

УДК 681.128

## Об измерении расхода жидких металлов, плохо смачивающих стенку расходомера

ЛОГИНОВ Н. И.

Известны три основных типа кондукционных электромагнитных расходомеров, применяемых в установках с жидкометаллическими теплоносителями: расходомеры с электродами, приваренными к наружной поверхности стенки трубопровода; расходомеры с электродами, введенными в поток теплоносителя и изолированными от стенки трубопровода, и расходомеры с трубчатыми электродами. Одним из недостатков всех этих расходомеров является зависимость их показаний от контактного сопротивления между измеряемой жидкостью и стенкой расходомера.

В соответствии с теорией электромагнитных расходомеров [1, 2] зависимость выходного напряжения расходомера от скорости измеряемой среды выражается следующими формулами: для расходомеров с приваренными к стенке электродами

$$U_c = 2B\bar{W}r_B \frac{K_1 K_2 2r_B / r_H}{1 + r_B^2 / r_H^2 + (R_K / \rho_c r_B + \rho_{ж} / \rho_c) (1 - r_B^2 / r_H^2)}, \quad (1)$$

для расходомеров с введенными в жидкость электродами

$$U_{ж} = 2B\bar{W}r_B \times \frac{1 + r_B^2 / r_H^2 + (R_K / \rho_c r_B) (1 - r_B^2 / r_H^2)}{1 + r_B^2 / r_H^2 + (R_K / \rho_c r_B + \rho_{ж} / \rho_c) (1 - r_B^2 / r_H^2)} K_1 K_2. \quad (2)$$

Здесь  $U_c$  и  $U_{ж}$  — напряжение на электродах, приваренных к стенке и введенных в жидкость соответственно;  $B$  — магнитная индукция в зазоре;  $\bar{W}$  — средняя по сечению расходомера скорость измеряемой жидкости;  $r_B$ ,  $r_H$  — внутренний и наружный радиусы трубы расходомера;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_c$  — удельное сопротивление жидкости и стенки;  $R_K$  — контактное сопротивление между жидкостью и стенкой расходомера;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий влияние температуры на магнитные свойства материалов и на размеры магнитной системы, приводящие к изменению индукции в зазоре;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий ограниченность магнитной системы вдоль направления потока жидкости (концевые эффекты).

Для расходомеров с трубчатыми электродами нет формулы для выходного напряжения, аналогичной (1) и (2).

Из формулы следует, что выходное напряжение расходомеров зависит не только от скорости измеряемой среды, но и от контактного сопротивления. Контактное сопротивление зависит, в свою очередь, от содержания примесей в измеряемой жидкости, от ее температуры и давления, от чистоты и характера обработки стенки, от ее материала и т. п. Это приводит к сильной нестабильности показаний расходомеров при работе с некоторыми жидкими металлами. На рис. 1 представлена зависимость  $U_c$  и  $U_{ж}$  от контактного сопротивления, откуда следует, что его влияние на выходное напряжение расходомеров первого и второго типа различно. Если напряжение на стенке расходомера падает практически до нуля по мере роста контактного сопротивления, то напряжение в жидкости возрастает. Это вполне естественно, так как бесконечно большое контактное сопротивление соответствует расходомеру с непроводящими стенками. Контактное сопротивление между жидкостью и электродами, введенными в поток и изолированными от стенки, не влияет на показания расходомера, так как в момент измерения ток в цепи электродов равен нулю. То же самое будет и при использовании высокоомных измерительных приборов, так как

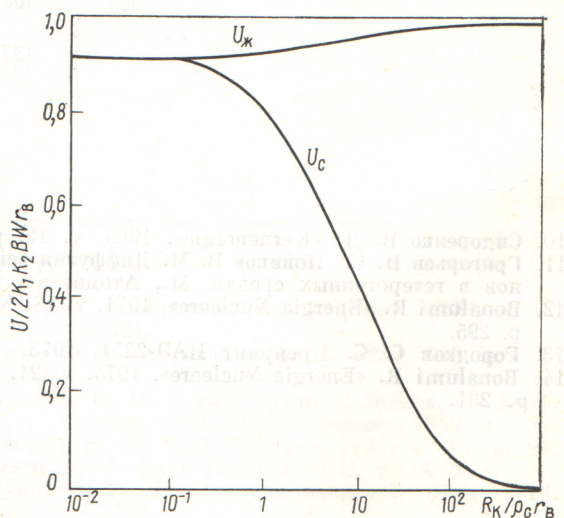
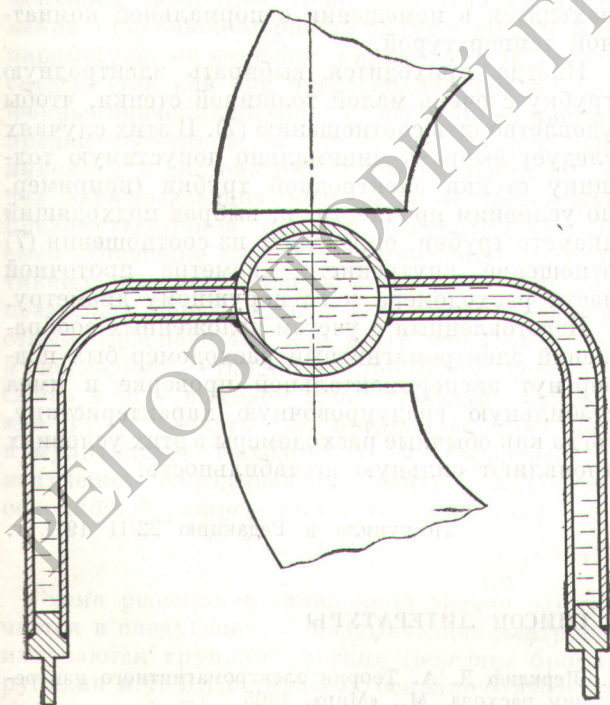


