

УДК 621.039.5:546.11.027*3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИТИЯ В КОНСТРУКЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА

Аникин А.С., Семенов А.А., Лизунов А.В., Забирова Н.Е., Крюкова А.С., Беляков М.И., Козлова Е.В.,
Ананьев А.В., Лесина И.Г., Тарасов В.Р., Чекушин Р.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),
Букин А.Н. (АО «ВНИИНМ», РХТУ, г. Москва)
e-mail: asanikin@bochvar.ru

Жидкосольевой реактор планируется использовать для снижения количества долгоживущих высокоактивных отходов отработавшего ядерного топлива. В нем уран, плутоний и другие актиноиды растворены в расплавленной несущей соли. В качестве несущей соли может использоваться смесь фторидов лития и бериллия LiF—BeF или смесь фторидов лития, натрия и калия LiF—NaF—KF [1].

При эксплуатации реакторной установки в топливной соли образуются продукты деления и другие радиоактивные материалы, например, тритий частично как продукт деления, но в основном за счет поглощения нейтронов литием (табл. 1). Радиоактивные элементы обычно ограничиваются стенками трубопроводов и сосудов, однако тритий при высокой температуре диффундирует через металлы и может попасть в окружающую среду [3].

Таблица 1. Источники и скорость образования трития в жидкосольевом реакторе мощностью 1000 МВт [2]

Источник	Скорость образования, Бк/сут
$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$	$4,47 \cdot 10^{13}$
$^7\text{Li}(n, \alpha + n)^3\text{H}$	$4,33 \cdot 10^{13}$
Тройное деление	$1,14 \cdot 10^{12}$
$^{19}\text{F}(n, ^{17}\text{O})^3\text{H}$	$3,33 \cdot 10^{11}$

В теплоноситель второго контура реактора тритий попадает в результате диффузии из первичной системы через стенки труб в теплообменниках и за счет захвата нейтронов в соли теплоносителя. Из вторичной системы он мигрирует в основном посредством диффузии через металлические стенки, поскольку вторичная система обычно не содержит сорбентов, кроме самого теплоносителя, и не оснащена сложной системой продувки. В результате нейтронного

захвата компонентами несущей и охлаждающей солей может образовываться и атомарный фтор, который способен его превращать во фторид и препятствовать диффузии через металлические стенки [1].

Считается, что третий контур теплообмена — паровая система реактора является стоками для трития [3]. Предполагается, что тритий, попадающий в паровую систему, может окисляться до воды или замещать протий в воде. При этом парциальное давление в молекулярной форме фактически равно нулю.

Исследования показали, что 48% трития выделяется из первичной системы жидкосольевого реактора в составе отходящих газов, 2% — в составе отходящих газов из второго контура теплообмена, 7% — с воздухом радиатора теплоносителя, 9% — в атмосферу электролизера, 14% попадает в графит активной зоны.

Жидкосольевой реактор производит большое количество трития. Часть его будет растворена в расплавах солей, другая часть может проникать через корпус в окружающую среду. Для защиты окружающей среды необходимо использовать меры контроля и очистки для снижения выбросов. На практике указанные методы требуют комплексного применения и выбора способов обработки, которые могут обеспечить поддержку и защиту безопасной эксплуатации реактора с расплавом солей. Для моделирования поведения трития необходимо определить параметры взаимодействия со средой, а именно его диффузионные характеристики в конструкционном материале.

Целью настоящей работы является проведение исследований, направленных на изучение диффузионных характеристик трития в конструкционном материале жидкосольевого реактора и влияния на диффузию трития обработки поверхности конструкционного материала расплавом фторидов.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Среди наиболее вероятных форм трития HT, TF, НТО в жидкосолевым реакторе только молекулярный водород способен к относительно быстрой диффузии в ионизированном состоянии [4]. Из окисленных форм тритий также способен к диффузии, но только после диссоциации на ионы. Скорость проникновения из воды через трубки, изготовленные из инконеля 600 и коррозионно-стойкой стали, при температуре 300 °С и давлении 17 МПа в 1000 раз меньше, чем для случая, когда он находится в молекулярной форме [5]. Соответственно молекулярный водород рассматривается как наиболее подвижная форма трития, которая приводит к его распространению по контурам безопасности и выходу в окружающую среду.

