

19. Зайцев, С. В. Газохроматографическое определение коэффициентов распределения в системе «трансформаторное масло – ионол – экстрагент» [Текст] / С. В. Зайцев, В. А. Кишневский, Б. А. Гуляенко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. 3 (42). – С. 86–90.
20. Emsley, A. M. Degradation of cellulose insulation in power transformers. Pt. 3. Effects of oxygen and water on ageing in oil [Text] / A. M. Emsley, X. Xiao, R. J. Heywood, M. Ali // IEEE. Proc. Sci., Meas. and Technol. – 2001. – Vol. 147, Issue 3. – P. 115–110. doi: 10.1049/ip-smt:20000021
21. Oomen, T. V. Analysis of furanic compounds from cellulose aging by GS – MS attempts to correlate with degree polymerization [Text] / T. V. Oomen, van R. B. Breemen. – CIGRE Symposium on Diagnostic and Maintenance techniques. – Berlin, 1993. – P. 110–112.
22. Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds [Text] / IEC publication 61198:1993-09. – Geneva, Switzerland, 1993. – 28 p.
23. Неустроева, И. В. Руководство по подготовке и проведению хроматографического анализа на аппаратно-программном комплексе «Хроматэк Кристалл». Масло трансформаторное. Определение содержания фурановых производных в трансформаторных маслах [Текст] / И. В. Неустроева. – Йошкар-Ола. СКБ «Хроматэк», 2005. – 36 с.
24. Зайцев, С. В. Газохроматографические методы определения содержаний растворенных в трансформаторных маслах компонентов [Текст] / С. В. Зайцев, В. А. Кишневский // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. (41). – С. 132–137.
25. Витенберг, А. Г. Газовая экстракция в хроматографическом анализе. Парофазный анализ и родственные методы [Текст] / А. Г. Витенберг, Б. В. Иоффе. – Л.: Химия, 1982. – 280 с.

Розроблено амперометричний сенсор хлору з матричним електролітом на основі LiI, що переважає існуючі вітчизняні та зарубіжні зразки за комплексом технічних характеристик. Реалізація та оптимізація електрохімічної системи з йод-йодидним медіатором індикаторного електрода і йод-срібним допоміжним електродом дозволили розширити діапазон вимірювань в 7 разів у порівнянні з існуючими зразками

Ключові слова: амперометричний сенсор хлору, діапазон вимірювання, селективність, медіаторний катализ, йод-йодидна система

Разработан амперометрический сенсор хлора с матричным электролитом на основе LiI превосходящий существующие отечественные и зарубежные образцы по комплексу технических характеристик. Реализация и оптимизация электрохимической системы с йод-йодидным медиатором индикаторного электрода и йод-серебряным вспомогательным электродом позволили расширить диапазон измерений в 7 раз по сравнению с существующими образцами

Ключевые слова: амперометрический сенсор хлора, диапазон измерения, селективность, медиаторный катализ, йод-йодидная система

УДК 620.193 : 541.136

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30566

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР ХЛОРА НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА С МЕДИАТОРОМ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ

А. И. Букет

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: buket@xtf.kpi.ua

О. В. Линючева

Доктор технических наук, профессор*

пр. Победы 37, г Киев, Украина, 03056

E-mail: ovlin13@rambler.ru

А. В. Нагорный

Ассистент*

E-mail: o.nagorniy@kpi.ua

А. Г. Линючев

Ассистент**

E-mail: o.liniychev@kpi.ua

*Кафедра технологии электрохимических производств***

Кафедра общей и неорганической химии*

***Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

Современная промышленность и коммунальные хозяйства очень широко используют экологически

опасные газы, такие как хлор. Мировое производство хлора превышает 50 млн. тон в год. Принимая во внимание токсичность хлора и его экологическую опасность, все предприятия, использующие и транс-

портирующие хлор, требуют особых мер по контролю воздушной среды.

