

УДК 621.039.542.44

Выделение трития из потока газа носителя с использованием палладий-серебряной мембраны применительно к системе газоочистки исследовательского жидко-солевого реактора

О.А. Кучеров¹, А.С. Аникин¹, А.А. Семенов¹, В.Р. Тарасов¹, Р.В. Чекушин¹,
Н.Е. Забирова¹, А.В. Лизунов¹, А.Н. Букин^{1,2}, Е.В. Козлова¹, А.С.Голенок¹
¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических
материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Обоснована возможность использования палладий-серебряных трубчатых мембран для селективного выделения трития вместе с другими изотопами водорода в системе газоочистки исследовательского жидко-солевого реактора. Определены температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости трития для палладий-серебряной мембраны с концентрацией серебра 15 %. Определены скорости выделения изотопов водорода из смеси с гелием при использовании циркуляционного режима работы газовой смеси с входной стороны.

Ключевые слова: тритий, изотопы водорода, диффузия, жидко-солевой реактор, палладий-серебряная мембрана, эффективный коэффициент диффузии, эффективная растворимость.

Separation of tritium from a carrier gas flow using a palladium-silver membrane in application to the gas purification system of a research molten salt reactor

O.A. Kuchеров¹, A.S. Anikin¹, A.A. Semenov¹, V.R. Tarasov¹, R.V. Chekushin¹,
N.E. Zabirowa¹, A.V. Lizunov¹, A.N. Bukin^{1,2}, E.V. Kozlova¹, A.S. Golenok¹
¹JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow
²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow, Russia

The possibility of using palladium-silver tubular membranes for selective extraction of tritium together with other hydrogen isotopes in the gas purification system of a research molten salt reactor is substantiated. The temperature dependences of the effective diffusion coefficients, permeability and solubility of tritium for a palladium-silver membrane with a silver concentration of 15% are determined. The rates of extraction of hydrogen isotopes from a mixture with helium are determined using the circulation mode of operation of the gas mixture from the inlet side.

Key words: tritium, isotopes of hydrogen, diffusion, molten salt reactor, palladium-silver membrane, effective diffusion coefficient, effective solubility

Развитие концепции жидко-солевого реактора является логичным продолжением реализации замкнутого ядерного топливного цикла. В нашей стране ведутся работы по созданию Исследовательского жидко-солевого реактора (ИЖСР), основное назначение которого – трансмутация минорных актинидов, образую-

щихся в процессе эксплуатации АЭС. В процессе работы ИЖСР происходит выделение радиоактивных изотопов, в том числе и радиоактивного газообразного трития [1]. Выделение трития происходит в ходе нескольких ядерных превращений на ядрах лития-6, лития-7, бериллия-9, присутствующих в составе топливной

соли жидко-солевого реактора [2]. Тритий высокотоксичен и обладает высокой диффузионной способностью, представляя потенциальную угрозу целостности реакторной установки из-за коррозионной активности окисленных форм. При окислении он образует на четыре порядка более токсичные окисленные формы, опасные для обслуживающего персонала. Поэтому тритий из основного потока газа-носителя ИЖСР

на основе гелия необходимо извлекать.

Настоящая работа посвящена выделению трития вместе с другими изотопами водорода из смеси газов на основе гелия. Эксперименты, проведенные в рамках данной работы, должны лечь в основу разработки одного из узлов системы газоочистки исследовательского жидко-солевого реактора (рис. 1).

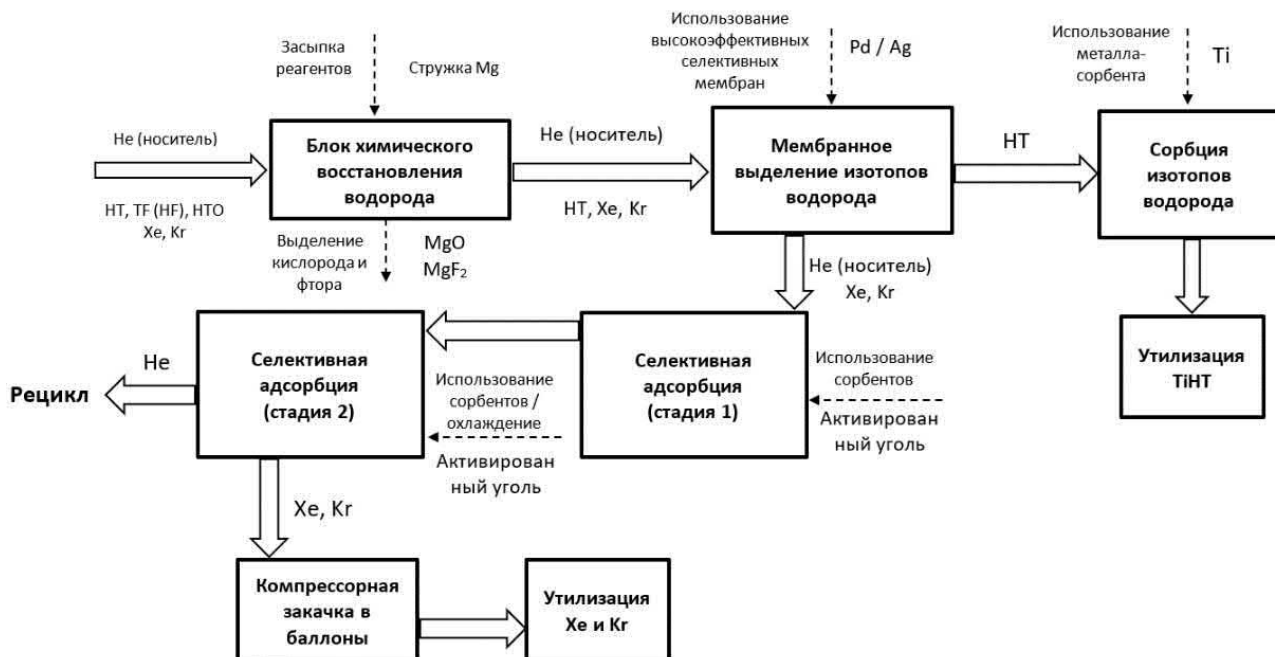


Рис. 1. Блок-схема система газоочистки ИЖСР

Выделение трития и других изотопов водорода в молекулярной форме из смеси газов может осуществляться как сорбционным, так и мембранным методами. Мембранное разделение обладает чрезвычайно высокой селективностью по отношению к изотопам водорода. Недостатком данного метода является использование дорогостоящего сплава благородных металлов и необходимость циркуляции газа из-за низкой концентрации трития на фоне газа-носителя. Наилучшими показателями обладает мембрана из сплава Pd / Ag, достигнутая степень детритизации на которой составляет 10^5 [3]. Для увеличения эффективности выделения изотопов водорода через мембрану на входной стороне должна быть организована циркуляция газового потока, а на выходной стороне - вакуумная откачка очищенной смеси изотопов водорода с последующей сорбцией в виде металлгидрида.

