

Изменение температур стенки твэла при остановке реактора:

а — работают два циркуляционных насоса первого контура; б — работает один циркуляционный насос; в — охлаждение осуществляется посредством естественной конвекции.

конвекции, как это видно из рис. 1, в, существенно зависит от мощности, на которой произведена остановка.

Результаты экспериментов показывают, что даже при полном прекращении циркуляции теплоносителя с закрытием насосных задвижек (а это более «жесткий» режим, чем аварийная остановка по причине прекращения подачи электропитания, когда задвижки остаются открытыми) максимальная температура стенки твэ-

ла не достигает температуры кипения воды. При планируемом отключении циркуляционных насосов следует остерегаться отключения насосов с одновременным закрытием задвижек, так как это влечет за собой дополнительные температурные напряжения на стенках твэла.

Поступило в Редакцию 9/XI 1970 г.
В окончательной редакции 24/I 1971 г.

Диффузия урана в тугоплавких ОЦК-металлах

Г. Б. ФЕДОРОВ, Е. А. СМЕРНОВ, Ф. И. ЖОМОВ, В. Н. ГУСЕВ, С. А. ПАРАЕВ

УДК 539.219.3:669.822

Изучение диффузионной подвижности атомов в тугоплавких ОЦК-металлах [1, 2] представляет значительный практический интерес, особенно в связи с обнаруженными аномалиями температурной зависимости коэффициентов диффузии в некоторых ОЦК-металлах [3]. Исследование диффузии урана в иодидном цирконии, монокристаллическом молибдене, а также в ванадии, ниобии, тантале, вольфраме, полученных методом электроннолучевой плавки, проводилось по известной методике с использованием U^{235} [4].

Анализ кривых проникновения урана $\ln C = f(x^2)$ показал, что при всех температурах диффузия преимущественно протекала в объеме кристалла.

Температурные зависимости коэффициентов диффузии урана приведены на рис. 1, а и в таблице. Они показывают, что соотношение Аррениуса хорошо опи-

сывает диффузионную подвижность урана во всех ОЦК-металлах, за исключением циркония. Существование аномальной температурной зависимости коэффициентов диффузии в β-цирконии [8, 9] связывается с влиянием различных факторов [3, 9, 10]. Результаты проведенного исследования коэффициентов диффузии урана в β-цирконии представлены в виде суммы двух экспоненциальных членов:

$$D = 0,36 \exp(-58\,000/RT) + 5,3 \cdot 10^{-6} \exp(-19\,700/RT), \text{ см}^2/\text{сек.}$$

Разложение экспериментальной кривой на две экспоненциальные части и расчет параметров диффузии проводились с помощью приближения, предложен-

Параметры диффузии урана в тугоплавких ОЦК-металлах

Исследуемый магнетит	Q , ккал/г-атом	D_0 , см ² /сек	Температурный интервал	Q самодиффузии, ккал/г-атом
Ванадий	61,4	10^{-4}	1100—1500	73,65 [5] (880—1356° C) 94,44 [5] (1356—1883° C)
Ниобий	76,7	$5 \cdot 10^{-6}$	1720—2100	100,6 [4]
Тантал	84,4	$7,6 \cdot 10^{-5}$	1600—2150	110 [6]
Молибден	75,6	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1800—2100	96,9 [7]
Вольфрам	103,5	$2 \cdot 10^{-3}$	1700—2200	116,4 [4]

ного Кидсоном [10], по методу наименьших квадратов на вычислительной машине «Минск-22» *.

На рис. 1, б приведены опубликованные температурные зависимости коэффициентов самодиффузии исследуемых металлов [1,5—7, 10]. Из сравнения рис. 1, а и б видно, что в исследованном температурном интер-

* Требуют дополнительной проверки результаты исследования диффузии урана в β -титане. Несмотря на указания [3] о аномальных диффузионных свойствах титана, полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися данными работы [11] и описываются уравнением

$$D = 6,9 \cdot 10^{-5} \exp(-25\ 000/RT), \text{ см}^2/\text{сек} \text{ (900—1500}^\circ\text{C)}.$$

вале коэффициенты диффузии урана, как правило, значительно меньше соответствующих коэффициентов самодиффузии. Правда, при более низких температурах (ниже 1000° C) температурные зависимости коэффициентов диффузии урана и самодиффузии пересекаются и соотношение между ними становится обратным.

