

# Определение условных констант кондуктометрических сенсоров

Н. Д. Кошель\*, С. А. Кошель

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,  
г. Днепр (Днепропетровск), 49005, Украина,

\*e-mail: [kknd@ua.fm](mailto:kknd@ua.fm)

Поступила в редакцию 27.12.2020

После доработки 06.01.2021

Принята к публикации 07.01.2021

Исследован процесс калибровки проточных кондуктометрических сенсоров электропроводности и концентрации в растворах NaOH, NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Используются двухэлектродные сенсоры в стеклянных трубках с платиновыми электродами в комбинации с разработанным резистометром. Измерительная система резистометр – сенсор КСН-19, КСН-22, КСН-23 работает на импульсном знакопеременном токе с частотой 4 кГц. Измерены калибровочные зависимости сенсоров концентрация – сопротивление в указанных растворах. Путем специальной программной обработки калибровочных данных и их сравнения с точными справочными функциями удельная электропроводность – концентрация определены три основные параметры сенсоров – «константа сенсора»  $K_S$ ,  $K_{S1}$ ,  $K_{S3}$ . Показано, что все характерные параметры сенсоров зависят от химического состава анализируемой среды и не являются константами. Приведены теоретические обоснования наблюдаемой закономерности.

**Ключевые слова:** кондуктометрический сенсор (датчик), электропроводность, калибровка, константа сенсора, ионная подвижность, резистометр

УДК 681.2./+543.08+543.55

<https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.4.35>

## ВВЕДЕНИЕ

В современной технике и технологиях используются многочисленные регулирующие и контролируемые устройства со встроенными сенсорами (датчиками) концентраций веществ или непосредственно связанной с ней величиной электропроводности жидкой электропроводящей среды (кондуктометрами) [1–8]. Если интерес представляет концентрация ионогенного вещества в газообразной среде, часто удается обеспечить полное поглощение этого вещества водным раствором и измерить электропроводность такого раствора. Например, таким способом можно определить концентрации SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S и др. [2, 4]. А электропроводность есть свойство, которое формируется характеристиками носителей заряда в среде – величиной заряда, размерами ионов с учетом сольватной оболочки, влиянием на вязкость и т.д. Совокупность этих свойств заряженной частицы в конечном счете проявляется в форме ее физической подвижности. Для множества ионов подвижности приведены в общепризнанных справочниках и монографиях [9–11].

Целью применения кондуктометрических сенсоров (КС) чаще всего является определение концентрации  $C$  либо одного конкретного вещества в некоторой среде, либо совокупности нескольких известных веществ. Даже если состав среды точно неизвестен, величина сигнала КС может нести полезную информацию о достижении некоторого предельного уровня,

указывающего на необходимость принятия решения о включении или выключении управляемой системы. Такая ситуация имеет место, например, при управлении промышленными ионообменными комплексами при водоочистке или водоподготовке.

Существуют многочисленные варианты КС, отличающиеся не только конструктивными деталями типовых классических датчиков, материалом и конструкциями электродов, но и вообще работающие на разных физических принципах. Например, индуктивные (безэлектродные) датчики [12].

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Обычно связь между электропроводностью среды и концентрацией ионофора определяется из выражения закона Ома для простейшей формы проводника длиной  $L$  и постоянным сечением  $S$ :

$$R = \frac{1}{\kappa} \times \frac{L}{S}, \quad (1)$$

где  $L/S = K_S$  – константа сенсора;  $\kappa$  – удельная электропроводность. Отсюда следуют размерность константы  $K_S$  – см<sup>-1</sup> и возможность ее приближенной предварительной оценки по параметрам геометрической формы рабочего пространства сенсора. Из уравнения (1) по данным калибровки вычисляется и константа сенсора в калибровочном растворе:

$$K_S = (R \times \kappa)^{-1}. \quad (2)$$

Казалось бы, что значение параметра  $K_S = L/S$  связано только с геометрией рабочей области сенсора и поэтому должно быть постоянной величиной. Однако в действительности определение  $K_S$  по данным калибровки дает величины, зависящие от вида калибровочного вещества. По формальным соображениям значение  $K_S$  было бы константой только в том случае, если бы в выражении (2) удельная электропроводность раствора  $\kappa$  и сигнал сенсора  $R$  были связаны некоторой общей универсальной зависимостью. Реально же такой зависимости не существует. Между параметрами  $\kappa$  и  $R$  связь более сложная, и ее конкретный характер различается у разных веществ.

Конечной целью кондуктометрического анализа является определение концентрации  $C$  анализируемого вещества. Вычисление концентрации по измеренному сопротивлению выполняется через эмпирическое соотношение:

$$C = \text{const} \times R^{-1}, \quad (3)$$

где  $R$  – непосредственный сигнал сенсора, а  $\text{const}$  (далее обозначим его как  $K_{S3}$ ) – некоторый параметр, имеющий отличающуюся от  $K_S$  размерность (Ом·г-экв), но фактически выполняющий аналогичную функцию константы сенсора.

