

15—20 кэВ не сильно поглощается в растворе и в стенках химической посуды.

Авторы выражают благодарность Г. Н. Флерову за постановку задачи, признательны И. Зваре и В. Н. Косякову за руководство и консультации в химической части работы, а также В. А. Друину и В. Г. Субботину за полезные обсуждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Друин В. А. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 3, с. 55.
2. Глазов В. М., Борисова Р. И., Шафиев А. И. Препринт НИИАР П-181. Димитровград, 1973.

3. Milsted J. e.a. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1969, v. 31, p. 1561.
4. Bemis C. e.a. «Phys. Rev. C», 1977, v. 16, N 3, p. 1146.
5. Зубарева А. М. и др. Препринт ОИЯИ Р13-10430. Дубна, 1977.
6. Козакова Г. М., Косяков В. Н., Ерин Е. А. «Радиохимия», 1975, т. 17, вып. 2, с. 311.
7. Горбачев В. М., Замятин Ю. С., Лбов А. А. Основные характеристики изотопов тяжелых элементов. Справочник. М., Атомиздат, 1975.
8. Полюхов В. Г. и др. «Радиохимия», 1977, т. 19, вып. 4, с. 460.

Поступило в Редакцию 30.01.79

УДК 621.039.534

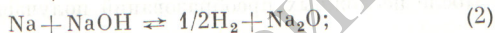
## Определение равновесных параметров системы натрий — кислород — водород

ПРИВАЛОВ Ю. В.

Разработка эффективных методов очистки от примесей и их контроля, понимание коррозионных процессов в натриевом теплоносителе вызывают необходимость изучения равновесия системы Na — O — H. Несмотря на большое число опытных исследований, до сих пор не предложено расчетного метода определения равновесных параметров этой системы.

Анализ работ [1—4] показывает, что в системе Na — O — H присутствуют следующие фазы: жидкий молекулярный раствор  $L_1$  на основе Na с растворенными компонентами NaOH, NaN и  $Na_2O$ ; жидкий молекулярный раствор  $L_2$  на основе NaOH с растворенными NaN и  $Na_2O$ ; твердые осадки NaN и  $Na_2O$ ; твердые растворы  $\alpha L_2$  и  $\beta L_2$  на основе  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций NaOH и газообразный водород  $H_2$ .

Между пятью основными компонентами системы протекают следующие обратимые реакции:



константы равновесия которых  $K_1^{OK}$ ,  $K_2^{OK}$ ,  $K_3^0$ ,  $K_4^{OK}$  соответственно связаны уравнениями  $K_2^{OK} = K_1^{OK}/K_3^0$ ;  $K_4^{OK} = K_1^{OK}/(K_3^0)^2$ . Численные значения констант  $K_1^{OK}$  и  $K_3^0$ , рассчитанные по новым данным о свойствах веществ, при отборе которых в основном ориентировались на рекомендации работы [5], аппроксимировали в интервале температуры 371—840 К функциями

$$\lg K_1^{OK} = 2,687 + 2805/T - 2,389 \lg T;$$

$$\lg K_3^0 = -5,498 + 3120/T + 0,250 \lg T.$$

При вычислении  $K_1^{OK}$  за стандартное состояние NaOH для  $T \leq 592$  К принято состояние переохлажденной жидкости, для других компонентов — основное стандартное состояние. Температура плавления Na, NaOH и NaN равна соответственно 371, 592 и 840 К.

Кроме констант реакций для расчетов равновесия необходимо знать активность компонентов, которую определяют в растворах  $L_1$  и  $L_2$  по модифицированной теории Ван-Лаара [6]. Допустив, что компоненты с близкими молекулярными объемами имеют одинаковые координационные числа в жидком состоянии и координационное число для всех молекул компонентов раствора задается растворителем, получили на основе этой теории следующие приближенные выражения активности компонента