Методическая часть

Исследования по определению эффективных коэффициентов диффузии трития проводили в такой последовательности:

1. Подготовка образцов и крепление к диффузионной ячейке с помощью сварки.
2. Проверка на герметичность с помощью гелиевого течеискателя Shimadzu MSE/2000R.
3. Подсоединение диффузионной ячейки к вакуумной установке «БВИ» и вакуумирование системы до давления не выше $4,0 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.
4. Нагрев в вакууме диффузионной ячейки до рабочей температуры.
5. Напуск изотопов водорода на входную сторону образца производится из сорбционных аппаратов (СА) до рабочего давления.
6. Контроль изотопов водорода на выходной стороне с помощью мембранно-

емкостного датчика абсолютного давления CCR363.

7. Построение зависимости приращения изотопов водорода по показаниям измерительного оборудования и расчёт зависимости потока водорода от времени.

8. Графическое определение времени запаздывания t_3 .

9. Расчёт диффузионных характеристик трития.

При определении диффузионных характеристик использовали один и тот же образец палладий-серебряной мембраны для всего температурного диапазона. Перед повторным использованием мембраны производили её вакуумный отжиг с постоянной откачкой десорбирующихся газов. Температура вакуумного отжига составляла 650 °С. Время вакуумного отжига было в несколько раз больше времени выравнивания при температуре дегазации. Для обеспечения воспроизводимости экспериментов новые образцы подвергали вакуумному отжигу при указанной температуре в течение 2 часов.

По требованиям [4] для исследования водородопроницаемости допускается использовать только чистый газ, включая изотопы водорода, такие как дейтерий и тритий, с концентрацией основного компонента не менее 98 об.%. Для определения возможности мембранного выделения изотопов водорода из газовых смесей были проведены эксперименты с напуском на входную сторону газов, содержащих аргон, азот и водород.

Очистку изотопов водорода от кислородосодержащих примесей до концентрации не более 10^{-4} об.% производили сорбционным методом с применением интерметаллида ZrCo. Предельное давление для высоковакуумного оборудования составляло $1,33 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Процесс диффузии водорода проводили снаружи внутрь. Рабочее давление газа на входной стороне образца поддерживали за счет использования дополнительных буферных емкостей большого объёма. Колебания давления на входе не превышало 5% в течение всего эксперимента.

Время проведения испытаний для каждого образца определяли на основании данных, получаемых по ходу эксперимента. Эксперимент прекращали после стабилизации потока водорода на выходной стороне образца или по достижении времени эксперимента 96 часов.

Уровень фонового газовыделения определяли при проведении холостого эксперимента

(без использования водорода), он не превышал 10 % от величины потока водорода на выходной стороне.

Перед проведением эксперимента образцы, приваренные к фланцу, а затем и собранный аппарат для исследования водородопроницаемости проверяли на герметичность с помощью гелиевого течеискателя Shimadzu MSE/2000R. Испытанный аппарат подсоединяли к установке «РЕКА» или «БВИ» и всю систему дегазировали с прогревом всех используемых магистралей до 200 °С. При этом аппарат прогревали до температуры 900 °С и выдерживали при этой температуре 2 часа. Параллельно осуществляли водяное охлаждение фланца. Откачку системы насосами продолжали до создания давления $4,0 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. на вакуумном poste. Для исключения натеканий водорода во второй контур при рабочих температурах на входную сторону подавали гелий, а атмосферу из второго контура направляли на гелиевый течеискатель для контроля герметичности.

По завершении процессов контроля герметичности, дегазации установки и отжига образца производили нагрев аппарата с исследуемым образцом до рабочей температуры. Нагрев осуществляли с помощью печи сопротивления, которую надевали снаружи на диффузионную ячейку. Контроль температуры производили термоэлектрическим методом с помощью термпар типа ХА (К). Для уменьшения температурного градиента по высоте образца допускалось использование двух печей, одна из которых сквозная, другая с закрытым дном.

Режим нагрева определяли по результатам предварительного эксперимента и по мере надобности корректировали при проведении следующего эксперимента. После достижения необходимой температуры напускали особо чистый водород. Водород получали термическим разложением интерметаллического сорбента, находящегося в аппарате хранения водорода СА. Наличие на установках «РЕКА» и «БВИ» буферных ёмкостей обеспечивало постоянство давления изотопов водорода на входной стороне даже при условии потерь газа при диффузии через исследуемый образец и наружные стенки диффузионной ячейки.

Для проведения испытаний в соответствии с [4] была разработана конструкторская документация ЭКД П-231.29.100 СБ на мембранную ячейку и образец палладий-серебряного сплава с содержанием серебра 15 мас. %, по

которым был изготовлен аппарат для диффузионных испытаний (рис. 2). Для проверки работоспособности методики диффузионных испытаний из никеля НП2 был изготовлен образец сравнения (рис. 3 и 4). В качестве образца сравнения использовали никель марки НП-2 по

ГОСТ 492 [5]. Никель является одним из самых изученных материалов по взаимодействию с водородом. Работы по исследованию диффузионных характеристик трития мембранным методом проводились на установке «БВИ».

