

ЭНЕРГЕТИКА

М. Г. ИСРАЕЛЯН, А. А. ПЕТРЕНКО, Р. А. ТЕЙМУРАЗЯН, Ю. М. ХОДЖАЯНИ

О МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКИСЛОВ
 В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

Последние годы в Советском Союзе и за рубежом значительное внимание уделяется реакторам на быстрых нейтронах. В качестве теплоносителей в установках с реакторами на быстрых нейтронах чаще всего используются жидкие металлы Na и NaK. Присутствие окислов этих металлов в теплоносителе может привести к неприятным последствиям, так как повышенное содержание их в Na или NaK вызывает ускоренную коррозию конструкционных материалов, что может привести к разгерметизации тепловыделяющих элементов и ухудшить теплопередающие свойства теплоносителя. Окислы также способствуют забиванию узких отверстий и щелей, имеющихся в технологических контурах или приборах. На установках, где используются щелочные металлы, осуществляется контроль содержания окислов с тем, чтобы не допустить работу реакторных установок с опасным содержанием окислов. В настоящей статье проводится анализ некоторых возможных методов измерения окислов в жидкометаллических теплоносителях Na и NaK и дается их сравнительная оценка.

В [1] рассматриваются такие методы измерения концентрации окислов в жидкометаллических теплоносителях, как метод отбора проб и химического анализа, метод пробкового индикатора и метод коррозии. Указанные методы являются достаточно простыми и точными, однако они обладают существенным недостатком — большой периодичностью измерения. В данной статье рассмотрены только непрерывные методы измерения, как представляющие наибольший интерес. Для создания приборов непрерывного контроля содержания окислов в жидкометаллическом теплоносителе используется зависимость удельного сопротивления жидкометаллического теплоносителя от концентрации окислов.

Из [1] видно, что

$$\rho = \rho_0 + \alpha (T - T_0) + \beta \omega, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление жидкого металла при температуре T ;
 ρ_0 — удельное сопротивление жидкого металла при температуре T_0 ;
 α — температурный коэффициент сопротивления жидкого металла;
 β — коэффициент, характеризующий зависимость удельного сопротивления от концентрации примесей;
 ω — концентрация примесей.

В данном случае под примесями имеются в виду в основном окислы. Из выражения (1) видно, что для определения содержания окислов в жидком металле применимы все методы, позволяющие измерять удельное сопротивление металла. Из выражения (1) видно также, что удельное сопротивление жидкого металла зависит не только от концентрации примесей, но и от температуры жидкого металла, поэтому основной проблемой при использовании этих методов является компенсация температурной составляющей.

Существует ряд методов измерения концентрации окислов в жидкометаллических теплоносителях, основанных на использовании зависимости (1). Каждый из этих методов по-разному решает вопрос компенсации температурной составляющей — $\alpha(T - T_0)$. В [1] рассматривается метод двойного моста Кельвина, однако из-за наличия шунти-

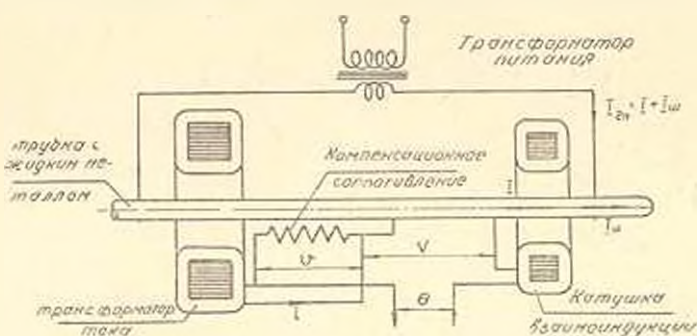


Рис. 1.

рующих цепей, образованных технологическим контуром шне прибора, этот метод не представляет практического интереса, и в данной статье не рассматривается. На наш взгляд наибольший интерес представляют приборы с потенциометрическим преобразованием тока и приборы, основанные на изменении проводимости короткозамкнутого витка трансформатора, образованного жидким металлом.

Схема потенциометрического метода преобразования тока представлена на рис. 1. Вторичная обмотка трансформатора питания подключена к трубопроводу с жидким металлом. На трубопровод насажен трансформатор тока, нагруженный на компенсационное сопротивление r , и катушка для компенсации реактивных составляющих схемы с взаимной индуктивностью M . При изменении активной составляющей участка трубопровода изменяется величина тока I , вследствие чего изменяется ток во вторичной обмотке трансформатора тока i , что влечет за собой изменение падения напряжения v . В процессе измерения v сравнивается с падением напряжения на катушке взаимной индуктивности и на комплексном сопротивлении участка трубопровода.