Простое соотношение (3) позволяет в программе измерительного прибора непосредственно по сигналу сенсора выдавать необходимое управляющее решение или команду в форме, необходимой для выполнения конкретной задачи.

В этой общей системе наиболее употребительным элементом является значение константы  $K_S$ . В многочисленных образцах промышленных сенсоров указывают значение этой константы и условия применения – характер и состав среды, для которой предназначен сенсор.

В тех случаях, когда прибор предназначен для работы в широкой области концентраций, всю область разбивают на несколько более узких зон и для каждой из них применяются необходимые действия с определением отдельной константы. Это зафиксировано, например, в ГОСТ РФ 22171-90 [13], где предусмотрена раздельная обработка диапазонов при оценке погрешности.

Задача настоящей работы – исследование количественных характеристик сенсоров и их роли в процедурах ручного или, что важнее, автоматизированного измерения концентраций.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Опыты производили с водными растворами нескольких веществ, для которых известны точные справочные данные по электропроводности – NaCl, NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HAc.

Использовали разработанные нами проточные сенсоры КСН-19 [14], КСН=22 и КСН=23, предназначенные для работы в погружном состоянии. Сенсор КСН-19 сконструирован так, чтобы была возможность выполнять измерения проб с небольшим объемом от 50 мм<sup>3</sup>.

Схемы конструкции сенсоров показаны на рис. 1.

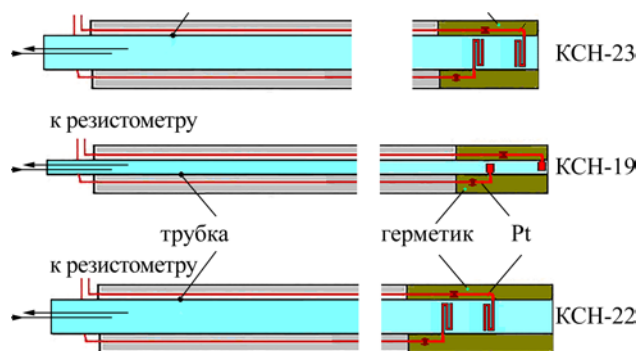
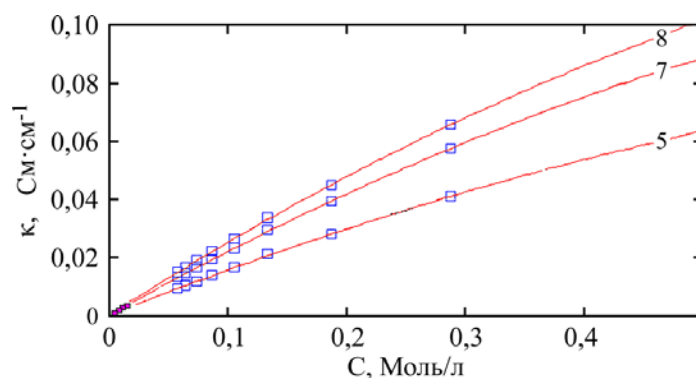


Рис. 1. Конструкции сенсоров КСН-19, КСН-22 и КСН-23.

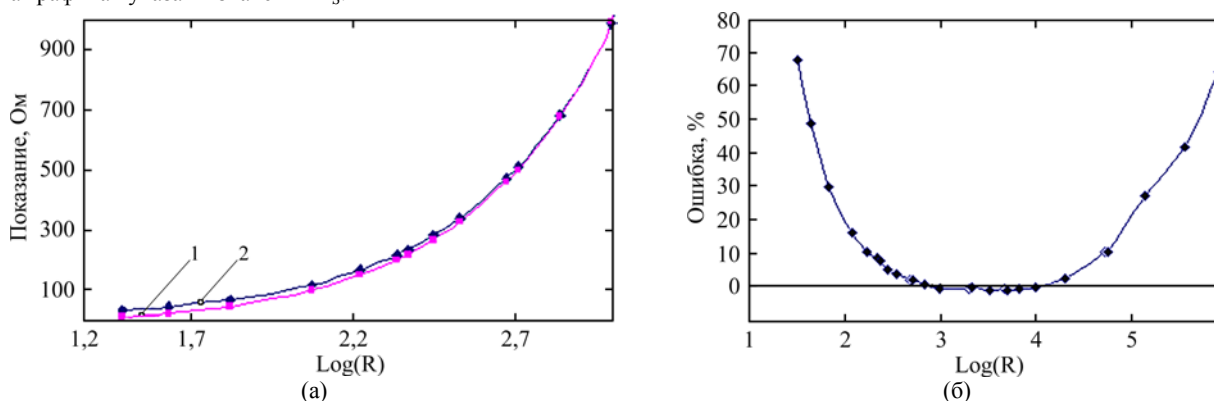
Сенсоры различаются размерами рабочей области (длина и сечение цилиндрической трубки) и формой электродов.