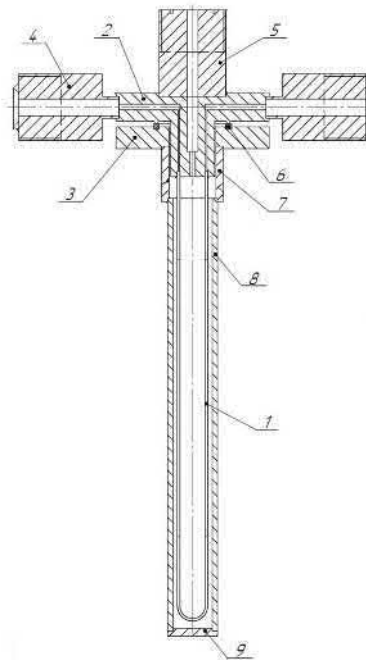


Рис. 2. Чертеж аппарата с палладий-серебряной мембраной

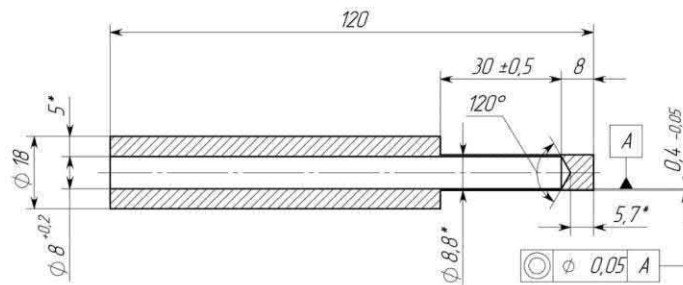


Рис. 3. Чертеж образца из никеля НП2 для определения диффузионных характеристик трития мембранным методом



Рис. 4. Внешний вид образцов для определения диффузионных характеристик трития мембранным методом

С помощью электронно-лучевой сварки образец из никеля крепили к аппарату из стали 12X18Н10Т (рис. 4 и 5).

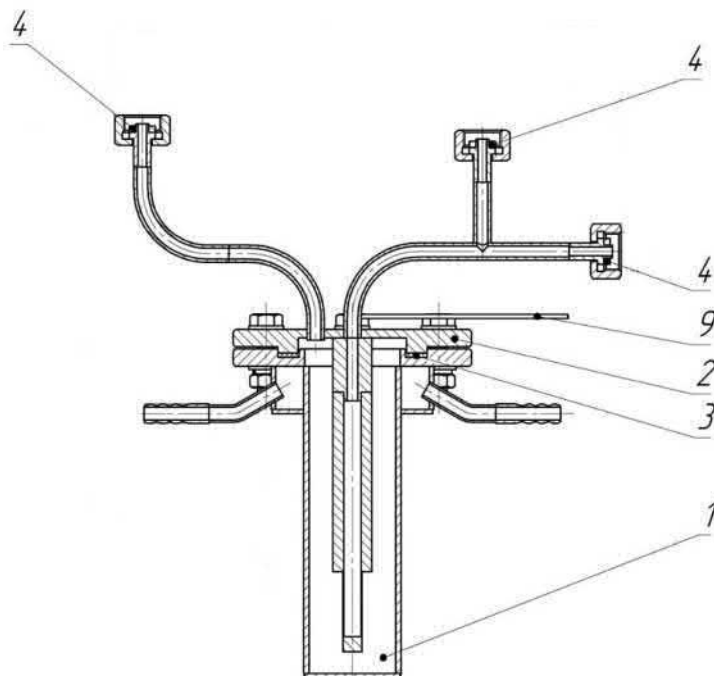


Рис. 5. Аппарат для диффузионных испытаний образца из никеля мембранным методом



Рис. 6. Аппарат для диффузионных испытаний образца из никеля мембранным методом (фото)

С помощью аргодуговой сварки образец из палладий-серебряного сплава крепили к аппарату из стали 12X18Н10Т.

Для проведения испытаний была подготовлена вакуумная установка «БВИ», представляющая собой комплекс для исследования взаимодействия изотопов водорода с

конструкционными материалами. Установка оснащена системой индикации и управления технологического процесса. На рис. 6 представлена схема установки для проведения исследований диффузии изотопов водорода через палладий-серебряную мембрану.

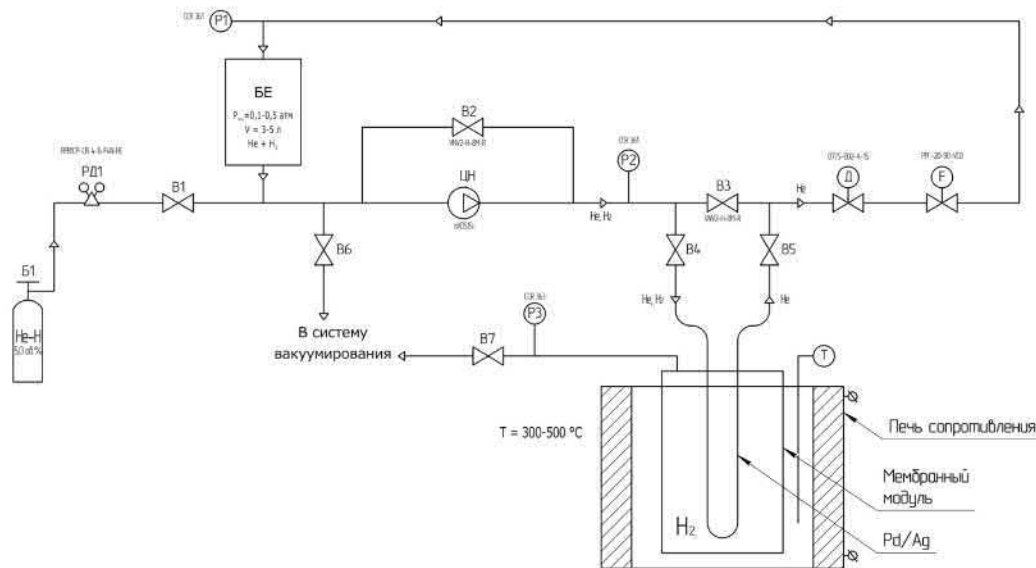


Рис. 6. Схема лабораторной установки для экспериментального обоснования подсистемы мембранного выделения изотопов водорода

Для достижения глубокого вакуума на установках проводили прогрев всех газовых магистралей установки с одновременной откачкой с помощью высоковакуумного поста. В качестве запорной арматуры применяли водородные приварные сильфонные вентили, рассчитанные для работы при давлении до 160 атм и температуре 200 °С. Режим нагрева установки программировали контроллером температуры. Концентрацию трития измеряли с помощью ионизационной камеры, в случае использования смеси газов их состав определяли по показаниям квадрупольного масс-спектрометра OMNIStar.