Основными характеристиками, описывающими процесс, являются эффективный коэффициент диффузии и проницаемость, которые связаны между собой через эффективную растворимость. Эффективная диффузия учитывает диффузию в кристаллической решетке и по границам зерен [6]. Диффузионные характеристики трития определяли мембранным и радиолюминографическим методами, все три параметра — мембранным с использованием стабильного изотопа водорода протия. Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что с увеличением массы изотопа водорода его диффузионные характеристики снижаются [7]. Эффективные коэффициенты диффузии и проницаемости с протия на тритий пересчитываются с использованием коэффициента по формуле

$$K_{Т/Н} = \sqrt{a_T/a_H} = \sqrt{3/1} = 1,73, \quad (1)$$

где a_T , a_H — атомная масса трития и протия 3 и 1 а.е.м. соответственно.

Для подтверждения правомерности использования изотопного эффекта методом радиолюминографии определялись эффективные коэффициенты диффузии именно трития.

Одним из распространенных способов исследования водородопроницаемости разных материалов является мембранный метод. В основу методики определения коэффициентов диффузии положен ОСТ 95 10447 [8]. Исследования проводятся путем подачи водорода на входную сторону мембраны после вакуумирования всех объемов установки [9]. Диффузионные характе-

ристики рассчитываются объемнометрическим методом — по приращению количества водорода в калиброванном объеме или динамическим методом — по его изменению на выходной стороне мембраны. По изменению количества водорода на выходе с мембраны от времени определяется время запаздывания, которое соответствует точке пересечения результата экстраполяции значений установившегося потока водорода с временной осью. По изменению потока водорода во времени определяют дополнительную к прямоугольнику площадь S_1 и подынтегральную площадь S_2 , которые входят в формулы эффективного коэффициента диффузии в объемнометрическом методе для плоских и цилиндрических мембран

$$D_{\text{эф}}^0 = \delta^2/6t_3;$$

$$D_{\text{эф}}^0 = \frac{R_1^2 - R_2^2 + (R_1^2 + R_2^2) \ln(R_2/R_1)}{4t_3 \ln(R_2/R_1)},$$

где δ — толщина образца, м; t_3 — время запаздывания, с; R_1 , R_2 — внутренний и внешний радиус образца соответственно, м, в динамическом методе — по формулам

$$D_{\text{эф}}^0 = (\delta^2/6t_3)(S_1 + S_2/S_1);$$

$$D_{\text{эф}}^0 = \frac{R_1^2 - R_2^2 + (R_1^2 + R_2^2) \ln(R_2/R_1)}{4t_3 \ln(R_2/R_1)} \frac{S_1 + S_2}{S_1},$$

где S_1 , S_2 — дополнительная к прямоугольнику и подынтегральная площадь соответственно, у.е.

Эффективный коэффициент водородопроницаемости плоских и цилиндрических образцов определяли по формулам

$$P_{\text{эф}} = \Phi_H \delta / S_3 P^\alpha; P_{\text{эф}} = \frac{\Phi_H (R_2 - R_1)}{\pi (R_2 + R_1) l_3 P^\alpha},$$

где Φ_H — поток водорода через образец, моль/с; S_3 — эффективная площадь образца, м²; l_3 — эффективная длина образца, м; P — давление газообразного водорода на входной стороне, Па; $\alpha = 0,5$ — показатель степени.

