



МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ТРУБОПРОВОДНЫХ ПОТОКАХ

А.К. Манштейн¹, П.А. Соколов^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия
e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

Представлено описание аппаратно-программного комплекса, разработанного и изготовленного для оперативной оценки концентрации растворенного вещества в водном потоке на нижней поверхности металлических труб в различных технологических линиях без отбора проб. В Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука были изучены зависимости электропроводности водных растворов от температуры в специфических условиях – электропроводящей ячейке. Выполнены физические эксперименты с использованием растворов разной минерализации (от 0.5 до 300 г/л), в измерительной ячейке из стали малого объема (8.14 см³). Выполнено математическое моделирование оценки минерализации растворов.

Палетка, минерализация, взрывозащита, геометрический коэффициент, сопротивление, растворы, проводимость

METHOD FOR MEASURING THE MINERALIZATION OF AQUEOUS SOLUTIONS IN PIPELINE FLOWS

A.K. Manstein¹, P.A. Sokolov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,
e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

A description of the hardware–software complex designed and manufactured for the operational assessment of the concentration of a dissolved substance in a water stream on the lower surface of metal pipes in various technological lines without sampling is presented. At the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS the dependences of the electrical conductivity of aqueous solutions on temperature were studied under specific conditions – in an electrically conductive cell. Physical experiments were performed using solutions of different mineralization (from 0.5 to 300 g/L), in a measuring cell made of steel of small volume (8.14 cm³). Mathematical modeling of solution mineralization assessment has been performed.

Palette, mineralization, explosion protection, geometric coefficient, resistance, solutions, conductivity

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности имеется необходимость измерения величины минерализации водных растворов. Данные актуальны, поскольку требуются для контроля качества продукции, водного режима, охраны окружающей среды и многого другого.

Мониторинг монарстворов и упрощенный контроль за многокомпонентными растворами можно выполнять с помощью преобразования измеренного сопротивления и температуры в минерализацию по электрической проводимости преобладающего соединения. Обратная величина сопротивлению является групповым показателем, характеризующим ионное содержание всех веществ, растворенных в воде [Методические указания..., 1986]. Известно, что зависимость удельной электрической проводимости солевых растворов от минерализации (изотермический процесс) линейна для концентраций от 0.1 до ~50 г/л ввиду полной диссоциации вещества [Гак, 2013]. Проводимость многокомпонентного раствора равна сумме электрических проводимостей, содержащихся в нем веществ, ввиду взаимной независимости от электропроводности отдельных веществ в растворе (свойство аддитивности). Для водных растворов электролитов допускаются большие погрешности в измерении концентрации (до 20 %), которые определены в соответствующем государственном стандарте [ГОСТ 27384-2002].

Разработанный в ИНГГ СО РАН аппаратно-программный комплекс «Поточный измеритель минерализации жидкости в газовом трубопроводе» предназначен для оперативной оценки минерализации водных растворов по данным двухэлектродного датчика в потоке жидкости в металлических трубах под большим давлением.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Аппаратно-программный комплекс состоит из блока питания с барьером искрозащиты, ноутбука с программным обеспечением для записи данных с измерителя RLC E7-22 и датчиков температуры.

В измерительной ячейке (отрезок стальной трубы с внутренним диаметром 24 мм) размещены два платиновых электрода диаметром 0.5 мм, длиной 5 мм и расстоянием между ними 9 мм.