На сегодняшний день контроль воздушной среды осуществляется газоанализаторами на основе амперометрических сенсоров. Их недостатком является узкий диапазон измерения, т. е. возможно определение на уровне предельно допустимой концентрации (ПДК), или измерения высоких концентраций, но без возможности чувствовать на уровне ПДК. Поэтому на предприятиях, где хранится сжиженный хлор, необходимо устанавливать как минимум двухканальные датчики для определения концентраций хлора в аварийных и в штатных ситуациях. Это усложняет системы мониторинга, и на практике часто отказываются от измерений в аварийных ситуациях, устанавливая только сенсоры с чувствительностью на уровне ПДК, которые выходят из строя при аварийном выбросе.

Поскольку объемы использования хлора мировой промышленностью все больше нарастают, то возрастает потребность в газоаналитическом оборудовании, способном определять хлор в широком диапазоне концентраций от 1 ppm до 1000 ppm (три порядка). Сенсоры хлора, удовлетворяющие эту потребность, отсутствуют на мировом рынке. Поэтому создание новых амперометрических сенсоров хлора для аварийных выбросов с высоким разрешением все еще остается актуальным.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Совершенствование потенциометрических сенсоров, имеющих диапазон измерений шириной в несколько порядков, не позволяет пока достигнуть воспроизводимой погрешности измерений не более 25 % [1, 2].

Расширение диапазона измерения амперометрического сенсора можно осуществить несколькими способами. Одним из них – снижение величины фоновых токов, что приводит к увеличению разрешающей способности сенсора, уменьшая минимальную достоверно измеряемую концентрацию [3]

$$C_{\min} = \frac{I_0}{\gamma_M \cdot K} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\gamma_M = 25\%$ – предел основной относительной погрешности промышленных газоанализаторов; I_0 – фоновый ток; K – коэффициент преобразования.

Однако, фоновый ток амперометрических сенсоров при использовании современных универсальных катализаторов, например, на основе углеродных композиционных материалов слишком высок [4].

Вторым способом является смещение диапазона линейности номинальной статической характеристики (НСХ) в область более высоких концентраций путем увеличения общего диффузионного сопротивление сенсора, что уменьшает его коэффициент преобразования. Недостатком такого способа является значительное снижение разрешающей способности. Работы, направленные на увеличение K собственно электрохимической системы за счет применения, например, углеродных нанотрубок, компенсировать

названный недостаток не могут [5, 6]. Причина состоит в том, что диапазон генерируемых сенсором достоверных токовых сигналов ограничен примерно теми же значениями, что и у существующих сенсоров [3, 7, 8], и его ширина составляет только два порядка [6].

Для создания сенсора хлора с действительно расширенным рабочим диапазоном было рассмотрено перспективное направление – медиаторный катализ [9], который был успешно применен для повышения чувствительности и селективности амперометрических сенсоров [10]. При этом, с целью снижения фоновых токов было решено отказаться от универсальных катализаторов и перейти к использованию в качестве катода коррозионно стойких вентильных металлов со специально подготовленной поверхностью [11].

В НТУУ «КПИ» была разработана электрохимическая система газодиффузионного индикаторного электрода с матричным электролитом на основе йодида лития по схеме (2). Верхний предел линейности НСХ этой системы повышен за счет использования гомогенного медиаторного катализа предварительной химической реакции (3). При этом также повышен коэффициент преобразования [12]. Т. е. сенсор с рабочим электродом системы (2) должен превосходить существующий сенсор хлора унифицированной серии НТУУ «КПИ» [3] по действительной ширине диапазона измерений.



Кроме диапазона измерений необходимо обеспечить комплекс метрологических характеристик согласно [13] и достаточный ресурс электрохимической ячейки. Ресурс ячейки может быть условно бесконечным – в 3-х и 4-х электродных системах [3, 5, 7] с нерасходуемыми вспомогательными электродами, что сопряжено с усложнением и повышением энергопотребления схемы вторичных устройств газоанализатора. Создание двухэлектродной ячейки упрощает эксплуатацию сенсора, но требует тщательно сбалансированной электрохимической системы с расходуемым вспомогательным электродом, подобно большинству сенсоров серии НТУУ «КПИ» [3].

