

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Атомная
энергия

Ежемесячный журнал
год издания двенадцатый

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 25 ■ Октябрь ■ Вып. 4

Главный редактор
М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Заместители главного
редактора:

Н. А. ВЛАСОВ, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

Редакционная коллегия:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, А. К. КРАСИН,
А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, П. Н. ПАЛЕЙ,
Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- В. Б. Осипов, Р. В. Джагацания, А. С. Штань,
В. М. Симонов, С. В. Мамиконян, Л. Д. Солодихина,
Д. П. Бодров, С. В. Голубков, Ю. Г. Ляскин.
Радиационный сульфохлоратор РС-2,5 271
- Г. Н. Баласаиов, Д. Я. Суражский, Б. А. Чумаченко,
А. А. Дерягин, Е. П. Власов. Использование мате-
матических методов при поисках месторождений
урана 274
- А. А. Шолохов, В. Е. Минашин. Теплообмен при про-
должном течении жидкости в пучках стержней 280
- Б. Н. Селиверстов, А. И. Ефанов, Ю. М. Быков,
П. А. Гаврилов, Л. В. Константинов. Некоторые
вопросы приложения статистических методов
к задачам оперативного исследования кинетиче-
ских характеристик реакторов 287
- В. И. Голубев, Н. Д. Голяев, А. В. Звонарев, М. Н. Зи-
нин, Ю. Ф. Колеганов, М. Н. Николаев, М. Ю. Ор-
лов. Распространение нейтронов в двуокиси
урана 292
- Часть I. Пространственно-энергетические распре-
деления 292
- Л. П. Абаган, В. И. Голубев, Н. Д. Голяев, А. В. Зво-
нарев, Ю. Ф. Колеганов, М. Н. Николаев,
М. Ю. Орлов. Распространение нейтронов в дву-
окиси урана 297
- Часть II. Допплер-эффект на U^{235} 297
- А. И. Громова, И. К. Морозова, В. В. Герасимов. Влия-
ние облучения на электрохимическое поведение
конструкционных материалов 302
- Р. А. Беляев, Ю. И. Данилов, С. А. Фураев. Корро-
зия длинномерных изделий из окиси бериллия
в газовых влагододержащих потоках 305
- А. Ф. Настоящий. О функции распределения электро-
нов в неоднородной слабоионизованной плазме 308

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Р. В. Джагацания, В. Б. Осипов, Л. Д. Солодихина,
Ю. Г. Ляскин, А. И. Гершеневич. Опыт эксплуа-
тации радиационно-химического сульфохлорато-
ра РС-2,5 314
- В. Б. Осипов, Л. Д. Солодихина, Д. П. Бодров,
В. М. Симонов, Р. В. Джагацания. Применение
кассет сферической формы для создания протяжен-
ных облучателей опытно-промышленных и промыш-
ленных радиационно-химических установок 315
- Э. И. Кузнецов. Время жизни заряженных частиц в
плазме на установке «Токамак ТМ-3» 315
- Н. С. Мартынова, И. В. Василькова, М. П. Сусарев,
С. С. Толкачев. Термографическое и рентгено-
структурное изучение системы $UCl_4 - KCl - NaCl$ 316
- В. Ф. Баранов, О. А. Павловский. О прохождении
электронов через вещество 317
- П. П. Зольников, Е. Г. Голиков, К. А. Суханова,
Б. Л. Двинянинов. Отражение тормозного излу-
чения бетатрона барьерами из различных материа-
лов 318
- П. А. Фелелов. Исследование влияния излучений
на прочность стеклопластиков 318

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- В. Б. Осипов, В. П. Гутеев, Р. В. Джагацания,
А. И. Гершеневич, С. В. Голубков. Техничко-эконо-
мические аспекты радиационного способа произ-
водства сульфоната 320
- Н. Т. Чеботарев, А. В. Безносикова. Исследование
структуры соединения $CaUF_6$ 321
- Б. П. Притчин. К динамике выделения накопленного
радиоактивного газа при нагревании горной породы 324

235307



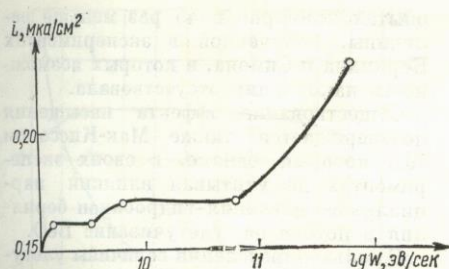


Рис. 4. Изменение плотности тока при облучении титана в 3%-ном растворе хлористого натрия ($\varphi_{н.в.э.} = -1,0$) в зависимости от энергии, поглощенной в окисном слое титана.

