

ской модели совместной работы топлива и оболочки, для получения информации об изменении коэффициентов термического расширения, модулей упругости и кратковременных механических свойств следующих материалов:

оболочки в области температур 500—900 °С, предварительно облученной флюенсом до  $(1,5 \div 2,5) \cdot 10^{23}$  нейтр./см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ) в интервале температур  $400 \leq T \leq 700$  °С при скорости деформирования  $1-10$  ч<sup>-1</sup>;

топлива  $(U + Pu) O_2$ , достигшего выгорания 3—10% тяжелых атомов в области температур 700—1500 °С при той же скорости деформирования.

Поступила в Редакцию 1.VIII.77

УДК 621.039.534.63

## Разработка метода регенерации холодных ловушек примесей жидкометаллических теплоносителей

Волчков Л. Г., Козлов Ф. А., Лихарев В. А., Налимов Ю. П., Тонов Б. И.

Проточные холодные ловушки — основной элемент систем очистки натриевого теплоносителя на ядерных энергетических установках (ЯЭУ) с реакторами на быстрых нейтронах.

В процессе работы происходит постепенное накопление примесей в ловушках и наступает момент, когда расход очищаемого теплоносителя через ловушки снижается настолько, вследствие возрастания их гидравлического сопротивления, что необходимо заменять ловушки новыми. На первом контуре ЯЭУ необходимость замены ловушек возникает также в результате накопления радиоактивных веществ выше допустимого значения. Так как ловушки промышленной установки являются довольно дорогими устройствами, многократное использование их позволяет снизить затраты и, таким образом, увеличить экономическую эффективность ЯЭУ в целом. Полное восстановление работоспособности ловушек (регенерация) заключается в удалении из них накопленных примесей.

В [1] предложен метод регенерации холодных ловушек, накопивших продукты взаимодействия натрия с водой или окись натрия путем перевода их в относительно легкоплавкую гидроксид натрия с одновременным растворением в последней других примесей. Аналогичный метод предложен в [2]. Некоторые

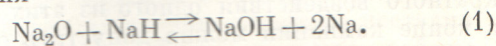
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
2. Лихачев Ю. И., Пупко В. Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1975.
3. Shcherbak V., Vykov V. «J. Brit. Nucl. Soc.», 1975, v. 14, N 2, p. 145.
4. Биргер И. А., Демьянушко И. В. «Механика твердого тела», 1959, № 6, с. 1070.
5. Лихачев Ю. И., Прошкин А. А., Забудько Л. М. Сборник докладов II симпозиума стран — членов СЭВ. Обнинск, изд. ФЭИ, 1973, т. I, с. 453.
6. Конобеевский С. Т. Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967.
7. Vorobjev A.e.a. [3], p. 149.
8. Bagley K.e.a. In: Proc. Europ. Conf. on Irradiation Embrittlement and Creep in Fuel Cladding and Core Components. L., 1972, p. 143.
9. Fahr D. Ibid., p. 167.

эксперименты для обоснования метода, изложенного в [2], описаны в [3].

В настоящей статье изложены основные результаты расчетных и экспериментальных работ, выполненных для обоснования предложенного авторами метода регенерации.

Опыт эксплуатации холодных ловушек, очищающих натрий от продуктов взаимодействия его с водой, показывает, что основными веществами, накапливаемыми ловушкой, являются  $Na_2O$  и  $NaN$ . Таким образом, в этом случае после удаления из ловушки основной массы натрия, как и предлагается в методе [1], в ловушке остаются  $NaN$  и  $Na_2O$ . Между ними возможна реакция



В [4] с использованием последних данных по термодинамическим свойствам  $Na$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2O$ ,  $NaN$  найдены значения константы равновесия ( $K$ ) реакции (1) для ряда температур. В табл. 1 значения  $K$  приведены для температуры 450 и 550 °С. Используя эти значения  $K$ , данные [5—7] по системам  $NaOH - NaN$ ,  $NaOH - Na_2O$ ,  $NaOH - Na$  и зная исходные количества  $Na_2O$ ,  $NaN$ ,  $Na$  в ловушке, можно определить равновесное содержание в ловушке  $NaOH$ ,  $NaN$  и  $Na_2O$  в каустической фазе при условии отсутствия в ней натрия. Результаты



Расчетный равновесный состав примесей (мас. %) в 800-литровой холодной ловушке

Таблица 1

T, °C	K	C <sup>s</sup> <sub>Na<sub>2</sub>O</sub>	C <sup>s</sup> <sub>NaH</sub>	C <sup>s</sup> <sub>NaOH</sub>	C <sup>p</sup> <sub>Na<sub>2</sub>O</sub>	C <sup>p</sup> <sub>NaH</sub>	C <sup>p</sup> <sub>NaOH</sub>
450	1,67	20 [6]	52 [5]	100	12,8	22	65,2
		7,3 [7]	52 [5]	100	9,4	21,3	69,3
550	6,34	27 [6]	60 [5]	100	7,7	20,6	71,7
		16,2 [7]	60 [5]	100	4,9	19,9	75,2

Примечание. C<sup>s</sup> — концентрация насыщения; C<sup>p</sup> — равновесная концентрация.