Эффективную растворимость находили по формуле

$$S_{\text{эф}} = P_{\text{эф}}/D_{\text{эф}}.$$

Методом радиолюминографии можно определять коэффициенты диффузии именно трития по глубине образца с использованием специальных сканеров, считывающих сигнал, который

накоплен чувствительными пластинами после контакта с образцами, содержащими тритий. Образцы для насыщения сначала выдерживаются в атмосфере трития, затем разрезаются перпендикулярно исследуемой поверхности, сушатся и выдерживаются на пластинах для накопления скрытого изображения. При обработке результатов используется модель с постоянным источником и бесконечным стоком [10—12]. Аппроксимацией методом покоординатного спуска находят концентрацию трития на поверхности и коэффициент диффузии по формуле

$$c_z = c_0 \operatorname{erf} c(z/2\sqrt{Dt}),$$

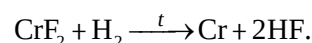
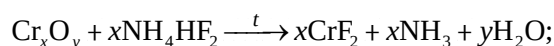
где c_z , c_0 — концентрация трития на глубине z , м и поверхности, у.е.; D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; t — время выдержки, с.

На диффузию трития в конструкционных материалах существенное влияние оказывает состояние их поверхности. При эксплуатации жидкосолевого реактора на поверхностях, контактирующих с расплавом топливной соли и жидкосолевого теплоносителя, будут протекать в разной степени процессы окисления, коррозии и пассивации за счет образования защитных слоев фторидов разного состава [1]. Известно, что оксидная пленка на конструкционных материалах и кислород в их составе снижают диффузию трития [3]. Данных о влиянии на диффузию изотопов водорода пленок фторидов нет. В связи с этим было проведено исследование, направленное на изучение влияния на диффузию трития обработки поверхности конструкционного материала расплавом фторидов.

В качестве имитатора расплава топливной соли, состоящей из смеси фторидов лития и бериллия, был выбран расплав бифторида аммония, характеризующийся по сравнению с ним низкой температурой плавления и более высокой коррозионной активностью. Это позволяло обрабатывать поверхность сплава при низкой температуре, ограничившись небольшим временем обработки. Кроме того, особенностью этого химического соединения является способность сублимироваться при температуре выше 260°C . Это позволяло его легко удалять с поверхности образца после обработки. Для исключения контакта нагретого и обработанного расплавом фторида образца с воздухом, влагой и другими кислородсодержащими средами после выдерж-

ки проводили обдувку бифторида аммония инертным газом гелием до полной сублимации, после чего также в потоке инертного газа образец охлаждали до комнатной температуры. Полированная поверхность образца сплава ХН80МТЮ после обработки в расплаве фторида стала матовой и приобрела белесый оттенок.

Таким образом, обработка образца заключалась в 2-часовой выдержке в расплаве NH_4HF_2 при 200°C и последующей обдувке бифторида аммония при 260°C до полного удаления. Затем образец выдерживали в тритии для определения эффективного коэффициента диффузии методом радиолюминографии. После выдержки в тритии с образца, обработанного расплавом бифторида аммония, исчез белесый оттенок, но появились черные пятна. Белесый оттенок, по-видимому, связан с образованием фторида хрома (II), но только не зеленого, а белого цвета из-за влияния остальных примесей сплава ХН80МТЮ или из-за иного состава фторида, отличающегося от стехиометрии. Черный цвет может быть связан с образованием мелкодисперсных частиц в результате восстановления фторида хрома водородом. Взаимодействие бифторида аммония и трития с хромом в сплаве ХН80МТЮ может быть описано следующими реакциями:



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение диффузионных характеристик трития мембранным методом. В качестве конструкционного материала жидкосолевого реактора рассматривается сплав на основе никеля ХН80МТЮ следующего химического состава, % [13]:

Ni ...	Основа	Nb ...	0,01
Mo ...	12,3	W ...	0,07
Cr ...	6,8	Al ...	1,12
Fe ...	0,15	Cu ...	0,02
Mn ...	0,013	Si ...	0,04
Ti ...	0,93	C ...	0,02