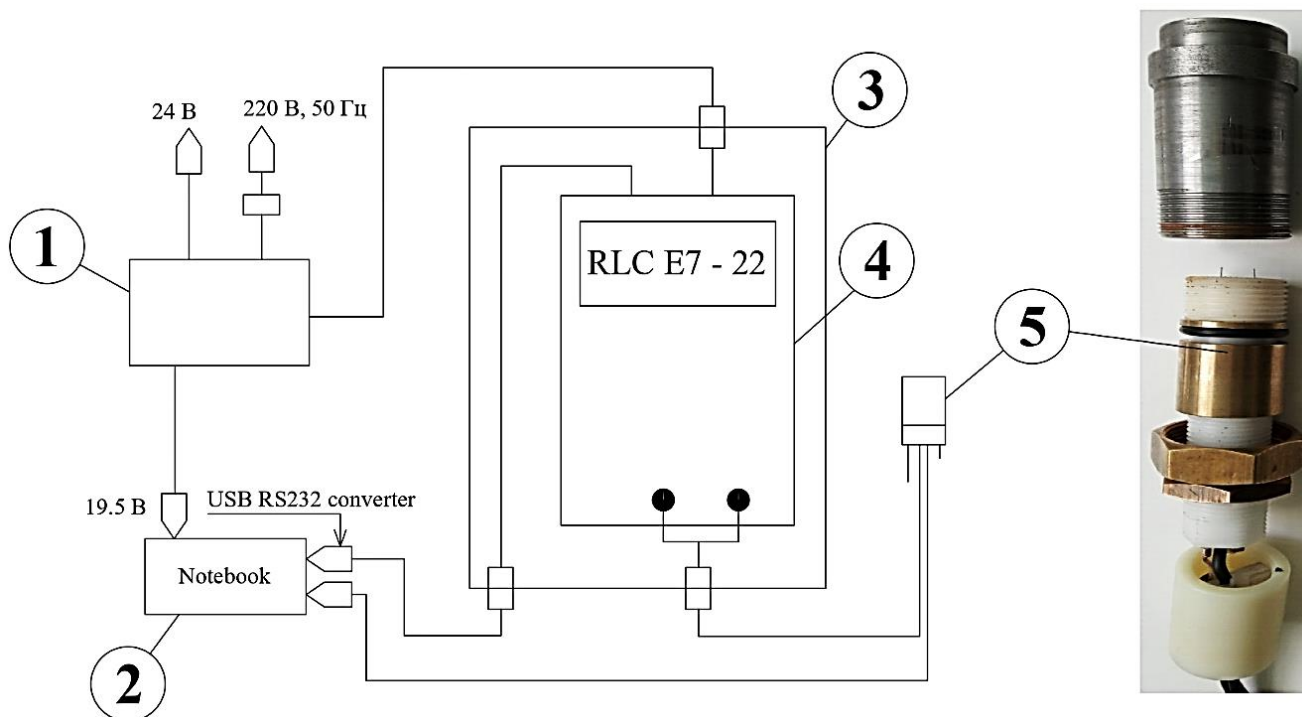


Рис. 1. Блок – схема аппаратно программно комплекса: 1 – блок питания с барьером искрозащиты, 2 – ноутбук, 3 – взрывозащитный корпус, 4 – измеритель E7-22, 5 – датчик двухэлектродный с измерительной ячейкой

Аппаратурно-программный комплекс взрывобезопасен, при условии, что ноутбук и блок питания, находятся на достаточном расстоянии от точки измерения, то есть не во взрывоопасной зоне.

Блок питания работает от 36 В переменного тока и обеспечивает питанием ноутбук и измеритель RLC E7-22. Во взрывоопасной зоне располагается взрывобезопасный датчик измерения сопротивления с датчиками температуры окружающей среды и температуры раствора. Двухэлектродный датчик может эксплуатироваться в газовом потоке со скоростью до 20 м/с. Измеритель RLC E7-22 находится внутри взрывобезопасного корпуса (рис. 1).

Взрывозащита выполнена согласно требованиям ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99). Основные параметры и характеристики оборудования представлены в табл. 1.

RLC E7-22 работает в режиме измерения сопротивления на частоте 1 кГц. Измеряемая жидкость должна покрывать электроды полностью и образовывать слой над электродами не менее 5 мм. Прибор измеряет ток (I , А) в цепи электродов и падение напряжения на электродах. Сопротивление подводящих проводов пренебрежимо мало. Сопротивление участка цепи между электродами (R , Ом) равно отношению напряжения на величину тока.

