

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА СВИНЕЦ-ВИСМУТ

Н.И.Логинов

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г.Обнинск



Рассматриваются методы исключения влияния контактного электрического сопротивления между эвтектическим сплавом свинец-висмут и стенкой трубопровода из нержавеющей стали, препятствующего применению широко известных электромагнитных расходомеров для измерения расхода этого сплава. Предлагаются конструкции расходомеров, позволяющие реализовать рассмотренные методы и обеспечивающие погрешность измерения расхода 2,5...5%. Сообщается о методе измерения самого контактного сопротивления. Впервые публикуются экспериментальные данные о величине контактного сопротивления и его зависимости от температуры и концентрации кислорода в сплаве.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных методов измерения расхода жидких металлов, применяющихся в качестве теплоносителей в экспериментальных и энергетических установках, является электромагнитный метод, в основе которого лежит закон электромагнитной индукции Фарадея. При движении электропроводной среды в магнитном поле в этой среде индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная скорости ее движения.

Освоение жидкометаллических теплоносителей потребовало разработки приборов для измерения скорости и расхода. Уже с 1950 г. в Физико-энергетическом институте начались работы по созданию электромагнитных расходомеров для натрия, калия, эвтектического сплава натрий-калий, ртути, эвтектического сплава свинец-висмут, а затем и лития [1-5].

Теоретические основы электромагнитного метода измерения расхода изложены во множестве публикаций. Здесь достаточно указать книгу Дж. Шерклифа [6].

Простейшее устройство электромагнитного расходомера показано на рис.1. Выходным сигналом такого устройства является электрическое напряжение, снимаемое с помощью электродов, присоединяемых к трубопроводу в точках "в" и "г". Это напряжение равно

$$U_{вг} = 2B\overline{W}R \frac{2R/R_1}{1 + R^2/R_1^2 + (R_c\sigma_c/R + \sigma_c/\sigma_{ж})(1 - R^2/R_1^2)}, \quad (1)$$

где B - магнитная индукция, \overline{W} - средняя по сечению скорость, R - внутренний радиус трубопровода, R_1 - наружный радиус трубопровода, σ_c - электропроводность стенки

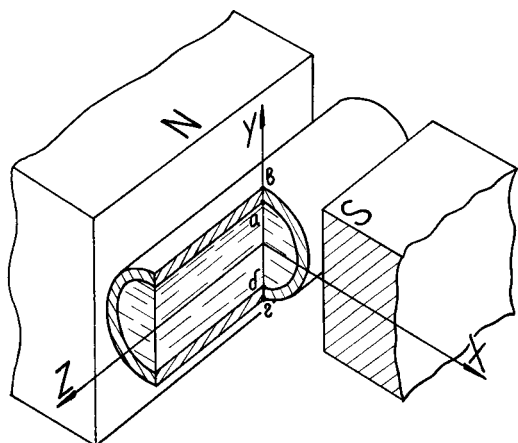


Рис. 1. Схематическое устройство расходомера

свинец, эвтектический сплав свинца с висмутом, плохо смачивают сталь и окисные пленки на ее поверхности, поэтому между жидкостью и стенкой трубопровода имеется контактное сопротивление. Численное значение этого сопротивления достаточно велико и, что особенно важно, зависит от многих условий (температура, состояние поверхности, примеси в жидком металле и др.). В связи с этим применение простейших электромагнитных расходомеров (рис.1) для этих металлов практически невозможно, т.к. погрешность измерения расхода может превышать 100%.

ПОПЫТКИ СТАБИЛИЗАЦИИ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Первые работы по измерению расхода сплава свинец-висмут, выполненные в начале 50-х гг., были направлены на стабилизацию контактного сопротивления. Многочисленные попытки повышения стабильности работы расходомеров этим путем можно разделить на три группы: улучшение смачиваемости стенки трубопроводов, введение электродов в жидкий металл, развитие поверхности электрода и стабилизация контактного сопротивления.

С целью улучшения смачиваемости внутреннюю поверхность канала расходомера тщательно обрабатывали и облуживали оловом. Такие расходомеры работали стабильно (как, например, на натрии), но срок их службы был мал. Приблизительно через 500 ч работы олово смывалось сплавом свинец-висмут и начиналась нестабильная работа с большими и непредсказуемыми погрешностями. Однако и 500 ч стабильной работы давали возможность выполнить определенные экспериментальные работы с контролируемым расходом.