На рис. 2 индексом m обозначены параметры цепей, шунтирующих участок трубопровода, где производится измерение; индексом $2n$ — параметры вторичной обмотки питающего трансформатора; ин-

дексом 2Т—параметры вторичной обмотки трансформатора тока. Из эквивалентной схемы (рис. 2) и векторной диаграммы (рис. 3) видно,

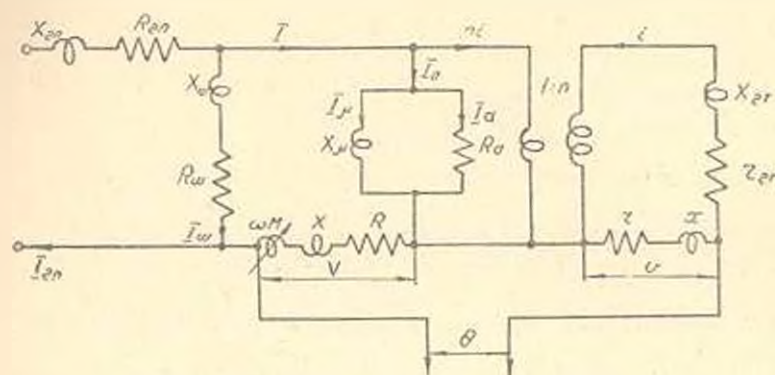


Рис. 2

что выходной сигнал

$$\Theta = V - \varphi, \quad (2)$$

где $V = I[R + j(X - \omega M)]$ — суммарное падение напряжения на катушке взаимной индуктивности M и на комплексном сопротивлении $Z = R + jX$ участка трубопровода;

$v = i(r + jx)$ — падение напряжения на компенсационном сопротивлении $z = r + jx$.

После подстановки в (2) значений V и v , получим:

$$\Theta = I[R + j(X - \omega M)] - i(r + jx) \quad (3)$$

Из рис. 2 и 3 видно, что ток в трубе с жидким металлом

$$I = I_0 + ni,$$

где I_0 — ток намагничивания трансформатора тока;

n — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Пренебрегая током намагничивания трансформатора тока, имеем

$$I \approx ni. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), после преобразований получим:

$$\Theta = \left(R + \frac{r}{n}\right)I + j\left[\left(X - \frac{x}{n}\right) - \omega M\right]I. \quad (5)$$

Величина взаимной индуктивности M выбирается с учетом компенсации реактивных составляющих сопротивлений схемы $X - \frac{x}{n} = \omega M$, следовательно:

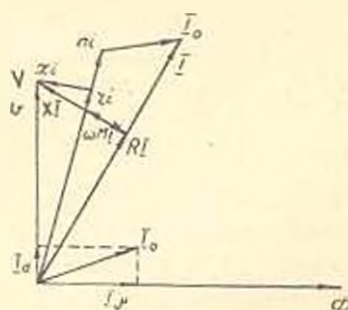


Рис. 3.

$$\Theta = \left(R - \frac{r}{n} \right) I. \quad (6)$$

Для температурной компенсации, сопротивление r изготавливается из материала, температурный коэффициент которого близок к температурному коэффициенту жидкого металла, при этом должен быть обеспечен хороший тепловой контакт сопротивления r с трубопроводом. Величина r выбирается с учетом соотношения $R = \frac{r}{n}$. Таким образом обеспечивается с определенной точностью отстройка схемы от влияния температуры, а возникновение окислов в теплоносителе приводит к неравенству $R \neq \frac{r}{n}$, в результате чего на выходе схемы появляется сигнал. Выражение (6) показывает, что выходной сигнал пропорционален току I и не зависит от шунтирующего тока $I_{ш}$. Это является значительным преимуществом потенциметрического метода преобразования тока по сравнению с методом двойного моста Кельвина. Полным отсутствием шунтирующего тока характеризуется трансформаторный метод измерения с короткозамкнутым витком (рис. 4).

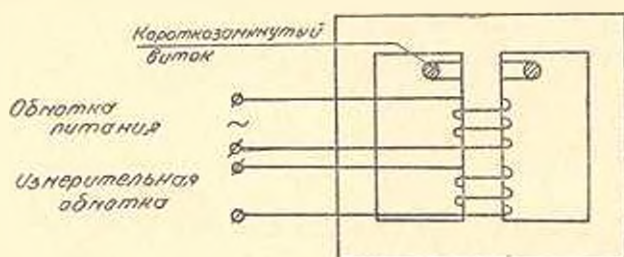


Рис. 4.

Трехобмоточный трансформатор питается от сети переменного тока. Одной из вторичных обмоток является короткозамкнутый виток, выполненный в виде трубки, по которой протекает жидкометаллический теплоноситель. При изменении концентрации окислов изменяется величина тока в короткозамкнутом витке вследствие изменения его активного сопротивления, что влечет за собой пропорциональное изменение потока в сердечнике трансформатора. Э.д.с., наведенная в измерительной катушке, пропорциональна потоку, а следовательно и концентрации окислов в жидкометаллическом теплоносителе.