в интервале температуры 371—840 К для раствора  $L_1$ :

$$a_1 = x_1 \exp \{ [x_2(1-x_1)u_{12} + x_3(1-x_1)u_{13} + x_4(1-x_1)u_{14} - x_2x_3u_{23} - x_2x_4u_{24} - x_3x_4u_{34}] / RT \}; \quad (5)$$

$$a_2^{OK} = x_2 \exp \{ [\Delta_2 + x_1(1-x_2)u_{12} - x_1x_3u_{13} - x_1x_4u_{14} + x_3(1-x_2)u_{23} + x_4(1-x_2)u_{24} - x_3x_4u_{34}] / RT \}; \quad (6)$$

$$a_3^0 = x_3 (K_3^0/k) \exp \{ [-x_1x_2u_{12} + x_1(1-x_3)u_{13} - x_1x_4u_{14} + x_2(1-x_3)u_{23} - x_2x_4u_{24} + x_4(1-x_3) \times u_{34}] / RT \}; \quad (7)$$

$$a_4 = (x_4/s_4) \exp \{ [-x_1x_2u_{12} - x_1x_3u_{13} + x_1(1-x_4)u_{14} - x_2x_3u_{23} + x_2(1-x_4)u_{24} + x_3(1-x_4)u_{34}] / RT \} \quad (8)$$

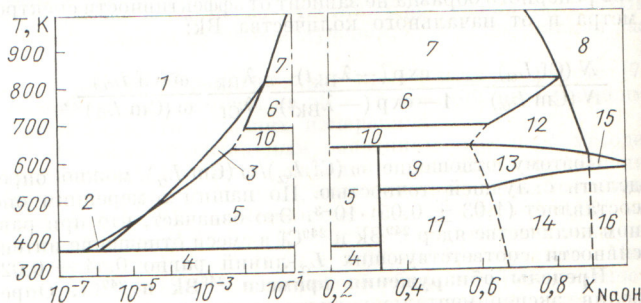
и для раствора  $L_2$ :

$$a_2^{OK} = y_2 \exp \{ [y_3(1-y_2)u_{23} + y_4(1-y_2)u_{24} - y_3y_4u_{34}] / RT \}; \quad (9)$$

$$a_3 = y_3 (K_3^0/k) \exp \{ [\Delta_3 - u_{13} + y_2(1-y_3)u_{23} - y_2y_4u_{24} + y_4(1-y_3)u_{34}] / RT \}; \quad (10)$$

$$a_4 = (y_4/s_4) \exp \{ [\Delta_4 - y_2y_3u_{23} + y_2(1-y_4)u_{24} + y_3(1-y_4)u_{34}] / RT \}; \quad (11)$$

где индекс 1, 2, 3, 4 относится соответственно к Na, NaOH, NaN,  $Na_2O$ ;  $x$  ( $y$ ) — молярная доля компонента в растворе  $L_1$  ( $L_2$ );  $k$  — константа Сиверса для раствора гидрида в натрии, принята по уравнению  $\lg k = -2,183 - 175/T$ , полученному автором обработкой опытов работ [7, 8];  $s_4$  — растворимость окиси в натрии, принята по уравнению  $\lg s_4 = 0,318 - 2372/T$  [9];  $a_2^{OK}$  — активность щелочи, отнесена при  $T \leq 592$  К к состоянию переохлажден-



Фазовая диаграмма Na — NaOH при  $P = 1,2$  бар: 1 —  $L_1$ ; 2 —  $L_1 + NaN$ ; 3 —  $L_1 + Na_2O$ ; 4 —  $Na^T + NaN + Na_2O$ ; 5 —  $L_1 + Na_2O + NaN$ ; 6 —  $L_1 + L_2 + Na_2O$ ; 7 —  $L_1 + L_2$ ; 8 —  $L_2$ ; 9 —  $Na_2O + NaN + \alpha L_2$ ; 10 —  $L_1 + Na_2O + L_2$ ; 11 —  $Na_2O + NaN + \beta L_2$ ; 12 —  $L_2 + Na_2O$ ; 13 —  $\alpha L_2 + Na_2O$ ; 14 —  $\beta L_2 + Na_2O$ ; 15 —  $\alpha L_2$ ; 16 —  $\beta L_2$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Привалов Ю. В. Препринт НИИАР П-16(310). Димитровград, 1977.
2. Привалов Ю. В. Препринт НИИАР П-6(300). Димитровград, 1977.
3. Миткевич Э. М., Шихов Б. А. «Журн. неорган. химии», 1966, т. 14, вып. 3, с. 633.
4. Шихов Б. А. «Журн. неорган. химии», 1967, т. 12, вып. 4, с. 545.
5. Лихарев В. А. Препринт ФЭИ-612. Обнинск, 1975.
6. Мелвин-Хьюз Э. А. Физическая химия. М., Изд-во иностр. лит., 1962, с. 675.
7. Katsuta H., Furukawa K. «Nucl. Techn.», 1976, v. 31, N 2, p. 218.
8. Vissers D. e.a. Ibid., 1974, v. 21, N 3, p. 235.
9. Claxton K. In: Proc. Intern. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, Champion Penn., 3—6 May 1976, paper VB6.
10. Myles K., Cafaccio F. «J. Nucl. Mater.», 1977, N 67, p. 249.
11. Ульман Х. и др. В кн.: Проблемы технологии и коррозии в натриевом теплоносителе и защитном газе. Дрезден, ГДР, изд. ЦИЯИ, 1977, т. 1, с. 16.
12. Козлов Ф. А. и др. В кн.: Труды физико-энергетического института. М. Атомиздат, 1974, с. 120.
13. Pulham R., Simm P. In: Proc. Conf. Brit. Nucl. Energy Society Nottingham, 4—6 Apr. 1973, p. 5.