Введение электродов в жидкий металл первоначально было рассчитано на то, что выходное напряжение в жидкости может быть больше, чем на стенке, и поэтому падение напряжения на контактом сопротивлении, сохраняясь по абсолютной величине, относительно уменьшится, следовательно, уменьшится и погрешность, связанная с ним. Таким образом появилась конструкция электрода, основу которой составляла молибденовая проволоочка диаметром около 1 мм, впаянная стеклом в коваровую втулку. Коваровую втулку можно было либо варивать в канал расходомера, либо уплотнять по типу "шар-конус".

Расходомеры с такими электродами работали весьма устойчиво и обеспечивали воспроизводимость показаний (на одной и той же установке) 2,5..5% при температуре сплава свинец-висмут до 350°C. Основным недостатком таких электродов была недостаточная механическая прочность. Тем не менее эти расходомеры широко использова-

трубопровода, $\sigma_{ж}$ - электропроводность жидкости, R_k - контактное сопротивление на границе жидкости и стенки. Если не считать контактного сопротивления, то все величины, входящие в правую часть формулы (1), являются постоянными для конкретного расходомера, и, следовательно, измеряемое напряжение $U_{вг}$ пропорционально средней скорости жидкости или ее объемному расходу.

Щелочные металлы, как правило, достаточно хорошо смачивают нержавеющую сталь, и контактное сопротивление равно нулю. Однако целый ряд металлов, таких, как ртуть, галлий, сви-

лись на теплофизических и материаловедческих стендах со сплавом свинец-висмут. Их градуировку производили обычно при температуре 270..330°C с погрешностью $\pm 3\%$ и устанавливали на исследовательских стендах в холодной части контура, где температура была примерно той же, что и при градуировке. Бывали случаи повторной градуировки таких расходомеров после 1..3 тыс. ч работы, и, если электроды не были повреждены, наблюдалась воспроизводимость градуировки с указанной выше точностью. Если градуировка не воспроизводилась, то извлекали электроды и, как правило, наблюдали повреждение внутреннего стеклянного спая на одном или обоих электродах. Нередко после замены электродов градуировка снова воспроизводилась.

Позднее В.Н. Супруновым и А.К. Паповянцем были разработаны и успешно использовались аналогичные электроды с изоляцией на основе ситалла, более простые по конструкции и более надежные.

В работе [2] впервые получена и приведена формула для выходного напряжения расходомера с учетом контактного сопротивления для расходомера с электродами, введенными в поток жидкости.

$$U_{аб} = 2B\bar{W}R \frac{1 + R^2/R_1^2 + (R_k \sigma_c / R)(1 - R^2/R_1^2)}{1 + R^2/R_1^2 + (R_k \sigma_c / R + \sigma_c / \sigma_{ж})(1 - R^2/R_1^2)} \quad (2)$$

Сравнение формул (1) и (2) показывает, что характер зависимости $U_{вг}$ и $U_{аб}$ от контактного сопротивления различен: $U_{аб}$ увеличивается с ростом R_k , а $U_{вг}$ уменьшается.