Для температурной компенсации применяется компенсационное сопротивление $r + jx$, а для компенсации реактивных составляющих сопротивлений вторичной обмотки применяется взаимдуктивность m (рис. 5). Из эквивалентной схемы (рис. 5) и векторной диаграммы (рис. 6) видно, что выходной сигнал

$$\Theta = \dot{V} - \dot{v}, \quad (7)$$

где $\dot{v} = I_1 [r + j(x - \omega m)]$ — падение напряжения в цепи r , x , m ;

$\dot{V}$ — напряжение на измерительной катушке.

Если число витков первичной обмотки равно N , то величина тока в первичной обмотке будет $\frac{I_k}{N}$, где I_k — ток в короткозамкнутом витке. Учитывая параметры короткозамкнутого витка, можно записать выражение для э.д.с. приходящейся на один виток $e = I_k (R + jX)$, при этом напряжение на измерительной катушке $V = n, e = nI_k (R + jX)$, где n — число витков измерительной катушки.

Ток в первичной обмотке трансформатора $I_1 = I_0 + I_k/N$. Если пренебречь током намагничи-

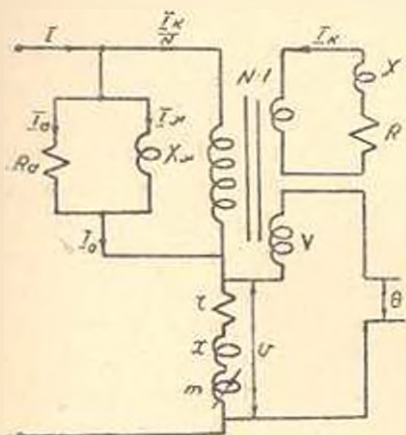


Рис. 5.

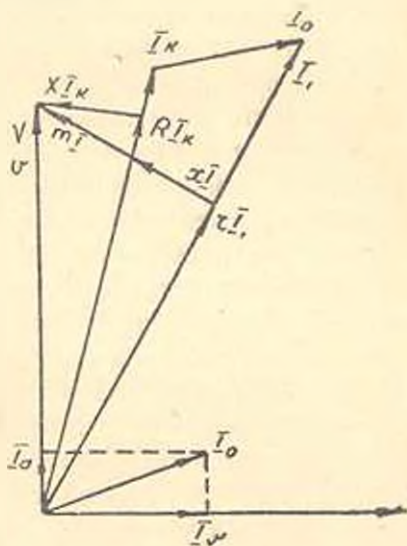


Рис. 6.

вания трансформатора I_0 , то $I_1 = \frac{I_k}{N}$. Следовательно $\dot{V} = \frac{I_k}{N} [r + j \cdot (x - \omega m)]$.

Учитывая изложенное, выражение (7) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= nI_k (R + jX) - \frac{I_k}{N} [r + j(x - \omega m)] = I_k \left(nR - \frac{r}{N} \right) + \\ &+ jI_k \left(nX - \frac{x}{N} + \frac{\omega m}{N} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Выбирая величину взаимной индуктивности m так, чтобы компенсировать реактивные составляющие сопротивлений схемы

$$\frac{\omega m}{N} = \frac{x}{N} - nX,$$

получим

$$\dot{\Theta} = I_k \left(nR - \frac{r}{N} \right). \quad (9)$$

Компенсационное сопротивление должно иметь хороший тепловой контакт с трубопроводом, и температурный коэффициент близкий

к температурному коэффициенту жидкого металла. Полная температурная компенсация имеет место в случае $NuR = r$. При этом, в случае появления окислов в жидком металле, изменяется R и появляется неравенство $NuR \neq r$. На выходе прибора появляется сигнал, пропорциональный концентрации окислов.

