

дуированы с помощью эталонного источника Co^{60} . Результаты измерений и расчета по формуле (5) приведены на рис. 2. Расчетная и измеренная зависимости мощности дозы от расстояния до плоскости излучателя одинаковы, а для расстояний более 30 см соблюдается квадратичный закон (6). Однако по абсолютным значениям расчетные данные примерно в два раза меньше экспериментальных (на рис. 2 результаты расчета условно увеличены в два раза). Это расхождение можно объяснить неточным знанием абсолютного потока и спектра быстрых нейтронов в активной зоне, сечения активации, а также экспериментальной ошибкой ($\pm 20\%$), связанной с определением абсолютного значения мощности дозы γ -излучения.

Мощность дозы нейтронного излучения «Улитки» (наведенная активность N^{17}), измеренная прибором РУС-5, в 100 раз меньше мощности дозы γ -излучения.

С помощью описанного радиационного контура были измерены также относительные концентрации химических форм N^{16} в реакторной воде. При этом использовалась примерно та же методика измерений, что и в работе [5]. Радиоактивная вода поочередно пропусклась через три ионообменные колонки, соединенные параллельно. Первая колонка содержала катионит, вторая — анионит, а третья, нейтральная, не улавливала соединений азота, но создавала одинаковые условия задержки и распада радиоактивных атомов. После колонок вода поступала в мерную емкость, изменения на которой давали информацию о химических формах N^{16} в реакторной воде. Регистрировалось лишь γ -излучение с энергией выше 4,5 Мэв. Величина рН реакторной воды колебалась от 6,4 до 6,9. Оказалось, что при 20° С доля анионных форм N^{16} (NO_2^- ,

NO_3^- , ...) равна 60%, катионных (NH_4^+ , ...) 15%, нейтральных (NO , NO_2 , N_2 , $NH_3 \cdot H_2O$, ...) 25%. Сравнить полученные результаты с соответствующими результатами работы [5] весьма трудно, поскольку EBWR — реактор кипящего типа.

В настоящее время проводится переоборудование радиационного контура, в результате чего интенсивность излучения радиатора повысится в 10 раз.

Авторы признательны А. В. Жениховой за систематический контроль величины рН реакторной воды; выражают благодарность В. В. Герасимову за подготовку ионообменных колонок к измерениям и полезное обсуждение полученных результатов; Ю. Г. Анисимову за помощь в проведении измерений и обработку результатов, а обслуживающему персоналу реактора — за монтаж и эксплуатацию контура.

Поступило в Редакцию 21/XII 1965 г.
В окончательной редакции 14/VI 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита ядерных реакторов. Под ред. Т. Роквелла. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
2. К. Шур, П. Ройс. Защита транспортных установок с ядерным двигателем. Под ред. В. В. Орлова и С. Г. Цыпина. М., Изд-во иностр. лит., 1961, стр. 197.
3. T. Tagami, M. Yamamoto, V. Osawa. J. Atomic Energy Society Japan, 6, 260 (1964).
4. Ю. В. Орлов, А. А. Севостьянов. «Приборы и техника эксперимента», № 1, 45 (1966).
5. R. Mittl, M. Theys. Nucleonics, 19, 81 (1961).

Контроль содержания примесей кислорода и водорода в расплавленном натрии методом измерения электросопротивления

В. И. СУББОТИН, М. Н. ИВАНОВСКИЙ, М. Н. АРНОЛЬДОВ,
Б. А. ШМАТКО, А. Д. ПЛЕШИВЦЕВ

УДК 621.039.534.6

Контроль содержания примесей газа в натрии — одно из условий успешной работы ядерных реакторов, охлаждаемых натриевым теплоносителем. Известно, что присутствие растворенных примесей в жидком металле отражается на многих его физических свойствах. Изменение этих свойств может служить сигналом изменения содержания примесей в металле.

Особый интерес представляет контроль содержания примесей путем измерения электросопротивления, что можно легко осуществить с помощью простых методов и аппаратуры как дистанционно, так и автоматически.

В литературе описан прибор, основанный на измерении электросопротивления. С помощью этого прибора контролировалась чистота протекающего в контуре ядерного реактора натрий-калиевого сплава [1]. В работе предполагалось, что электросопротивление жидкого сплава изменяется вследствие изменения содержания кислорода, находящегося в сплаве в виде окиси натрия. Влияние температуры на сопротивление исключалось с помощью специальной схемы измерений. Электросопротивление сплава определяли при его одновременной очистке от примесей с помощью холод-

ных ловушек. Результаты измерения указывают на зависимость электросопротивления сплава от степени его очистки. Однако в работе [1] не было приведено никаких доказательств того, что сопротивление сплава изменяется вследствие изменения содержания кислорода или других примесей. Авторы работы [1] произвольно предположили, что зависимость электросопротивления сплава натрия с калием от содержания кислорода аналогична такой зависимости для некоторых других металлов (меди, ниобия).

В дальнейшем появилось сообщение [2], в котором указывается, что зависимость сопротивления от концентрации примесей не специфична для кислорода, растворенного в натрии, а следовательно, и в натрий-калиевом сплаве. Согласно этим данным, содержание кислорода в указанных жидких расплавах невозможно проконтролировать путем измерения электросопротивления.

Впервые экспериментальные данные о зависимости сопротивления натрия от концентрации кислорода были представлены в работе [3].