Интересные выводы можно сделать из сравнения энергий активации диффузии урана и самодиффузии в исследуемых металлах. Из таблицы следует, что энергии активации диффузии урана всегда меньше соответствующей энергии активации самодиффузии, поскольку атом примеси значительно искажает кристаллическую решетку металла основы. На рис. 2 приведены зависимости энергий активации самодиффузии и диффузии примесных атомов в тугоплавких ОЦК-металлах от их абсолютной температуры плавления. Прямая 1 на этом рисунке соответствует соотношению $Q = 33,4 T_{пл}$ [1].

Такая же прямолинейная зависимость существует между энергией активации диффузии урана (прямая 2 на рис. 2) и температурой плавления рассматриваемых металлов. Из-за наблюдающегося разрыхления решетки металлов атомами примеси коэффициент пропорциональности оказывается несколько меньшим и составляет 27 ккал/г-атом °C. Поэтому можно предположить, что при исследовании диффузии одного и того же элемента в различные металлы-растворители, имеющие одинаковые кристаллические структуры, энергия активации диффузии примеси может характеризовать прочность межатомной связи в металлах-растворителях.

Таким образом, уравнение типа $Q = kT_{пл}$ справедливо для диффузии различных примесей замещения, но величины коэффициента пропорциональности могут иметь различные значения, зависящие от природы диффундирующего атома. Следует также отметить, что аналогичная зависимость выполняется и для диффузии примесей внедрения, причем наблюдаемые значе-

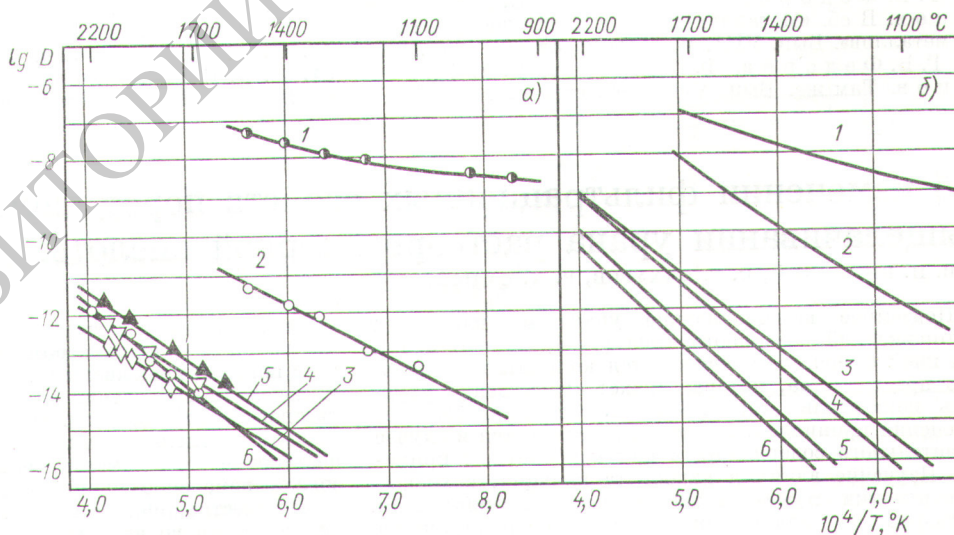
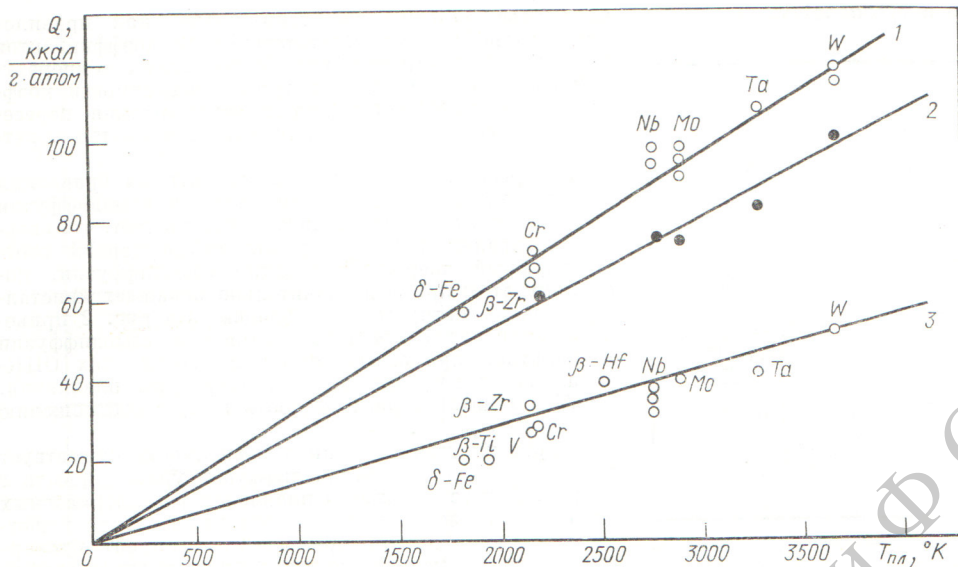


