

УДК 621.317.084.2
И. К. ФОМИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕРВИЧНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ХЕМОТРОННОГО
ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКОВ ПУЛЬП**

Хемотронные измерители скорости потоков пульп и других электропроводных жидкостей находят применение в составе автоматических систем регулирования, технологии контроля и измерений на шахтах и обогатительных фабриках. Дальнейшее совершенствование и разработка измерителей связаны с определением аналитических зависимостей для обоснованного выбора параметров и метрологических характеристик первичного хемотронного преобразователя, а также условий, обеспечивающих необходимое качество измерения. В настоящее время эти вопросы решены недостаточно полно, что затрудняет синтез приборов и их широкое внедрение в измерительную практику.

Для решения поставленной задачи были проведены теоретические и экспериментальные исследования первичного преобразователя прибора. Его физическая модель приведена на рис. 1, 2 и представляет собой электролитическую ячейку, состоящую из трубопровода, заполненного электролитом, контрольного электрода 1, электрода сравнения 2, компенсационного электрода 3, электрически изолированных между собой и включенных в плечи измерительного моста постоянного тока. Механизм происходящего физического процесса, положенного в основу принципа преобразования, следующий. После включения напряжения, в результате эффекта электронного обмена ионов на поверхности электродов, на выходе преобразователя возникает электрический ток. С тече-

нием времени при неподвижном электролите концентрация ионов у поверхности электродов C_s уменьшается, что вызывает уменьшение выходного сигнала. При движении электролита к поверхности электродов принудительно в количестве, пропорциональном скорости потока, доставляются ионы, что приводит к увеличению

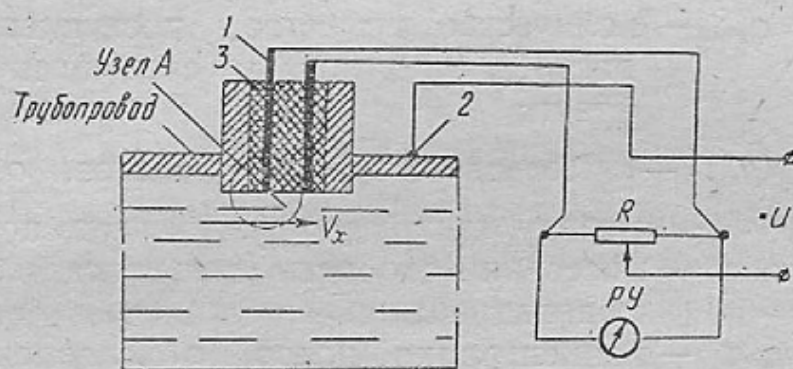


Рис. 1.

тока в цепи. Удаление продукта реакции из активной зоны происходит за счет его растворения, молекулярной диффузии при достижении необходимого градиента концентрации, а также путем выноса частиц вещества из зоны движущимся электролитом. Поступление реагента в приэлектродное пространство осуществляется за счет молекулярной и конвективной диффузии.

Необходимо определить в статическом и динамическом режимах работы преобразователя аналитическое выражение, связывающее между собой скорость потока жидкости на входе V_x и электрический ток i_0 на выходе, произвести оценку точности преобразования, установить его свойства и условия, при которых наблюдается воспроизводимость статической характеристики.

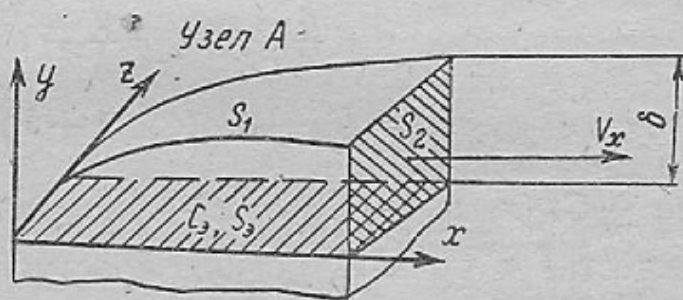


Рис. 2.

При исследовании приняты следующие допущения: молекулярная диффузия ионов в направлении оси x отсутствует, градиентов скорости потока и концентрации ионов в направлении оси z не существует, концентрация ионов на поверхности электродов равна нулю, а в глубине потока постоянна, толщина диффузионного и пограничного слоев у поверхности электрода равны между собой.

