

Ж 53  
А99

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

**Атомная  
Энергия**

Ежемесячный журнал  
ГОД ИЗДАНИЯ ТРИНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Апрель ■ Вып. 4

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО

**СОДЕРЖАНИЕ**

**СТАТЬИ**

- А. К. Красин, И. И. Саламатов, В. Б. Нестеренко, А. Н. Девойно. Развитие исследований в Институте ядерной энергетики АН БССР . . . . . 307
- С. Т. Конобецкий, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев. К вопросу о механизме радиационного роста урана при малых дозах облучения . . . . . 312
- В. И. Векслер, В. П. Саранцев, А. Г. Бонч-Осмоловский, Г. В. Долбильов, Г. А. Иванов, И. Н. Иванов, М. Л. Иовнивич, И. В. Кожухов, А. Б. Кузнецов, В. Г. Маханьков, Э. А. Перельштейн, В. П. Рашевский, К. А. Решетникова, Н. Б. Рубин, С. Б. Рубин, П. И. Рыльцев, О. И. Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов . . . . . 317
- В. П. Дзюленов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов 323
- В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы с помощью системы обратных связей . . 327
- В. М. Бондаренко, Г. Г. Викторов, А. Г. Тархов. Об использовании космического излучения для оценки эффективности биологических защит . . . . . 330
- С. Н. Барков. Многогрупповой аналитический метод расчета гетерогенного ядерного реактора . . . . 335
- П. Т. Потапенко. Предельная оценка качества внутри-реакторного контроля нейтронного потока . . . . 340
- Д. М. Каминкер, К. А. Коноплев, Ю. П. Семенов, В. Д. Тренин. Поведение продуктов радиолиза при работе реактора ВВР-М без системы дегазации 343
- В. А. Жарков, В. П. Терентьев, Г. М. Фрадкин. Получение топлива изотопных электрогенераторов методами нейтронного облучения . . . . . 348
- Ю. В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Измерение отношения сечений радиационного захвата и деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в резонансной области энергий нейтронов . . . . . 351

- В. А. Афанасьев, Б. В. Кебадзе, Г. А. Сапковский, В. И. Грицков, И. Н. Соколов, Л. А. Адамовский, С. А. Маркин. Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50 363

**АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ**

- Д. П. Осанов, В. П. Панова, Г. Б. Радзиевский. Измерение дозовых факторов накопления для точечных изотропных источников  $\gamma$ -излучения низкой энергии в воде 368
- В. А. Жарков, Т. П. Зорина, Г. М. Фрадкин. Самоэкранирование тепловых нейтронов в конечных цилиндрах и телах других геометрий . . . . . 369
- И. Н. Бриккер, В. П. Астафьев, А. Р. Мирзоян. Обращенное решение тепловых уравнений двухкомпонентного ядерного реактора . . . . . 370
- С. Ф. Дегтярев, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственные, угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов в гидриде лития, воде, вольфраме и карбиде бора 370
- С. Ф. Дегтярев, В. Б. Староверов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Экспоненциальные угловые коэффициенты нейтронов для неводородсодержащих сред 372
- В. К. Даруга, С. Ф. Дегтярев, В. И. Кухтевич, А. Н. Николаев, В. П. Подиванский, Б. И. Синицын, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственно-энергетические и угловые распределения нейтронов в литии . . . . . 372
- С. М. Рубанов, В. И. Титов, Л. С. Шкорбатова. Расчет защиты контура с циркулирующим горючим . . 373
- В. Д. Горяченко. Акустическая неустойчивость ядерного реактора . . . . . 374
- В. Д. Горяченко, Е. Ф. Сабаев. Акустические колебания в реакторе с циркулирующим газообразным горючим . . . . . 375
- В. Д. Горяченко, В. А. Денисов, Ю. Ф. Трунин. Влияние изменения плотности делящегося вещества на устойчивость реактора с циркулирующим горючим 376
- В. С. Шулепин. Применение асимптотического  $P_N$ -приближения для расчета ячейки . . . . . 376

235607

225304/м



РГ

$$\Delta\Omega_{12} = \frac{\int_0^{2\pi \operatorname{arctg} R_0/\delta} \int_0^{\frac{d\Phi}{d\Omega}} d\Omega}{\int_0^{2\pi \pi/2} \int_0^{\frac{d\Phi}{d\Omega}} d\Omega};$$

$\frac{d\Phi}{d\Omega} = \text{const } e^{-\theta/\theta_0}$  — для случая плоского мононаправленного источника.