Заметное увеличение тока наблюдается при поглощении энергии $1,7 \cdot 10^9$ эв/сек*. В интервалах $(1,7-3) \cdot 10^9$ эв/сек и $6 \cdot 10^9 - 6 \cdot 10^{10}$ эв/сек скорость электродного процесса не изменяется. При дальнейшем возрастании поглощенной энергии ($> 6 \cdot 10^{10}$ эв/сек) плотность тока заметно увеличивается.

Таким образом, на основании проведенных исследований влияния излучения реактора (поток тепловых нейтронов 10^{12} нейтр/см²·сек) на электрохимическое поведение перлитной стали, сплавов титана и циркония в водных растворах можно сделать следующие выводы.

1. Процессы, происходящие на сплаве циркония при облучении в реакторе на тепловых нейтронах, полностью обратимы. В случае сплава титана и перлитной стали такой обратимости процессов за время испытаний не наблюдалось.

2. Возрастание скорости анодного процесса у сплавов циркония и титана, по-видимому,

связано с влиянием фотоэлектрохимического эффекта.

3. Заметный фотоэлектрохимический эффект для титана наблюдается при пороговом значении поглощенной энергии $\sim 1,7 \cdot 10^9$ эв/сек.

Поступила в Редакцию 18/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Розенфельд, Е. К. Оше. В сб. «Коррозия металлов и сплавов». М., Металлургиздат, 1963, стр. 280.
2. В. Д. Вальков, А. В. Бялобжеский. Там же, стр. 298.
3. И. Б. Рабинович, В. И. Веселовский. «Ж. физ. хим.», 30, 2, 313 (1956).
4. Ц. И. Залкинд, В. А. Шепелли, В. И. Веселовский. «Электрохимия», 2, 1165 (1966).
5. И. Л. Розенфельд, Е. К. Оше. «Докл. АН СССР», 125, 139 (1959).
6. В. В. Герасимов, В. Н. Александрова. «Атомная энергия», 10, 164 (1961).
7. В. В. Герасимов, А. И. Громова, И. К. Морозова. «Защита металлов», № 4, 452 (1965).
8. И. Л. Розенфельд, Е. К. Оше, В. И. «Труды 1-й Всесоюзной конференции по радиационной химии». М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 156.
9. А. В. Бялобжеский, В. Д. Вальков. «Докл. АН СССР», 134, 121 (1960).
10. Е. К. Оше. Обратимые радиационно-электрохимические реакции на окисленных металлах. Диссертация. М., 1963.
11. О. Кубашевский, Б. Гопкинс. Окисление металлов и сплавов. Изд. 2. М., Изд-во иностр. лит., 1965, стр. 45.
12. А. В. Бялобжеский, В. Д. Вальков. В кн. «Труды Института физической химии АН СССР». М., Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 5, стр. 119.
13. «Коррозия реакторных материалов». М., Атомиздат, 1960, стр. 250.
14. С. Т. Конобеевский, В. И. «Действие ядерных излучений на материалы». М., Госатомиздат, 1962, стр. 5.

Коррозия длинномерных изделий из окиси бериллия в газовых влагосодержащих потоках

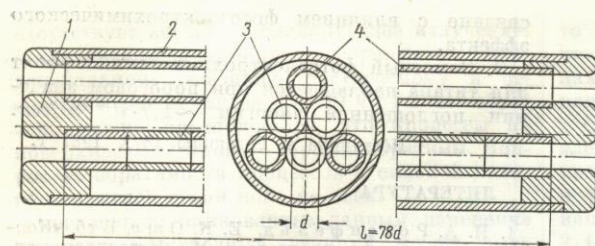
Р. А. БЕЛЯЕВ, Ю. И. ДАНИЛОВ, С. А. ФУРАЕВ