Методика обработки экспериментальных данных, а также расчёт основных диффузионных характеристик трития в данной работе совпадали с ранее апробированной работой [6].

Экспериментальная часть

В таблице 1 представлен результат расчета коэффициентов диффузии для трития с расчетом погрешностей измерений. Значения, полученные при близких температурах, были объединены. На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости эффективного коэффициента диффузии трития и его натурального логарифма от обратной температуры.

Таблица 1
Результат расчета эффективных коэффициентов диффузии трития для мембраны из никеля НП2

№ п/п	Температура процесса, °С	Температура процесса, К	$D_{эф}^0$, см ² /с	1000/T	-ln(D)	Максимальная относительная погрешность, %
1	436	709	3,27E-06	1,410	12,63	1,99
2	464	737	3,76E-06	1,357	12,49	
3	546	819	1,06E-05	1,221	11,46	
4	599	872	1,61E-05	1,147	11,03	
5	633	906	2,34E-05	1,103	10,66	1,53
6	676	949	5,30E-05	1,054	9,85	
7	721	994	8,91E-05	1,006	9,33	
8	764	1037	1,42E-04	0,964	8,86	

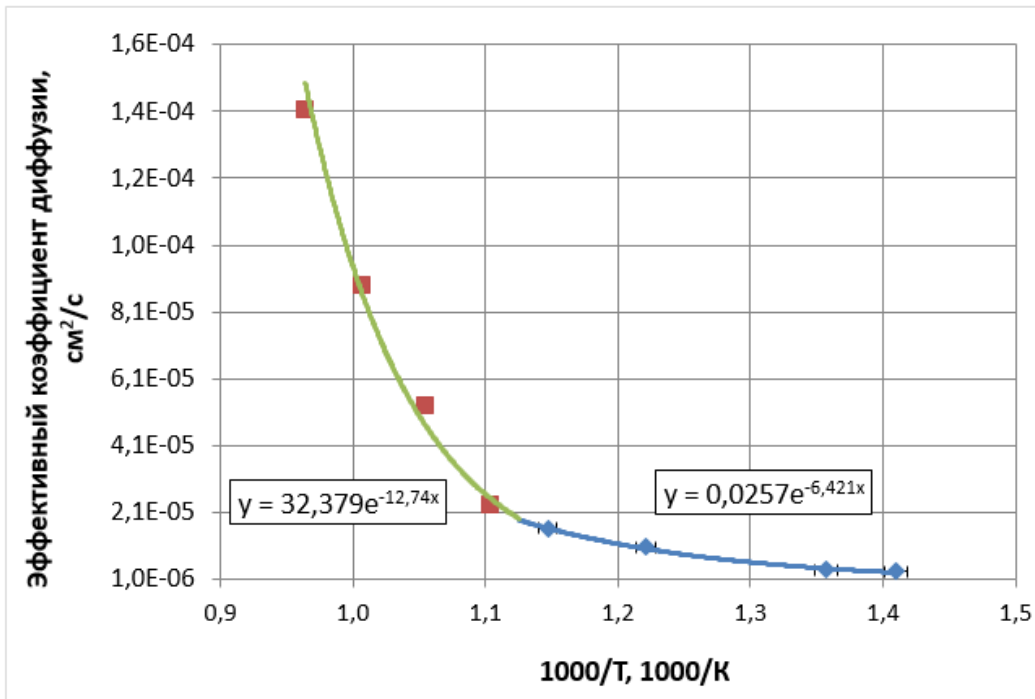


Рис. 7. График зависимости эффективного коэффициента диффузии трития для никеля НП2 от обратной температуры

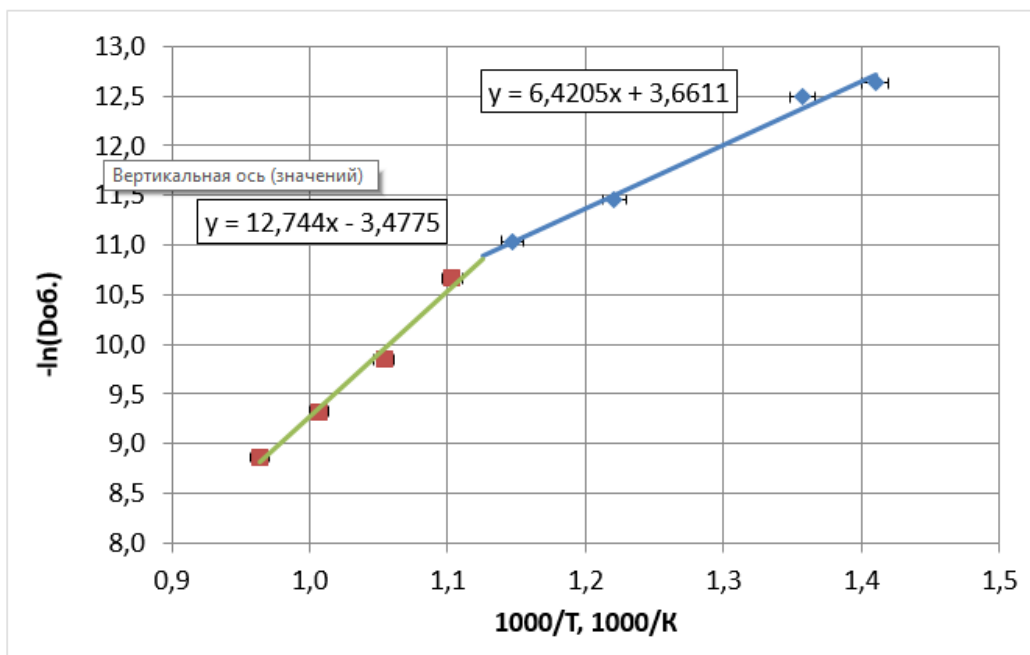


Рис. 8. График зависимости натурального логарифма эффективного коэффициента диффузии трития для никеля НП2 от обратной температуры

Для никеля марки НП2 в исследуемом диапазоне температур наблюдаются две температурные зависимости с точкой перегиба в диапазоне температур между 600 и 630 °С. Данный рост может быть обусловлен образованием фаз или изменениями структуры материала с ростом температуры. Такие резкие перепады могут привести к ускоренному наводороживанию материала, увеличению его хрупкости и способствовать разрушению при больших нагрузках. В литературе [7; 8-10] часто встречается, что коэффициенты диффузии водорода для различных материалов описываются несколькими температурными зависимостями. Например, образование фазы γ -Fe резко

влияет на диффузию водорода [11]. Поэтому для никеля НП2 было решено проводить расчёты для двух температурных диапазонов, первый от 436 до 600 °С, а второй от 630 до 764 °С.