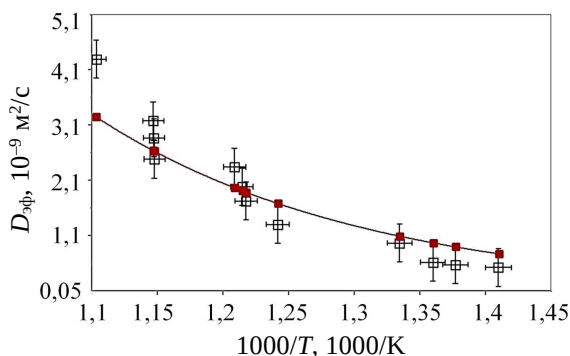
В качестве образца сравнения использовался никель марки НП2 следующего химического состава, % [14]:

Ni + Co ...	>99,5	O ...	—
As ...	<0,002	P ...	<0,002
Bi ...	<0,002	Pb ...	<0,002
C ...	<0,1	S ...	<0,005
Cd ...	<0,002	Sb ...	<0,002
Cu ...	<0,1	Si ...	<0,15
Fe ...	<0,1	Sn ...	<0,002
Mg ...	<0,1	Zn ...	<0,007
Mn ...	<0,05	Сумма примесей ...	<0,5

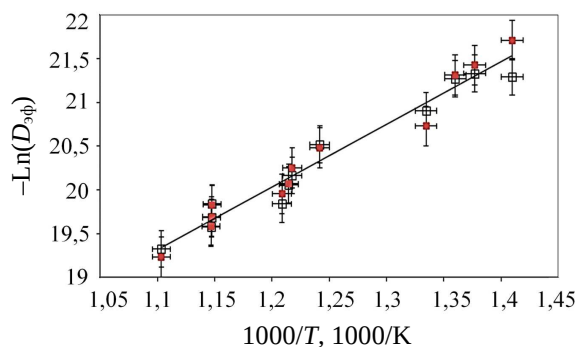
Мембраны в форме диска для сплава ХН80МТЮ и цилиндра для никеля марки НП2 герметично свариваются в аппарат из коррозионно-стойкой стали. Никель марки НП2 выбран в качестве одного из ближайших аналогов сплава ХН80МТЮ. Известно, что он обладает высокой пропускной способностью по отношению к изотопам водорода и рассматривается в качестве материала мембран для селективного выделения изотопов водорода из газового потока [15]. Это может означать, что и сплав ХН80МТЮ может обладать высокой пропускной способностью для трития.

Для верификации методики определения диффузионных характеристик изотопов водорода мембранным способом был проведен сравнительный анализ эмпирических коэффициентов диффузии никеля НП2 с данными [16]. На рис. 1 в интервале температуры 430—630 °С эффективные коэффициенты диффузии близки, что подтверждает корректность методики постановки экспериментальной работы и расчет. Эффективные коэффициенты диффузии противя, полученные объемнометрическим и динамическим методами, имеют близкие значения, за результат определения взято среднее арифметическое значений, полученных двумя методами (рис. 2).

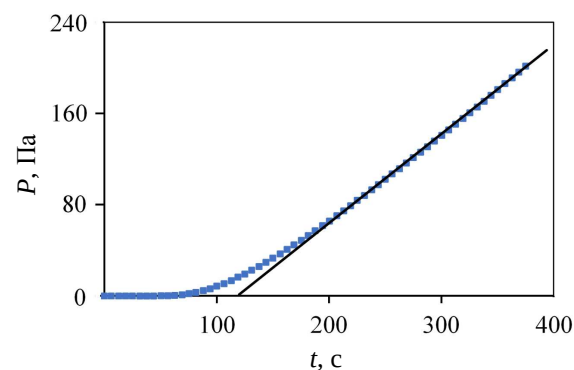
Аналогично мембранным методом были проведены исследования образца сплава



Р и с. 1. Зависимость эффективного коэффициента диффузии противя, полученного объемнометрическим методом, от обратной температуры: □ — эксперимент; ■ — [16]



Р и с. 2. Зависимость эффективного коэффициента диффузии противя от обратной температуры, полученная объемнометрическим (□) и динамическим методом (■)



