

Следует отметить, что эта структура не является стабильной и возникает только при воздействии облучения и высокой концентрации внедренного дейтерия. Как известно [9], никель не образует стабильных гидридов, но в условиях его интенсивного насыщения водородом в процессе электролиза образуется новая г.ц.к.-фаза, характеризующаяся увеличенным периодом решетки 0,3735 нм и высоким отношением $H:Ni \approx 0,8$ [10]. Эта фаза неустойчива и при комнатной температуре разлагается за время от десятков минут до десятков часов в зависимости от условий насыщения. При разложении гидроксида в поверхностных слоях возникают упругие напряжения, что с одновременным выделением водорода приводит к растрескиванию как грани зерен, так и самого зерна, что хорошо видно в микроскоп. Электронно-микроскопические исследования использовавшихся никелевых образцов также выявили появление похожих блочных выделений.

Характер зависимости проникающего потока от энергии ионов обусловлен ионно-стимулированной десорбцией. Ускорение десорбционных процессов под воздействием ионного облучения отмечалось и ранее для нержавеющей стали [11], когда скорость десорбции водорода при ионной бомбардировке более чем в 10 раз превышала скорость термодесорбции. Одинаковая температурная зависимость дает основание предположить, что это термодесорбция, ускоренная облучением. В таком случае ее скорость определяется энергией, выделяемой в поверхностных слоях при ионной бомбардировке. Поэтому увеличение энергии ионов приводит к уменьшению проницаемости (см. рис. 4). Этот эффект, очевидно, возможен при низкой энергии бомбардирующих ионов, когда энерговыделение происходит в приповерхностных слоях. При дальнейшем росте энергии ионов (больше 240 эВ) энергия выделяется в более глубоких слоях и скорость десорбции уже не изменяется.

При еще большей энергии ионов (свыше 1,5 кэВ) увеличивается глубина пробега ионов в металле и в результате уменьшения градиента концентрации уменьшается реэмиссионный поток и соответственно повышается проникающий поток [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Livshitz A.I., Notkin M.E., Samartsev A.A. Physico-chemical origin of superpermeability — large-scale effects of surface chemistry on «hot» hydrogen permeation and absorption in metals. — *J. Nucl. Mater.*, 1990, v. 170, p. 79—94.
2. Фомичев А.И., Канаев А.И., Шарапов В.М. Использование электростатического энергоанализатора для исследования параметров ионно-плазменного источника. — ПТЭ, 1989, № 2, с. 162—165.
3. Roth J., Bohdanský J., Ottenberger W. Data on low energy light ion sputtering. IPP-Berichte, 9/26, 1979.
4. Waelbroeck F., Winter J., Wienhold P. Influence of the wall temperature on hydrogen recycling phenomena in an SS-simulation apparatus. — *J. Nucl. Mater.*, 1981, v. 103—104, p. 471—475.
5. Pitcher C. A review of particle fuelling and recycling processes in magnetic fusion devices. — *Vacuum*, 1988, v. 38, № 12, p. 1059—1069.
6. Курдюмов А.А., Беляков Ю.И., Звездин Ю.И. Диффузия дейтерия, поглощенного никелевым катодом в условиях тлеющего разряда. — *Журн. техн. физ.*, 1973, т. 43, вып. 1, с. 164—170.
7. Лившиц А.И., Ноткин М.Е., Пустовойт Ю.М., Яковлев С.В. Пропускание и поглощение атомов и ионов водорода нержавеющей сталью 1X18H9T. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 1982, вып. 2(10), с. 73—76.
8. Causey R., Kerst R., Mills V. The effect of surface composition on plasma driven permeation of deuterium through 304 stainless steel. — *J. Nucl. Mater.*, 1984, v. 122—123, p. 1547—1552.
9. Гольдшмидт Х.Дж. Сплавы внедрения, т. 2. М.: Мир, 1971, с. 463.
10. Boniszewski T., Smith G.C. A note of nickel hydride. — *Phys. Chem. Solids*, 1961, v. 21, p. 115—118.
11. Шарапов В.М., Канаев А.И., Захаров А.П. Проникновение водорода через нержавеющую сталь X18H10T из плазмы тлеющего разряда. — *Атомная энергия*, 1985, т. 59, вып. 4, с. 269—273.
12. Залужный А.Г., Копытин В.П., Пестрецов С.М. и др. Водородопроницаемость конструкционных материалов при ионном облучении. Тезисы докл. Вес. конф. «Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов». Ленинград, ЦНИИ КМ «Прометей», 1990, т. 2, с. 216.

