

УДК 536.24:621.039.534.44

## Содержание примесей воды в слое пористых отложений на парогенерирующей поверхности

РЯБОВ М. И.

Концентрирование примесей воды в пористых отложениях окислов железа на парогенерирующей поверхности экспериментально изучалось с помощью  $^{22}\text{Na}$  [1], а также соевым методом [2]. Степень концентрирования достигала соответственно  $10^4$  и не более 10. Существует несколько моделей [3—6] для оценки степени концентрирования. В настоящей статье предложены зависимости для количественной оценки степени концентрирования с использованием наиболее простой модели Макбета [3], которые не только качественно, но и количественно согласуются с результатами экспериментов [1].

Согласно модели Макбета, отвод пара от греющей поверхности через слой отложений происходит по так называемым паровым тоннелям, неоднократно экспериментально зафиксированным [7—9], а подвод воды к менискам в основании паровых тоннелей, где происходит испарение, идет за счет сил поверхностного натяжения по «питающим капиллярам» в пористой структуре отложений. Примеси воды будут концентрироваться в питающих капиллярах. Пренебрегая кривизной и неравномерностью сечения, представим такой капилляр в виде кругового цилиндра, ось которого является координатной осью  $X$ . В точке  $x = 0$  происходит испарение воды в паровой тоннель;  $x = \delta$  — точка выхода капилляра на поверхность отложений.

Средняя скорость движения воды в капилляре

$$W = qv'/ra, \quad (1)$$

где  $q$  — тепловой поток на поверхности нагрева;  $r$  — тепло парообразования;  $v'$  — удельный объем воды;  $a$  — доля объема отложений, приходящаяся на питающие капилляры.

В состоянии установившегося массообмена подвод примесей к основанию парового тоннеля вместе с водой, движущейся по питающим капиллярам, должен компенсироваться диффузией этих примесей навстречу потоку воды. Распределение концентрации примеси по длине питающего капилляра будет подчиняться уравнению конвективной диффузии, которое в случае пренебрежения неравномерностью скорости воды по сечению капилляра имеет вид

$$-D \frac{d^2C}{dx^2} = W \frac{dC}{dx}, \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация примеси в воде, заполняющей питающий капилляр;  $D$  — коэффициент диффузии примеси в воде.

В точке  $x = \delta$  концентрация примеси равна концентрации в исходной воде  $C(\delta) = C_n$ . В точке  $x = 0$  конвективное поступление примесей к границе испарения компенсируется диффузией от нее. (Предполагается, что концентрация насыщения не достигнута и выпадения примеси в виде твердой фазы не происходит.) В этом случае должно выполняться условие

$$-D \frac{dC}{dx} \Big|_{x=0} = WC \Big|_{x=0}. \quad (3)$$

Решением уравнения (2) при указанных граничных условиях будет

$$C(x) = C_n \exp \left[ \frac{qv'}{raD} (\delta - x) \right]. \quad (4)$$

Максимальная концентрация примеси достигается в точке испарения воды в паровой тоннель

$$C(0) = C_n \exp \left( \frac{qv'\delta}{raD} \right) = C_n \exp \left( \frac{W\delta}{D} \right). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) следует, что концентрация примесей очень быстро растет по длине питающего капилляра и может достигать большого значения вблизи места испарения, т. е. у поверхности металла. Зависимость степени концентрирования примесей воды в порах ( $\bar{\theta} = C/C_n$ ) от тепловой нагрузки и толщины отложений носит экспоненциальный характер. Сопоставим приведенные выше формулы с экспериментальными данными [1], полученными изотопным методом. Формулы (4) и (5) показывают концентрацию примеси в одной точке питающего капилляра, в опытах [1] фиксировалась средняя степень концентрирования по всей толщине отложений, которая может быть найдена из зависимости

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{C}}{C_n} = \frac{1}{C_n \delta} \int_0^\delta C(x) dx. \quad (6)$$

Подставив выражение  $C(x)$  из формулы (4) в выражение (6), получим

$$\bar{\theta} = [\exp(y) - 1]/y, \quad (7)$$

где

$$y = \frac{K}{a} y_s = \frac{K}{a} \frac{sv'q}{Dr} \quad (8)$$

— приведенная длина питающих капилляров;  $y_s = sv'q/Dr$  — приведенная толщина отложений;  $s$  — толщина отложений;  $K = \delta/s$  — коэффициент извилистости питающих капилляров.