Рис. 1. Зависимость выходного напряжения расходомера от контактного сопротивления

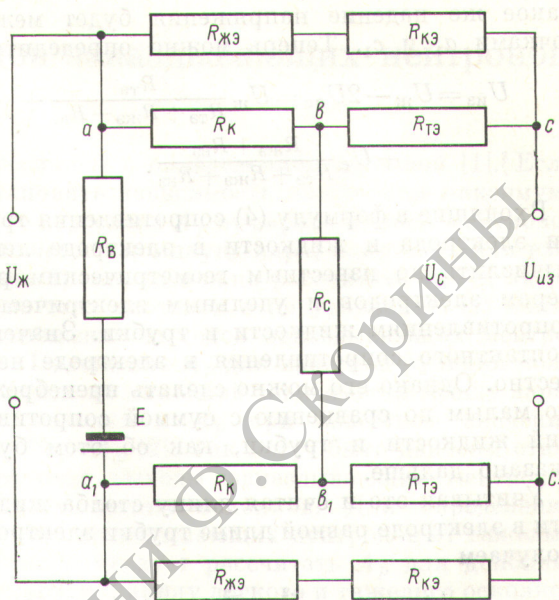
сопротивление контакта жидкости с электродом составляет не более нескольких Ом.

Как следует из рис. 1, расходомеры с приваренными к стенке электродами очень чувствительны к контактному сопротивлению и поэтому практически непригодны для измерения расхода жидких металлов, плохо смачивающих стенку или загрязненных примесями. Расходомеры с введенными в поток электродами более пригодны в этих случаях, однако конструкция таких электродов обладает не очень высокой надежностью. Поэтому такие расходомеры используются главным образом в лабораторных условиях. В связи с этим и появились расходомеры с трубчатыми электродами. Их особенностью (рис. 2) является то, что его выходное напряжение определяется напряжением в жидкости и напряжением на стенке. Следовательно, зависимость выходного напряжения от контактного сопротивления должна занимать некоторое промежуточное положение между кривыми (см. рис. 1).

Эти расходомеры используются на практике и действительно подвержены в меньшей степени влиянию контактного сопротивления по сравнению с расходомерами первого типа, но это влияние все еще довольно сильное.



Р и с. 2. Схематическое устройство расходомера с трубчатыми электродами



Р и с. 3. Эквивалентная схема расходомера:  $E$  — ЭДС, индуцируемая в жидкости;  $R_{в}$  — внутреннее сопротивление источника ЭДС, т. е. сопротивление жидкого металла в расходомере;  $R_{к}$  — контактное сопротивление между жидкостью и стенкой;  $R_{с}$  — сопротивление стенки расходомера;  $R_{тэ}$  — сопротивление трубки электрода;  $R_{жэ}$  — сопротивление жидкости в электроде;  $R_{кэ}$  — контактное сопротивление между жидкостью и заглушкой электрода;  $U_{ж}$  — напряжение, развиваемое в жидкости (2);  $U_{с}$  — напряжение на стенке расходомера (1);  $U_{из}$  — напряжение на концах трубчатых электродов, измеряемое вторичным прибором

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы определить условия, при которых влияние контактного сопротивления на показания расходомера с трубчатыми электродами было минимальным или отсутствовало бы вообще.

Так как аналитическое выражение для выходного сигнала расходомера с трубчатыми электродами неизвестно, рассмотрим эквивалентную электрическую схему такого расходомера, представленную на рис. 3.

Данная эквивалентная схема, однако, является лишь некоторым приближением к действительности, и полученные результаты нуждаются в проверке.