Сенсор оснащен специальным электронным устройством – резистометром, который преобразует генерируемый сигнал в требуемую по условиям задачи форму. Сигнал появляется либо в цифровой форме на дисплее резистометра (для медленных процессов), либо передается в компьютерную таблицу для фиксации и математической обработки быстрых динамических процессов по соответствующим алгоритмам.

Резистометр измеряет сопротивление раствора в рабочей области между электродами сенсора. Прибор на частоте 4 кГц генерирует на двухэлектродный сенсор импульсный ток переменного направления. Наличие знакопеременного тока гарантирует отсутствие электрохимических процессов на электродах и позволяет использовать наиболее простую двухэлектродную схему сенсора. А при частоте 4 кГц обеспечивается практически полное отсутствие поляризационных явлений на электродах (концентрационная поляризация, появление поляризационной емкости, поляризационного сопротивления). Следствием этого является устранение соответствующей ошибки при определении сопротивления. В то же время при указанной частоте в проводах возникает допол-



**Рис. 2.** Зависимость удельной электропроводности раствора NaOH от концентрации по результатам калибровки сенсора КСН-23 при 24 °С. Точки – данные эксперимента. Фиолетовые точки в области  $C < 0,02\text{M}$  – справочные данные [9]. На графиках указаны значения  $K_S$ .



**Рис. 3.** Зависимости: (а) – истинного сопротивления (1) и показания сенсора (2); (б) – ошибки измерения от логарифма показания прибора.

нительная емкостная проводимость, что уменьшает и без того низкое их сопротивление.

Процессор резистометра формирует напряжение  $U_0 = 5 \pm 0,005\text{ В}$  в виде последовательности одинаковых пар прямоугольных импульсов с противоположными полярностями. Импульсный ток проходит через делитель напряжения, состоящий из сопротивления раствора в камере сенсора и постоянного резистора  $R_R$ . В положительном импульсе тока измеряется падение напряжения на резисторе  $R_R$  и по его значению установленная в процессор программа вычисляет величину сопротивления раствора в рабочей камере сенсора.

Все проточные сенсоры изготовлены в стеклянных трубках и работают в растворах с произвольными концентрациями. Калибровку сенсоров производили на модельных растворах электролитов NaCl, NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Наиболее надежные результаты получаются в разбавленных растворах (до 0,02M), для которых существуют общепринятые табличные данные. Благодаря низким концентрациям табличные функции удельной  $\kappa = f(C)$  и эквивалентной  $\lambda = f(C)$  электропроводности [1] аппроксимируются линейным законом, что обеспечивает наибольшую точность сравнения опытных и справочных данных по наклону  $d\lambda/dC$  и  $d\kappa/dC$ .

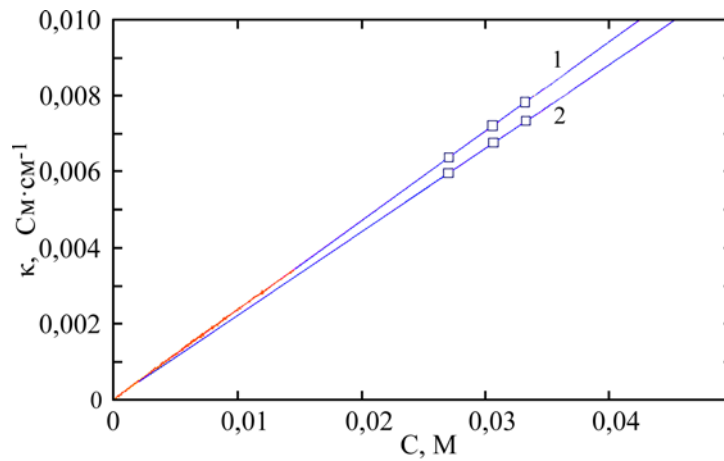
## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение всех характеристик сенсоров выполняли в процессе их калибровки. Для этого сначала готовили раствор эталонного вещества с точно определенной концентрацией  $C_0$ , и путем его постепенного разбавления дистиллированной водой получали серию 1– $N$  растворов с уменьшающимися концентрациями  $C_0$ – $C_N$ . В каждом из растворов измеряли сопротивление  $R_0$ – $R_N$ .