Результаты расчета, приведенные на рис. 2, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Но расчет по формуле (2) плохо согласуется с результатами эксперимента, когда источник, однако, расположен недалеко от первого блока защиты. В этих случаях максимальное отклонение расчетной кривой от экспериментальной находится в минимуме распределений (при  $\delta \approx 100$  см); расчетные значения оказываются заниженными на 30–50%.

В процессе измерений были получены факторы накопления для барьерной геометрии. Для точечного

изотропного источника и плоского мононаправленного источника они оказались одинаковыми ( $6,3 \pm 0,2$ ). Полученные значения факторов накопления согласуются с данными работы [3] в пределах  $\pm 0,3$ , если учесть поправки на барьерную геометрию [4].

Поступило в Редакцию 21/VIII 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Казанский и др. «Атомная энергия», 20, 424 (1966).
2. Ю. А. Казанский, В. И. Кухтевич, С. Г. Цыпин. В сб. «Бюллетень информационного центра по ядерным данным». Вып. 2. М., Атомиздат, 1965, стр. 305.
3. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Атомиздат, 1961.
4. M. Berger, J. Doggett. J. Res. Nat. Bur. Standards, 56, 89 (1956).

## Кондуктометрический индикатор примесей в жидкометаллических теплоносителях

М. Н. ИВАНОВСКИЙ, М. Н. АРНОЛЬДОВ, Б. А. ШМАТКО,  
А. Д. ПЛЕШИВЦЕВ, С. К. КОРОТАЕВ

УДК 543.25:621.039.534.44.6

Первые опыты по измерению электросопротивления циркулирующего натрий-калиевого сплава (для контроля за содержанием примесей) с помощью специально разработанного прибора [1] показали, что его недостатком является относительно сложная электронная часть, обладающая значительным дрейфом показаний и не обеспечивающая полной компенсации температурных изменений электросопротивления. Поэтому необхо-

димо вводить табличные поправки в показания прибора [1].

В 1961 г. авторами был разработан кондуктометрический индикатор примесей, основанный на измерении электросопротивления с помощью двойного моста постоянного тока. Схема индикатора изображена на рис. 1. Одна из U-образных трубок — эталонная — заполнена расплавленным металлом стандартной чистоты и заглушена с обоих концов. Через другую трубку постоянно протекает контролируемый металл. Обе трубки погружены в термостат, заполненный кипящим даутермом. Благодаря интенсивному перемешиванию при кипении даутерма обе трубки имеют одну и ту же температуру с точностью 0,05° С. Сопротивление проточной и эталонной трубок сравнивается при помощи двой-

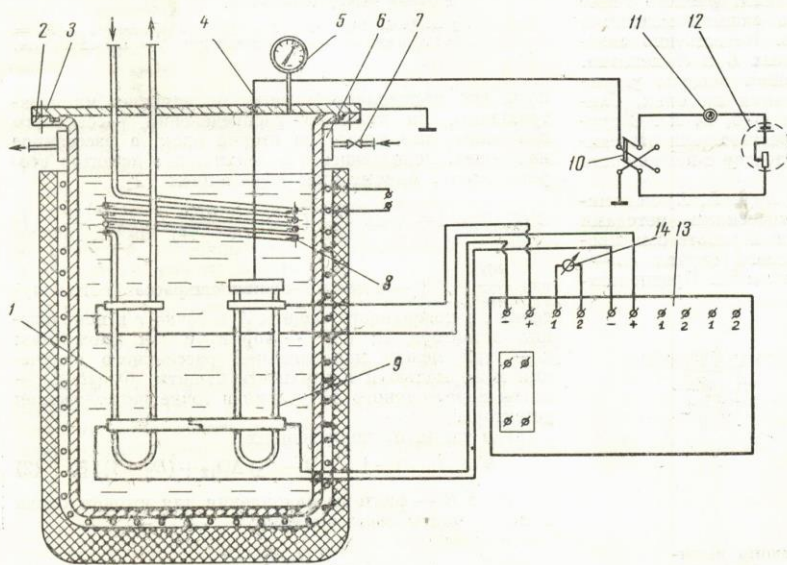


Рис. 1. Схема индикатора примесей:

1 — проточная трубка ( $l = 400$  мм,  $d = 9$  мм, толщина стенки 0,4 мм); 2 — корпус термостата; 3 — крышка термостата; 4 — токоподвод; 5 — манометр; 6 — конденсатор; 7 — водный вентиль; 8 — теплообменник; 9 — эталонная трубка; 10 — двухполюсный переключатель; 11 — амперметр; 12 — источник постоянного тока; 13 — двойной мост сопротивлений; 14 — нуль-гальванометр.

ного моста постоянного тока. Мост измеряет отношение сопротивлений

$$A = \frac{R_{пр}}{R_{эт}}$$

Сигналом индикатора является отклонение отношения сопротивлений от начального значения  $A_{нач} = 1$ :

$$\Delta A = 1 - \frac{R_{пр}}{R_{эт}} = \frac{\Delta R}{R_{эт}} \quad (1)$$

Из рис. 1 видно, что конфигурация трубок исключает утечку тока во внешнюю часть циркуляционного контура.

Температура металла, поступающего в индикатор, может отличаться от температуры кипения дауртерма. Для того чтобы это не влияло на показания прибора, перед входом в проточную измерительную трубку установлен теплообменник, погруженный в ту же термостатирующую жидкость. В ней металл принимает температуру, достаточно близкую к температуре кипящего дауртерма, а следовательно, и измерительных трубок. Нетрудно показать, что допустимое отклонение температуры металла, поступающего на вход теплообменника, от температуры термостатирования  $\Delta t_{вх}$  может быть подсчитано по формуле

$$\Delta t_{вх} = \Delta t \exp\left(\frac{kF}{GC_p}\right), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи от потока металла к кипящей жидкости;  $F$  — поверхность теплообменника;  $G$  — расход металла;  $\Delta t$  — допустимая разность температур измерительной и эталонной трубок. Расчеты показывают, что при расходе натрия 25 кг/ч спиральный теплообменник из трубок диаметром 12 мм (толщина стенки 1 мм) и длиной 2 м способен термостатировать металл с температурой, отличающейся от температуры термостатирования на 50°С в любую сторону. Если возникает необходимость в увеличении допустимых пределов изменения температуры металла на входе в индикатор, прибор должен быть подключен к циркуляционному контуру через рекуперативный теплообменник.

Для измерений в комплекте с индикатором используются стандартные измерительные приборы и источники постоянного тока. Измерения проводились при прямом и обратном направлении тока в измерительных цепях, что позволило исключить влияние паразитных э. д. с. Время, затрачиваемое на одно измерение, не превышает 1 мин.

Рассмотрим возможные источники погрешности показаний индикатора. Представим выражение для сигнала индикатора в виде

$$\Delta A = \frac{(R_{м}^{пр}/R_{м}^{эт}) - 1}{(R_{м}^{пр}/R_{м}^{эт}) + 1}, \quad (3)$$

где индекс «м» относится к металлу, залитому в трубки. Выражение (3) справедливо, если проточная и эталонная трубки имеют одинаковые размеры. Так как  $R_{ст} \gg R_{м}$  (индекс «ст» относится к стальной стенке трубки), с удовлетворительной точностью (не более 2%) это выражение может быть заменено следующим:

$$\Delta A = \frac{\rho_{м}^{пр} - \rho_{м}^{эт}}{\rho_{м}^{эт}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — удельное электросопротивление. Полагая, что  $\rho_{м} = \rho_0 + \alpha t + \beta C$ , получаем

$$\Delta A = \frac{\beta C + \alpha(t_{пр} - t_{эт})}{\rho_0 + \alpha t_{эт}} = \frac{\beta C + \alpha \Delta t}{\rho_0 + \alpha t_{эт}} \quad (5)$$

Из соотношения (5) видно, что сигнал индикатора зависит не только от изменения концентрации примеси  $C$ , но и от изменения температуры термостатирования  $t_{эт}$  и разности температур эталонной и проточной трубок  $\Delta t = t_{пр} - t_{эт}$  (качество термостатирования).

