейтерия сквозь медь в условиях реакторного излучения / Ю.Н. Гордиенко и др. // Ядерная и радиационная физика: Доклады VII межд. конф., Алматы, 08–11 сентября 2009. – Алматы: НЯЦ РК, 2010. – С. 221–226.
8. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility / А. О. Sadvakassova, T. V. Kulsartov, I. L. Tazhibaeva, E. A. Kenzhin // Fusion Science and Technology. – 2011. – Vol. 60. – № 1Т. – P. 9–15.
9. Study of Tritium and Helium Release from Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> / Т. V. Kulsartov, I. L. Tazhibaeva, E. A. Kenzhin // Journal of the Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 1. – P. 65–69.
10. Миграция трития в конструкционных и функциональных материалах ТЯР. Обзор и анализ результатов / Т. В. Кульсартов и др. // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами: Материалы школы-конференции, Звенигород, 24–28 октября 2011. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 147–172.
11. Определение параметров взаимодействия водорода с жидким литием и литиевой капиллярно-пористой системой (КПС) в условиях реакторного облучения / И. Л. Тажибаева, Т. В. Кульсартов, Ю. Н. Гордиенко, Ж. А. Заурбекова, Ю. В. Понкратов, Н. И. Барсуков, Е. Ю. Тулубаев, В. В. Бакланов, В. С. Гныря, Е. А. Кенжин // – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2013, том 36, вып. 4, с. 25–38.