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является создание электрохимических сенсоров хлора амперометрического типа, с широким диапазоном измерения и высоким разрешением на основе ранее разработанной электрохимической системы с медиатором.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка индикаторного электрода с медиаторным катализом и оптимизация условий его работы для расширения диапазона измерений;
- разработка вспомогательного электрода и оптимизация работы электрохимической системы создаваемого сенсора хлора;
- расчет параметров электрохимической системы сенсора хлора, обеспечивающих ресурс эксплуатации не менее двух лет, и их практическая реализация;

– определение технических характеристик и их воспроизводимости на опытной серии сенсоров хлора.

4. Материалы и методы исследований электрохимической системы амперометрического сенсора

Исследования проводились с использованием амперометрических сенсоров хлора унифицированной серии НТУУ «КПИ» (Украина). Электрохимические ячейки сенсоров выполняли послойным прессованием функциональных слоев, компоненты которых предварительно гомогенизировались. Опытные ячейки содержали рабочий и вспомогательный электроды с токопроводящим скелетом из порошкового титана марки ПТЕМ и разделялись сепаратором из полимерного материала ФТ-4 в смеси с гидрофилизующей добавкой SiO₂. Прессованные ячейки пропитывались электролитом на основе раствора галогенида лития.

Общая схема установки, на которой проводились исследования, приведена на рис. 1. Ячейка 1 в корпусе из полимерного материала, помещена в адаптер 2, связана с электродом сравнения 3 с помощью ионного мостика 4 и подключена к потенциостату 7. В адаптер подавалась хлорвоздушная смесь с заданной концентрацией хлора при помощи кулонометрического дозатора хлора 5 [14] и компрессора 6.

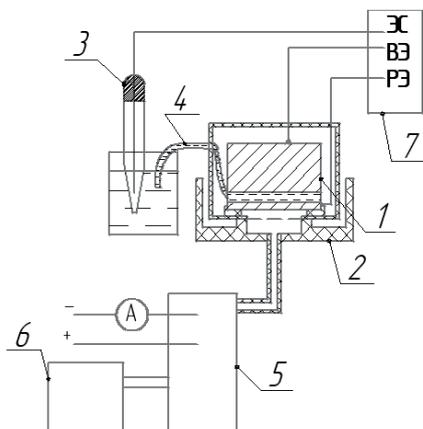


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – электрохимическая ячейка; 2 – адаптер; 3 – электрод сравнения; 4 – ионный мостик; 5 – кулонометрический дозатор хлора; 6 – компрессор; 7 – потенциостат

Хроновольтамперометрические измерения проводили с помощью потенциостата ПИ-50-1.1 в комплексе с программатором ПР-8 и двухкоординатным потенциометром ПДА 1-01. Значения потенциалов электродов в работе приведены в нормальной водородной шкале.

5. Результаты исследований электрохимической системы амперометрического сенсора и их обсуждение

На элементной базе унифицированной серии НТУУ «КПИ» [3] была изготовлена электрохимическая ячейка с рабочим газодиффузионным электродом системы

(2), на котором в установке с рис. 1 получили семейство переходных характеристик восстановления хлора при постоянном потенциале (рис. 2). По стационарным значениям токов восстановления хлора с рис. 2 и подобных результатов, полученных при иных значениях потенциала рабочего электрода и концентрации хлороздушнoй смеси, построены катодные поляризационные кривые на рис. 3. Участки линейной зависимости тока от потенциала на рис. 3 указывают, согласно [12], на омические ограничения в растворе электролита в пористой матрице рабочего электрода, частичное устранение которых медиаторным катализом должно способствовать расширению диапазона измерений сенсора.