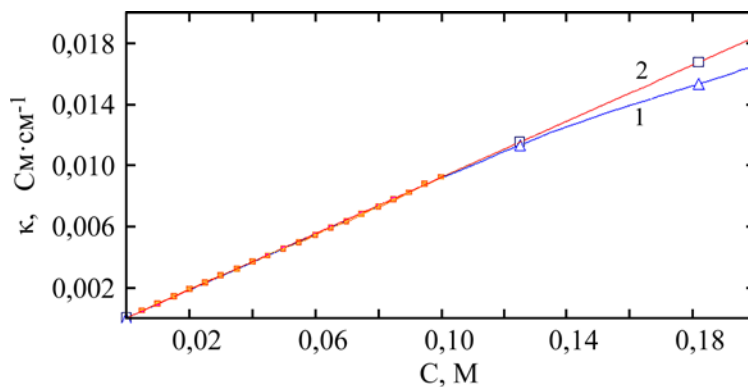
На рис. 2 можно видеть, что экспериментальный график разведения получен без разброса точек, что указывает на хорошую точность показаний сенсора. Отметим, что экспериментальные данные в калибровочных растворах расположены в области, включающей большие концентрации, до 1M, тогда как область точных справочных данных более чем на порядок меньше.

График на рис. 2 использовался для начальной оценки параметра  $K_S$  сенсора совмещением линий аппроксимации, построенных по опытным данным (пустые квадраты аппроксимированы уравнением  $\kappa = K_{S1} \times (C \times 0,001)$ ) и по точным справочным данным (фиолетовые точки при  $C < 0,02\text{M}$ ).

Из рис. 2 видно, что по совпадению наклонов теоретической и опытной зависимостей  $\kappa = f(C)$



**Рис. 4.** Зависимость удельной электропроводности раствора NaOH от концентрации по результатам калибровки сенсора КСН-19 при  $t = 19$  °С. Оранжевая линия – справочные данные [9], точки – данные эксперимента. 1 – точный; 2 – неточный выбор параметров сенсора.



**Рис. 5.** Зависимость удельной электропроводности раствора NaCl от концентрации по результатам калибровки сенсора КСН-19 при 22 °С. 1 – данные эксперимента, аппроксимированные уравнением (4); 2 – справочные данные [9].

на полномасштабном графике оценивать значения параметров сенсора можно, но только ориентировочно, в первом приближении. Точная оценка параметров сенсора производится далее на графиках в мелком масштабе.

Вопросы оценок точности в статье мы рассматривать не будем, для этого есть специальные стандартизованные процедуры. Наша задача состоит только в том, чтобы рассмотреть количественные характеристики сенсора и технику их практического использования. Тем не менее нужно иметь в виду следующее. Резистометры КСН-19–КСН-23 сконструированы для работы в относительно разбавленных растворах. Точность выполняемых ими измерений определяется величиной настроечного резистора  $R_R = 671$  Ом, встроенного в схему резистометра. На графиках [рис. 3](#) видно, что в этой схеме резистометров ошибка показаний будет меньше  $\pm 2\%$ , если показания располагаются в интервале 200–6000 Ом ( $\text{Log}(R) = 2,7\text{--}4,1$ ).

Для измерений, проводимых в концентрированных растворах кислот или щелочей при показаниях  $R \sim 20\text{--}50$  Ом, должен использоваться другой настроечный резистор  $R_R$  с меньшим номиналом. В резистометре он легко подклю-

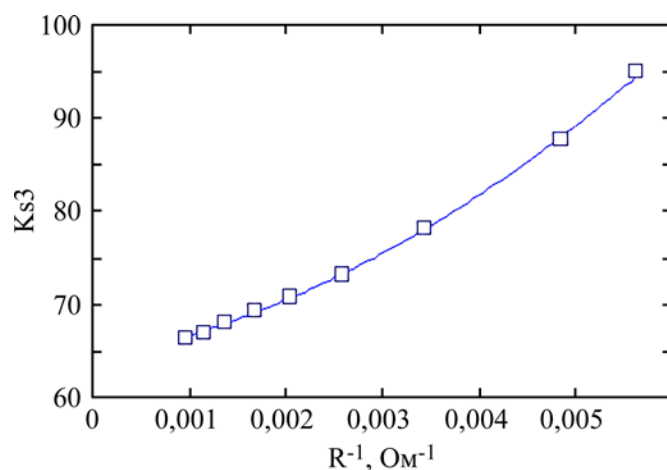
чается как элемент соответствующего диапазона. Понятно, что в каждом диапазоне необходима отдельная калибровка, и параметры сенсора будут иметь разные значения.