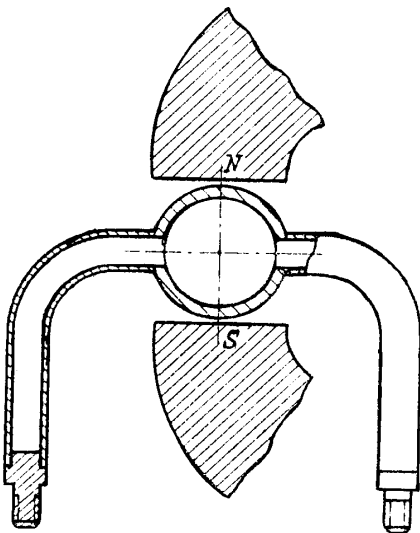


Рис.3. Преобразователь с трубчатыми электродами

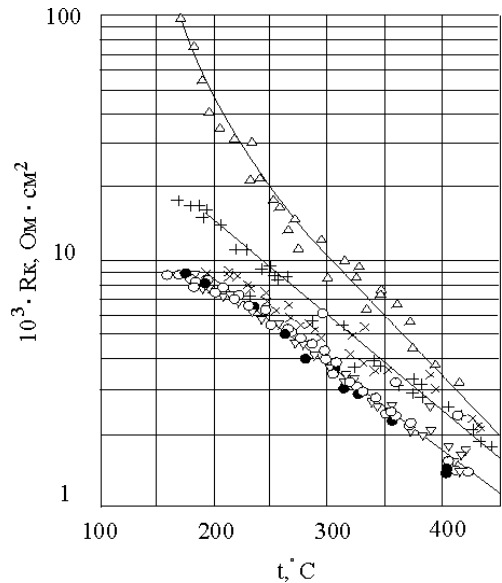


Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления от температуры. Концентрация кислорода: ∇ - 0,04 ppm; \circ - 0,1 ppm; \bullet - 0,2 ppm; \times - 0,40 ppm; $+$ - 1,0 ppm; Δ - 2,0 ppm

Расходомер с введенными в жидкость электродами, установленный в холодной части контура, в сочетании с расходомером обычной конструкции, установленным на экспериментальном участке с изменяющейся температурой, позволили измерить контактное сопротивление между движущимся сплавом свинец-висмут и стенкой трубопровода из нержавеющей стали и впервые исследовать экспериментально зависимость контактного сопротивления от температуры, скорости движения и концентрации кислорода в сплаве [2].

Зависимость от температуры при различной концентрации кислорода в сплаве показана на рис.2.

Конструктивная ненадежность электродов со стеклом вынуждала искать другие решения, которые позволили бы применять электромагнитные расходомеры и в реакторных установках, в частности, при тепловых испытаниях твэл. С этой целью были созданы расходомеры с трубчатыми электродами (рис.3). Идея трубчатых электродов состояла в том, чтобы увеличить поверхность контакта жидкого металла и электрода и создать условия, при которых контактное сопротивление у электрода оставалось бы неизменным. Электроды представляли собой трубки из нержавеющей стали диаметром 8х1мм или 10х1мм, герметично приваренные одним концом к каналу расходомера и герметично заваренные с другого конца пробками из той же стали. Трубки были прогнуты вниз и назад по ходу жидкого металла так, что они были постоянно заполнены как при горизонтальном, так и при вертикальном положении канала расходомера. Длина трубок составляла около 150 мм, их концы выходили за слой теплоизоляции и всегда оставались холодными. Поэтому сплав свинец-висмут был там всегда заморожен на некоторой длине. Это должно было обеспечивать стабильный, хотя и не идеальный контакт.

На этой основе совместно с НИИТеплоприбор были созданы и успешно эксплуатировались расходомеры МР-51А и МР-52А для линии возврата протечек ГЦН первого контура реакторных установок атомных подводных лодок. В ФЭИ была также создана серия расходомеров с трубчатыми электродами для петлевых реакторных испытаний твэл в ИАЭ им.И.В. Курчатова и в НИИАР, для линии возврата протечек ГЦН реакторных и экспериментальных стенов.

Опыт использования этих расходомеров неоднозначен. Многие из них работали весьма успешно и стабильно, другие давали существенные погрешности при изменении условий, приводящих к изменению контактного сопротивления.

Расчетно-теоретический анализ работы таких расходомеров, а также и расходомеров с электродами, введенными в поток жидкого металла, позволил разработать и реализовать несколько методов измерения расхода сплава свинец-висмут.

Прежде чем излагать эти методы, сделаем следующее замечание.

Необходимо различать контактное сопротивление между жидким металлом и стенкой канала расходомера и контактное сопротивление между жидким металлом и электродом, введенным в жидкий металл. Обозначим первое из них R_{κ} , второе - $R_{\kappa\epsilon}$. В формуле (1) присутствует только R_{κ} , и это естественно, т.к. контакта электрода с жидким металлом нет (электроды присоединены к стенке в точках "в" и "г"). Но и в формуле (2) $R_{\kappa\epsilon}$ тоже отсутствует. Дело в том, что формула получена теоретически и определяет индуцированную разность потенциалов между точками "а" и "б" независимо от того, измеряется эта разность или нет каким-либо способом.

Если ввести в точки "а" и "б" электроды, не имеющие непосредственного контакта со стенкой, то при измерении $U_{аб}$ компенсационным методом, т.е. с помощью потенциометра, а не вольтметра, ток в измерительной цепи отсутствует. Значит, отсутствует и падение напряжения на $R_{\kappa\epsilon}$, как, впрочем, и на подсоединительных проводах. Поэтому при повреждении внутреннего стеклянного спая электрода, когда жидкий металл создает контакт между проволочкой, коваровой втулкой и стенкой, контактное сопротивление влияет на выходной сигнал расходомера.