Таблица 1

Основные параметры и характеристики

Интервал рабочих температур, °С	от –4 до +50
Датчик R предназначен для подключения к газовой трубе с давлением до, МПа (кг/см ²)	16 (160)
Диапазон измерений, Ом	от 10 до 10 000
Точность измерения сопротивления, %	±0.5
Измеритель температуры корпуса датчика R	есть
Измеритель температуры окружающей среды	есть
Точность измерения температуры, °С	±0.5
Диапазон измеряемых минерализаций, г/л	0.5–300

УЭС (ρ , Ом·м) жидкости равно произведению измеренного сопротивления на геометрический коэффициент χ . Исходя из теоретических выкладок, значение геометрического коэффициента, для случая размещения электродов в однородном пространстве, приближенно равно отношению площади электрода (S , м) на расстояние между электродами (L , м) и мало зависит от минерализации [Сваровская и др., 2017]:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \rightarrow \rho = R \cdot \frac{S}{L} \rightarrow \rho = R \cdot \chi \rightarrow \chi = \frac{\rho}{R}. \quad (1)$$

На практике кондуктометры эталонируются с применением водяных растворов с известными УЭС. Значение коэффициента χ получается расчетным путем согласно выражению (1) из экспериментальных данных.

Как и в большинстве кондуктометров, перевод измеренного сопротивления в удельное электрическое происходит с помощью умножения измеренного сопротивления между электродами на геометрический коэффициент. На рисунке 2 представлены экспериментальные кривые измеряемого сопротивления в измерительной ячейке со стальными стенками (для температуры 25 °С) и расчетного

геометрического коэффициента для перевода этого сопротивления в УЭС. Для оценки расчетного коэффициента применялась палетка Шлюмберже [Ellis, Singer, 2013].

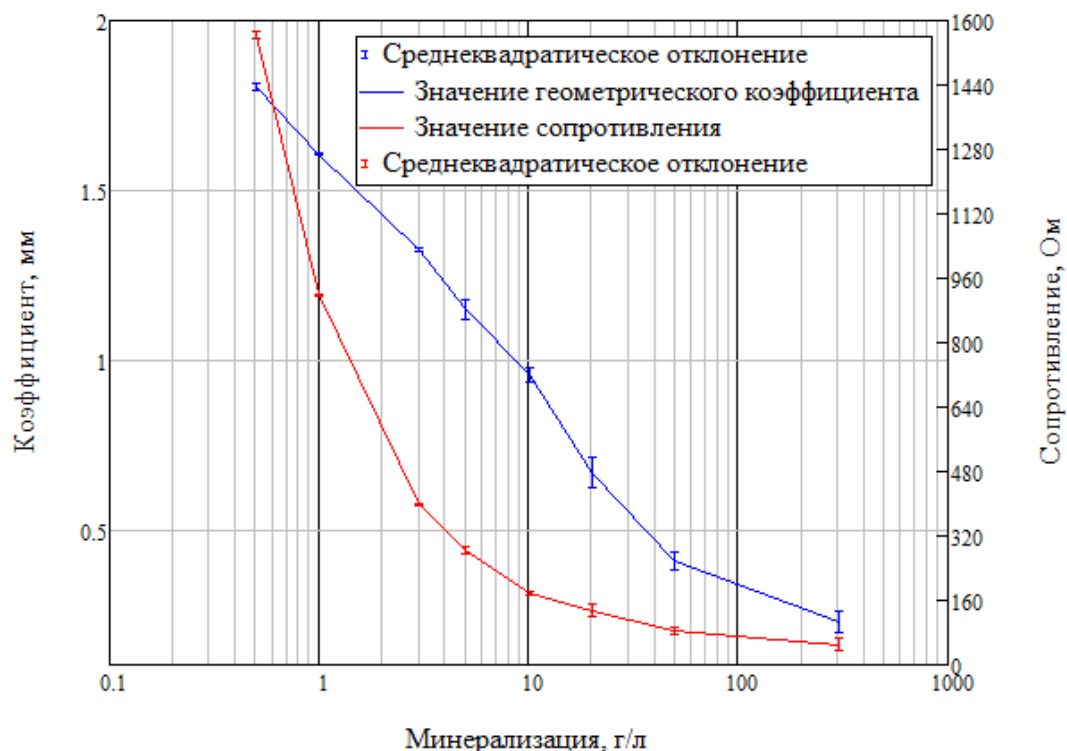


Рис. 2. Зависимость геометрического коэффициента и сопротивления от минерализации раствора в ячейке из стали (температура 25 °С)

Наличие проводящих стенок ячейки влияет на измерение сопротивления датчиком R из-за растекания тока по проводящей стенке. В этом случае данный коэффициент зависит от распределения тока между электродами по двум параллельным контурам – между электродами в жидкости и вокруг электродов по проводящей стенке.