На всех приведенных здесь графиках справочные данные [9] теоретической зависимости  $\kappa = f(C)$  для 18 °С аппроксимированы уравнением (4):

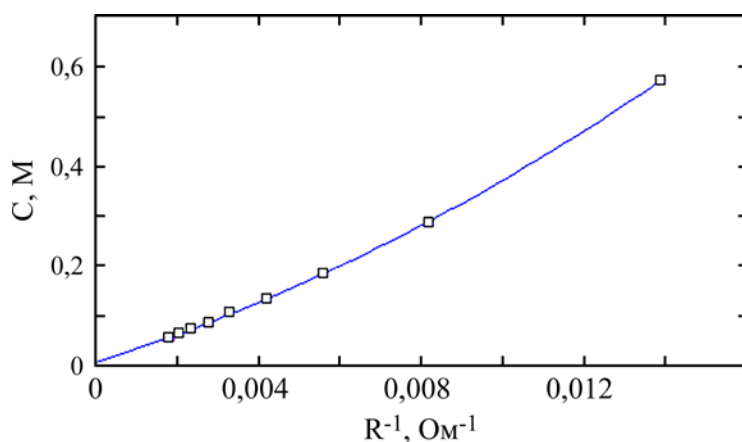
$$\kappa = 0,0004 + 0,087 \times C - 0,0131 \times C^2. \quad (4)$$

Для других температур вводится поправка, пропорциональная изменению температуры ( $t-18$ ) из расчета температурного наклона электропроводности  $d\kappa/dt$ , в среднем составляющего  $\sim 2\%$  на один градус Цельсия. Для отдельных веществ можно использовать более точные справочные данные. Поправка на нестандартную температуру учитывается в программе компьютерной обработки данных калибровки.

На [рис. 4](#) и [5](#) в двух масштабах показано, каким образом согласуются точные справочные данные теоретической зависимости  $\kappa = f(C)$  и данные калибровочного эксперимента с использованием параметров сенсора. На графиках [рис. 4](#) в области  $C < 0,04$ М в мелком масштабе



**Рис. 6.** Зависимость параметра  $K_{S3}$  от обратного сопротивления ( $1/R$ ) по показаниям резистометра в процессе калибровки сенсора КСН-23 по растворам  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $t = 24$  °С. Точки – экспериментальные данные, линия – их аппроксимация полиномом 3 порядка



**Рис. 7.** Зависимость концентрации  $\text{NaOH}$  от обратного сопротивления по показаниям резистометра в процессе калибровки сенсора КСН-23,  $t = 24$  °С. Точки – экспериментальные данные, линия – их аппроксимация полиномом  $C = 0,0075 + 25,575 \times (R^{-1}) + 1086,6 \times (R^{-1})^2$ .

хорошо видно результат сравнения при точном ( $1 - K_{S1} = 235$ ) и при неточном ( $2 - K_{S1} = 220$ ) выборе параметра  $K_{S1}$ .

Такие же данные на [рис. 5](#) приведены в мелком масштабе и максимально точно показывают теоретический участок. Так как этот участок локализован в области малых концентраций  $\text{NaCl}$   $C < 0,1\text{М}$ , он имеет практически линейную форму.

Промежуточный размерный параметр  $K_{S1}$  ( $\text{См}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{г}\cdot\text{экв}^{-3}$ ) используется как второй шаг для точного определения параметров сенсора путем подбора его значения. Для сенсора КСН-19 в растворах  $\text{NaCl}$  значение  $K_{S1}$  на [рис. 5](#) подбиралось таким образом, чтобы теоретическая (линия 2) и экспериментальная (линия 1) зависимости полностью совпадали.

Графики для других веществ и условий качественно аналогичны показанному на [рис. 2](#). Они иллюстрируют высокое качество результатов калибровки, но непосредственно не дают информации о цели эксперимента – определить концентрацию анализируемого вещества. Эта

цель достигается дальнейшей математической обработкой всей совокупности данных.

Переменное значение параметра  $K_{S3}$  в интервале 31–41 Моль·Ом на [рис. 6](#) определялось по данным калибровочного ряда по формуле  $\kappa = K_{S3} \times R$ . Здесь показан график зависимости  $K_{S3} = f(1/R)$  для сенсора КСН-23 в растворе  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

На [рис. 7](#) представлен конечный результат калибровки – зависимость концентрации изучаемого вещества ( $\text{NaOH}$ ) от сопротивления, которое формируется резистометром в процессе калибровки. Этот результат позволяет автоматически устанавливать неизвестную концентрацию раствора по величине сопротивления, которое выдает тот же резистометр и сенсор. Отметим, что на однотипных [рис. 6](#) и [7](#) похожие графики аппроксимированы разными выражениями. Этот элемент алгоритма обработки опытных данных, один из многих других, влияет на значения определяемых параметров сенсора. Именно по этой причине параметры сенсоров можно использовать для оценок результатов измерений только