Образец трубки из палладий-серебряного сплава был приварен к диффузионной ячейке в АО «ВНИИНМ». Содержание серебра в мембране было близко к 15 %. После проверки аппарата с образцом мембраны на герметичность он был испытан на установке «БВИ». Размеры мембраны были определены с помощью штангенциркуля и микрометра. Параметры мембраны представлены в таблице 2. Всего было проведено 17 экспериментов с чистым водородом в интервале температур от 300 до 450 °С при различном давлении.

Таблица 2

Геометрические размеры мембраны из сплава «палладий-серебро»

Материал образца	Диаметр, см	Толщина, см	Длина, см
Сплав палладий-серебро	1,15	0,01	16

По экспериментальным данным были определены поток водорода через образец после стабилизации, Φ_H (см³/с), эффективные коэффициенты диффузии, $D_{\text{эф}}^0$ (см²/с) и проницаемости, $P_{\text{эф}}$ (см³/(с·см·Па^{0,5})), а также эффективная

растворимость противя, $S_{\text{эф}}$ (см³/(см³·Па^{0,5})) (таблица 3). Полученные результаты были пересчитаны для диффузанта (третия) путем деления на $K_{T/H}$ (таблица 4).

Таблица 3

Результаты диффузионных испытаний мембраны из сплава «палладий-серебро» в атмосфере водорода

№ эксп.	Температура процесса, °С	$D_{\text{эф}}^0$, см ² /с	$P_{\text{эф}}$, см ³ /(с·см·Па ^{0,5})	$S_{\text{эф}}$, см ³ /(см ³ ·Па ^{0,5})	Φ_H , (см ³ /с)
1	300	4,93E-04	1,25E-06	2,66E-03	2,34E-02
2	300	5,06E-04	1,64E-06	3,19E-03	2,74E-02
3	350	1,33E-03	1,60E-06	1,16E-03	3,04E-02
4	350	1,10E-03	1,65E-06	1,44E-03	3,15E-02
5	350	1,14E-03	1,76E-06	1,51E-03	3,42E-02
6	400	1,35E-04	8,37E-08	4,95E-04	6,36E-05
7	400	4,93E-05	6,95E-08	1,03E-03	1,63E-04
8	400	9,65E-06	5,54E-08	1,50E-02	1,18E-04
9	400	5,75E-05	2,09E-07	3,28E-03	1,19E-03
10	400	5,08E-05	2,74E-07	6,26E-03	1,71E-03
11	400	9,81E-05	3,47E-07	3,60E-03	2,71E-03
12	400	6,55E-04	6,53E-07	6,14E-04	7,25E-03
13	400	6,43E-04	7,14E-07	6,94E-04	8,66E-03
14	400	6,22E-04	1,91E-06	2,92E-03	3,55E-02
15	400	4,48E-04	9,06E-07	1,81E-03	1,75E-02
16	450	1,20E-03	3,16E-06	2,65E-03	5,90E-02
17	450	1,16E-03	2,80E-06	2,31E-03	5,25E-02

Таблица 4

Результат расчета диффузионных характеристик трития для мембраны
из палладий-серебряного сплава

№ эксп.	Температура процесса, °С	$D_{эф}^o$, см ² /с	$P_{эф}$, см ³ /(с·см·Па ^{0,5})	$S_{эф}$, см ³ /(см ³ ·Па ^{0,5})	Φ_H , (см ³ /с)
1	300	2,84E-04	7,23E-07	2,66E-03	1,35E-02
2	300	2,92E-04	9,46E-07	3,19E-03	1,58E-02
3	350	7,67E-04	9,26E-07	1,16E-03	1,76E-02
4	350	6,36E-04	9,51E-07	1,44E-03	1,82E-02
5	350	6,58E-04	1,01E-06	1,51E-03	1,97E-02
6	400	7,79E-05	4,83E-08	4,95E-04	3,67E-05
7	400	2,84E-05	4,01E-08	1,03E-03	9,42E-05
8	400	5,57E-06	3,20E-08	1,50E-02	6,84E-05
9	400	3,32E-05	1,21E-07	3,28E-03	6,88E-04
10	400	2,94E-05	1,58E-07	6,26E-03	9,89E-04
11	400	5,66E-05	2,01E-07	3,60E-03	1,56E-03
12	400	3,78E-04	3,77E-07	6,14E-04	4,19E-03
13	400	3,71E-04	4,12E-07	6,94E-04	5,00E-03
14	400	3,59E-04	1,10E-06	2,92E-03	2,05E-02
15	400	2,58E-04	5,23E-07	1,81E-03	1,01E-02
16	450	6,91E-04	1,82E-06	2,65E-03	3,41E-02
17	450	6,68E-04	1,62E-06	2,31E-03	3,03E-02

На рис. 9 представлен график зависимости натурального логарифма эффективного коэффициента диффузии трития для палладий-серебряного сплава от обратной температуры, полученный двумя методами.