МЕТОД СТУПЕНЧАТОЙ СТЕНКИ

Рассмотрим некоторые возможности, заложенные в формулах (1) и (2) [7]. Контактное сопротивление между жидким металлом и стенкой канала влияет на выходной сигнал постольку, поскольку оно изменяет шунтирующее действие стенки. При $R_{\kappa}=0$ шунтирующее действие стенки максимально, при этом напряжение в жидкости $U_{аб}$ и на стенке $U_{вг}$ минимально. При $R_{\kappa} \rightarrow \infty$ между жидким металлом и стен-

кой полностью нарушается электрический контакт и напряжение на стенке стремится к нулю. Это означает, что простейший преобразователь (рис.1) вообще не работоспособен, т.к. в случае сплава свинец-висмут $R_k\sigma_c/R$ может изменяться в диапазоне 0,1..100. Зато шунтирующее действие стенки отсутствует и $U_{аб}$ имеет максимальное значение, соответствующее течению в неэлектропроводной трубе. Но преобразователь с электродами, введенными в поток, тоже может значительно изменять свои показания. Даже у тонкостенного расходомера ($R/R_1 \approx 0,9$) выходной сигнал изменяется от 0,9 до 1, т.е. на 10%, в указанном выше диапазоне изменения контактного сопротивления. В практических конструкциях $R/R_1 \approx 0,8$ и изменения выходного сигнала могут быть еще больше.

Далее, шунтирующее действие стенки тем больше, чем она толще, тем больше и влияние R_k на $U_{вр}$. Следовательно, два преобразователя, имеющие различную толщину или различную электропроводность стенок, т.е. различный коэффициент шунтирования, будут в разной степени чувствительны к контактному сопротивлению. Из сопоставления показаний двух таких преобразователей, находящихся в одинаковых условиях, можно определить истинное значение расхода. Но два преобразователя трудно поместить в совершенно одинаковые условия. Необходимо обеспечить одинаковую чистоту поверхности, одинаковую температуру и т.д., поэтому целесообразно объединить эти преобразователи в один – преобразователь со ступенчатой стенкой.

Преобразователь представляет собой трубопровод, имеющий два смежных участка, отличающиеся друг от друга наружным диаметром и толщиной стенки. На каждом участке трубопровода имеются электроды, присоединенные к наружной поверхности. Трубопровод и обе пары электродов находятся в воздушном зазоре магнитной системы, создающей поперечное магнитное поле. Внутренний диаметр и внутренняя поверхность трубопровода одинаковы как на тонкостенном, так и на толстостенном участке, скорость и расход жидкости через оба участка также одинаковы. Одинакова и магнитная индукция в поперечных сечениях трубопровода, где находятся электроды. Электроды расположены сравнительно близко друг от друга (на расстоянии 1-2 диаметров трубы), и поэтому температурные условия их тоже одинаковы.

Рассмотрим работу преобразователя. В соответствии с формулой (1) напряжение на тонкостенном участке равно

$$U_1 = 2WBR \frac{2R/R_1'}{1 + R^2/R_1'^2 + (R_k\sigma_c/R + \sigma_c/\sigma_{ж}) \left(1 - R^2/R_1'^2 \right)}, \quad (3)$$

а на толстостенном участке

$$U_1 = 2WBR \frac{2R/R_1''}{1 + R^2/R_1''^2 + (R_k\sigma_c/R + \sigma_c/\sigma_{ж}) \left(1 - R^2/R_1''^2 \right)}, \quad (4)$$

где R' и R'' - наружные радиусы тонкостенного и толстостенного участков соответственно. Если U_1 и U_2 измерены, то в уравнениях (3) и (4) содержатся только две неизвестные величины (\bar{W} и R_k), определить которые позволяет совместное решение этих уравнений. Выражение для скорости получается следующим:

$$\bar{W} = \frac{1}{2BR(K_1/U_1 - K_2/U_2)}, \quad (5)$$

где

$$K_1 = \frac{R_1'}{R} \frac{R_1''^2 - R^2}{R_1''^2 - R_1^2}, \quad K_2 = \frac{R_1''}{R} \frac{R_1'^2 - R^2}{R_1''^2 - R_1^2}. \quad (6)$$