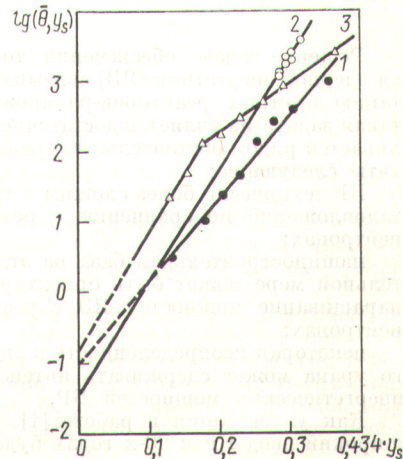
При  $y \geq 3,5$  можно полагать (с погрешностью до 3%), что

$$\exp(y) - 1 \approx \exp(y). \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) из выражения (7) получим

$$\lg(\bar{\theta} y_s) = 0,434 y_s \frac{K}{a} - \lg \frac{K}{a}. \quad (10)$$

В соответствии с выражением (10) экспериментальные данные о  $\bar{\theta}$  в области  $\frac{K}{a} y_s \geq 3,5$  должны укладываться на прямую при нанесении их на диаграмму с координатами  $\lg(\bar{\theta} y_s)$  и  $0,434 y_s$ . При этом отношении коэффициента извилистости питающих капилляров к пористости, приходящейся на капилляры,  $K/a$  численно равно тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс. Кроме того, прямая должна отсекают на оси ординат в области отрицательных значений отрезок, равный  $\lg(K/a)$ .



Результаты обработки экспериментальных данных [1] о концентрировании  $^{22}\text{Na}$  в слое пористых магнетитовых отложений

Подобная обработка трех опытов из работы [1] приведена на рисунке. Кривые 1—3 характеризуют соответственно данные опытов № 2, 5 и 7 на покрытом магнетитовыми отложениями нагревателе 6, согласно нумерации экспериментов в работе [1]. Толщина отложений 25 мкм. Опытным точкам на этих кривых соответствуют максимальные степени концентрирования, зафиксированные на каждом исследовавшемся уровне тепловых нагрузок и теплофизических параметров. В первых двух случаях экспериментальные точки хорошо легли на прямые, найденные по методу наименьших квадратов. Коэффициент корреляции соответственно 0,992 и 0,95. В области диаграммы, где прямые проведены пунктиром, они не должны проходить через экспериментальные точки, так как здесь не выполняется равенство (9).

Кривая 1 соответствует опыту, в котором наблюдается хорошая количественная сходимость рассмотренной теории и экспериментальных данных, так как десятичный логарифм тангенса угла наклона равен 1,07, что очень близко к длине отрезка, отсекаемого кривой 1 от оси ординат в отрицательной области 1,01. В этом опыте тепловой поток на экспериментальном участке последовательно увеличивался, и регистрируемая степень концентрирования  $^{22}\text{Na}$  в отложениях непрерывно нарастала. Максимальные степени концентрирования, зафиксированные на каждом уровне тепловой нагрузки, видимо, были близки к равновесным значениям.

Опытные точки, соответствующие кривой 2, получены при одинаковом тепловом потоке. Менялись только давление в стенде и, следовательно, значения  $v'$ ,  $r$ ,  $D$  в выражении (8). В результате опытные точки на рисунке расположились очень близко. Логарифм тангенса угла наклона кривой 1,19, а длина отрезка, отсекаемого от оси ординат в отрицательной области, 1,38. Согласно между этими значениями следует считать достаточно хорошим, учитывая кучность точек на кривой 2 и их удаленность от оси ординат.