Определим допустимые интервалы изменения  $t_{эт}$  и  $\Delta t$ , в пределах которых они не влияют на точность показаний индикатора. Найдем выражение для абсолютной погрешности сигнала индикатора  $\delta \Delta A$ , про дифференцировав соотношение (5):

$$\delta \Delta A = \frac{\alpha}{\rho_0 + \alpha t_{эт}} \delta \Delta t + \frac{\beta C}{(\rho_0 + \alpha t_{эт})^2} \delta t_{эт}, \quad (6)$$

где  $\delta \Delta t$  и  $\delta t_{эт}$  — абсолютные погрешности соответствующих величин. Так как применение термостата создает условия, когда  $\Delta t \rightarrow 0$ , погрешность этой величины можно считать равной самой величине,  $\delta \Delta t = \Delta t$ . Очевидно, что разность  $\Delta t$  не должна вносить погрешность, превышающую погрешность средств измерения. Отсюда следует, что

$$(\Delta t)_{доп} \leq (\delta \Delta A)_м \left( t_{эт} + \frac{\rho_0}{\alpha} \right). \quad (7)$$

Здесь  $(\delta \Delta A)_м$  — основная абсолютная погрешность использованного моста, равная  $10^{-4}$ . Из этих соображений

$$(\delta t_{эт})_{доп} \leq (\delta \Delta A)_м \frac{(\rho_0 + \alpha t_{эт})^2}{\beta C}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что при малых концентрациях примеси ( $C \rightarrow 0$ ) требование стабильности  $t_{эт}$  отсутствует ( $\delta t_{эт} \rightarrow \infty$ ).

Воспользовавшись формулами (7) и (8), можно подсчитать величины  $\Delta t_{доп}$  и  $\delta t_{доп}$  при контроле содержания  $10^{-3}$  вес. % водорода в натрии при температуре 350°С. Они равны  $\pm 0,05$  и  $\pm 10^\circ$ С соответственно (значение  $\beta$  взято из работы [2]).

Индикатор был испытан на циркуляционном натриевом стенде, снабженном устройством для очистки натрия, пробоотборниками и дозаторами для ввода различных газовых примесей в натрий.

Измерение температурного поля внутри кипящего термостата показало, что требование  $\Delta t \leq 0,05^\circ$ С удовлетворяется. Стабильность температуры термостатирования обеспечивалась при помощи электронного регулирующего потенциометра с точностью  $\pm 1,5^\circ$ С.

Основной режим работы индикатора в процессе испытаний — изотермический, при котором температура термостатирования и температура натрия, поступающего в индикатор, были одинаковы и равны 350°С.

В этом режиме записывались показания индикатора при вводе в циркулирующий натрий газообразных водорода и кислорода. Примеры записи [3] приведены на рис. 2. Подобным образом была исследована зависимость сопротивления расплавленного натрия от содержания водорода и кислорода при температуре 350°С. Из результатов этой работы [2] следует, что электросопротивление натрия при 350°С чувствительно к изменению содержания водорода в нем и практически не зависит от изменения содержания кислорода.

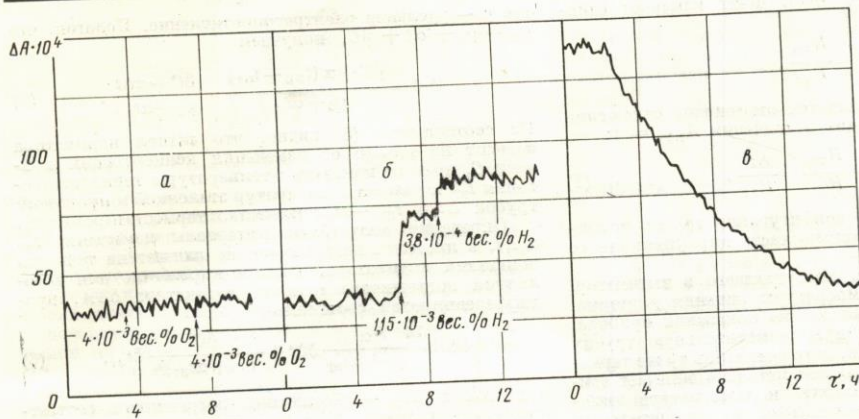


Рис. 2. Запись показаний индикатора:  
а — при вводе кислорода; б — при вводе водорода; в — при очистке от водорода.