Р и с. 3. Зависимость приращения давления противя на выходной стороне мембраны от продолжительности эксперимента при 462 °С

ХН80МТЮ диаметром 1,9 см, толщиной 0,154 см, площадью 2,84 см² при давлении противя на входной стороне мембраны $0,1 \pm 2\%$ МПа в интервале 450—750 °С (рис. 3). По экспериментальным данным были определены поток водорода через образец после стабилизации, эффективный коэффициент диффузии и проницаемости, а также эффективная растворимость противя:

Эффективный коэффициент диффузии, м²/с ... $D_{\text{эф}} = 7,17 \pm 0,16 \cdot 10^{-7} \times \exp[-(49,6 \pm 1,1)10^3/RT]$

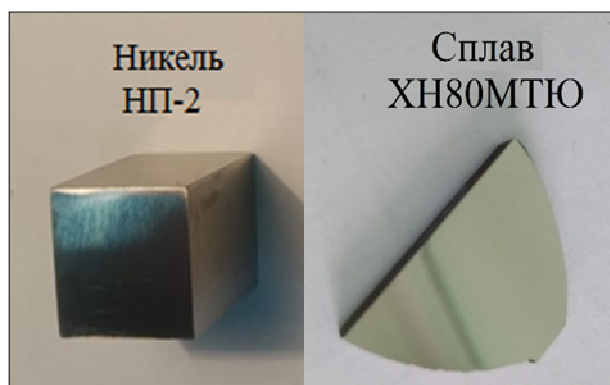
Эффективный коэффициент проницаемости, моль/с·м·Па^{0,5} ... $P_{\text{эф}} = 2,53 \pm 0,13 \cdot 10^{-7} \times \exp[-(64,0 \pm 3,3)10^3/RT]$

Эффективная растворимость, моль/м³·Па^{0,5} ... $S_{\text{эф}} = 0,61 \pm 0,04 \times \exp[-(14,1 \pm 1,1)10^3/RT]$

Определение диффузионных характеристик трития методом радиолюминографии. Для исследований были подготовлены образцы из никеля НП2 и сплава ХН80МТЮ (табл. 2, рис. 4).

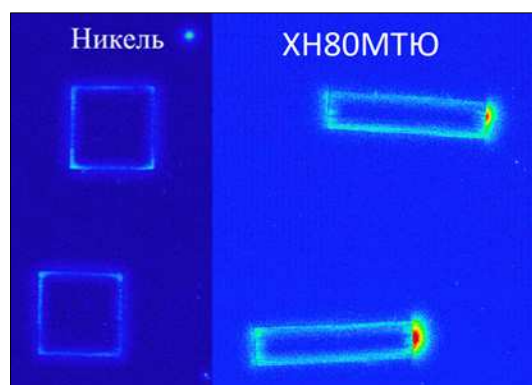
Таблица 2. Геометрические размеры и масса образцов никеля и сплава ХН80МТЮ для определения коэффициентов диффузии методом радиолюминографии

Номер партии	Марка образца	Толщина, мм	Масса, г
1	Никель НП2	15,98×13,97×13,87	27,40
2		16,2×13,95×13,83	27,86
3	Сплав ХН80МТЮ	3,7	7,2859
4		3,76	7,6227
5		3,66	5,1777
6		3,83	3,2914
7		3,82	3,3682
8		3,6	3,1471