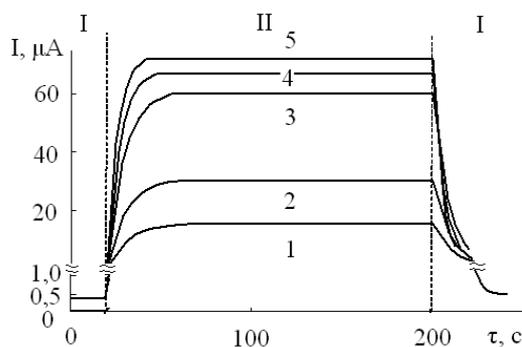


Рис. 2. Переходные характеристики сенсоров хлора. Концентрация хлора в газовой смеси ррт: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 25; 5 – 30. I – воздух; II – хлороздушная смесь

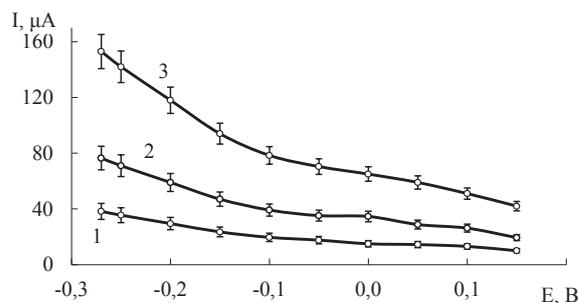


Рис. 3. Зависимость токов восстановления хлора в медиаторной системе от потенциала индикаторного электрода. Концентрация хлора в газовой смеси ррт: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20

Линейная зависимость тока восстановления хлора от его концентрации в газовой смеси, полученная из рис. 3 при постоянном потенциале -0,25 В и представленная на рис. 4, показывает принципиальную возможность реализации амперометрического принципа измерения концентрации хлора благодаря замедленной его диффузии в газовой фазе. Т. е. на рис. 4 показана номинальная статическая характеристика разрабатываемого сенсора с верхним пределом измерения 1200 µА (п. 4 на рис. 4), что на порядок превышает верхний предел сенсора хлора унифицированной серии [3], соответствующий п. 6 на рис. 4.

Термодинамическая возможность взаимодействия хлора и йода с водой как растворителем вынуждает провести оптимизацию рН раствора электролита. Как

видно с рис. 4, наибольший коэффициент преобразования концентрации хлора в токовый сигнал достигается при рН 1...5.

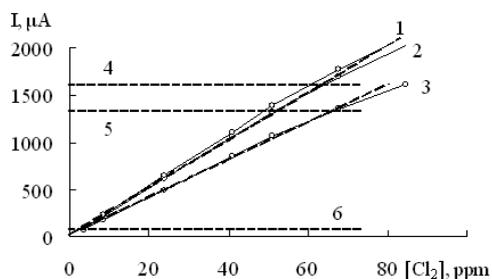


Рис. 4. Номинальные статические характеристики сенсоров хлора с медиатором рН медиаторной системы: 1 – рН5, 2 – рН1, 3 – рН9. Верхняя граница линейности для систем: 4 – рН1...5; 5 – рН9; 6 – без медиатора

В процессе оптимизации рН установлено, что фоновый ток исследуемого рабочего электрода (определяемый по переходным характеристикам, как показано на рис. 2) возрастает по мере снижения рН раствора электролита (рис. 5). Причина этого явления состоит в увеличении разности потенциалов между рН-зависимым кислородным электродом и йод-йодидной медиаторной системой, для которой кислород выступает окислителем в широком диапазоне рН.

Экспериментальное подтверждение того факта, что основная составляющая фонового тока разрабатываемой электрохимической ячейки состоит из катодного восстановления атмосферного кислорода посредством медиаторного катализа, получено на установке с рис. 1 путем создания в приэлектродном слое бескислородной среды при подаче аргона (рис. 6). Существенное снижение фоновых токов на рис. 6 в среде аргона по сравнению со средой атмосферного воздуха однозначно указывает на необходимость выбора по возможности более высокого рН раствора электролита, что с учетом данных рис. 4 обуславливает выбор рН5.