Поступило в Редакцию 7.06.93

УДК 621.039.584-733

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ИОДА В ГЕЛИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ВТГР

Борисов Н.Б., Борисова Л.И. (НИФХИ), Былкин Б.К., Цветков С.В. (ВНИИАМ), Момот Г.В., Хрулев А.А. (Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Практика эксплуатации ядерных реакторов показала, что в газозеролевых выбросах в значительном количестве может находиться радиоактивный йод, представляющий серьезную опасность для здоровья обслуживающего персонала и населения. При этом он может находиться одновременно в виде аэрозолей и газообразных продуктов с различными сорбционными свойствами, что осложняет надежность и эффектив-

ность систем очистки выбросов. Применительно к ВТТР обоснование радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды при эксплуатации является приоритетной задачей, от положительного решения которой может зависеть судьба этой перспективной реакторной концепции. В связи с указанным обстоятельством выполнена серия экспериментов по определению компонентного состава радиоактивного иода по сорбируемости в фильтрах с углем СКТ и ОУ-А, импрегнированным азотнокислым серебром, в гелии при осаждении в канале на экспериментальной установке и удалении при прогреве канала [1]. Анализ проводили на выходе гелия из экспериментального канала при нормальных температуре и давлении.

Для улавливания и анализа компонентного состава иода в гелиевой среде использовали две разновидности пакетов аналитических фильтров. В первой серии экспериментов пакеты по направлению проходящего потока газов состояли из трех фильтров АФА-РМП [2], шести фильтров АФАС-И [3, 4] и защитного фильтра АФА-РМП, во второй — из двух фильтров АФА-РМП, трех фильтров АФАС-У_{скт}, трех фильтров АФАС-И и защитного фильтра АФА-РМП.

Фильтры АФА-РМП изготовлены из материала ФПП-15-1, 5 [5], улавливающего аэрозольные фракции иода, АФАС-И — из сорбционно-фильтрующего материала с импрегнированным азотнокислым серебром углем ОУ-А [3], поглощающего все формы газообразного иода, АФАС-У_{скт} — из сорбционно-фильтрующего материала с измельченным углем СКТ, улавливающего в основном молекулярный (легкосорбируемый) иод.

После проведения каждого эксперимента пакеты фильтров разбирали на отдельные части и гамма-спектрометром измеряли содержание изотопов иода. По результатам эксперимента определяли процентное содержание аэрозольной и газообразной фракции иода, по распределению в пакете фильтров — сорбируемость газообразного иода в фильтрах АФАС-И. Содержание аэрозолей вычисляли как процент иода, поглощенного первыми двумя фильтрами АФА-РМП, к общему его количеству в пакете фильтров. Долю газообразного иода определяли соответственно как процент иода, уловленного сорбирующими фильтрами АФАС-И и АФАС-У_{скт}, к общему количеству в пакете фильтров. При использовании пакетов второго типа с фильтрами АФАС-У_{скт} дополнительно определяли процентную долю трудносорбируемой фракции газообразного иода как отношение уловленного в фильтрах АФАС-И к общему количеству в пакете.

Т а б л и ц а 1. Результаты исследований, проведенных с помощью пакета фильтров АФА-РМП и АФАС-И

Серия опытов	№ опыта	Источник выделения продуктов деления	Режим работы экспериментального канала	Продолжительность, ч	Скорость потока через фильтры, см/с	Результаты анализа			
						изотоп	% аэрозольной фракции	% газообразной фракции	β , (мг/см ²) ⁻¹
1	1.1	Твэл	Осаждение	2,0	4,5	^{131,133} I	95,7	4,3	0,23
2	2.1	»	»	2,0	26,2	»	55,3	44,7	0,07
3	3.1	Порошок	Прогрев при 400 °С после осаждения	2,0	4,5	¹³¹ I	4,5	95,5	0,41
						¹³³ I	5,5	94,5	0,41
4	3.2	»	То же при 550 °С	2,0	4,5	¹³¹ I	36,7	63,5	0,23
						¹³³ I	51,8	48,2	0,23
4	4.1	»	Осаждение	2,0	4,5	^{131,133} I	36,5	63,5	0,48
	4.2	»	Прогрев при 320 °С после осаждения	1,5	4,5	»	0,7	99,3	0,58
	4.3	»	Прогрев при 550 °С (продолжение)	2,5	4,5	»	0,5	99,5	0,23
5	5.1	»	Осаждение	1,5	4,5	»	69,7	30,3	0,23
	5.2	»	Прогрев при 420 °С после осаждения	1,0	4,5	»	33,0	67,0	0,80
	5.3	»	Прогрев при 400 °С (продолжение)	1,0	44,4	»	35,2	64,8	0,18
	5.4	»	Прогрев при 550 °С (продолжение)	2,0	4,5	»	7,0	93,0	0,60