Градуировка показаний индикатора при изменении содержания в натрии водорода, проведенная при изотермических условиях работы стенда, позволила установить его чувствительность, равную  $3,3 \times 10^{-5}$  вес. % / деление моста.

При отсутствии источников и отвода примесей в натрии и при постоянной температуре металла в контуре средние показания индикатора отличались стабильностью в течение всего времени наблюдения. Будучи неизменными в среднем, показания индикатора пульсировали с периодом 5—30 мин и средней амплитудой  $\pm 2$  деления моста. Причина пульсаций, по-видимому, заключалась в нестабильности состава циркулирующего натрия.

Как показала длительная эксплуатация индикатора, основной погрешностью его измерений можно считать среднюю амплитуду пульсаций сигнала. В качестве примера укажем, что погрешность контроля изменения содержания водорода в расплавленном натрии при  $350^\circ\text{C}$  равна  $7 \cdot 10^{-5}$  вес. % водорода.

Показания индикатора при изменении содержания водорода в натрии согласуются с результатами химического анализа проб натрия с точностью выше 10%.

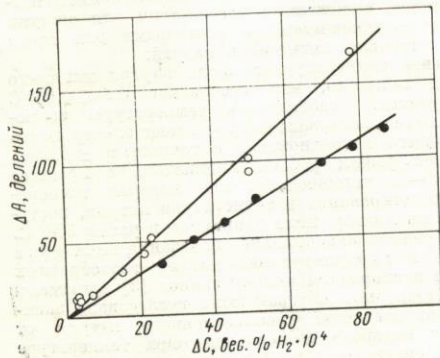


Рис. 3. Зависимость показаний индикатора от концентрации водорода в натрии (отношение объемов металла и газовой полости равно 3). Температура металла в контуре  $350^\circ\text{C}$  (●) и  $500^\circ\text{C}$  (○); температура металла в индикаторе  $350^\circ\text{C}$ .

В дальнейшем индикатор, работающий в изотермическом режиме с контуром, широко применялся для записи различных процессов изменения концентрации примеси. К ним относятся нестационарные процессы включения ловушек, разогрева ловушек, распада пересыщенных растворов примеси, перераспределения примеси водорода между натрием и газовой полостью и пр. В этих условиях индикатор показал способность к устойчивой работе в течение длительного времени. Показания индикатора воспроизводились при воспроизведении концентраций примесей. Измерения показали стабильность сопротивления эталонной трубки при температуре  $350^\circ\text{C}$  в течение всего времени исследования (более 2000 ч).

На показания индикатора, температура металла на входе в который постоянно меняется, влияют особенности поведения системы металл — примеси. При изменении температуры металла в контуре происходит изменение структуры металла и форм состояния примесей в расплаве, перераспределение примесей между компонентами в растворе, перераспределение диссоциирующих примесей между газовой полостью и металлом. Структурные и количественные изменения этого происхождения с конечной скоростью. Результатом этого может быть появление сигнала индикатора, характерного для температурного режима контура, а не термостага, хотя последний обеспечивает полное термостатирование протекающего металла. Поэтому при контроле содержания растворенных в расплавленном металле примесей, основанном на применении физических методов, необходимо учитывать влияние, оказываемое изменением различных параметров системы.

На рис. 3 показан градуировочный график зависимости показаний индикатора, работающего при температуре  $350^\circ\text{C}$ , от концентрации примеси водорода, вводимого в натрий, очищенный холодной ловушкой и циркулирующий в контуре при  $350$  и  $500^\circ\text{C}$ . Из рис. 3 видно, что и в неизотермических условиях работы зависимость сохраняет линейный характер.

Поступило в Редакцию 5/IX 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Den. J. Radio and Electron. Engng, 29, No. 6 (1965).
2. В. И. Субботин и др. «Атомная энергия», 21, 511 (1966).
3. М. Н. Арнольд и др. Доклад № SM 85/47 на симпозиуме МАГАТЭ по щелочнометаллическим теплоносителям. Вена, декабрь 1966.