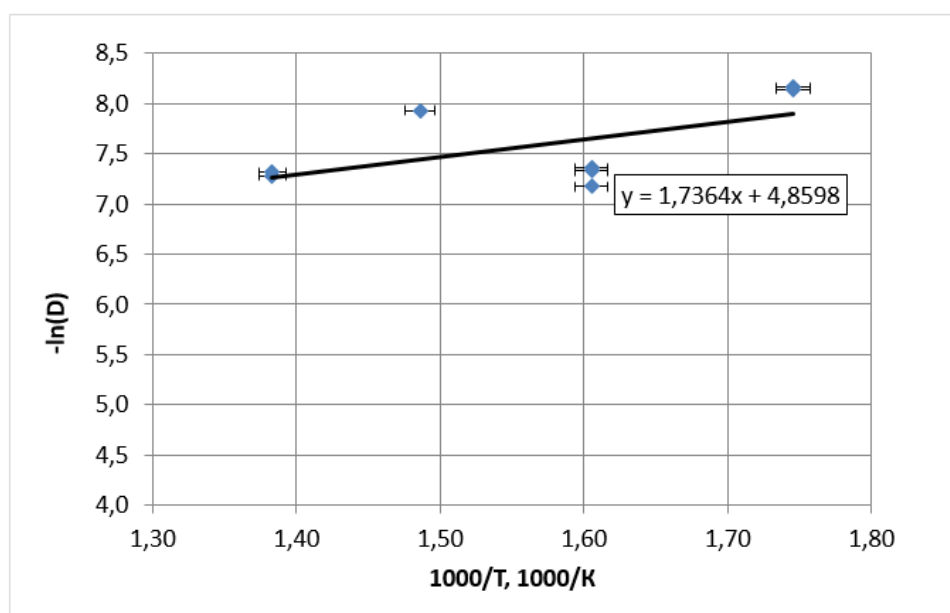


Рис. 9. Зависимость натурального логарифма эффективных коэффициентов диффузии трития для палладий-серебряного сплава от обратной температуры

Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии трития для палладий-серебряного сплава в интервале температур от 300 до 450 °С имеет вид:

$$D_{эф} = 0,0078 \cdot e^{\left(\frac{-14436}{R \cdot T}\right)} \quad (1)$$

На рис. 10 представлен график расчётной зависимости потока диффузанта (трития) на выходе из мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С в экспериментах с давлением трития на входе 750 – 803 торр.

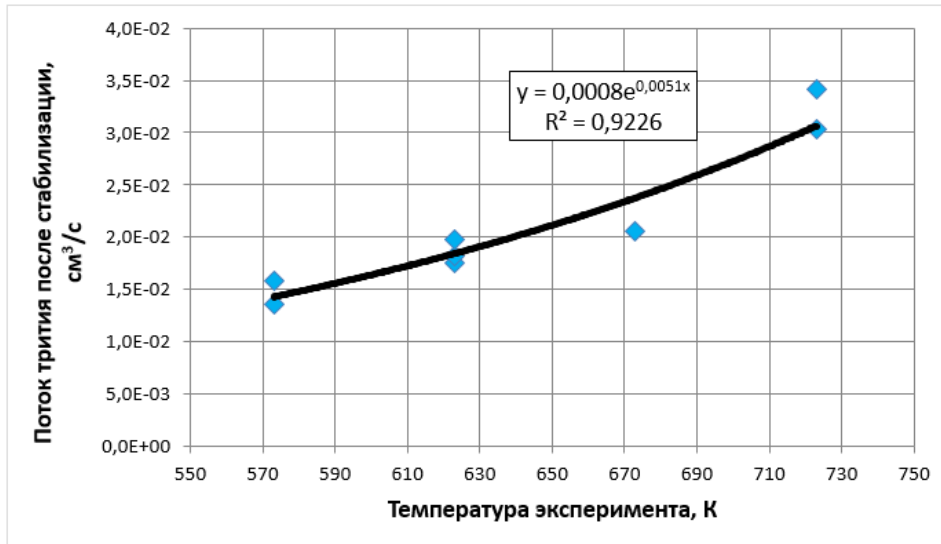


Рис. 10. Зависимость потока трития на выходе из мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С в экспериментах с давлением трития на входе 750 – 803 торр

На рис. 11 представлен график зависимости эффективного коэффициента проницаемости трития для мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С.

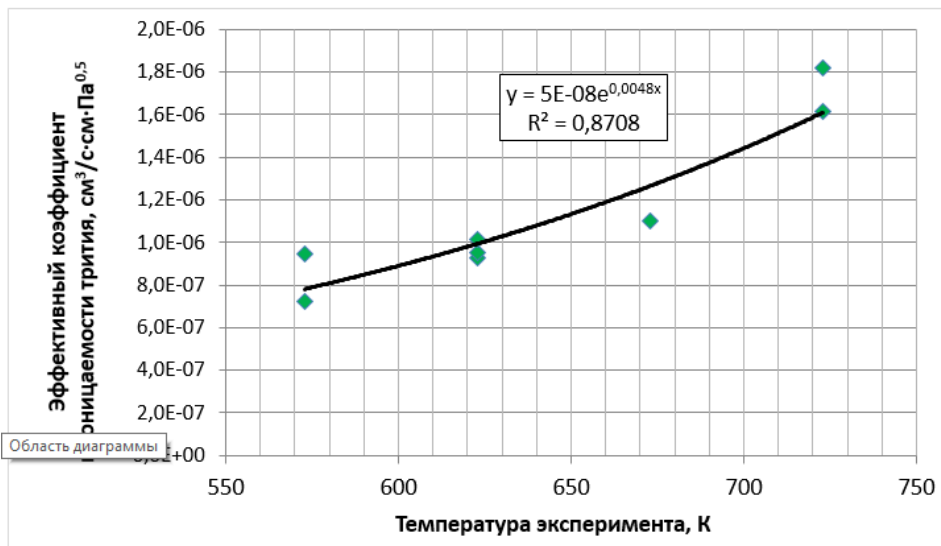


Рис. 11. Зависимость эффективного коэффициента проницаемости трития для мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С

На рис. 12 представлен график зависимости эффективной растворимости трития для мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С.

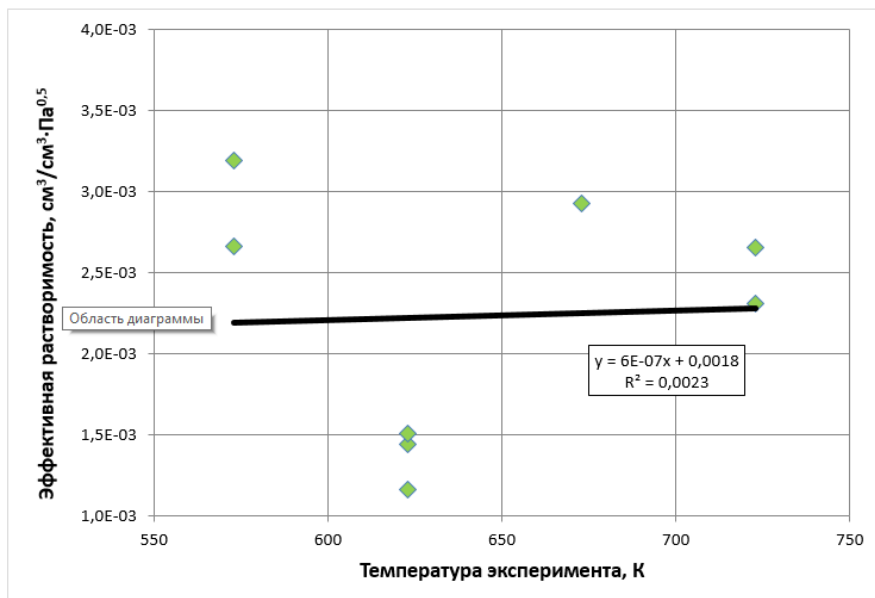


Рис. 12. Зависимость эффективной растворимости трития для мембраны из палладий-серебряного сплава от температуры в диапазоне 300 – 450 °С

