

следует, что среднее значение коэффициента  $B = (5,9 \pm 0,6)$  кВт·с/(м<sup>3</sup>·°С), причем погрешность находится в пределах точности эмпирических формул (3) и (4). Погрешность  $B$  для отдельного реактора определяется расхождением его значений, вычисленных по формулам (3) и (4). Среднее значение  $v \approx (0,8 \div 0,9)$ .

Как следует из выражения (3), величина  $B = \alpha/w \sim \text{const} (c\rho)^{0,8} (d_r w)^{-0,2} \text{Pr}^{-0,4}$  при форсированном теплообмене слабо зависит от конструкции твэлов и термодинамических параметров теплоносителя и поэтому оказывается практически одинаковой для большинства реакторов.

Значение  $B \approx (5 \div 7)$  кВт·с/(м<sup>3</sup>·°С) также следует из обработки экспериментальных данных, проведенной М. Д. Миллиончиковым [3] для критерия  $St^* \equiv St/\sqrt{\xi/8}$  в широком диапазоне изменения параметров  $\xi$  и  $\text{Pr}$ , включающих область, характерную для исследовательских реакторов. Наконец, грубую оценку  $B$  можно получить, исходя из микроскопической модели Кармана — Прандтля передачи теплового потока  $q$  через турбулентный слой жидкости [5–7]:

$$B \equiv \frac{\alpha}{w} = \frac{q}{w\Delta t} \approx -c\rho\varepsilon\bar{\Delta t}/w\Delta t = 2c\rho\bar{w}_\perp/wd_r, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_\sigma$  — турбулентная вязкость;  $\bar{l}$  — длина «пути перемешивания»;  $\bar{w}_\perp/w$  — средняя величина относительной поперечной пульсации скорости. Подставляя в уравнение (5) экспериментальные значения  $\bar{w}_\perp/w \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\bar{l}/d_r \approx 5 \cdot 10^{-2}$ , найденные по данным работ [7–9], получим оценку  $B \approx (6 \pm 3)$  кВт·с/(м<sup>3</sup>·°С). Величина погрешности в основном определяется долей температурного перепада на ламинарном подслое, достигающей по различным моделям [5–7] (20 ÷ 50)% от полного  $\Delta t$ .

Формула (2) позволяет быстро оценивать теплотехнический запас реактора, причем она может быть отнормирована на экспериментальное значение  $B$  в одном из режимов его работы. Так как коэффициенты неравномерности энерговыделения различны для отдельных реакторов, то последние целесообразно сравнивать по величине  $k_1 \equiv k_V k_\Pi k(z_0)$ . Из таблицы видно, что при  $k_V k_\Pi \approx 2 \div 2,8$  реакторы имеют запас до кипения  $k(z_0)$  от 1,2 до 1,5. Параметры воды взяты из работы [10].

Авторы благодарят В. А. Шустова за критические замечания.

УДК 621.039.531

## Влияние перепада температуры на распухание стали X18N9 по стенке гильзы СУЗ

ПРИКАР. Г., КОСТРОМИН Л. Г., ДМИТРИЕВ В. Д.

Некоторые конструкционные элементы активной зоны облучаются в условиях перепада температуры, в результате чего, например, наблюдается неоднородное распухание материала по периметру оболочки периферийных твэлов. \* Аналогично толстостенные элементы активной зоны быстрых реакторов, характеризующиеся неодинаковой температурой внутренней и наружной поверхностей, могут претерпевать неравномерное распухание по толщине стенки. Это подтверждается результатами изучения распухания гильзы СУЗ из стали X18N9, которая была облучена в БОР-60 до флюенса  $1,8 \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup>, что соот-

ветствует 99 смещ./атом. Исследовался материал одной и той же грани в трех различных сечениях стенки толщиной 3 мм (см. таблицу).

Методика приготовления образцов в виде фольг для электронно-микроскопических исследований была описана ранее \*. Толщину фольги определяли с помощью съемки стереопар.

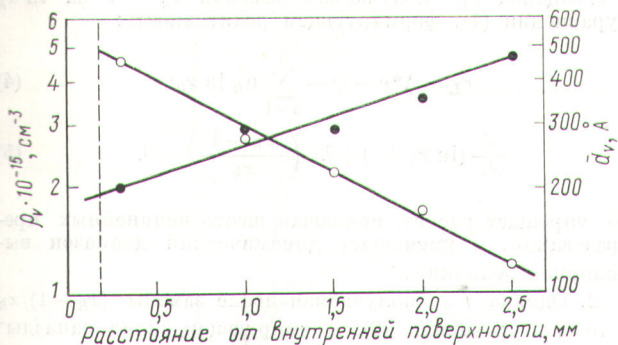
Электронно-микроскопические исследования микроструктуры стали X18N9 выявили отсутствие пор в нижнем сечении. В среднем сечении относительный объем пор составлял 1,5–2,5%. Более отчетливая неравномерность распухания стали обнаружена в верхнем сечении (рис. 1). Характер изменения микроструктуры стали X18N9 на различных расстояниях от внутренней поверхности гильзы представлен на рис. 2. Анализ электронно-микро-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П. Исследовательские ядерные реакторы. М., Атомиздат, 1972.
2. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Процессы теплообмена в ядерных энергетических установках. М., Атомиздат, 1974.
3. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. Под ред. чл.-кор. В. И. Субботина. М., Атомиздат, 1975.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., «Энергия», 1973.
5. Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен. М., «Энергия», 1972.
6. Повх И. Л. Техническая гидродинамика, Л., Машиностроение, 1976.
7. Хинце О. И. Турбулентность. М., Изд-во Инстр. лит., 1960.
8. Ибрагимов М. Х. и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М., Атомиздат, 1978.
9. Рухадзе В. К. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 6, с. 413.
10. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., «Наука», 1972.
11. Гончаров В. В. и др. Препринт ОЛИАЭ-2373. М., 1974.
12. Корнеев В. Т. и др. В кн.: Опыт эксплуатации и использования исследовательских реакторов. Т. 1. Предел, изд. СЭВ, 1974, с. 205.
13. Алехин А. И. и др. Препринт ЛИЯФ-283. Л., 1976.
14. Кирсанов Г. А. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 5, с. 320.
15. Верховых П. М. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 3, с. 201; Препринт ЛИЯФ-127. Л., 1974.
16. Ерыкалов А. Н. и др. Препринт ЛИЯФ-479. Л., 1979.
17. Цыканов В. А. и др. [12], с. 236.
18. Цыканов В. А. и др. «Kernenergie», 1966, В. 9, N 10, S. 310.
19. Цыканов В. А. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 1, с. 3.
20. Directory of Nuclear Reactors. V. X, N. Y., 1976, p. 375.
21. Swartout J. e.a. In: Proc. III Intern. Conf. Geneva, 1964, Rep. 28/P/221.