В формулы (5) и (6) не входит контактное сопротивление, и, следовательно, средняя скорость и расход жидкости однозначно определяются по измеренным значениям U_1 и U_2 . С помощью данного преобразователя можно одновременно с расходом определить и значение контактного сопротивления в соответствии с соотношением

$$\frac{R_k \sigma_c}{R} = \frac{U_2 R_1'' \left[1 + \frac{R^2}{R_1''^2} + \frac{\sigma_c}{\sigma_{ж}} \left(1 - \frac{R^2}{R_1''^2} \right) \right] - U_1 R_1' \left[1 + \frac{R^2}{R_1'^2} + \frac{\sigma_c}{\sigma_{ж}} \left(1 - \frac{R^2}{R_1'^2} \right) \right]}{U_1 R_1 - U_2 R_1}. \quad (7)$$

Знание контактного сопротивления может представлять самостоятельный интерес, т.к. в ряде случаев позволяет судить о состоянии поверхности трубопровода и о содержании примесей в теплоносителе.

При практическом осуществлении рассматриваемого преобразователя нужно иметь в виду, что электроды тонкостенного и толстостенного участков должны быть разнесены на некоторое расстояние. Это связано с тем, что формулы (3) и (4) справедливы для преобразователей, далеко отстоящих и не влияющих друг на друга. Можно считать, что области потока, удаленные от электродов более чем на 1,5 диаметра вверх и вниз по течению, не оказывают влияния на чувствительность преобразователя (сравните концевые эффекты). Вероятно, взаимное электрическое влияние будет незначительным, если разнести в преобразователе электроды вдоль потока более чем на 3 диаметра. Это значит, что суммарная протяженность поля должна быть равной 6 диаметрам. Но это необходимо только в том случае, когда желательно получить расчетным путем надежные характеристики преобразователя. В тех случаях, когда имеется возможность провести градуировку, эти требования можно не выдерживать, при этом значения коэффициентов K_1 и K_2 в формуле (5) будут отличаться от значений в формуле (6) на некий постоянный коэффициент, который следует определить по результатам градуировки.

Тем не менее преобразователь обладает существенным недостатком, ограничивающим область его применения. При больших значениях контактного сопротивления напряжения, снимаемые электродами, будут довольно малы, что может вызвать определенные затруднения при их измерении. Кроме того, в знаменателе формулы (5) стоит разность сравнительно близких по значению величин, что при их малости может дать большую погрешность в вычисленном результате. Поэтому преобразователь можно эффективно использовать лишь при умеренных значениях контактного сопротивления ($R_k \sigma_c / R \approx 1$).

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ТРУБЧАТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Электродные трубки (рис.3) приварены к наружной поверхности стенки, и если бы их внутренняя полость была заполнена изолятором, то напряжение на их заглушенных концах равнялось бы $U_{вг}$. Жидкий или частично замороженный металл в трубках имеет контакт с потоком в канале, и если бы электродные трубки были неэлектропроводны, кроме заглушек, то напряжение на них равнялось бы $U_{а6}$. Фактически мы имеем некое параллельное соединение двух источников напряжения $U_{а6}$ и $U_{вг}$; т.к. напряжение в жидкости $U_{а6}$ возрастает с увеличением контактного сопротивления, а $U_{вг}$ уменьшается, то напряжение, измеряемое на концах трубчатых электродов, должно слабее зависеть от R_k , чем каждое в отдельности.

Аналитическое решение задачи и вывод формулы для измеряемого напряжения практически невозможны, поэтому в [7] применен метод эквивалентной электрической схемы расходомера.

Эквивалентная схема преобразователя с трубчатыми электродами представлена на рис.4; здесь E - ЭДС, индуцируемая в жидкости; R_B - внутреннее сопротивление источника ЭДС, т.е. сопротивление жидкого металла; R_K - контактное сопротивление между жидкостью и стенкой; R_C - сопротивление стенки преобразователя, шунтирующее ЭДС; $R_{TЭ}$ - сопротивление электродной трубки; $R_{ЖЭ}$ - сопротивление жидкости в электродной трубке; $R_{КЭ}$ - контактное сопротивление между жидкостью (или замерзшим теплоносителем) и заглушкой электрода;

$U_{Ж}$ - напряжение, индуцированное в жидкости; U_C - напряжение на стенке преобразователя; $U_{ИЗ}$ - напряжение на концах трубчатых электродов, измеряемое вторичным прибором.