В опыте, соответствующем кривой 3, тепловой поток попеременно то увеличивался, то снижался. При этом равновесные значения степени концентрирования (особенно при больших тепловых нагрузках), вероятно, не достигались. Для таких условий приведенные зависимости перестают быть справедливыми, и, видимо, поэтому проходящая через экспериментальные точки кривая 3 имеет

перегиб. Тем не менее нижние три точки, в которых степень концентрирования наименьшая и должна быть более близкой к равновесной, качественно соответствуют теории, так как проведенная через них прямая пересекает ось ординат в отрицательной области.

Из рисунка следует, что предложенные в настоящей статье зависимости для количественной оценки степени концентрирования растворимых примесей воды в слое пористых отложений на парогенерирующей поверхности достаточно хорошо подтверждаются результатами изотопных исследований этого явления [1]. При расчетах по формулам (4) и (5) неопределенной величиной является  $K/a$ . Как видно из рисунка, в экспериментах [1]  $K/a$  было примерно равно 10—20, но менялось от опыта к опыту, хотя все измерения проводились в одной точке одного экспериментального участка с отложениями. По-видимому, неостоянство  $K/a$  связано с тем обстоятельством, что в пористой структуре отложений продуктов коррозии нет строго фиксированных питающих капилляров, а пути подвода питающей воды через поры в отложениях к менискам в основании паровых тоннелей в каждом случае формируются случайно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Picone L., Whyte D., Taylor C. WCAP-3731, 1963.
2. Стырикович М. А. и др. «Теплофизика высоких температур», 1977, т. 15, № 2, с. 353.
3. Macbeth R. AEEW-R741, 1974.
4. Cohen P. «Amer. Inst. Chem. Engng Symp. Series», 1974, v. 70, N 138, p. 74.
5. Стырикович М. А., Леонтьев А. И., Малышенко С. П. «Теплофизика высоких температур», 1976, т. 14, № 5, с. 998.
6. Полонский В. С. и др. «Докл. АН СССР», 1978, т. 241, № 3, с. 579.
7. Macbeth R., Trenberth R., Wood R. AEEW-R705, 1974.
8. Рассохин Н. Г. и др. «Теплоэнергетика», 1973, № 9, с. 12.
9. Huijbregts W., Genlgersma G., Snel A. KEMA Rapport N III, 9884-74, 1974.

Поступило в Редакцию 6.08.79

УДК 621.039.5

## О возможности наращивания масштаба топливного цикла для различных быстрых реакторов

ШМЕЛЕВ А. Н., ЮРОВА Л. Н.

Решение задачи обеспечения топливом развивающейся ядерной энергетики (ЯЭ) связывают с вводом в эксплуатацию быстрых реакторов-размножителей (БР). Однако такая задача не является достаточно простой, что обусловливается рядом обстоятельств, среди которых можно отметить следующие:

БР технически более сложны и требуют больших капиталовложений по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах;

машиностроительная база на этапе ввода БР в значительной мере может быть ориентирована на интенсивное наращивание мощностей ЯЭ с реакторами на тепловых нейтронах;

некоторая неопределенность в оценках запасов дешевого урана может сдерживать интенсивный массовый ввод энергетических мощностей БР.

Как указывается в работе [1], в развивающейся ЯЭ широкий ввод БР в 90-х годах будет обеспечен достаточным количеством плутония для загрузки. В этих условиях

ориентация на ввод БР с пониженной удельной загрузкой может привести к задержкам в вовлечении накопленного плутония и наращивании масштаба топливного цикла быстрых реакторов.

В то же время использование на этом этапе БР с повышенными удельной загрузкой и темпом избыточного воспроизводства (с таким же временем удвоения, как у БР с пониженной удельной загрузкой) могло бы позволить развить в большем масштабе их топливный цикл за счет более раннего вовлечения накопленного плутония и последующего его размножения. Это потребовало бы меньших капиталовложений и меньших потребностей в машиностроительной базе для развертывания БР. Для иллюстрации этих соображений были выполнены расчетные оценки увеличения масштаба топливного цикла БР.

Предположим, что к моменту начала ввода БР с темпом  $\omega_c$  ( $\omega_c > \omega_0$ ) (где  $\omega_0$  — собственный темп развития системы быстрых реакторов) тепловыми реакторами накоплено количество топлива  $G(0)$ . Изменение масштаба топ-