УДК 620.193.23

Исследованию взаимодействия BeO с водяными парами посвящено несколько работ [1—7], в которых рассматривалась зависимость величины улетучивания от различных факторов (температуры образца, времени выдержки образца при рабочей температуре, парциального давления водяных паров в газе и т. п.). Одна-

ко все эти работы выполнены на образцах, имеющих небольшую величину отношения длины к диаметру, и при скоростях газа 0,2—5,0 м/сек. Анализ условий работы трубчатых изделий из BeO с отношением $l/d \geq 100$ и скоростями газа 100—300 м/сек, а также результатов и условий проведения экспериментов в работах [1—7] позволил предположить [8], что на улетучивание BeO оказывает влияние парциальное давление продуктов взаимо-

* Приводится величина энергии, поглощаемой на 1 см² окисной пленки толщиной 100 Å.



Р и с. 1. Продольный и поперечный разрезы рабочего участка (термопары и термопарная соломка не показаны):
1 — решетка; 2 — защитный экран; 3 — составная трубка; 4 — центральная трубка.

действия окиси бериллия с водяными парами в окружающей среде.

При пропускании пара или влажного воздуха по длинной трубке из BeO локальные потери массы стенок трубки должны непрерывно уменьшаться в направлении движения пара за счет постепенного насыщения потока продуктами реакции. Когда это насыщение достигнет предельной для данной температуры величины, улетучивание прекратится. Этот «эффект насыщения» [8] позволяет объяснить значительные расхождения результатов, полученных разными авторами в казалось бы весьма близких условиях (см. таблицу).

Улетучивание окиси бериллия в парах воды по данным разных авторов

Параметры	Беркман и Симон [3]	Хатчисон и Малм [1, 2]	Гроссвейнер и Зейферт [4]
Масса образца, г	5,2	2	3
Плотность, г/см ³	2,4	2,38	2,3
Внешняя поверхность, см ²	9,97	6,9	138
Температура образца, °K	1823	1823	1808
Расход пара (стандартные условия), л/ч	148,5	148,5	54
Скорость пара, м/ч	994	994	3620
Общая потеря массы, мг	—	44,8	79,7
Удельная потеря массы, мг/см ² ·ч	10,2	2,6	0,23

Примечание. Каждый опыт проводился в течение 2,5 ч.

В опытах Гроссвейнера и Зейферта продукты реакции накапливались в проходящем потоке, чем, по-видимому, и можно объяснить тот факт, что величина улетучивания в указанных

опытах примерно в 45 раз меньше величины, полученной в экспериментах Беркмана и Симона, в которых возможность накопления отсутствовала.

Существование эффекта насыщения подтверждается также Мак-Киссоном [9], который, однако, в своих экспериментах не учитывал влияния парциального давления гидроокиси бериллия в потоке на улетучивание BeO.

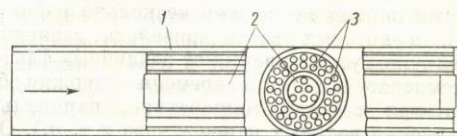
С целью определения величины улетучивания BeO при высокой температуре образца и значительной скорости газового потока и экспериментального подтверждения эффекта насыщения была

проведена серия экспериментов на длинномерных образцах.

Образцы изготавливались методом выдавливания с последующим обжигом и окончательным спеканием при 2000—2100° K. Чистота превышала 99,5%. Плотность составляла 2,8—2,9 г/см³.

Образцы монтировались в рабочий участок, представляющий собой пакет из шести трубок (рис. 1); причем три крайние (направляющие) трубки были сплошными, а три внутренние трубки состояли из 11 припаянных по торцам равных отрезков, что позволяло определять изменение локальных массовых потерь по длине канала. Внутренняя полость трубок имела ровную сплошную поверхность с трудно различимыми местами стыков.

Рабочий участок монтировался по оси экспериментальной кассеты (рис. 2), которая размещалась в рабочей камере стенда, представлявшего собой пламенную печь, изготовленную на базе камеры сгорания воздушно-реактивного двигателя [10]. Продукты сгорания керосина или спирта в атмосферном воздухе поступали в рабочую камеру, проходили через экспериментальную кассету и омывали испытываемые образцы. Так как проходное сечение кольцевого пространства между рабочим участком и наружной трубкой кассеты превышало более чем в 10 раз проходное сечение рабочего



Р и с. 2. Экспериментальная кассета:
1 — наружная трубка из Al₂O₃; 2 — рабочий участок;
3 — трубки из Al₂O₃.