Из схемы можно определить:

$$U_{ИЗ} = U_{Ж} - U_{ac} - U_{a1c1} = U_{Ж} \frac{R_{TЭ}}{R_{КЭ} + R_{ЖЭ} + R_{TЭ}} + U_C \frac{R_{КЭ} + R_{ЖЭ}}{R_{КЭ} + R_{ЖЭ} + R_{TЭ}}. \quad (8)$$

Этот результат анализа схемы показывает, что выходное напряжение преобразователя с трубчатыми электродами определяется как напряжением в жидкости, так и напряжением на стенке. А поскольку эти напряжения имеют взаимно противоположный характер изменения с ростом контактного сопротивления, то зависимость $U_{ИЗ} = f(R_K)$ должна быть более слабой, чем $U_C = f(R_K)$.

Сопротивления $R_{ЖЭ}$ и $R_{TЭ}$ можно легко вычислить по известным геометрическим размерам электродных трубок и удельным сопротивлением измеряемой жидкости и материала трубки. Контактное сопротивление, вообще говоря, неизвестно. Однако его значение можно сделать достаточно малым по сравнению с $(R_{ЖЭ} + R_{КЭ})$, например, путем облуживания пробки. Поэтому положим $R_{КЭ} = 0$. Учитывая, что $R_{TЭ} = \rho_T l_{TЭ} / S_{TЭ}$, а $R_{ЖЭ} = \rho_{ЖЭ} l_{ЖЭ} / S_{TЭ}$, и, считая, что длина столба жидкости в электроде $l_{ЖЭ}$ равна длине электродной трубки $l_{TЭ}$, получаем из (8):

$$U_{ИЗ} = \frac{U_{Ж} + U_C (R_{НЭ}^2 / R_{ВЭ}^2 - 1) \rho_{Ж} / \rho_m}{1 + (R_{НЭ}^2 / R_{ВЭ}^2 - 1) \rho_{Ж} / \rho_m}, \quad (9)$$

где $R_{НЭ}$ и $R_{ВЭ}$ - наружный и внутренний радиусы электродной трубки, т.к. $U_{Ж}$ и U_C зависят от контактного сопротивления (в соответствии с (1) и (2)), то и зависит от контактного сопротивления, хотя и слабее, чем U_C .

Попытаемся теперь выяснить условия, при которых $U_{ИЗ}$ не зависело бы от $R_{КЭ}$. Это будет в том случае, когда

$$\frac{dU_{ИЗ}}{d(R_K / \rho_c R)} = 0.$$

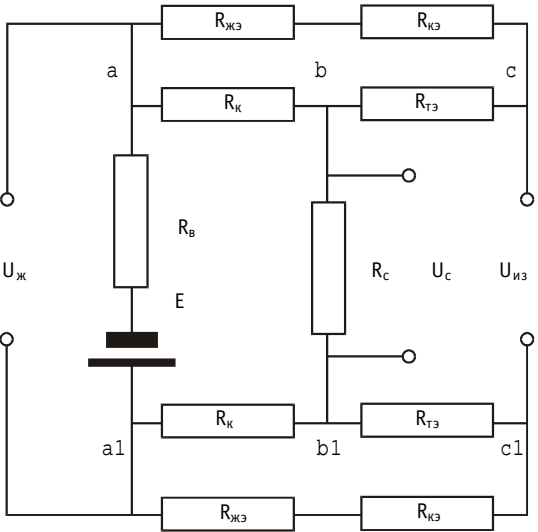


Рис.4. Эквивалентная электрическая схема преобразователя с трубчатыми электродами

Продифференцировав (1) и (2), получим после преобразований

$$\frac{R_{нз}}{R_{вз}} = \sqrt{1 + \frac{\rho_{\tau}}{\rho_c} \cdot \frac{1 - R^2/R_1^2}{2R/R_1}}. \quad (10)$$

Итак, для того, чтобы выходное напряжение преобразователя с трубчатыми электродами не зависело от контактного сопротивления, необходимо выбрать размеры электродной трубки в соответствии с соотношением (10). Этот результат объясняет, почему применение трубчатых электродов не всегда давало желаемый эффект.