При 350° С изменение удельного электросопротивления натрия в зависимости от концентрации кислорода представляется так:

$$\rho_{350^{\circ}C} = 0,189(1 + \Delta C),$$

где ΔC — изменение концентрации кислорода, вес.%; ρ — удельное электросопротивление, $ом \cdot м \cdot м^2 / м$. Измерения проводились на циркуляционном контуре с помощью прибора, аналогичного описанному в работе [1].

Полученное в работе [3] приращение сопротивления, отнесенное к единице концентрации кислорода, составляет 20 $мком \cdot см / вес. \% O_2$. Эта величина весьма велика.

Таким образом, в литературе имеются противоречивые данные о зависимости электросопротивления натрия от содержания кислорода.

Авторы настоящей работы измеряли удельное сопротивление натрия при температуре 350° С в зависимости от концентрации кислорода и водорода. Водород — одна из наиболее характерных примесей в натриевом теплоносителе. Экспериментальных данных о зависимости электросопротивления натрия от содержания водорода в литературе нет.

Для измерений использовался двойной мост постоянного тока. Исследуемый натрий находился в измерительной трубке из стали 1Х18Н9Т с наружным диаметром 9 мм и толщиной стенки 0,4 мм. К трубке были подпаяны потенциальные и токовые электроды. Измерительная трубка подсоединялась к натриевому циркуляционному контуру, снабженному насосом для перекачивания натрия и устройством для ввода кислорода и водорода в натрий.

Водород и кислород вводились в циркулирующий натрий в газообразном виде. Ниже приведен состав газов (по сертификату):

кислород всего 99,2%; влаги < 7·10⁻²%
 водород всего 99,5%; кислорода < 5·10⁻²%

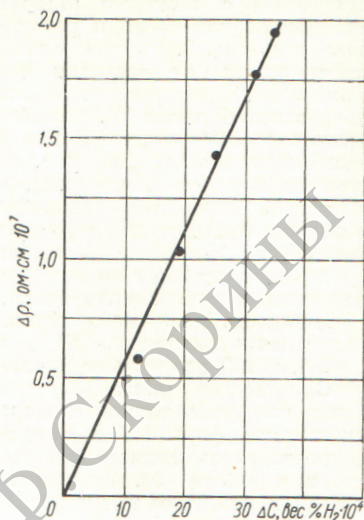
Количество введенных газов определяли по изменению их давления в баке известного объема, находящегося при известной температуре. Кислород, кроме того, вводился в натрий в виде перекиси натрия. Непрерывная циркуляция натрия через измерительную трубку обеспечивала постоянство состава натрия во время измерения.

Температура циркулирующего в контуре и через измерительную трубку натрия составляла 350° С. Постоянство температуры натрия в измерительной трубке поддерживалось с точностью до 0,05° С с помощью термостата.

Для исследований применялся натрий со следующим исходным содержанием примесей:

Элемент	O	Fe, Mg, H, Si, Ca, Al	Ag, Cu, B, Li	Ti	K
Содержание, вес. %	5·10 ⁻⁴	< 1·10 ⁻³	< 1·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻³	3,7·10 ⁻³

Как показал химический анализ, в процессе ввода кислорода содержание остальных примесей не изменялось. Общее количество введенного в натрий несколькими порциями кислорода составило 1,6·10⁻² вес.%. После введения последней порции натрий представлял собой насыщенный при температуре 350° С раствор



Зависимость электросопротивления натрия от концентрации водорода (температура натрия 350°С).

оксида натрия; содержание ее контролировалось в опытах дистилляционным методом.

В процессе ввода кислорода не было обнаружено изменения сопротивления измерительной трубки с натрием с точностью до 5·10⁻⁸ ом (сопротивление измерительной трубки с натрием при 350° С равно 5·10⁻⁴ ом). Согласно данным работы [3], изменение электросопротивления трубки при введении такого количества кислорода должно было составить 8·10⁻⁶ ом.

Таким образом, полученные нами результаты согласуются с данными работы [2] и расходятся с предположениями, высказанными в работе [1], и данными работы [3]. Причины расхождения результатов с данными работы [3] неясны. Для выяснения этого авторами работы [3] будут проведены специальные исследования.

При вводе водорода измеряли электросопротивление натрия, очищенного от кислорода и содержащего 5·10⁻⁴ вес. % O₂. В процессе ввода водорода содержание кислорода и остальных примесей также оставалось неизменным.

Объем газовой полости над поверхностью расплавленного натрия составлял 1/4 от объема натрия и имел ту же температуру, что и натрий. Согласно данным работы [4], количество свободного водорода, находящегося в этих условиях в газовой полости, не превышало 2—3% количества водорода, растворенного в натрии.

Результаты измерений приведены на рисунке.

Таким образом, методом измерения электросопротивления можно с чувствительностью 3·10⁻⁵ вес. % контролировать содержание водорода в натрии. Контроль содержания кислорода этим методом затруднителен.

Поступило в Редакцию 23/VI 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Blake. *Nucleonics*, **19**, 66 (1961).
2. K. Claxton. *J. Nucl. Engng. A/B*, **19**, 849 (1965).
3. Ф. А. Козлов и др. «Теплофизика высоких температур», **3**, № 1, (1965).
4. C. Addison. *J. Chem. Soc.*, January, 116 (1965).