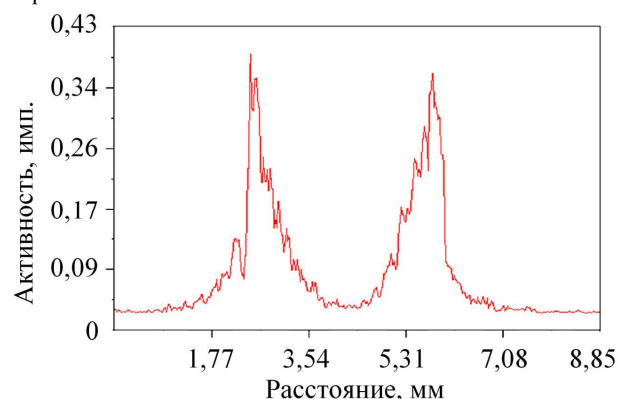


Р и с. 4. Внешний вид образцов для исследований

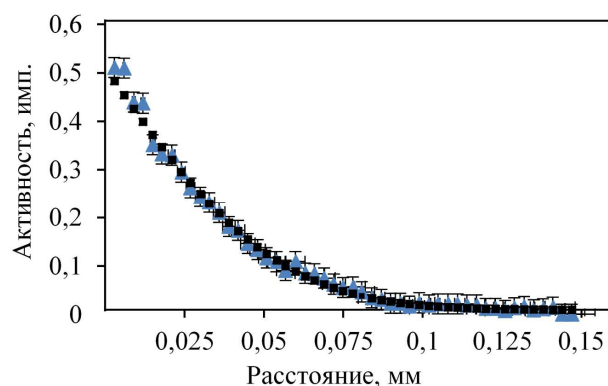
Образцы насыщали тритием на вакуумной установке. Концентрация трития в газовой смеси с протием изменялась в диапазоне 0,95—1,11% по объему, давление изотопов водорода — 75—120 кПа, температура — 450—600 °С. Необходимым условием исследований является соответствие насыщения тритием модели с постоянным источником и бесконечным стоком. Таким образом, давление изотопов водорода в аппарате с образцами поддерживается на постоянном уровне, не допускается диффузия трития в центральную часть образца (сквозная диффузия). Из-за небольшой толщины образца и необходимости соблюдения данных условий продолжительность выдержки в атмосфере трития варьировали в интервале 5—30 мин, уменьшая с ростом температуры насыщения. После насыщения образцы разрезали на высокоточном станке с водяным охлаждением, распределение трития по глубине определяли с помощью чувствительных ИР-пластин. На рис. 5 показан срез образцов из никеля марки НП2 и сплава ХН80МТЮ, рис. 6, 7 — распределение трития



Р и с. 5. Радиолюминограмма образцов после выдержки в тритии



Р и с. 6. Распределение трития на срезе образца из сплава ХН80МТЮ



Р и с. 7. Распределение трития в образце из сплава ХН80МТЮ с $D_{эф} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$: $\blacktriangle$ — эксперимент; $\blacksquare$ — аппроксимационная зависимость [10—12]

после выдержки при 450 °С и результат математической обработки с учетом засветки, которая возникает при воздействии на ИР-пластину β -излучения трития, испускаемого с боковых граней образцов. За результат определения эффективного коэффициента диффузии принято среднее арифметическое по не менее 10 профилям с каждого образца.

По полученным данным была определена температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии трития сплава

ХН80МТЮ в интервале 450—600 °С, которая описывается уравнением

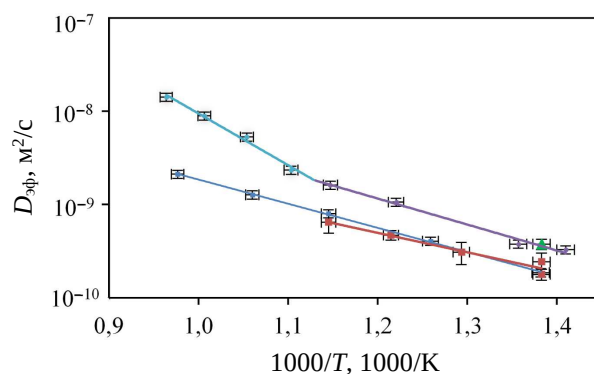
$$D_{\text{эф}} = 1,58 \pm 0,10 \cdot 10^{-7} \exp[-(40,0 \pm 2,6)10^3/RT].$$

Небольшое различие эффективных коэффициентов диффузии трития для сплава ХН80МТЮ, полученных двумя методами, объясняется большой погрешностью метода радиолюминографии. Для данного метода оптимальная толщина образцов не менее 10 мм, так как увеличивается продолжительность насыщения трития при охлаждении аппарата с образцами и удаление из него трития.