Из схемы следует, что падение напряжения между точками  $a$  и  $b$  равно

$$U_{a, в} = U_{a, в} = (U_{ж} - U_{с}). \quad (3)$$

Ток в цепи  $авс$   $I = U_{a, в} / (R_{кэ} + R_{тэ} + R_{жэ})$ . Следовательно, падение напряжения между точками  $a$  и  $c$  равно

$$U_{ac} = I (R_{жэ} + R_{кэ}) = \\ = U_{ав} (R_{жэ} + R_{кэ}) / (R_{жэ} + R_{тэ} + R_{кэ}).$$

Такое же падение напряжения будет между точками  $a_1$  и  $c_1$ . Теперь можно определить

$$U_{из} = U_{ж} - 2U_{ac} = U_{ж} \frac{R_{тэ}}{R_{тэ} + R_{жэ} + R_{кэ}} + U_c \frac{R_{жэ} + R_{кэ}}{R_{тэ} + R_{жэ} + R_{кэ}}. \quad (4)$$

Входящие в формулу (4) сопротивления трубки электрода и жидкости в электроде легко вычислить по известным геометрическим размерам электродов и удельным электрическим сопротивлениям жидкости и трубки. Значение контактного сопротивления в электроде неизвестно. Однако его можно сделать пренебрежимо малым по сравнению с суммой сопротивлений жидкости и трубки, как об этом будет сказано дальше.

Учитывая это и считая длину столба жидкости в электроде равной длине трубки электрода, получаем

$$U_{из} = U_{ж} \left/ \left( 1 + \frac{\rho_{тэ}}{\rho_{ж}} - \frac{r_{нэ}^2 - r_{вэ}^2}{r_{вэ}^2} \right) \right. + U_c \left/ \left( 1 + \frac{\rho_{тэ}}{\rho_{ж}} \times \frac{r_{вэ}}{r_{нэ}^2 r_{вэ}^2} \right) \right. \quad (5)$$

Здесь  $r_{нэ}$  и  $r_{вэ}$  — наружный и внутренний радиусы электродной трубки;  $\rho_{тэ}$  — удельное сопротивление материала электродной трубки;  $U_{ж}$  и  $U_c$  — определяются формулами (1) и (2). Из формулы (4) следует, что, изменяя размеры электродной трубки и ее материал, можно в какой-то степени изменять зависимость измеряемого напряжения от контактного сопротивления между жидкостью и стенкой расходомера. Попытаемся выбрать размеры электродов так, чтобы измеряемое напряжение не зависело от контактного сопротивления. В этом случае

$$\frac{\partial U_{из}}{\partial (R_{к}/\rho_c r_{в})} = 0. \quad (6)$$

Проведя дифференцирование формул (1) и (2) и выполнив соответствующие алгебраические преобразования, получаем, что условие (6) выполняется, если

$$\frac{r_{нэ}^2}{r_{вэ}^2} = 1 + \frac{\rho_{тэ}}{\rho_c} \frac{1 - r_{в}^2/r_{н}^2}{2r_{в}/r_{н}}. \quad (7)$$

Следовательно, если выбрать отношение внутреннего и наружного радиусов электродной трубки в соответствии с соотношением (7), то выходное напряжение расходомера с трубчатыми электродами не будет зависеть от контактного сопротивления между жидкостью и стенкой расходомера. Если электродные трубки

выполнены из того же материала, что и стенка корпуса расходомера, то формула (7) несколько упростится, а измеряемое напряжение расходомера, у которого размеры электродов выбраны в соответствии с этой формулой, определится следующим образом:

$$U_{из} = 2B\bar{W}r_{в} \frac{2r_{в}/r_{н}}{2r_{в}/r_{н} + \rho_{ж}(1 - r_{в}^2/r_{н}^2)/\rho_c} K_1 K_2. \quad (8)$$

Это выражение получено из формул (5) и (7).

Для того чтобы сделать пренебрежимо малым контактное сопротивление между жидкостью и заглушкой электрода, достаточно покрыть ее поверхность припоем, растворяющимся в измеряемом жидком металле. Во многих практических случаях для этой цели подходят серебряные припой. Для сохранения припоя на поверхности контакта концы электродов охлаждаются до температуры ниже точки замерзания жидкого металла и поддерживаются в этом состоянии во время работы расходомера. Сделать это нетрудно, так как измеряемый жидкий металл в электродной трубке неподвижен и на охлаждение его не требуется теплообменник большой мощности. Во многих случаях достаточно естественного охлаждения, если концы электродов находятся в помещении с нормальной комнатной температурой.

Иногда приходится выбирать электродную трубку с очень малой толщиной стенки, чтобы удовлетворить соотношению (7). В этих случаях следует выбрать минимально допустимую толщину стенки электродной трубки (например, по условиям прочности) и, выбрав подходящий диаметр трубки, определить из соотношения (7) отношение внутреннего диаметра проточной части расходомера к ее наружному диаметру.

Изготовленный с учетом изложенных соображений электромагнитный расходомер был подвергнут экспериментальной проверке и имел стабильную градуировочную характеристику, тогда как обычные расходомеры в этих условиях проявляют сильную нестабильность.

Поступила в Редакцию 22/II 1977 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шерклиф Д. А. Теория электромагнитного измерения расхода. М., «Мир», 1965.
2. Гуцин Г. И., Логинов Н. И. В кн.: Вопросы магнитной гидродинамики. Вып. 3. Рига, «Зинатне», 1963.