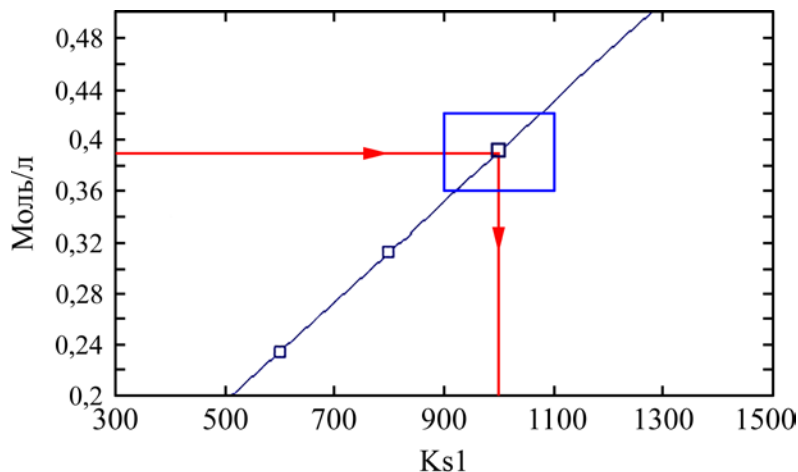


Рис. 8. Способ нахождения константы  $K_{S1}$  по выделенной области.

Таблица 1. Параметры сенсора КСН-22 в растворах NaOH и NaCl

КСН-22	$K_S, \text{см}^{-1}$	$K_{S1}, \text{См}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Г}\cdot\text{ЭКВ}^{-3}$	$K_{S3}, \text{Г}\cdot\text{ЭКВ}\cdot\text{Ом}$
NaOH	2,45	200–210 $K_{S1} = 198,28 - 231,63 \times (C) + 203,04 \times (C)^2$	12–20 $K_{S3} = 11,469 - 3,7515(1/R) + 14718(1/R)^2$
NaCl	4,15	150–293 $K_{S1} = 198,28 - 231,63 \times (C) + 203,04 \times (C)^2$	20–32 $K_{S3} = 20,681 + 631,31(1/R) + 3498,7(1/R)^2$

Таблица 2. Параметры сенсора КСН-23 в калибровочных растворах

Раствор	$\lambda^0, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{Г}\cdot\text{ЭКВ}^{-1}\cdot\text{См}^2$	$K_S, \text{см}^{-1}$	$K_{S1}, \text{См}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Г}\cdot\text{ЭКВ}^{-3}$	$K_{S3}, \text{Г}\cdot\text{ЭКВ}\cdot\text{Ом}$
NaOH	244	7,00	100	41–31 $K_{S3} = 30,336 + 302,73(1/R) + 34710(1/R)^2$
NaCl	97,5	5,50	85	71–62 $K_{S3} = 60,666 + 1526,5(1/R) - 10004(1/R)^2$
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	169,5	5,2	60	95–66 $K_{S3} = 64,06 + 2000(1/R) + 603099(1/R)^2$
NaOH + NaCl, 1:2	146,3	13	1000	69,8–45,5 $K_{S3} = 43,945 + 461,27(1/R) + 60018(1/R)^2$
NaOH + NaCl, 2:1	195,2	11	700–200	61,2–36,1 $K_{S3} = 34,233 + 294,55(1/R) + 43457(1/R)^2$
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	361	0,3		
CH <sub>3</sub> COOH	41	5,5		

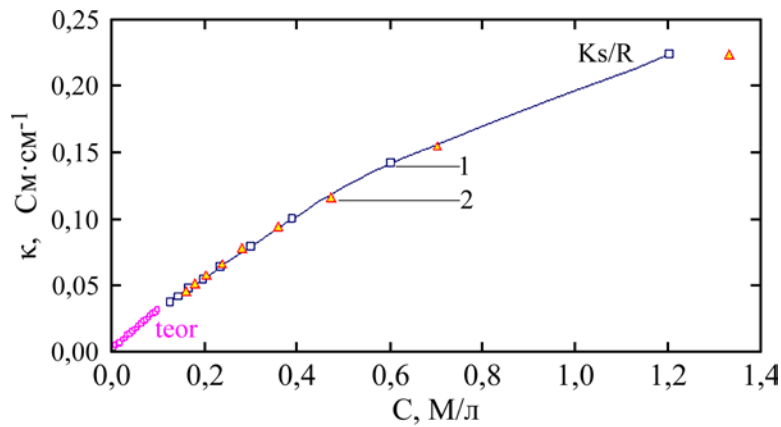
в условиях (приборы, растворы, алгоритмы), соответствующих процессу калибровки.