Соответственно, геометрический коэффициент измерительной ячейки в данном приборе не может определяться как принято в рабочих ячейках с непроводящими стенками, что подтверждается графически на рис. 2. В этом проявляется влияние электропроводящих стенок измерительной ячейки. Поэтому было решено интерпретировать экспериментальные данные с помощью палетки зависимостей «Сопротивление, температура, минерализация», которая в последствии была разработана.

Эксперименты выполнены в стабильных термодинамических условиях для растворов минерализаций от 0.5 до 300 г/л. Каждый раствор нагревался в измерительной ячейке до определенной температуры, после чего на термостабильных участках записывались значения сопротивлений. По полученному набору сопротивлений, зависящих от температуры, строились полиномиальные уравнения регрессии второй степени (аппроксимирующая функция) [Селютин, 2018] в виде:

$$R = \alpha \cdot T^2 + \beta \cdot T + \gamma, \quad (2)$$

где R – измеренное сопротивление, Ом; T – температура, °С; α , β , γ – коэффициенты, которые определяются из системы уравнений для квадратичной регрессии вида:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n R_i = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^2 + \beta \sum_{i=1}^n T_i + \gamma n \\ \sum_{i=1}^n R_i T_i = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^3 + \beta \sum_{i=1}^n T_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n R_i T_i^2 = \alpha \sum_{i=1}^n T_i^4 + \beta \sum_{i=1}^n T_i^3 + \gamma \sum_{i=1}^n T_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая большой объем первичного материала (при частоте измерения регистратора 3–4 в секунду), выполнялась машинная обработка сразу всех измерений для известной минерализации. Такой режим измерений возможен в промышленных условиях и допускает возможность определения качественных данных для дальнейшей обработки. Экспериментальные и аппроксимированные зависимости сопротивления от температуры для разных минерализаций представлены на рис. 3.