Поступило в Редакцию 11.09.78

\*Щербак В. И. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Топливные и конструкционные материалы. Вып. 2 (5). М., изд. ВНИИНМ, 1976, с. 3.

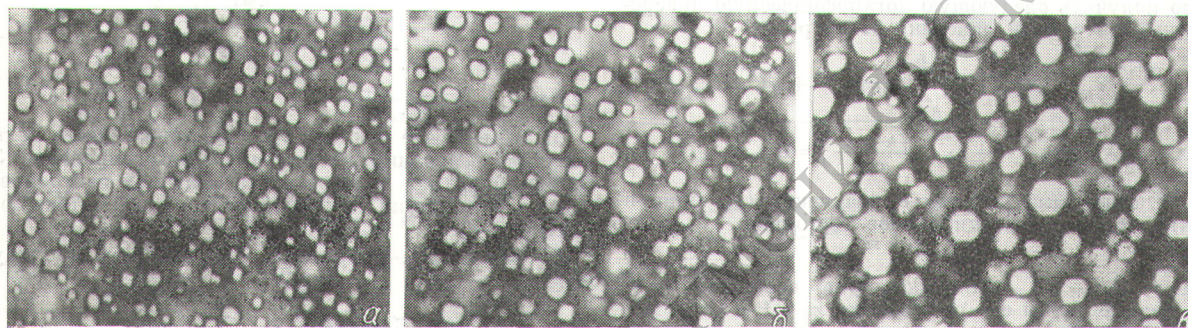


Р и с. 1. Изменение среднего диаметра (●) и концентрации пор (○) по стенке гильзы СВЗ (верхнее сечение)

Характеристики исследуемых образцов

Сечение	Расстояние от низа активной зоны, мм	Флюенс, $10^{23}$ нейтр./см <sup>2</sup>	Доза, смещ./атом	Температура облучения, °С *
Нижнее	0	1,2	66	350/360
Среднее	250	1,8	99	380/435
Верхнее	400	1,55	85	395/470

\* Числитель — внутренняя, знаменатель — внешняя сторона гильзы СВЗ.



Р и с. 2. Изменение микроструктуры стали X18H9 по толщине гильзы СВЗ на расстоянии 0,3 (а); 1,5 (б) и 2,5 мм (в) от внутренней поверхности гильзы (× 100 000)

скопических снимков показал, что по мере приближения к внешней поверхности гильзы средний диаметр пор возрастал, а концентрация снижалась. В зонах взаимодействия стали с теплоносителем отмечено резкое падение объема пор. Характерная особенность микроструктуры стали в зонах с низким распуханием — присутствие деформационных двойников.

Изменение распухания стали X18H9 в верхнем сечении от 2 до 7% может быть объяснено влиянием темпера-

туры, которая увеличивалась с ростом расстояния от внутренней стенки, причем перепад температуры в одном сечении достигал 775 °С. Перепад температуры по толщине стенки также отразился на среднем диаметре  $\langle d_v \rangle$  и концентрации пор  $N_v$ .

Поступило в Редакцию 30.10.78

УДК 621.039.512

## Логарифмическая инверсная модель кинетики реактора и ее аппроксимации

БРИККЕР И. Н., ПРЯНИШНИКОВ Б. А., СИМОНОВ В. Д., ЮДАНОВ Б. В.

Исследование на универсальных аналоговых вычислительных машинах (АВМ) систем управления и защиты реакторов, а также использование АВМ в качестве имитаторов требует решения прямой и обратной задач кинетики [1]. Связанные с этим трудности обусловлены ограниченностью динамического диапазона элементов АВМ. Согласования диапазонов входной и выходной переменных с диапазоном вычисляемых величин можно достигнуть применением коммутирующих устройств, но это нежелательно для расчетов и неприемлемо для режима имитации. Известна попытка преодолеть эту трудность с помощью инверсной модели кинетики, в которой за входную величину принята логарифмическая производная потока нейтронов (мгновенное значение обратного периода) [2]. В этом слу-

чае отпадает необходимость в коммутирующих устройствах, но входной сигнал нуждается в дополнительной обработке посредством фильтров, выбор которых достаточно сложен. Избежать предварительной фильтрации позволяет инверсная модель кинетики, где роль входного сигнала играет логарифм потока нейтронов. Сглаживание мгновенных значений обратного периода здесь выполняется естественным образом в процессе определения вкладов в реактивность отдельных групп запаздывающих нейтронов. Получение точной реактивности при таком подходе, как и в других случаях, связано со сложностью решения нелинейных уравнений кинетики. Однако высокая точность определения реактивности требуется далеко не всегда, и для ряда задач можно ограничиться приближениями, в той или