Если трубчатые электроды изготовлены из того же материала, что и основной трубопровод, то $\rho_{\tau} = \rho_c$ и формула несколько упрощается. Подставляя найденное оптимальное отношение размеров электродных трубок в (9), получаем выражение для выходного напряжения преобразователя

$$U_{из} = 2\bar{W}BR \frac{2R/R_1}{2R/R_1 + (\rho_{ж}/\rho_c)(1 - R^2/R_1^2)}, \quad (11)$$

т.е. $U_{из}$ действительно не зависит от R_k .

Для выполнения полученного соотношения размеров приходится брать довольно тонкостенные электродные трубки, а именно:

R/R_1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
$R_{нз}/R_{из}$	0,975	0,951	0,927	0,904	0,878	0,856	0,832	0,808

Если по условиям прочности или по другим, например, конструкционным, соображениям нельзя брать слишком тонкую стенку, то следует провести расчет размеров преобразователя в обратном порядке: сначала выбрать минимальную допустимую толщину стенки электродов, а затем по соотношению определить размеры основного трубопровода.

Напомним, что формула получена на основе анализа эквивалентной схемы, являющейся лишь некоторым приближением к действительности. Поэтому справедливость ее должна быть проверена довольно большим числом экспериментов с преобразователями различных, но удовлетворяющих формуле размеров на различных жидкометаллических средах и в широком диапазоне изменения контактного сопротивления. К настоящему времени таких экспериментальных данных еще почти нет, но можно с уверенностью сказать, что соблюдение условия, если и не приведет к полному избавлению от влияния контактного сопротивления, то значительно снизит это влияние.

МЕТОД ДВУХ НАПРЯЖЕНИЙ

Напряжение, возникающее в жидкости, и напряжение на стенке использованы, вообще говоря, в преобразователе с трубчатыми электродами. Однако решение получено не строгим математическим путем, а методом анализа эквивалентных электрических схем, поэтому рассмотрим строго следующий метод измерения расхода. Допустим, что в одном и том же преобразователе измерены одновременно напряжение в жидкости $U_{ж}$ и в стенке U_c . Тогда совместное решение уравнений (1) и (2), содержащих две неизвестные величины \bar{W} и $R_{кз}$, позволит найти эти величины. В соответствии с [7] имеем:

$$\frac{R_k \sigma_c}{R} = \frac{U_{ж}}{U_c} \cdot \frac{2R/R_1}{1 - R^2/R_1^2} - \frac{1 + R^2/R_1^2}{1 - R^2/R_1^2}, \quad (12)$$

$$\bar{W} = \frac{1}{2BR} \left(U_{ж} + U_c \frac{\sigma_c}{\sigma_{ж}} \cdot \frac{1 - R^2/R_1^2}{2R/R_1} \right) \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) служат основой для создания преобразователя расхода с коаксиальными электродами, работающего с использованием двух напряжений, конструкция которого описана в [7].

Расходомер с электродами описанной конструкции успешно испытан на сплаве свинец-висмут в течение около 1500 ч.

Коаксиальные электроды могут иметь и другую конструкцию. В частности, успешно использовались гермовводы на основе ситалла. Недостатком таких гермовводов является большой диаметр корпуса, что приводит к усреднению напряжения на стенке по некоторой поверхности и к отличию его численного значения от теоретического.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования и разработки в области электромагнитных расходомеров для жидких металлов, выполненные в ГНЦ РФ-ФЗИ на протяжении многих лет, в целом обеспечили потребности экспериментальных теплофизических, технологических и материаловедческих стендов, реакторных петель и некоторых реакторных установок в измерении расхода сплава свинец-висмут с погрешностью 2...5 %.

Разработанные методы измерения расхода сплава свинец-висмут и других металлов, плохо смачивающих стенку трубопровода, таких, как свинец, ртуть, галлий и других, рекомендуются для практического применения.

Автор приносит глубокую благодарность академику РАН В.И. Субботину за постоянную поддержку исследований по технологии свинцово-висмутового теплоносителя и в том числе исследований в области измерения расхода.