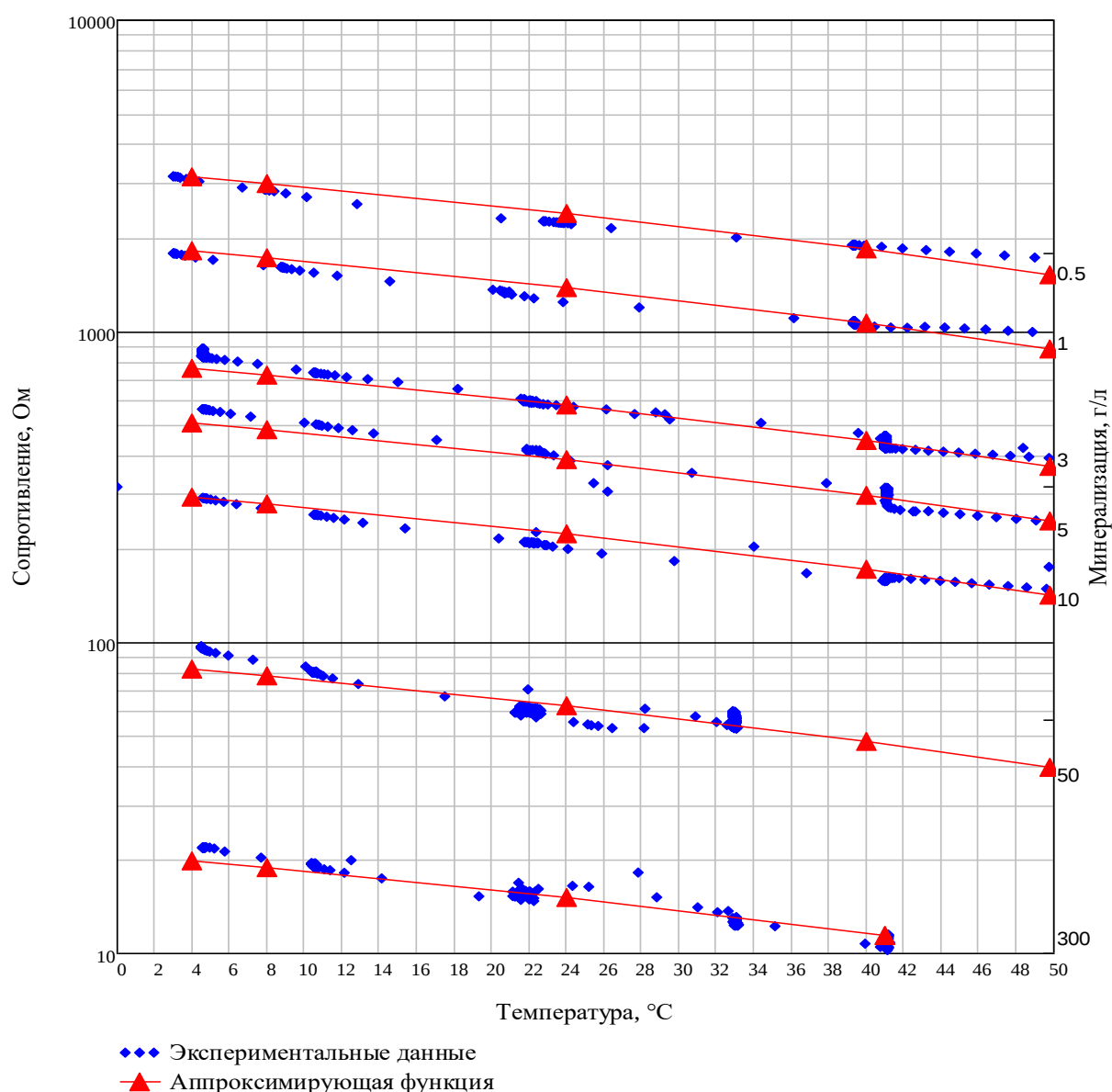


Рис. 3. Экспериментальная палетка зависимостей «Сопротивление, температура, минерализация» с аппроксимирующими функциями

Чтобы найти неизвестные промежуточные данные, применялась интерполяция, основанная на нахождении аппроксимирующей функции для коэффициентов в полиноме (2), описывающем

экспериментальные данные. Основная идея заключалась в нахождении зависимости между коэффициентами α , β , γ и минерализацией. После построения графиков и сравнения нескольких типов аппроксимаций было установлено, что наиболее подходящей аппроксимацией является степенная регрессия (рис. 4).