такого расчета даны в табл. 1. В соответствии с [7] при температуре >450 °C система NaOH — Na<sub>2</sub>O — NaH является жидкой, т. е. ее можно без каких-либо затруднений удалить из ловушки. Поскольку в ловушке при накоплении в ней только продуктов взаимодействия натрия с водой создается излишнее для реакции (1) количество NaH, удаление его из ловушки облегчено, потому что при T > 450 °C равновесное давление H<sub>2</sub> над NaH > 0,1 МПа, а реакция диссоциации NaH имеет большую скорость. Поэтому еще до завершения реакции (1), отгоняя водород, можно удалить излишек NaH. Кроме того, часть NaH растворяется в NaOH и затем удаляется вместе с ней.

При наличии в ловушке только твердой Na<sub>2</sub>O для перехода ее в NaOH необходимо проводить реакцию гидрирования, при этом возможны 2 реакции:



Зависимости изобарно-изотермических потенциалов и констант равновесия реакций (2) и (3) от температуры приведены на рис. 1. Анализ показывает, что при T > 415 °C более вероятно протекание реакции (2).

В [3] экспериментально установлен температурный порог реакции гидрирования, равный ~430 °C. Таким образом, гидрирование твердой окиси натрия при проведении регенерации холодной ловушки должно проводиться при температуре выше 430 °C.

Полученные результаты по составу продуктов регенерации и температуре реакции гидрирования были подтверждены экспериментально при регенерации методом гидрирования твердой окиси натрия в четырех ловушках, накопивших продукты взаимодействия натрия с водой.

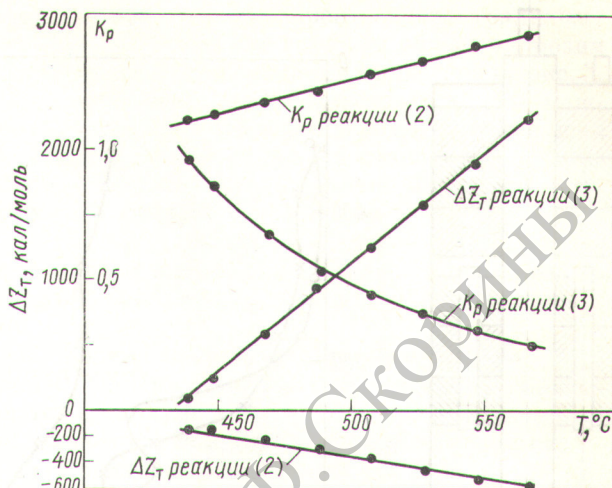


Рис. 1. Зависимость изобарно-изотермического потенциала и константы равновесия реакций (2), (3) от температуры

Основные данные по регенерации приведены в табл. 2.

Регенерация ловушки объемом 800 л была проведена без вырезки ее из контура с применением штатных нагревателей. Фильтрационные характеристики и распределение температур в ловушке, снятые после ее введения в номинальный режим очистки, показали при-