Оценим еще один полезный способ определения, показанный на рис. 8. Технически удобно последовательно выделять достаточно узкую область предполагаемого решения и анализировать зависимость в очень мелком масштабе. В данном случае на калибровочном растворе NaOH+NaCl 1:2 определяли значение параметра  $K_{S1}$  в точке с суммарной концентрацией 0,39М. Ожидаемое значение  $K_{S1}$  было равно 1000, поэтому рассматривали выделенную область 0,2–0,5М и в ней подтвердили значение  $K_{S1} = 1000$ . Можно выделить еще более узкую область и определить искомый параметр точнее. В этом примере параметр  $K_{S1}$  имеет постоянное

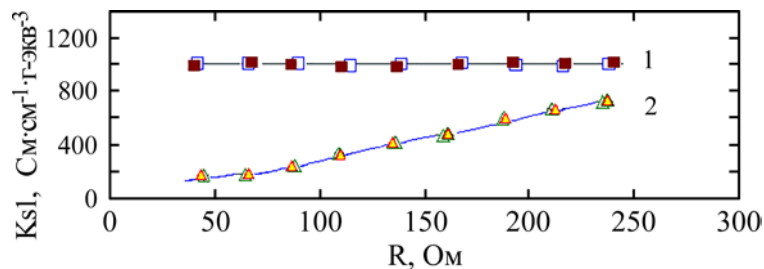
значение, однако в других условиях (растворы, конструкции сенсоров, алгоритмы) он может быть зависящим от концентрации, как видно из табл. 1, и тогда будет необходимой точность определения.

Представляется интересным сравнить значения характерных параметров сенсоров в различных калибровочных растворах. В табл. 1 приведены наиболее полные и согласованные данные для сенсоров КСН-22 и КСН-23.

Как видно из табл. 1 и 2, все характерные параметры сенсоров оказываются зависящими от вида вещества, по которому производится калибровка. В том числе это наблюдение относится и к общепринятой «константе сенсора»  $K_S$ . Формально параметр  $K_S$  как соотношение  $L/S$ ,



**Рис. 9.** Экспериментальные калибровочные кривые сенсора КСН-23 в растворах NaOH+NaCl при соотношении NaOH:NaCl 1:2 (1 – квадраты) и 2:1 (2 – треугольники). Значение  $\kappa$  определяли по выражению  $\kappa = K_S/R$ .



**Рис. 10.** Зависимость параметра  $K_{S1}$  от показания сенсора для растворов NaOH+NaCl при соотношении NaOH:NaCl 1:2 (1 – квадраты) и 2:1 (2 – треугольники).

имеющее в соответствии с содержанием закона Ома чисто геометрическое происхождение, должен бы быть постоянной величиной. Именно в таком понимании производители промышленных сенсоров приводят значения постоянных  $K_S$  в инструкциях по их использованию. Однако разработчиками уточняется химико-аналитическая область применения сенсоров. Для сенсоров, предназначенных к работе в широкой области концентраций и веществ, указывают различающиеся значения параметра  $K_S$  на дискретных участках. Например, в кондуктометрическом датчике проводимости/концентрации жидких продуктов CombiLyz AF14/AF15 [8] для интервалов 0–500 мкСм/см и 0–1000 мСм/см имеется 14 вариантов для проводимости и четыре предустановки для концентрации.

Таким образом, факт зависимости  $K_S$  от физико-химических свойств анализируемой среды учитывается, но явно не декларируется, что дает разработчикам оборудования формальные основания применять к параметру  $K_S$  термин «константа».

В основе этой наблюдаемой закономерности лежит тот очевидный факт, что работа кондуктометрических сенсоров основана на законах теории электропроводности электролитов. При этом различные вещества-ионофоры (ионы или диссоциирующие на ионы нейтральные вещества) различаются между собой с точки зрения электропроводности фундаментальной

характеристикой разбавленных ( $C \rightarrow 0$ ) растворов. Это физическая  $V^0$  (скорость движения иона при единичном градиенте потенциала  $dE/dx$  1 В/см ( $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ )) или электрохимическая  $\lambda^0$  (эквивалентная электропроводность ( $\text{Ом}^{-1} \text{см}^2 \text{моль}^{-1}$ )) подвижность:

$$\lambda^0 = V^0 \times F. \quad (5)$$

Эти параметры связаны между собой уравнением Нернста-Эйнштейна:

$$D = V^0 \times \left( \frac{R^*T}{zF} \right), \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $F$  – число Фарадея;  $R^*$  – газовая постоянная;  $T$  – температура в шкале Кельвина;  $z$  – заряд иона.

Отметим, что в соответствии с законом Кольрауша величина ионной подвижности нейтральных ионофоров-молекул является суммой подвижностей составляющих ее ионов. Уравнения (5) и (6) однозначно связывают между собой все три характерные транспортные константы каждого вида ионов –  $D$ ,  $\lambda^0$  и  $V^0$  и позволяют пересчитывать их из одного в другой. Понятно, что различие ионных подвижностей калибровочных веществ проявляется как фактор, сложным образом влияющий на показания сенсора в соответствующих растворах разных веществ одинаковой концентрации.