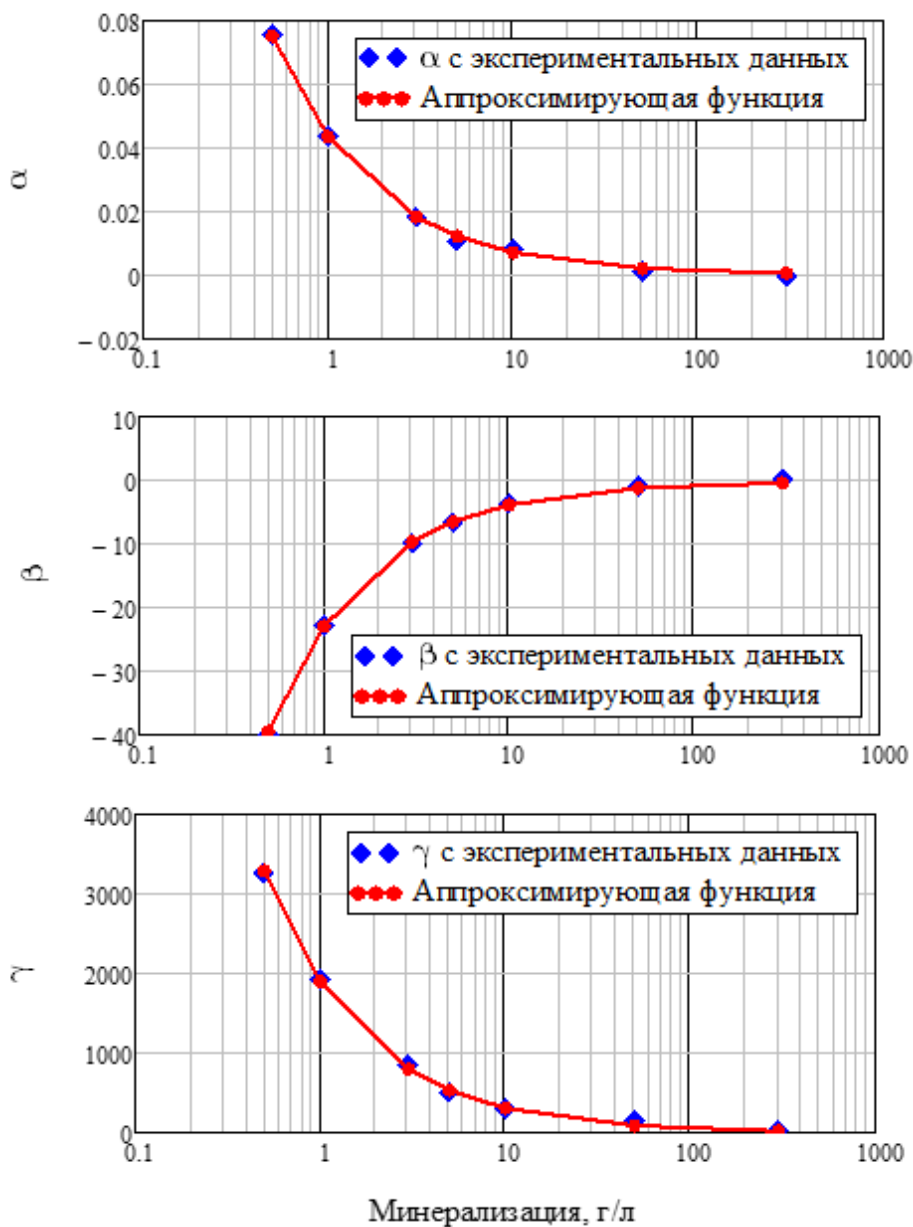


Рис. 4. Зависимости коэффициентов α , β , γ от минерализации

Найденные аппроксимирующие функции для коэффициентов α , β и γ равны:

$$\begin{aligned}\alpha(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79144}, \\ \beta(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79146}, \\ \gamma(C) &= 0.0434 \cdot C^{-0.79148},\end{aligned}\tag{4}$$

где C – минерализация, г/л.

Подставляя найденные функции в уравнение (2), можно выразить минерализацию, зависящую от температуры и сопротивления, при условии, что степень в $\alpha(C)$, $\beta(C)$ и $\gamma(C)$ изменяется незначительно и можно считать ее одинаковой. Таким образом, конечная формула для расчета концентрации для поточного измерителя имеет вид:

$$C(R, T) = \left(\frac{R}{0.0434 \cdot T^2 - 22.7757 \cdot T + 1904.5654} \right)^{1/-0.79146}, \quad (5)$$

где R – измеренное сопротивление, Ом; T – температура, °C; C – минерализация, г/л.

Цифровые коэффициенты оценки точности для $\alpha(C)$, $\beta(C)$ и $\gamma(C)$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка точности цифровых коэффициентов

Коэффициент	Коэффициент корреляции	Средняя ошибка аппроксимации, %
$\alpha(C)$	0.99957	4.236
$\beta(C)$	0.99972	3.415
$\gamma(C)$	0.99952	1.313

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построенная палетка зависимости «Сопротивление, температура, концентрация» (рис. 3) может применяться для перевода величин сопротивления и температуры в минерализацию для данного аппаратно-программного комплекса графически.

Выполнено сравнение расчета минерализации по формуле (5) с данными, полученными в лабораторных условиях. Для этого измеряемый раствор помещался в измерительную ячейку датчика R , регистрировалось сопротивление и температура, после чего измеренные данные подставлялись в уравнение (5) и определялась погрешность между рассчитанным значением минерализации и исходными. Результаты сравнения представлены в табл. 3. Погрешность определения минерализации удовлетворяет государственным стандартам (10–20 %) [ГОСТ 27384-2002].

Таблица 3

Результат тестирования расчета минерализации

Дата	Минерализация раствора, г/л	Сопротивление, Ом	Температура раствора, °C	Относительная погрешность расчета минерализации к лабораторным данным, %
24.04.21	0.3	3217	27.5	–7.236
26.05.21	0.37	3457	9.8	–7.887
14.05.21	1	1475.8	23.2	6.484
18.05.21	10	231.4	27.4	10.344
29.05.21	50	60	22.6	–8.175
21.04.21	300	14.9	22.4	–5.184

Ограничения в расчете минерализации по формуле (5):

1. Достоверными данными можно считать в пределах аппроксимации экспериментальных данных (от 0.5 до 300 г/л).
2. С учетом приемлемой погрешности для всех минерализаций температурный интервал измерений – от 4 до 50 °С.
3. Измерения в диапазоне сопротивлений от 10 Ом до 10 кОм пригодны для выполнения расчета минерализации.