Исходя из общих законов гидродинамики, диффузионной кинетики и закона сохранения массы для принятых условий получена следующая математическая формулировка технической задачи

$$m = m_k + m_g, \quad (1)$$

где m — результирующее количество реагирующего вещества, поступившего к поверхности электродов;

$m_k = q_k s_2$ — количество вещества, приходящего из глубины потока через поверхность s_2 в приэлектродное пространство за счет конвективной диффузии;

$m_g = q_g S_1$ — количество вещества, поступившего к поверхности s_1 электрода за счет молекулярной диффузии;

$q_g = D \frac{\partial}{\partial y} C_g(y, t)$ — массовая скорость вещества, обусловленная молекулярной диффузией через поверхность S_1 ;

$q_k = V_x C_k(x, t)$ — массовая скорость вещества, обусловленная конвекцией;

$C_g(y, t)$ — концентрация ионов, обусловленная молекулярной диффузией вдоль оси y ;

$C_k(x, t)$ — концентрация ионов, обусловленная конвекцией потока вдоль оси x ;

D_i — коэффициент диффузии;

V_x — скорость движения потока;

t — время.

Для вывода уравнения преобразования требуется найти зависимость, устанавливающую изменение величин $C_g(y, t)$ и $C_k(x, t)$ во времени и в пространстве. Принимая градиенты концентрации $\frac{\partial}{\partial y} C_g(y, t)$, $\frac{\partial}{\partial x} C_k(x, t)$ как линейные функции от переменных x , y , получим уравнение вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} C_k(x, t) + \frac{\partial}{\partial t} C_g(y, t) &= \\ &= D_i \frac{\partial}{\partial y^2} C_g(y, t) + V_x \frac{\partial}{\partial x} C_k(x, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\frac{\partial}{\partial t} C_k(x, t)$; $\frac{\partial}{\partial t} C_g(y, t)$ — скорость изменения концентрации вещества в приэлектродном пространстве.

Используя решение уравнения (2), произведенное методом преобразования Лапласа для начального условия $C_g(y, 0) = 0$; $C_k(x, 0) = C_{kn}$ и граничного условия $C_g(0, t) = C_{gn}$; $C_k(0, t) = 0$, а также первый закон Фарадея для электролиза, из уравнения (1) получено выражение

$$\int_0^t i_0 dt = \frac{FD_i}{E_x S_1} \left(\frac{2C_n}{y} - \frac{C_n}{V \sqrt{\pi t}} + \frac{y^3}{6V \sqrt{\pi t}} \right) + \frac{F}{E_x S_2} V_x C_n (t + \tau), \quad (3)$$

где F — число Фарадея;

E_x — электрохимический эквивалент вещества;

C_n — концентрация реагирующего вещества в глубине потока;

τ — время транспортного запаздывания;

x — размер электрода в направлении оси X ;

$C_{gn}; C_{kn}$ — начальная концентрация ионов по диффузионной и конвективной составляющей тока, устанавливающая связь между входной и выходной координатами хемостатического преобразователя.

Для статического режима работы преобразователя уравнение (3) преобразуется к виду

$$i_0 = k_{эн} (V_x - V_x^{0,5} X^{0,5} \nu^{-0,5} \frac{D_i S_2}{S_2}), \quad (4)$$

где $k_{эн} = \frac{FC_n S_2}{E_x S_2}$ — коэффициент преобразования;

ν — кинематическая вязкость жидкости.

Анализ выражения (4) показывает, что диапазон преобразования входного сигнала преобразователя неограничен. Это объясняется принятым допущением бесконечно большой скорости электродной реакции. В реальных условиях скорость реакции ограничена временем релаксации ионов, поэтому верхний предел преобразования входной величины должен быть также ограничен. Его предельное значение определяется условиями равенства скорости реакции i_p и скорости конвективной диффузии i_0 .

При условии $i_p > i_0$ электрохимический процесс будет сдерживаться отсутствием реагирующего вещества в зоне реакции и при $i_p < i_0$ лимитироваться ее скоростью. В первом случае скорость электрохимического процесса зависит от изменения конвективной диффузии, во втором — не зависит. Основным условием физической реализуемости метода является случай $i_p \geq i_0$.

Определим предельное значение входной величины. Для этого найдем скорость реакции из уравнения

$$i_p = k^0 C_n \exp\left(\frac{\alpha \Delta \varphi n}{RT}\right),$$

где $k^0; \alpha$ — постоянные электродной реакции;

$\Delta \varphi$ — сдвиг потенциала на электроде от равновесного;

R — газовая постоянная;

T — температура электролита;

n — валентность ионов реагирующего вещества.