Сорбируемость газообразного иода оценивали по распределению поглощенного иода вдоль пакета в фильтрах АФАС-И, коэффициент вычисляли по формуле

$$\beta = \frac{\ln(A_k/q_k) - \ln(A_{k+2}/q_{k+2})}{0,5q_k + q_{k+1} + 0,5q_{k+2}}$$

где A — количество иода, уловленного сорбирующим фильтром; q — содержание сорбента в фильтре, мг/см²; k — порядковый номер сорбирующего фильтра в пакете.

Из анализа экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, 2, следует, что при осаждении иода в экспериментальном канале и прогреве последнего после его осаждения в гелиевом потоке постоянно присутствуют изотопы иода в аэрозольной и газообразных формах, процент которых изменяется в широких пределах. Газообразную фракцию иода улавливает в пакет фильтров АФАС-И с образованием протяженного фронта по глубине сорбента с коэффициентом β от 0,07 до 0,92 (мг/см²)⁻¹. Согласно лабораторным исследованиям, эти значения указывают на присутствие в газообразной фракции трудносорбируемых соединений иода, которые плохо улавливают угольные сорбенты. При наличии легкосорбируемой молекулярной фракции в газовой среде для фильтров АФАС-И $\beta \geq 1$ (мг/см²)⁻¹.

Т а б л и ц а 2. Результаты исследований, проведенных с помощью пакета фильтров АФА-РМП, АФАС-У_{скт} и АФАС-И

Серия опытов	№ опыта	Режим работы экспериментального канала	Продолжительность, ч	Скорость потока через фильтры, см/с	Результаты анализа				
					изотоп	% аэрозольной фракции	% газообразной фракции	% трудносорбируемой фракции	β , (мг/см ²) ⁻¹
6	6.1	Осаждение	2,0	4,5	¹³¹ I	2,1	97,9	82,1	—
	6.2	Прогрев при 500 °С после осаждения	8,0	4,5	»	84,9	15,1	11,8	—
7	7.1	Осаждение	2,0	4,5	»	96,8	3,2	—	—
	7.2	Прогрев при 500 °С после осаждения	3,0	4,5	»	92,8	7,2	—	—
	7.3	То же при 550 °С (продолжение)	4,5	4,5	»	0,4	99,6	72,7	0,16
8	8.1	Осаждение	2,0	4,5	»	21,5	78,5	25,3	0,26
9	9.1	Осаждение	2,0	4,5	»	10,1	89,9	57,3	—
	9.2	Прогрев при 500 °С после осаждения	14,0	4,5	¹³¹ I ¹³³ I	15,9 17,2	84,1 82,8	78,0 76,8	0,26
10	10.0	Осаждение	2,0	4,5	¹³¹ I ¹³³ I	10,8	89,2	59,6	0,92

П р и м е ч а н и е. В качестве источника использовался порошок диоксида урана.

Эксперименты показали, что после фильтров АФАС-У_{скт} процент трудносорбируемой фракции иода составлял ~ 12—82% (см. табл. 2).

При измерении концентрации изотопов иода на фильтрах компонентный состав и распределение ¹³¹I в пакете фильтров в пределах ошибки измерения совпадал, что указывает на идентичность химических форм.

Таким образом, исследования показали, что радиоактивные изотопы иода, образовавшиеся в облученных твэлах, в гелиевой среде находились в аэрозольной и газообразных (легко- и трудносорбируемых) формах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков С.В., Былкин Б.К., Момот Г.В., Хрулев А.А. Экспериментальное исследование отложений радиоактивного иода на металлических поверхностях канала с гелием. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 5, с. 407—410.
2. Аналитические аэрозольные фильтры АФА. Каталог. М.: Атомиздат, 1963.

3. Борисов Н.В., Борисова Л.И., Старостина И.А., Петрянов И.В. Аналитическая лента АФЛ-2И-50 и фильтр АФАС-И для определения содержания радиоактивных йодов в газовых средах. — Гигиена и санитария, 1977, № 9, с. 64—66.
4. Борисов Н.В., Борисова Л.И., Старостина И.А., Петрянов И.В. Пакеты аналитических фильтров АФА и АФАС для исследования компонентного состава радиоактивного йода в воздушной среде. — Технический прогресс в промышленности. Сер. Изотопы в СССР, 1987, вып. 1 (72), с. 103—106.
5. Петрянов И.В., Козлов В.И., Васманов П.И., Огородников В.И. Фильтрующие материалы ФП. М.: Знание, 1968.