ВЫВОДЫ

Расчет по формуле (5) при подстановке измеренного сопротивления и температуры дает значение минерализации. Зная минерализацию, можно получить удельное электрическое сопротивление и удельную электрическую проводимость при любой температуре по уже известной палетке Шлюмберже [Ellis, Singer, 2013]. Приведенные результаты исследования могут быть использованы там, где необходимо производить контроль качества продукции, ведения водного режима, охраны окружающей среды и многого другого в автоматическом режиме при размещении датчика (измерительной ячейки) в стальной трубе.

В статье представлена обоснованная методика измерения концентрации растворенного вещества по преобладающему соединению в реальном времени в потоке жидкости непосредственно в технологическом оборудовании. Такая методика может использоваться не только в промышленности, но и в быту, например, для контроля качества водопроводной воды.

Разработанная методика может применяться в упрощенном контроле за многокомпонентными растворами в автоматизированном режиме [Методические указания..., 1986]. Разработанная палетка, связывающая сопротивление и температуру раствора с минерализацией для разработанного датчика, с помощью аппроксимации и интерполяции экспериментальных данных, позволяет получать сразу числовое значение концентрации растворенного вещества без предварительной температурной компенсации.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Новосибирского государственного технического университета. Грант № 021 – НСГ – 21.

Авторы выражают признательность д.т.н., профессору И.Н. Ельцову за оказанную помощь при проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гак Е.З.** Магнитные поля и водные электролиты – в природе, научных исследованиях, технологиях. – СПб.: Элмор, 2013. – 536 с.
- ГОСТ 27384-2002.** Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств; Введ. с 1 января 2004 г. – М.: Стандартинформ, 2010. – 15 с.
- ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99).** Электрооборудование взрывозащищенное; Введ. с 9 декабря 1999 г. – М.: Стандартинформ, 2008. – 120 с.
- Методические** указания по применению кондуктометрического контроля для ведения водного режима электростанций МУ 34-70-114-85. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. – 37с.

Сваровская Н.А., Колесников И.М., Винокуров В.А. Электрохимия растворов электролитов. Часть I. Электропроводность: Учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – 66 с.

Селютин А.Д. Аппроксимация полиномов n степени методом наименьших квадратов // Молодой ученый. – 2018. – № 16 (202). – С. 91–96.

Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, 2013. – 692 p.

REFERENCES

Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for Earth scientists. – Springer, 2013. – 692 p.

Gak E.Z. Magnetic fields and aqueous electrolytes – in nature, scientific research, technology. – St. Petersburg: Elmor, 2013. – 536 p.

GOST 27384-2002. Norms of measurement error of indicators of composition and properties; Introduction since January 1, 2004. – Standartinform, Moscow, 2010. – 15 p.

GOST R 51330.10-99 (IEC 60079-11-99). Explosion-proof electrical equipment; Introduction since December 9, 1999. – Standartinform, Moscow, 2008. – 120 p.

Guidelines for the use of conductometric control for maintaining the water regime of power plants MU 34-70-114-85. – SPO Soyuztekhnenergo, Moscow, 1986. – 37p.

Selyutin A.D. Approximation of polynomials of degree n by the method of least squares // Young Scientist. – 2018. – Vol. 16 (202). – P. 91–96.

Svarovskaya N.A., Kolesnikov I.M., Vinokurov V.A. Electrochemistry of electrolyte solutions. Part I. Electrical Conductivity: Study Guide. – Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin, Moscow, 2017. – 66 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАНШТЕЙН Александр Константинович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: электрометрические измерения и разработка электроразведочной аппаратуры.

СОКОЛОВ Павел Андреевич – магистрант Новосибирского государственного технического университета, инженер лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: автоматизация обработки данных и изучение методов подавления электромагнитных помех.

*Статья поступила 16 ноября 2022,
принята к печати 2 февраля 2023*