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициентов диффузии урана (а) и самодиффузии (б): 1 — цирконий; 2 — ванадий; 3 — молибден; 4 — ниобий; 5 — тантал; 6 — вольфрам.



Р и с. 2. Зависимости энергий активации самодиффузии и диффузии примесных атомов от температуры плавления матрицы:

1 — самодиффузия; 2 — диффузия урана; 3 — диффузия углерода.

ния коэффициента пропорциональности ниже, чем для самодиффузии и диффузии примесей замещения (см. рис. 2).

Поступило в Редакцию 23/XI 1970 г.
В окончательной редакции 12/IV 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Б. Федоров, Ф. И. Жомов, Е. А. Смирнов. В сб. «Металлургия и металлостроение чистых металлов». Вып. VIII. М., Атомиздат, 1969, стр. 145.
2. Г. Б. Федоров, Ф. И. Жомов, Е. А. Смирнов. Там же. Вып. VII, 1968, стр. 128.

3. А. Д. Ле Клер. В сб. «Диффузия в металлах с объемноцентрированной решеткой». М., «Металлургия», 1969, стр. 11.
4. Г. Б. Федоров, Е. А. Смирнов, В. Н. Гусев. «Атомная энергия», 27, 149 (1969).
5. Р. Ф. Пирт. См. [3], стр. 247.
6. R. Eager, D. Langmuir. Phys. Rev., 89, 911 (1953).
7. J. Askill, D. Tomlin. Philos. Mag., 8, 997 (1963).
8. G. Kidson, J. McGurn. Canad. J. Phys., 39, 1146 (1961).
9. J. Federer, T. Lundy. Trans. AIME, 227, 592 (1963).
10. G. Kidson. Canad. J. Phys., 41, 1563 (1963).
11. Л. В. Павлинов, А. И. Наконечников, В. Н. Быков. «Атомная энергия», 19, 521 (1965).

Об изменении фильтрационных свойств пород при подземном выщелачивании урана раствором серной кислоты

В. И. БЕЛЕЦКИЙ, В. Г. БАХУРОВ, Р. Х. САДЫКОВ

УДК 622.775:622.349.5

Подземное выщелачивание урана из пластовых месторождений осадочного типа [1—4] обычно в той или иной степени сопровождается коагуляцией порового пространства, которая может существенно ухудшить показатели этого процесса. Особенно большие изменения проницаемости пород наблюдаются в случае значительного содержания в них карбонатных примесей. Изучение влияния карбоната кальция, исходной концентрации H_2SO_4 , а также скорости фильтрации растворов на коагуляцию порового пространства послужило предметом настоящего исследования.

В опытах использовали кварцевый песок (диаметр частиц 0,2—0,25 мм), тщательно перемешанный с определенным количеством карбоната кальция той же

крупности. Песок загружали в плексигласовые колонки длиной 50 см и диаметром 3 см. В начале опыта колонки с породой промывали водой для получения стабильных исходных значений дебита. Затем в них подавали раствор серной кислоты. Напорные градиенты поддерживали неизменными в течение всего опыта. При такой постановке эксперимента величина дебита характеризовала изменение проницаемости песка.

В качестве примера на рис. 1 приведен график изменения дебита во времени. Четко выделяются три стадии.

Первая (на рис. 1 от начала опыта до точки А) характеризовалась резким ухудшением фильтрационных свойств песка, связанным главным образом с обра-