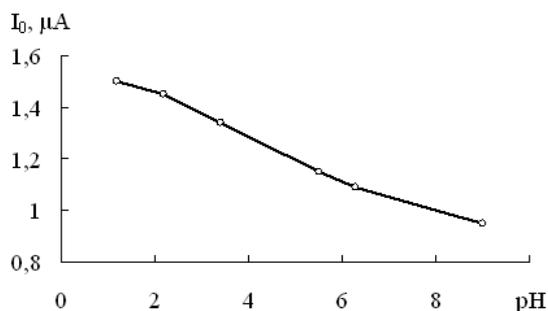


Рис. 5. Зависимость величины установившегося фонового тока от рН электролита

Разработка электрохимической системы в целом для сенсора хлора предполагает создание вспомогательного электрода отвечающего двум основным требованиям: поддержание постоянного потенциала рабочего электрода в требуемом диапазоне и постоянства состава в растворе электролита. Необходимый к поддержанию потенциал индикаторного электрода лежит, как следует из рис. 3, в диапазоне не вы-

ше $-0,2$ В, в соответствии с требованием увеличения коэффициента преобразования сенсора. А в соответствии с требованием минимизации фоновых токов, вызываемых побочными процессами, потенциал должен быть выше $-0,25$ В, как видно из рис. 6. Расчеты показывают, что названным требованиям соответствует электродная реакция (4) на йод-серебряном электроде (5), потенциал которого в 6 м LiI составляет $-0,25$ В.

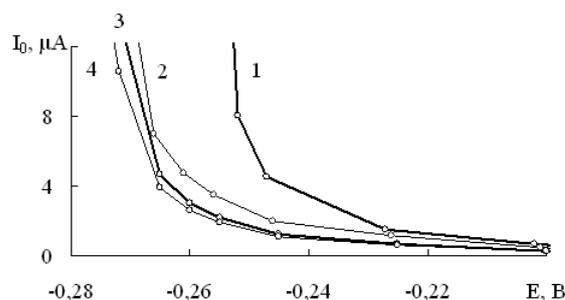


Рис. 6. Зависимость величины фонового тока от потенциала индикаторного электрода в системах с различными рН электролита в воздухе и в аргоне: 1, 3 – рН1; 2, 4 – рН5; 1, 2 – в воздухе, 3, 4 – в аргоне

Как показали поляризационные исследования (рис. 7), такой электрод (5), изготовленный на элементарной базе унифицированной серии [3], является достаточно малополяризуемым для поддержания потенциала при токах даже более 1 мА. Недостатком этого вспомогательного электрода является накопление в растворе хлорида лития в процесс эксплуатации электрохимической системы сенсора. Это происходит вследствие образования исключительно йодида серебра по реакции (4) на вспомогательном электроде, поскольку произведения растворимости хлорида серебра ($1,6 \cdot 10^{-10}$ при $25^\circ C$) существенно выше такового у его йодида ($1 \cdot 10^{-16}$) [15]. Т. е. катодная реакция (6) в сумме с анодной реакцией (4) приводят к замещению в растворе электролита йодида на хлорид по уравнению (7).



Поляризационные кривые, подобные рис. 3, снятые на рабочем электроде в системе с раствором электролита из смеси йодида и хлорида лития, показали, что даже при соотношении содержания этих солей 1:1 изменение токов катодного восстановления хлора лежит в пределах ошибки эксперимента. Учитывая содержание раствора в электрохимической ячейке около $0,65 \text{ см}^3$ и исходной концентрации йодида лития около 6 м, половина заложенного количества последнего соответствует восстановлению 0,5 ммоль хлора. При непрерывном генерировании токового сигнала 1 мкА на хлор на уровне концентрации 3 ppm указанное количество йодида израсходуется в течение 6,3 лет, что

превышает в 6 раз обычной гарантийный срок. Такой запас йодида должен обеспечить работу датчика в условиях аварийных выбросов.