Методы, основанные на зависимости концентрации окислов от удельного сопротивления жидкометаллического теплоносителя, дают возможность непрерывно измерять концентрацию окислов. Однако при использовании этих методов необходимо учитывать некоторые обстоятельства. Из (1) видно, что удельное сопротивление зависит от концентрации примесей, в качестве которых могут рассматриваться не только окислы, но и газовые пузыри, механические взвеси и т. п., которые могут внести погрешность в выходной сигнал. По данным [1] минимальная концентрация окислов в жидкометаллическом теплоносителе, которую необходимо измерить, составляет $1 \cdot 10^{-4}$ по весу. Одновременно изменение концентрации окислов на $1 \cdot 10^{-4}$ эквивалентно изменению температуры на $0,01^\circ\text{C}$. следовательно температурную компенсацию необходимо осуществить с точностью до $0,04^\circ\text{C}$. Температурная компенсация обычно осуществляется сопротивлением, температурный коэффициент которого в определенном диапазоне температур близок температурному коэффициенту жидкого металла. Величина диапазона ограничивает применение указанных методов. Большое значение здесь имеет стабильность магнитных характеристик магнитопровода, вследствие чего необходимо применять магнитные материалы со стабильными температурными характеристиками. Для обеспечения необходимой точности магнитные материалы должны при этом обладать высокой проницаемостью и иметь малые токи намагничивания. На точность выходного сигнала также влияют изменения питания и частоты. В [2] рассматривается возможность применения нейтронного активационного анализа для определения кислорода. В последние годы работы в этом направлении получили дальнейшее развитие. В [3] рассматривается активационный метод определения кислорода при помощи быстрых нейтронов с использованием дешевого портативного источника нейтронов. При этом происходит следующая реакция:



где ядро N^{16*} является радиоактивным.

При распаде N^{16*} излучаются γ -кванты следующих энергий с соответствующими выходами: $0,07 \gamma$ -кв с энергией $7,11 \text{ мэв}$; $0,76 \gamma$ -кв с энергией $6,13 \text{ мэв}$; $0,009 \gamma$ -кв с энергией $2,75 \text{ мэв}$; $0,001 \gamma$ -кв с энергией $1,72 \text{ мэв}$. Как видно из приведенных данных, существенный вклад в общее ϕ -излучение дает γ -излучение с энергией $6,13 \text{ мэв}$ (76%). Это излучение можно зарегистрировать известными методами. Существенной особенностью приведенной физической реакции является то, что она возможна на нейтронах с энергией $\sim 11 \text{ мэв}$.

Из физических основ активационного метода следует, что реакция (10) может быть использована, как одно из надежных и точных средств контроля концентрации окислов не только в аналитической химии, но также и в реакторостроении.

Рассмотренные материалы позволяют сделать следующие выводы.

1. Непрерывные методы измерения окислов в жидкометаллических теплоносителях имеют большие преимущества по сравнению с известными методами периодического контроля, особенно при использовании их на реакторных установках.

2. Для обеспечения непрерывного контроля содержания кислорода в жидкометаллических теплоносителях на реакторных установках предпочтительнее использовать метод, основанный на изменении удельного сопротивления при изменении концентрации окислов. Однако, ввиду того, что описанные выше схемы обеспечивают температурную компенсацию только в узком диапазоне температур, целесообразна дальнейшая проработка этого метода в части обеспечения точной температурной компенсации в пределах рабочих температур жидкометаллических теплоносителей.

3. С целью дальнейшего повышения точности указанного метода представляется необходимым выявление зависимости удельного сопротивления жидкометаллических теплоносителей от концентрации окислов и других примесей.

4. Для осуществления анализа состава жидкометаллического теплоносителя с помощью активационного метода требуется стабильный источник нейтронов, что не всегда представляется возможным в условиях промышленной реакторной установки.

Организация №/я 472

Поступило 25.X 1963

Մ. Գ. ԻՍԽԱՅԷԼՅԱՆ, Ա. Ա. ՊԵՏԵՆՅԱՆ, Ի. Ա. ԹԵՅՄՈՒՐԱԶՅԱՆ, ՅՈՒ. Մ. ԽՈՋԱՆՅԱՆ

ՀԵՂՈՒԿԱՄԵՏԱՂԱՑԻՆ ԶԵՐՄԱՏԱՐՆԵՐԻ ՄԵՋ ՕԳՍԻՂՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԽՈՒՂՆԵՐԻ ՎԵՐԱՐՆԵՐՅԱԼ

Ա. Ա. Մ. Ս. Մ. Ս. Ս.

Հողվածում զիտվում են ռեակտորային սարքավորումների հեղուկամետաղային ջերմատարների մեջ օքսիդների խտությունն անընդհատ չափման մեթոդները: Տրվում է նրանց համեմատական դնահատակները: Յուրք է տրվում, որ ռեակտորային սարքավորումներում առավել նպատակահարմար է օդատարածել տրանսֆորմատորային մեթոդը, որտեղ որպես չափող էլեմենտ օգտագործվում է հեղուկամետաղային ջերմատարից կազմված կարճ միացված գալարը, որի զիմադրությունը փոփոխվում է՝ կախված օքսիդների քանակից:

Բերվում է ելքի աղղանշանը որոշելու անալիտիկ մեթոդը՝ կախված չափող սխեմայի պարամետրերից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. The Journal of the Br. Nucleonics En. Conf. 1961. 6, № 1.
2. „Химия радиоэлементов и радиационных превращений“, 1959, М., Тр. II-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии.
3. Analytical Chemistryabr. 1962.