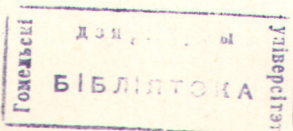
Результаты проведения регенерации \*

Таблица 2

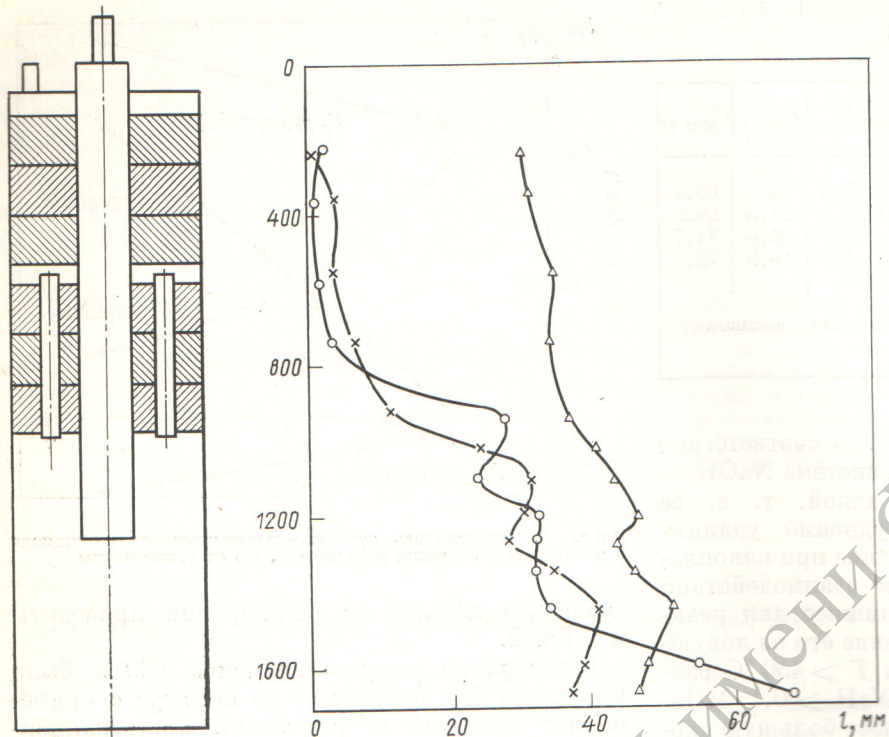
Объект	Накоплено примесей, кг	Состав продукта, мас. %
800-литровая ловушка	Na <sub>2</sub> O 131	NaOH 79
	NaH 80	Na <sub>2</sub> O 11
		NaH 9
105-литровая ловушка		Na 1
	Na <sub>2</sub> O 18	NaOH 80
	NaH 13	Na <sub>2</sub> O 7
		NaH 12
105-литровая ловушка 3		Na 1
	Na <sub>2</sub> O 14	
Опыт 1 **	NaH 11	NaOH 77
	Na <sub>2</sub> O 7,3	Na <sub>2</sub> O 12
Опыт 2 **		NaH 10
		Na 1
		NaOH 67
		Na <sub>2</sub> O 26
		NaH 6
	Na 1	

\* Температура плавления продуктов регенерации 310 ÷ 390 °C.

\*\* Экспериментальный участок объемом 36 л.







Р и с. 2. Распределение содержимого 105-литровой ловушки перед регенерацией (Δ); после удаления натрия (×) и после нагрева и выдержки при 450°С (○)

ближение их к характеристикам и распределениям температур, которыми обладала эта ловушка в начальный период работы на экспериментальном стенде.

При проведении регенерации ловушек 2 и 3 объемом 105 л контролировали изменение распределения примесей по высоте ловушек путем просвечивания их  $\gamma$ -излучением [8] на различных стадиях процесса. Результаты, полученные на ловушке 3, приведены на рис. 2. Измерения показывают, что после проведения реакции гидрирования продукты реакции в жидком состоянии перемещаются в нижнюю часть ловушки.

Двукратная регенерация экспериментального участка, накопившего чистую окись натрия, также прошла успешно. Водород подавали в участок, из которого предварительно удаляли натрий при  $T \sim 150 \div 200^\circ\text{C}$ . Установлено, что скорость реакции со временем падает. В опытах 1 и 2 при просвечивании участка  $\gamma$ -излучением в процессе гидрирования обнаружено, что примеси в течение нескольких минут из мест локальных скоплений перемещаются вниз. После проведения опыта 2 эксперимен-

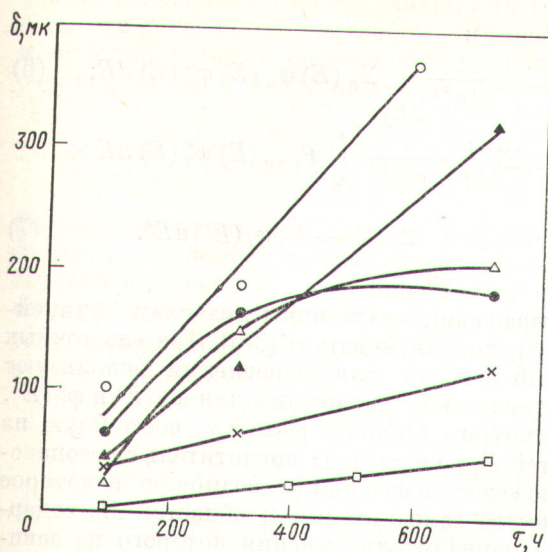
тальный участок был разрезан. Визуальный осмотр показал полное удаление из него всех продуктов.