Образец из сплава ХН80МТЮ, который предварительно был обработан расплавом бифторида аммония, был выдержан в тритии при 450 °С. В результате было обнаружено увеличение эффективного коэффициента диффузии трития с $2,43 \pm 0,58 \cdot 10^{-10}$ без обработки до $3,77 \pm 0,49 \cdot 10^{-10}$ м²/с при обработке, т.е. в 1,55 раза выше, чем образца сравнения. Таким образом, при эксплуатации реактора возможна вероятность увеличения скорости проникновения трития через оболочку корпуса. Воздействие расплавов фторидов может проявляться еще сильнее при более высокой температуре.

Сравнительный анализ. Анализ эффективных коэффициентов диффузии трития в никеле НП2 мембранным и радиолюминографическим методами показал их близкие значения $3,58 \pm 0,34 \cdot 10^{-10}$ и $3,28 \pm 0,92 \cdot 10^{-10}$ м²/с и соответствие данным $4,72 \cdot 10^{-10}$ м²/с [16], следовательно оба метода могут быть применимы для оценки диффузии трития в металлах.

В рамках работы были определены температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии трития в никеле марки НП2 и сплаве ХН80МТЮ (рис. 8). Эксперименты проводились с применением мембранного и радиолюминографического методов. Результаты обоих методов почти полностью совпадают. Это подтверждает, что для оценки диффузионных характеристик изотопов водорода допускается использовать коэффициент, рассчитываемый по уравнению (1). Сплав ХН80МТЮ имеет отличные от никеля НП2 параметры проницаемости трития. Температурная зависимость для сплава ХН80МТЮ в исследуемом диапазоне 450—751 °С не имеет перегибов, коэффициенты диффузии и проницаемости трития не возрастают



Р и с. 8. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии трития сплава ХН80МТЮ при 450—751 °С $y = 7 \cdot 10^{-7} \exp(-5,962x)$ (■) и 450—600 °С $y = 2 \cdot 10^{-7} \exp(-4,8x)$ (■), определенная мембранным методом и методом радиолюминографии соответственно, никеля НП2 при 435—599 °С $y = 3,10^{-6} \exp(-6,421x)$ (●) и 633—764 °С $y = 0,0032 \exp(-12,74x)$ (●), определенная мембранным методом, сплава ХН80МТЮ после выдержки в расплаве бифторида аммония при 450 °С, определенная методом радиолюминографии (▲)

также резко при увеличении температуры, как на никеле НП2. Коэффициенты диффузии трития для сплава ХН80МТЮ имеют похожие значения, которыми обладает коррозионно-стойкая сталь [17, 18]. Сходство со сплавом ХН80МТЮ по параметрам скорости диффузии трития может быть обусловлено наличием пленки оксидов хрома. После выдержки образца из сплава ХН80МТЮ в расплаве бифторида аммония эффективный коэффициент диффузии трития увеличился до значений, которыми обладает никель НП2, что может объясняться удалением оксидной пленки с поверхности. Это означает, что воздействие расплава топливной соли на стенку реактора при эксплуатации может привести к ускорению диффузии трития.

ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что сплав ХН80МТЮ имеет значительно более низкие диффузионные характеристики трития $D_{\text{эф}} = 7,17 \pm 0,16 \cdot 10^{-7} \exp[-(49,6 \pm 1,1)10^3/RT]$ м²/с в отличие от чистого никеля марки НП2, не имеет перегибов в температурных зависимостях. Никель марки НП2 после температуры 600 °С характеризуется более резким увеличением эффективных коэффициентов диффузии трития, что может быть обусловлено образованием фаз или изменением структуры материала с ростом температуры. Резкие перепады могут привести к

ускоренному наводороживанию материала, увеличению его хрупкости и способствовать разрушению при больших нагрузках.