Для предельного уровня входного сигнала справедливо уравнение

$$k^0 C_n \exp\left(\frac{\alpha \Delta \varphi n}{RT}\right) = k_{эн} (V_x - V_x^{0,5} X^{0,5} \nu^{-0,5} \frac{D_i S_2}{S_2}).$$

Решение уравнения относительно $V_{x \max}$ дает значение корней

$$V_{x \max} = \frac{2\sqrt{C}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2\sqrt{C} - A^2}{2}\right)^2 - C};$$

$$A = k_{эн} \frac{D_i S_2}{S_2}; \quad A = \frac{D_i S_2}{S_2} x^{-0,5} \nu^{-0,5} \sqrt{C} = \frac{k^0 C_n}{K_{эн}} \exp\left(\frac{\alpha \Delta \varphi n}{RT}\right). \quad (5)$$

Выражение (5) имеет смысл в том случае, когда увеличение скорости реакции приводит к увеличению диапазона преобразования входного сигнала. Это справедливо, если

$$V_{x \max} = \frac{2\sqrt{C} - A^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{2\sqrt{C} - A^2}{2}\right)^2 - C}.$$

Из (4), (6) следует, что верхний предел преобразования скорости зависит от напряжения питания электродов, их физической поверхности, вязкости среды. Нижний предел входной величины равен нулю, что характеризует отсутствие гистерезистых явлений в характеристике преобразователя.

Как следует из (3), выходной сигнал преобразователя находится в сложной и неоднозначной зависимости от скорости потока. Его величина и характер зависят от коэффициента диффузии, концентрации ионов в потоке, поверхности электродов, физических и химических свойств жидкости. Поэтому он может служить показателем скорости только в том случае, когда переменные, входящие в уравнение, будут стабилизированы, либо их влияние сведено к допустимому уровню.

В связи с тем, что температура, физические и химические свойства измеряемой среды, величина и состояние поверхности электродов в процессе эксплуатации приборов могут изменяться, это обстоятельство приводит к возникновению дополнительной погрешности измерения. Значение суммарной погрешности преобразования, полученное из (3), по указанным переменным составляет значительную величину, поэтому применение преобразователя в рабочем интервале изменения переменных требует компенсации погрешности. Введение поправок в результат измерения затруднено тем, что на входе преобразователя одновременно случайно воздействует ряд помех. Разработанная схема компенсации погрешности позволяет исключить либо свести ее к допустимому уровню. Для этого в преобразователе предусмотрен компенсационный электрод, выходной сигнал которого направлен встречно сигналу контрольного электрода. При этом их площади контактных поверхностей с измеряемой средой значительно различаются. В схеме применяется два преобразователя, расположенных в точках сечения потока с разными местными скоростями его движения. Над выходными сигналами преобразователей с помощью функционального устройства производится математическая операция их деления друг на друга, чем исключается влияние указанных переменных.

Для подтверждения справедливости полученных выводов и уравнений были проведены экспериментальные исследования преобразователя. Изучено влияние рН среды, плотности тока Δ на электродах, электропроводности γ и твердой среды ρ в потоке на точность преобразования. Диапазон указанных переменных составил

$$\text{pH} = 1 \div 8, \Delta = 0,05 \div 0,5 \text{ ма/мм}^2;$$

$$\gamma = (1 \div 8) 10^{-3} \text{ см} \cdot \text{см}^{-1}; \rho = 300 \text{ г/л.}$$

Результаты исследований показали, что влияние рН среды и твердой фазы на точность преобразования незначительно (дополнительная погрешность не превышает 0,3% на весь диапазон изменения переменных); увеличение плотности тока на электродах приводит к росту верхнего предела преобразования входной величины и уменьшению чувствительности. Такое явление наблюдается до $\Delta \leq 0,5 \text{ ма/мм}^2$. Дальнейшее увеличение плотности не оказывает заметного влияния на эти параметры.

Для повышения точности измерения необходимо выполнять следующие условия:

электрохимический процесс на электродах должен проводиться при строго определенном потенциале, равном потенциалу реагирования выбранного иона, что обеспечивает селективный отбор вида реагирующего иона и позволяет распространить метод на многокомпонентные растворы;

стабилизация состояния поверхности рабочего электрода должна быть выполнена путем ее анодного растворения;

плотность электрического тока на электродах должна быть равной $\Delta = 0,08 \text{ ма/мм}^2$, при которой наблюдается воспроизводимость статической характеристики.

Параметры преобразования зависят от геометрических размеров, напряжения питания электродов и могут варьироваться в широких пределах конструктивными мерами.

Влияние температуры, вязкости и удельной электропроводности рабочей среды на точность преобразования значительно и требует компенсации погрешности. Принятая схема компенсации позволяет свести это влияние к допустимому уровню.

УДК 621.317.084.2

Исследование свойств первичного преобразователя хемотронного измерителя скорости потоков пульп. Фомин И. К. Сб. «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики», вып. 34, 1975, с. 66—71.

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке первичного преобразователя хемотронного измерителя скорости потока пульп и других электропроводных жидкостей. На основе проведенных исследований установлены свойства преобразователя, получены математические зависимости для обоснованного выбора его параметров. Произведена оценка точности преобразования входной величины и разработана схема компенсации систематической погрешности. Приведены рекомендации по обеспечению необходимого качества измерения.

Ил. 1.