Поступило в Редакцию 22.02.79  
В окончательной редакции 09.07.79

УДК 621.039.517.5

## Расчет нестационарной температуры в канале ядерного реактора

ТРОФИМОВ А. С., СОБОЛЕВ А. В.

Как известно [1], при расчете нестационарной температуры в элементах активной зоны при определенных соотношениях параметров твэлов и теплоносителя возможно квазистационарное представление распределения температуры по сечению твэлов. В то же время необходим учет ее распределения по высоте. При переменных во времени расходе теплоносителя и коэффициенте теплоотдачи получить аналитическое решение такой задачи не удастся. Рассмотрим один из способов приближенного решения применительно к многослойному стержневому твэлу и однофазному теплоносителю [2]. В этом случае тепловые процессы в безразмерном виде могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + G(\tau) \frac{\partial \theta}{\partial z} = ku + (1-G)\eta(z), & 0 \leq z = \frac{\chi}{H} \leq 1; \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} + \xi(\tau) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \delta(\tau)u = \Psi(\tau)\eta(z)q(\tau), & 0 \leq \tau; \\ \tau = 0, u = \theta = 0, z = 0, \theta = \theta_+(\tau), \end{cases} \quad (1)$$

где  $u(\tau, z)$ ;  $\theta(\tau, z)$  — относительная температура твэлов и теплоносителя соответственно [2];  $G(\tau) = W(\tau)/W(0)$  — относительный расход теплоносителя;  $\eta(z)$  — относительное распределение энерговыделения в канале, нормированное на среднее значение;  $q(\tau) = [N(\tau) - N(0)]/N(0)$  — изменение мощности реактора;  $k, \xi, \delta, \Psi$  — коэффициенты [2], в общем случае зависящие от времени при учете изменения коэффициента теплоотдачи.

При неизменном расходе  $G(\tau)$  или его скачкообразном изменении система уравнений (1) решается аналитически [2] для любых возмущений по мощности  $q(\tau)$  или входной

температуре  $\theta_+(\tau)$ . Для произвольного  $G(\tau)$  может быть получено лишь приближенное решение.

Принтегрируем второе уравнение (1) и получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + G \frac{\partial \theta}{\partial z} = \eta(z) \int_0^{\tau} \delta(\tau') q(\tau') \exp \left[ - \int_{\tau'}^{\tau} \delta(\tau'') d\tau'' \right] \times \\ \times d\tau' + (1-G)\eta(z) - \varepsilon(\tau)\theta(\tau; z) + \int_0^{\tau} \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau'} + \right. \\ \left. + \varepsilon(\tau') \right] \theta(\tau'; z) \exp \left[ - \int_{\tau'}^{\tau} \delta(\tau'') d\tau'' \right] d\tau', \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\varepsilon(\tau) = k\xi(\tau)$ .

Для оценки последнего члена представим  $\theta(\tau'; z)$  в виде разложения в ряд Тэйлора в окрестности точки  $\tau' = \tau$ :

$$\begin{aligned} \theta(\tau'; z) \approx \theta(\tau; z) + (\tau' - \tau) \frac{\partial \theta(\tau; z)}{\partial \tau} + \\ + (\tau' - \tau)^2 \frac{\partial^2 \theta(\tau; z)}{\partial \tau^2} + \dots \end{aligned}$$

Такая подстановка в интеграл (2) дает возможность решить задачу с любой степенью точности. Для получения аналитического решения ограничимся двумя членами ряда. Это позволяет перевести интегриродифференциальное уравнение (2) в дифференциальное уравнение в частных про-