Можно было предположить, что в однотипных веществах с одинаковыми

зарядовыми числами аниона и катиона чем меньше ионная подвижность, тем большее будет сопротивление, показанное сенсором, и тем меньше будет рассчитанная по калибровочным данным величина «постоянной сенсора»  $K_S$ . Однако, как видно из табл. 1 и 2, это предположение не подтверждается экспериментальными наблюдениями. Реальные связи между параметрами сенсоров более сложные и неоднозначные. Это явно можно видеть на рис. 9 и 10, где приведены данные для двух похожих калибровочных растворов NaOH+NaCl в соотношении 1:2 (1) и 2:1 (2). Несмотря на, казалось бы, очень близкие свойства обоих растворов, на практически совпадающие графики экспериментальных функций  $\kappa = f(C)$ , разными оказались значения параметра  $K_S$  (соответственно 13 и 11), а форма зависимости  $K_{S1}(R)$  различается даже качественно. Опыты были проверены дважды в разные дни, алгоритмы обработки одинаковы, и итоговые зависимости  $K_{S1}(R)$  на рис. 10 воспроизвелись практически полностью. Этот факт подтверждает достоверность указанных заключений, следующих из данных этого эксперимента.

Поэтому корректно можно лишь использовать выражения, получаемые описанными алгоритмами применительно к конкретному калибровочному раствору.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение процедуры калибрования кондуктометрических сенсоров показывает, что их главная характеристика  $K_S$ , обозначаемая термином «константа сенсора», в действительности является условным параметром, числовое значение которого зависит не только от типа и конструкции сенсора, но и от области его эксплуатации – химического типа определяемого вещества или комбинации веществ. Приближенно значение «константы» можно оценить из геометрических параметров рабочей зоны сенсора.

Все другие характеристики сенсора также являются переменными величинами, но зависящими не только от химического типа раствора, но и от его концентрации. В виде функциональных зависимостей они могут быть определены путем обработки данных калибровки сенсора и справочных данных о физико-химических свойствах среды, в которой производится измерение.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Реут, О.П., Куличенков, В.П., Чепуркин, А.А., *Методы и приборы контроля водно-химического режима ТЭС*. Минск: БНТУ, 2015. 73 с.

- Афанасьев, Д.С., Бардакова, Е.А., Быстряков, Д.С., Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2016, т. 4, № 4, с. 1.
- Kirichek, R., Koucheryavy, A., Internet of Things Laboratory Test Bed, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2016. p. 485.
- ГОСТ 22729-84, Анализаторы жидкостей ГСП. Общие технические условия.
- Кучерявый, А.Е., Интернет Вещей. *Электросвязь*, 2013, № 1, с. 21.
- Кострикин, Ю.М., Мещерский, Н.А., Коровина, О.В., *Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления*. Справочник, М.: Энергоатомиздат, 1990. 254 с.
- Левшина, Е.С., Новицкий, П.В., *Электрические измерения физических величин*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
- ГОСТ 22171-90, Анализаторы жидкости кондуктометрические лабораторные. Общие технические условия.
- Справочник химика. Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов. Электродные процессы*, Том 3. Издание 2. М-Л.: Химия, 1965. 1005 с.
- Washburn, E.W., *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*. N-Y: National research council of the USA, 2003, (6), 511 p.
- Zoski, Cynthia G., *Handbook of Electrochemistry*. Las Cruces, New Mexico, USA: Elsevier, 2007. 935 p.
- Ершов, А.М., Маслов, А.А., Совлуков, А.С., Фатеев, В.Я., и др., Измерение концентраций веществ в водных растворах, *Вестник Мурманского технического университета*, 2006, т. 9, № 3, с. 36.
- ГОСТ РФ 22171-90, Анализаторы жидкости кондуктометрические лабораторные.
- Кошель, Н.Д., Смирнова, Е.В., Кошель, С.А., Исследование обменных процессов в ионитах в электрических полях методом компьютерной резистометрии. Часть 2. Методы и техника, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 5, с. 56.

### Summary

The process of the calibration of flow-through conductometric sensors of electrical conductivity and their concentration in solutions of NaOH, NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> is investigated. Two-electrode sensors in glass tubes were used, with platinum electrodes in combination with the developed resistometer. The measuring system resistometer-sensor KSN-19, KSN-22, and KSN-23 operates on a pulsed alternating current with a frequency of 4 kHz. The calibration dependences of the concentration-resistance sensors in the indicated solutions were measured. Three main parameters of the sensors were determined by means of special software processing of the calibration data and their comparison with precise reference functions, namely, the “sensor constant”  $K_S$ ,  $K_{S1}$ , and  $K_{S3}$ . It is shown that all characteristic parameters of sensors depend on the chemical composition of the analyzed medium and are not constants. Theoretical substantiations of the observed regularity are given.

*Keywords:* conductometric sensor, electrical conductivity, calibration, sensor constant, ion mobility, resistometer