Коэффициенты диффузии трития в сплаве ХН80МТЮ, определенные методом радиолюминографии при 450—600 °С, с учетом погрешности воспроизводят коэффициенты диффузии, оцененные мембранным методом. Это подтверждает возможность использования уравнения (1) для оценки диффузионных характеристик изотопов водорода.

Установлено увеличение коэффициента диффузии трития после выдержки сплава ХН80МТЮ в расплаве бифторида аммония, оцененное методом радиолюминографии при 450 °С. Оно совпадает со значением, полученным на никеле марки НП2 мембранным методом. Это может означать ускорение диффузии трития при эксплуатации реактора. Для проверки гипотезы необходимы исследования диффузии трития в конструкционных материалах после выдержки в расплавах несущих солей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson M., Sridharan K., Morgan D. e.a. Heat Transfer Salts for Nuclear Reactor Systems—Chemistry Control, Corrosion Mitigation, and Modeling. Univ. of Wisconsin, Univ. of California, PNNL, 2015.
2. Schmutz H., Sabharwall P., Stoots C. Tritium Formation and Mitigation in High Temperature Reactors. US, 2012.
3. Qiao Y., Liu F., Zhang C. e.a. The sources and control of tritium in molten salt reactor. Advanced materials research. — Trans Techn. Publ. Ltd, 2014, v. 953, p. 609—613.
4. Галактионова Н.А. Водород в металлах. М.: Металлургия, 1967.
5. Katayama K., Matsumoto T., Ipponsugi A. e.a. Tritium permeation from tritiated water to water through Inconel. — Nucl. Mater., 2022, v. 565, p. 153—723.
6. Kärger J., Heitjans P. Diffusion in Condensed Matter: Methods, Materials, Models. NY: Springer, 2005, p. 417—460.
7. Lässer R. Properties of Protium, Deuterium and Tritium in Selected Metals. Tritium and Helium-3 in Metals. Berlin: Springer, 1989.
8. Материалы ядерных реакторов конструкционные. Метод исследовательских реакторных испытаний на водородопроницаемость. ОСТ 95 10447—91. М., 1992. 25 с.
9. Семенов А.А., Аникин А.С., Лизунов А.В. и др. Аппроксимация процесса натекания водорода при его диффузии через металлические мембраны. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2021, № 4(110), с. 23—35.
10. Бобырь Н.П., Лесина И.Г., Семенов А.А. и др. Исследование распределения трития в конструкционных и функциональных материалах методом радиолюминографии. — Аналитика, 2021, т. 11, № 1, с. 40—45.
11. Лесина И.Г., Семенов А.А., Аникин А.С. и др. Радиолюминография — высокоинформативный метод исследования тритийсодержащих материалов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2019, № 4, с. 81—90.
12. Иванов Б.В., Аникин А.С., Букин А.Н. и др. Измерение коэффициента диффузии водорода в циркониевых сплавах с помощью метода радиолюминографии. — Физика и химия обработки материалов, 2018, № 2, с. 81—91.
13. Игнатьев В.В. Создание экспериментальных установок и базы данных для выбора и усовершенствования жидкосольевых топливных композиций и теплоносителей в ядерных реакторах. Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. М., НИЦ «Курчатовский институт», 2007.
14. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. ГОСТ 492—2006. М., 2011. 15 с.
15. Wang M., Zhou Y., Tan X. e.a. Nickel hollow fiber membranes for hydrogen separation from reformat gases and water gas shift reactions operated at high temperatures. — Membrane Sci., 2019, v. 575, p. 89—97.
16. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
17. Grant D., Cummings D., Blackburn D. Hydrogen in 304 steel — diffusion, permeation and surface reaction. — Nucl. Mater., 1987, v. 149, p. 180—191.
18. Grant D., Cummings D., Blackburn D. Hydrogen in 316 steel — diffusion, permeation and surface reaction. — Ibid., 1988, v. 152, p. 139—145.

Поступила в Редакцию 28.09.22