При наличии в газовой смеси гелия он способен за счёт создания газовой подушки ухудшать параметры очистки изотопов водорода. В результате диффузии изотопов водорода через мембрану на входной стороне будет увеличиваться концентрация гелия и снижаться концентрация изотопов водорода. Чтобы повысить эффективность процесса очистки изотопов водорода, его можно проводить в циркуляционном режиме.

Ниже сопоставлены результаты диффузии изотопов водорода, полученные при использовании газовой смеси гелия с водородом, и чистого водорода, проведённые в циркуляционном режиме.

Газовые смеси создавали на установке непосредственно перед проведением исследований. Состав газовых смесей представлен в таблице 5.

Таблица 5

Состав газовых смесей для исследования водородопроницаемости мембран

№ смеси	Концентрация водорода, об. %	Концентрация гелия, об. %
1	0,13	99,87
2	1,30	98,7
3	13,0	87,0
4	50,0	50
5	75,0	25,0
6	100	0

Методика экспериментов на газовых смесях повторяла диффузионные испытания на чистом водороде, только вместо него на входную сторону мембраны подавали газовую смесь. Для каждой газовой смеси были проведены эксперименты при температуре 400 °С. Основные

параметры и результаты испытаний для газовых смесей и чистого водорода представлены в таблицах 6 и 7 соответственно. Циркуляция газовой смеси осуществлялась с помощью спирального насоса.

Таблица 6

Параметры и результаты исследования водородопроницаемости мембраны из палладий-серебряного сплава при использовании газовых смесей в циркуляционном режиме

№ п/п	Температура процесса, °С	P, торр	H ₂ , %	$D_{эф}^o$, см ² /с	$P_{эф}$, см ³ /(с·см·Па ^{0,5})	$S_{эф}$, см ³ /(см ³ ·Па ^{0,5})	Φ_H , (см ³ /с)
1	400	781	0,13	1,35E-03	9,25E-06	3,38E-02	6,33E-03
2		770	1,30	6,99E-04	2,96E-06	7,94E-03	6,24E-03
3		775	13,00	8,35E-04	1,22E-06	1,78E-03	8,41E-03
4		783	50,00	3,64E-04	9,95E-07	2,32E-03	1,37E-02
5		781	75,00	3,67E-04	9,89E-07	2,52E-03	1,63E-02
6		774	100,00	2,89E-04	7,41E-07	2,26E-03	1,46E-02

Таблица 7

Параметры и результаты исследования водородопроницаемости мембраны из палладий-серебряного сплава при использовании чистого водорода в циркуляционном режиме

№ п/п	Температура процесса, °С	Давление, торр	$D_{эф}^o$, см ² /с	$P_{эф}$, см ³ /(с·см·Па ^{0,5})	$S_{эф}$, см ³ /(см ³ ·Па ^{0,5})	Φ_H , (см ³ /с)
1	400	1,1	2,37E-05	5,32E-08	1,08E-02	3,89E-05
2		8,9	4,95E-04	1,66E-07	3,80E-02	3,53E-04
3		106	2,55E-04	4,72E-07	4,98E-03	3,28E-03
4		380	2,71E-04	7,94E-07	2,69E-03	1,05E-02
5		582	8,14E-04	9,26E-07	1,10E-03	1,52E-02
6		774	2,89E-04	7,41E-07	2,26E-03	1,46E-02

По полученным результатам была определена зависимость потока водорода через палладий-серебряную мембрану от парциального давления водорода на входной стороне (рис. 13 и 14).

Из полученных результатов на рис. 13 и 14 видно, что при парциальных давлениях водорода выше 200 торр поток водорода через мембрану не зависит от наличия гелия в исходной камере. На более низких значениях парциаль-

ного давления водорода наблюдается расхождение в потоках, причем более высокие значения достигаются на газовой смеси. Вероятней всего, такое явление объясняется чистотой используемых газов. Для экспериментов использовали баллонный водород с чистотой 99,99 об. % и баллонный гелий марки 6.0 с чистотой 99,9999 об. %. Таким образом, с увеличением доли гелия снижается концентрация примесей в газовой смеси.

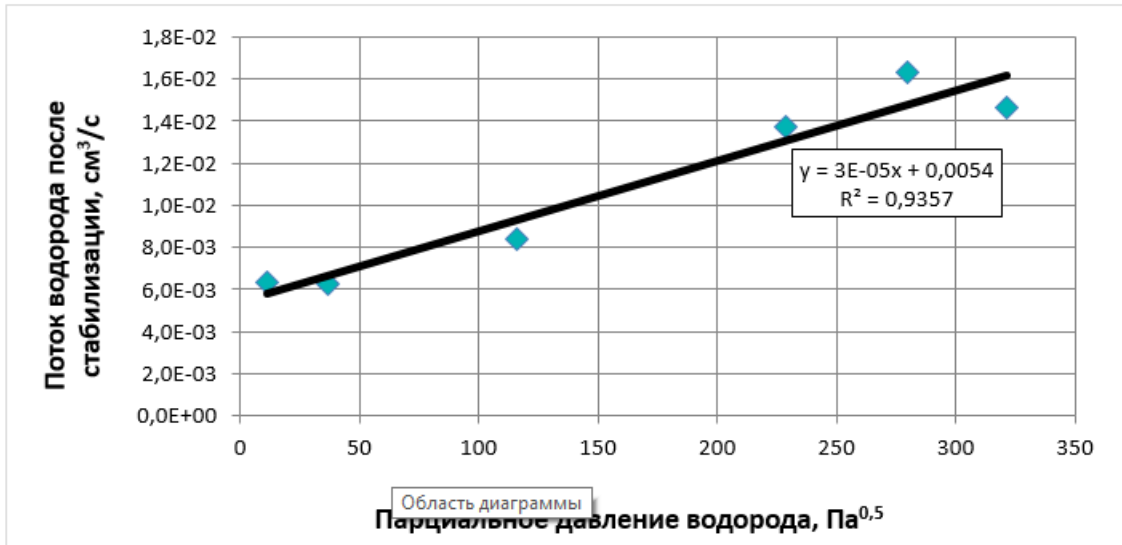


Рис. 13. Величины потока водорода через палладий-серебряную мембрану при использовании газовых смесей в циркуляционном режиме