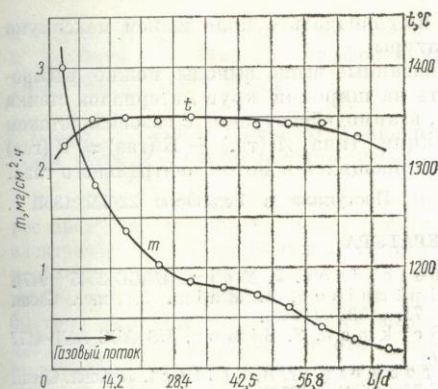


Рис. 3. Распределение температуры и локальной скорости коррозии BeO по длине рабочего участка (скорость воздуха $w = 150$ м/сек).

участка, то основная часть горячих продуктов сгорания шла по кольцевому пространству, что позволяло получать практически одинаковую температуру по всей длине рабочего участка (рис. 3).

Температура по длине и радиусу рабочего участка измерялась Pt — Pt + 10% Rh-термопарами диаметром 0,5 мм, размещенными в средней части отрезков, где алмазным диском прорезалась канавка глубиной и шириной примерно 0,5—0,6 мм. Кроме того, измерялось распределение температуры по длине и сечению экспериментальной кассеты и рабочей камеры.

Скорость газа в рабочем участке измерялась стандартным методом [11, 12] с помощью насадков и с хорошим совпадением рассчитывалась по известным расходам воздуха и топлива, геометрии экспериментальной кассеты и эшпорам температуры по ее длине и сечению.

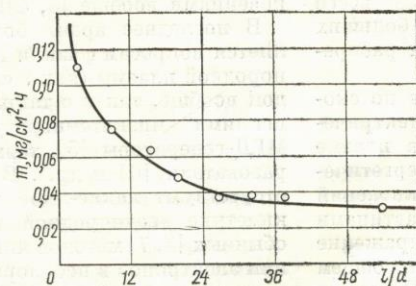


Рис. 4. Распределение локальных массовых потерь по длине трубки из Al_2O_3 ($t = 1350^\circ C$; $w = 165$ м/сек).

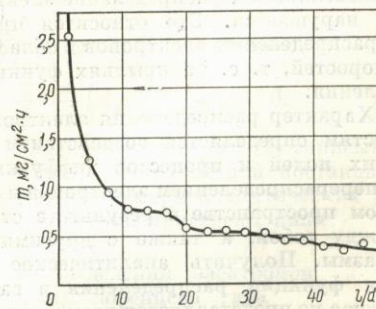


Рис. 5. Распределение локальных массовых потерь по длине образца из нафталина при обдуве их потоком воздуха ($t = 18,3^\circ C$; $w = 0,7$ м/сек).

Влагосодержание продуктов сгорания (1 г H_2O на 1 кг сухих продуктов сгорания) рассчитывалось на основании следующих экспериментально определяемых параметров: влагосодержание атмосферного воздуха, расходы воздуха и топлива, химический состав топлива.

Потери массы определялись взвешиванием образцов до и после опыта на аналитических весах. Перед взвешиванием образцы высушивались при $200^\circ C$ в течение 2,0—2,5 ч и охлаждались в эксикаторе.

Проведенные эксперименты позволили найти распределение локальных скоростей коррозии по длине образцов (см. рис. 3). Каждая точка кривой получена усреднением данных для соответствующих отрезков трех составных трубок. Средний разброс результатов по одной трубке составлял 2—3%, а максимальный не превышал 11%.

Анализ результатов измерений показывает, что величина удельных ($mg/cm^2 \cdot ч$) массовых потерь в значительной степени зависит от длины образцов, причем наблюдаемое различие может значительно возрасти (например, при увеличении общей длины трубки, уменьшении скорости газового потока и т. д.).

Если температура по длине трубки не одинаковая, а имеет максимумы и минимумы, то распределение локальных скоростей коррозии может не совпадать с распределением температуры, причем сдвиг максимума локального улетучивания по отношению к максимуму температуры определяется условиями эксперимента (влагосодержание и скорость газового потока, температура образцов и т. п.), что может иметь важное практическое значение при расчете работоспособности длинномерных изделий, омываемых потоком агрессивных газов.