Список литературы

1. Кириллов П.Л., Колесников В.Д., Кузнецов В.А., Турчин Н.М. Приборы для измерения давления, расхода и уровня расплавленных щелочных металлов // АЭ. – 1960. - Т.9. - Вып.3. – С.173-181.
2. Гуцин Г.И. Электромагнитный метод измерения расхода сплава свинец-висмут. Кандидатская диссертация, 1961.
3. Гуцин Г.И., Логинов Н.И., Субботин В.И. Измерение профиля скорости электромагнитным методом // Вопросы магнитной гидродинамики. - Рига: Зинатне. – 1963. - Вып.3. - С.287-307.
4. Корнилов В.П., Логинов Н.И. Влияние скоростного профиля на выходное напряжение электромагнитного измерителя скорости с цилиндрическим магнитом // Магнитная гидродинамика. – 1978. - №1. - С.121-124.
5. Михин В.И., Жуков А.В., Ушаков П.А. Некоторые вопросы теоретического обоснования магнитного метода измерения скоростей в каналах сложной формы: Препринт ФЭИ-406. - Обнинск, 1973.
6. Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. - М.: Мир, 1965.
7. Логинов Н.И. Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. - М.: Энергоиздат, 1981. - С.15-38.

Поступила в редакцию 27.05.99.

(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 1 illustration. - References, 14 titles.

Results of development of the method of processing radioactive wastes of alkali metals used as the coolant in NPP are given. The method includes processing and conditioning of the products of processing for the ecologically safe long-time burial. Dispersion of an alkali metal on the solid inert carrier, dissolution and low baking into geocement stone are described. The features of the technological procedure and properties of a final product are shown.

УДК 621.039.53

The Basic Stages of Examinations of Corrosion in Liquid Metals \V.A. Ivanov, V.A. Solovjev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 4 pages, 1 illustration. - References, 7 titles.

The development stages of the corrosion of structural materials in liquid metals is classified and the prediction of essential works necessary for the development of an expert system and for the formulation of theoretical principles of the liquid metal corrosion is made.

УДК 621.039.553

On Physicochemical Similarity of Liquid Metal Loops \A.L. Shimkevich, B.A. Shmatko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 1 table, 4 illustrations. - References, 13 titles.

Derivation of the criterion of physicochemical similarity of circulating systems based on the solution of a nonuniform transport equation for technological impurities in the liquid metal coolants is shortly considered. The behaviour of a thermodynamic activity of oxygen in nonisothermal loops with the lead-bismuth coolant investigated by monitoring method is discussed. The accent is made on Permissible Activity Domain (PAD) related to normal operation of loops with lead-bismuth coolant.

УДК 681.128:538.4

Electromagnetic Flowmeters for Lead-Bismuth Eutectic Alloy \N.I. Loginov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 4 illustrations. - References, 7 titles.

Some methods of elimination of influence of contact electric resistance between a liquid lead-bismuth alloy and a stainless steel pipe on accuracy of measurement by the electromagnetic flowmeters are considered.

The constructions of the flowmeter permitting to realize these methods and providing the accuracy of flow measurement with an error 2,5...5% are offered. The method of measurement of the contact resistance is proposed, and experimental data on the contact resistance as a function of temperature and concentration of oxygen in alloy are published for the first time.

УДК 530.1:536.4

Oxygen Inhibition of Structural Materials in Melts of Lead-Bismuth Eutectic and Lead \B.F. Gromov, G.S. Yachmenev, A.Eu. Rusanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 8 pages, 3 tables. - References, 4 titles.

Experimental data related with influence of the concentration of dissolved oxygen on corrosion resistance of steels in a lead-bismuth alloy of an eutectic composition and in the lead melt are represented. It is shown, that at fixed concentration of oxygen dissolved in coolant steel is passivated: the protective oxide film Me_3O_4 , Me_2O_3 (where Me - Fe, Cr, Si etc. - the steel components with high affinity to oxygen) forms on its surface. The oxide film essentially hampers the action of aggressive liquid-metal medium on a material. The most effective influence on protective properties of an oxide film renders a steel doping of steel with silicon ($\sim 1\div 3\%$ by mass).

УДК 669.884:539.12

Lithium in the Problem of Solar Neutrino \M.N. Arnoldov, A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petuhov, Eu.A. Janovich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 2 tables, 1 illustration. - References, 7 titles.

The problems of detection of the solar neutrino of intermediate energies by means of the metallic lithium detector is discussed in the paper. The possibility of extraction the product of neutrino-lithium interaction, i.e. beryllium-7 from lithium, by filtering of lithium at temperature close to its melting temperature are described.

УДК 621.039.534

Extraction of Microquantities of Beryllium from Aqueous Solutions of Lithium \G.Ja. Novikova, V.V. Petuhov; Editorial