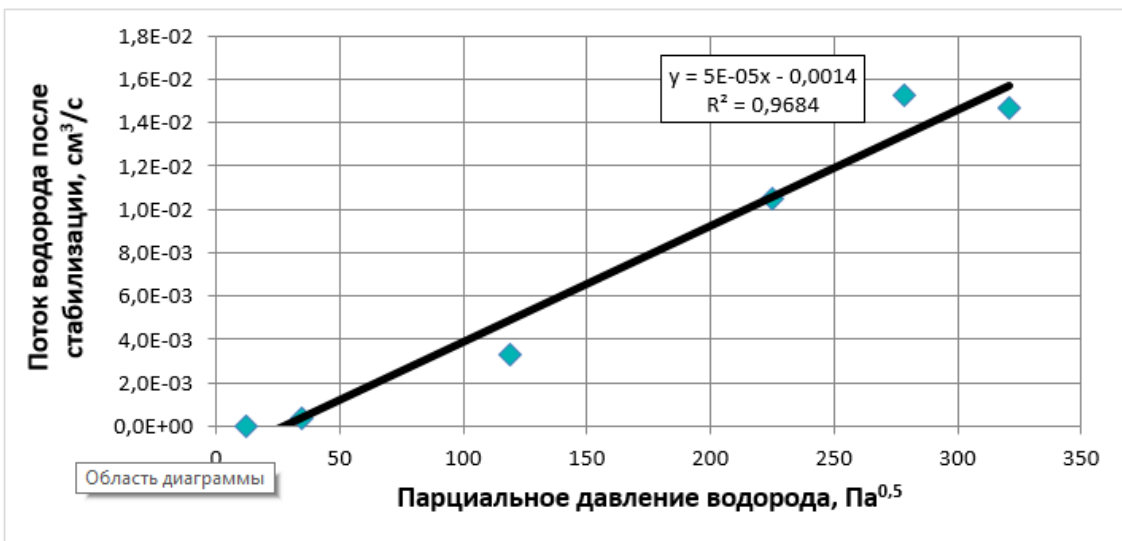


Рис. 14. Величины потока водорода через палладий-серебряную мембрану при использовании чистого водорода в циркуляционном режиме

Таким образом, трубчатые палладий-серебряные мембраны могут быть успешно использованы как для очистки изотопов водорода от прочих газов, так и для селективного выделения трития вместе с другими изотопами водорода в системе газоочистки жидко-солевого реактора. Для ускорения процесса выделения изотопов водорода на входной стороне мембраны должна быть организована циркуляция газа, а на выходной стороне откачка изотопов

водорода с помощью герметичных вакуумных насосов.

На основе проведённых экспериментов была разработана эскизная конструкторская документация мембранного модуля для выделения трития в системе газоочистки исследовательского жидко-солевого реактора ИЖСР с циркуляцией газовой смеси. Ожидаемая селективность отделения изотопов водорода от прочих газов – не менее 99,99999 об. %

ВЫВОДЫ

В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Экспериментально обоснован модуль мембранного выделения изотопов водорода жидко-солевого реактора на основе палладий-серебряных мембран.

2. Определены температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости трития для палладий-серебряной мембраны с концентрацией серебра около 15 %.

3. Определена скорость выделения изотопов водорода из смеси с гелием при

использовании циркуляционного режима работы газовой смеси с входной стороны.

4. Разработана эскизная конструкторская документация мембранного модуля для выделения трития в системе газоочистки исследовательского жидко-солевого реактора с ожидаемой селективностью отделения изотопов водорода от прочих газов – не менее 99,99999 об. %

Авторы выражают благодарность заслуженному сотруднику тритиевого отдела АО «ВНИИНМ» М.И. Белякову за ценные консультации и техническую помощь в работе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е. О. и др. *Белая книга ядерной энергетики*. – 2001.
2. Schmutz H. A., Sabharwall P., Stoots C. *Tritium Formation and Mitigation in High Temperature Reactors* //US, Np. – 2012. – С. 33.
3. Bornschein B. et al. *Tritium tests with a technical PERMCAT for final clean-up of ITER exhaust gases* //Fusion engineering and design. – 2003. – Т. 69. – №. 1-4. – С. 51-56.
4. ОСТ 95 10447-91 *Материалы ядерных реакторов конструкционные. Метод исследовательских реакторных испытаний на водородопроницаемость*. –М., 1992, -25 с.
5. ГОСТ 492-2006. *Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки*. –М., 2011, -15с.
6. Аникин А. С. и др. *Определение диффузионных характеристик трития в конструкционном материале жидкосолевого реактора* //Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. – №. 5-6. – С. 265-271.
7. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. *Физические величины. Справочник. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З.* –М.;
8. Галактионова Н.А. *Водород в металлах*. М.: Металлургия, 1967.
9. *Водород в металлах*. Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. М.: Мир, 1981.
10. Гапонцев А.В., Кондратьев В.В. *Диффузия водорода в неупорядоченных металлах и сплавах*. – Успехи физических наук, 2003, том 173, №10, с. 1107-1129.
11. Mindyuk A. K., Svist E. I. *The diffusion mobility of hydrogen in iron and steel allowing for phase transformations* //Soviet materials science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov/Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. – 1975. – Т. 9. – №. 1. – С. 34-38.

Поступила в редакцию / Received 02.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.06.2025

Принята к публикации / Accepted 16.06.2025