Предположение об эффекте насыщения может быть распространено на все случаи, когда имеет место обратимая реакция взаимодействия газового потока с материалом стенки канала или когда материал стенки испаряется в поток нейтрального газа. Это подтверждается результатами экспериментов, проведенных по аналогичной методике на длинномерных изделиях из Al_2O_3 [предполагается взаимодействие с водяными парами по реакции $Al_2O_3 + 3H_2O \rightleftharpoons 2Al(OH)_3$], а также опытами с нафталином (испарение в поток нейтрального газа), проведенными на специальной установке, представляющей собой длинную кварцевую трубу, в которую вплотную друг к другу закладывались лодочки, залитые нафталином (рис. 4, 5).

Выводы

1. Подтверждено высказанное ранее предположение о действии эффекта насыщения.
2. Абсолютная величина удельных массовых потерь зависит от отношения длины испытываемых образцов к их диаметру. Результаты исследования коррозии, полученные на короткомерных образцах, нельзя распространять на длинномерные изделия.
3. При неравномерном нагреве трубок положение максимума локальной скорости коррозии

может не совпадать с положением максимума температуры.

4. Указанные выше выводы можно распространить на широкий круг материалов стенки канала, взаимодействующих с газовым потоком по реакции типа $A \text{ (тв.)} + B \text{ (газ)} \rightleftharpoons B \text{ (газ)}$ или испаряющихся в поток нейтрального газа.

Поступила в Редакцию 22/IX 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Hutchison, J. Malm. EACD-2345 (1947).
2. C. Hutchison, J. Malm. J. Amer. Chem. Soc., 71, 1338 (1949).
3. M. Berkman, S. Simon. US AEC ANL-4177 (1948).
4. L. Großweiner, R. Seifert. J. Amer. Chem. Soc., 74, 2701 (1952).
5. J. Elston, R. Caillat. Corrosion of Beryllium Oxide. A/Conf. 15/P/1147. France, June 1958; J. Elston, R. Caillat. Proc. of the Second Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, Unit. Nat., 1958, vol. 5, p. 334.
6. J. Elston. Nucl. Power, 5, No. 48, 131 (1960).
7. W. Young. J. Physical Chem., 60, 1003 (1960).
8. Р. А. Беляев. Окисл бериллия. М., Госатомиздат, 1962.
9. McKisson. J. Nucl. Materials, 1, 196 (1959).
10. Р. А. Беляев, Ю. И. Данилов, С. А. Фуряев. «Огнеупоры», № 10 (1968).
11. В. П. Преображенский. Теплотехнические измерения и приборы. М., Гостехтеориздат, 1953.
12. С. Г. Попов. Измерение воздушных потоков. М.—Л., Гостехтеориздат, 1947.

О функции распределения электронов в неоднородной слабоионизованной плазме

А. Ф. НАСТОЯЩИЙ

УДК 533.93

Известно, что в достаточно сильных электрических полях (сильно неоднородной плазме) максвелловское распределение электронов в газе нарушается. Это относится прежде всего к распределению электронов в области больших скоростей, т. е. на крыльях функции распределения.

Характер распределения электронов по скоростям определяется воздействием электрических полей и процессов диффузии в плазме и перераспределением электронов в энергетическом пространстве в результате столкновений между собой, а также с другими частицами плазмы. Получить аналитическое выражение для функции распределения в самом общем случае не представляется возможным. Известны только некоторые частные решения. Например распределение Дрювестейна — Давыдова [1, 2] для электронов в однородном электрическом

поле, полученное в пренебрежении электрон-электронными столкновениями, решения уравнения Власова (пренебрегается любыми столкновениями вообще [3, 4]) и др.

В последнее время большое внимание уделяется вопросам физики пространственно неоднородной плазмы (как в связи с газовым разрядом вообще, так и с такими новейшими применениями низкотемпературной плазмы, как МГД-генераторы [5], термоэмиссионные преобразователи [6] и др.). В литературе, однако, отсутствуют какие-либо работы, посвященные кинетике неоднородной плазмы. Применение обычных [2, 7] методов кинетики при исследовании электронов в неоднородной плазме связано с некоторыми дополнительными математическими трудностями. Предлагаемый ниже подход позволяет существенно упростить известную систему уравнений для угловых моментов [2, 7],