Поступило в Редакцию 15.06.93

УДК 621.362:537.533

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЭП С КОЛЛЕКТОРОМ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛА Мо (110) С ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫМ КИСЛОРОДОМ

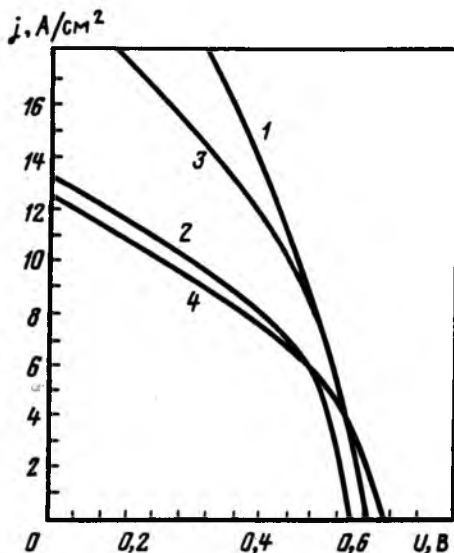
Герашенко С.С., Гусева М.И., Корюкин В.А., Кайбышев В.З., Обрезумов В.П., Талдонов Ю.В. (Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Повышение выходных характеристик термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) в дуговом режиме наряду со снижением плазменных потерь может быть достигнуто путем введения кислорода в межэлектродный зазор непосредственно к его электродам. В качестве источника кислорода в этом случае целесообразно использовать коллектор, содержащий растворенный кислород. Поскольку кислород ни в молибдене, ни в вольфраме не растворяется, были предприняты попытки его введения внутрь коллектора методом ионной имплантации. Исследования молибденовых монокристаллических образцов с имплантированным кислородом на термоэмиссионном микроскопе [1] показали существенное влияние имплантированного кислорода на эмиссионные характеристики поверхности [2]. Дальнейшие исследования были проведены на термоэмиссионном преобразователе, который представлял собой плоский цезиевый диод с переменным зазором [3].

Для определения влияния имплантации кислорода в коллектор на выходные характеристики ТЭП провели три эксперимента. В первом и втором экспериментах в качестве эмиттера и коллектора использовали Мо (110), причем коллектор отжигали в течение 20 ч при 1000 К. При этом вольт-амперные характеристики, полученные в первом эксперименте сразу же после высокотемпературного обезгаживания эмиттера, существенно выше измеренных во втором эксперименте с этими же электродами. В ходе второго эксперимента осуществлялось промежуточное вскрытие установки с последующим высокотемпературным обезгаживанием эмиттера при 2000 К, что свидетельствует о неэффективности такой очистки.

В третьем эксперименте использовали тот же эмиттер Мо (110) с пониженными характеристиками, но коллектор из Мо (110) с помощью ИЛУ-2 [4] сначала подвергли очистке ионами Ag^+ ($t \sim 5$ мин, $E = 20$ кэВ, $j = 10$ мкА/см²), затем в рабочую поверхность имплантировали ионы O^+ ($D = 6,7 \cdot 10^{17}$ ион/см², $E = 35$ кэВ, $j = 20$ мкА/см²). Отметим, что попытки полностью исключить при этом сопутствующее внедрение углерода оказались безуспешными. Для полного удаления углерода и восстановления монокристалличности поверхности, аморфизированной в результате имплантации, а также сохранения максимально возможного количества имплантированного кислорода была дополнительно проведена ступенчатая термоактивация ТЭП [5].

Анализ вольт-амперных характеристик во втором и третьем экспериментах показал, что при повышении температуры коллектора имплантированный кислород выходит на его поверхность, а затем переносится на эмиттер. В результате с повышением температуры коллектора возрастает эмиссионная способность эмиттера. В случае ТЭП с коллектором из Мо (110) подобный эффект не наблюдался. Сравнение оптимизированных вольт-амперных характеристик ТЭП при температуре цезиевого резервуара 578 К приведено на рис. 1.



Р и с. 1. Оптимизированные по температуре коллектора вольт-амперные характеристики ТЭП при $T_3 = 1673$ К, $d = 0,4$ мм, $T_k = 578$ К:

- 1 — коллектор из Мо (110), первый эксперимент;
- 2 — тот же коллектор, второй эксперимент;
- 3 — коллектор из Мо (110) с имплантированным кислородом, третий эксперимент;
- 4 — тот же коллектор после отжига при 1600 К