Состав каустической фазы, получающийся в результате реакции  $\text{Na}_2\text{O}$  с  $\text{NaH}(\text{H}_2)$ , был определен следующим образом. Сначала из пробы определенной массы с помощью бутил-бромида удаляли натрий. Остаток, высушенный от бутил-бромида и взвешенный, растворяли в воде и затем определяли количество выделившегося водорода. Измеряли количество и щелочность полученного раствора и на основе всех указанных выше данных определяли содержание в пробе  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{NaH}$  и  $\text{Na}$ ; основу фазы составляет  $\text{NaOH}$  (см. табл. 2).

Результаты анализов близки к расчетным значениям, приведенным в табл. 1, температура плавления не превышает  $390^\circ\text{C}$ .

Важным вопросом в рассматриваемой проблеме регенерации холодных ловушек является определение коррозионной стойкости конструкционных материалов, из которых изготавливаются детали ловушек. Обычными материалами являются сталь X18H9 и X18H10T. В настоящей работе были испытаны указанные стали,





Р и с. 3. Зависимость глубины общей коррозии различных сталей от времени испытаний при  $T = 500^\circ\text{C}$ :

▲, △, ● — сталь X18H9, X20H40B, X18H10T в натрии соответственно; ○, ×, □ — сталь X18H10T, X20H40B в гидроксиде натрия

а также X20H40B. Выдержка образцов сталей была проведена одновременно в продукте регенерации 800-литровой ловушки, в натрии над ним и в газовой фазе.

Температуру в нижней части контейнера подерживали на уровне  $500 \pm 10^\circ\text{C}$ , в газовой полости она изменялась от  $460^\circ\text{C}$  над поверхностью натрия до  $420^\circ\text{C}$  у крышки контейнера. Образцы извлекали из указанных выше сред через 100, 300, 500 и 700 ч.

Перед испытанием образцы были подвергнуты аустенизации при  $1100^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. После соответствующей выдержки проводили весовой и металлографический анализ образцов. Часть образцов подвергалась рентгеноструктур-

ному фазовому и микрорентгеноспектральному анализу. Зависимость глубины общей коррозии сталей от времени испытаний приведена на рис. 3.

На основании полученных результатов можно считать, что время, допустимое для ловушек в режиме регенерации, составляет  $\sim 150$  ч. Процесс регенерации ловушек можно сформулировать следующим образом.

1. Из ловушки при  $T \sim 150 \div 200^\circ\text{C}$  удаляется натрий либо через штуцер в днище ловушки, либо через трубу, доходящую до дна ловушки.

2. Затем ловушка разогревается до  $T > 450^\circ\text{C}$ . При этом излишек водорода сбрасывается из ловушки. В случае нехватки водорода он подается в ловушку из внешней системы.

3. Продукты регенерации удаляются из ловушки в специальную емкость.

4. Ловушка охлаждается до  $T \sim 150 \div 200^\circ\text{C}$ , вакуумируется и заполняется теплоносителем.

Авторы выражают благодарность товарищам М. П. Филину и Л. В. Абрамовой за подготовку образцов для коррозионных испытаний и проведение металловедческих анализов.

Поступила в Редакцию 19.X.77

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчков Л. Г. и др. «Бюл. изобрет.», 1975, № 21.
2. McKee J. Patent USA N 3941586, 1976.
3. McKee J. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1975, v. 21, p. 175.
4. Лихарёв В. А. Препринт ФЭИ-612, Обнинск, 1975.
5. Михеева В. И., Шкрабкина М. М. «Журн. неорганич. химии», 1962, т. 7, вып. 10, с. 2411.
6. Bouaziz R. e.a. «Compt. Rend. Ser. C», 1966, v. 262, p. 1051.
7. Миткевич Э. М., Шихов Б. А. «Журн. неорганич. химии», 1966, т. 11, вып. 3, с. 633.
8. Волчков Л. Г. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 396.

УДК 539.125.5.173.162.3

## Резонансная структура функции ценности в гетерогенных реакторах и расчеты коэффициентов реактивности

Дулин В. А.

Для получения информации о многих интегральных реакторных параметрах, в том числе о коэффициенте воспроизводства плутония, используют опыты с возмущением критических сборок нулевой мощности малыми образцами различных материалов. Гетерогенная структура критическихборок в расчетах может

быть учтена, например, путем использования теории возмущений в интегрально-транспортной формулировке [1]. Поскольку при этом применяется групповой подход с небольшим числом групп, необходимо оценить гетерогенные резонансные эффекты при использовании теории возмущений.