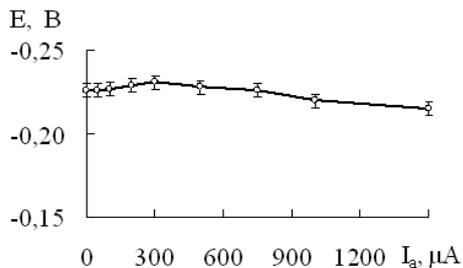


Рис. 7. Поляризация вспомогательного йод-серебряного электрода анодным током

Более дорогой расходный материал вспомогательного электрода (серебро) закладывался из расчета редких аварийных выбросов с учетом экспериментально установленного коэффициента использования в 30 % и в меньшем избытке, чем йодид лития.

Таким образом, фактический диапазон измерений, который равен отношению максимальной концентрации измеряемой сенсором к минимальной, у разработанного сенсора в семь раз, больше чем у ранее существовавшего, но при этом сенсор не менее стабилен в работе благодаря использованию йод-серебряного вспомогательного электрода.

Разработанная электрохимическая ячейка системы (8) прошла испытания на установке с рис. 1 в виде партии из 10 однотипных сенсоров по стандартной методике [13].



Результаты испытаний каждого сенсора в виде переходной характеристики с рис. 8 обрабатывались до получения номинальной статической характеристики, показанной на рис. 9, и отдельных данных по длительности переходных процессов, величины которых укладываются в диапазон (9).

$$\tau_{90} = 30 \dots 60 \text{ с.} \tag{9}$$

Из рис. 9 видно, что линейность номинальной статической характеристики гарантируется до токовых сигналов 1200 мкА, а при среднем коэффициенте преобразования 0,6 мкА/ррм и фоновом токе 0,5 мкА (рис. 8) нижний предел измерений согласно уравнению (1) составит 3 ррм. Уменьшением общего диффузионного сопротивления сенсоров достигали коэффициента преобразования 12 мкА/ррм, что соответствует диапазону измерений от 0,17 до 100хррм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

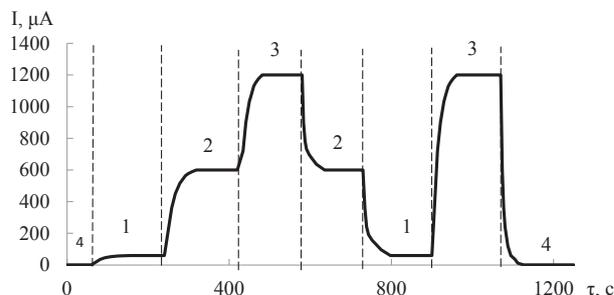


Рис. 8. Изменение сигнала во времени при проведении одной серии испытаний на определение метрологических характеристик: [Cl₂], ррм: 1 – 100; 2 – 1000; 3 – 2000; 4 – воздух без хлора

Таблица 1

Технические характеристики сенсоров хлора

Показатели	City Technology (Великобритания)	Информаналитика (Россия)	НТУУ "КПИ" (Украина)	
			Твердоэлектролитный	Разработанный сенсор
Количество электродов	3	2	2	2 и 3
Диапазон измерения, ррм	0–100 0–250	0–10	0–5 0–200	0 – 100 0 – 2000
Коэффициент преобразования, мкА/ррм	0,6 1±0,25	0,6	3 ± 0,3 0,075	12 0,6
Разрешение, ррм	1,3 2	0,33	0,05 1	0,17 3
Время отклика t 0.9 не более, с	≤60	30	40	60
Рабочий диапазон температуры, °С	–20...50	–30...50	–30...30	–20...50
Относительной влажности, %	15...90	20...95	40...100	20...95
Срок службы, годы	2	1	3	3
Срок хранения, годы	0,5	0,5	2	2
Селективность ^(*) : O ₃	+	–	–	+
HCl	–	–	–	–
H ₂ S	+	–	–	–
NO ₂	+	+	+	+
SO ₂	+	–	–	+
NH ₃	–	–	–	–
CO	–	–	–	–
H ₂	–	–	–	–

Примечание: ^(*) – возможность (+) или невозможность (–) генерирования стабильного токового сигнала на постоянную концентрацию указанного газа.

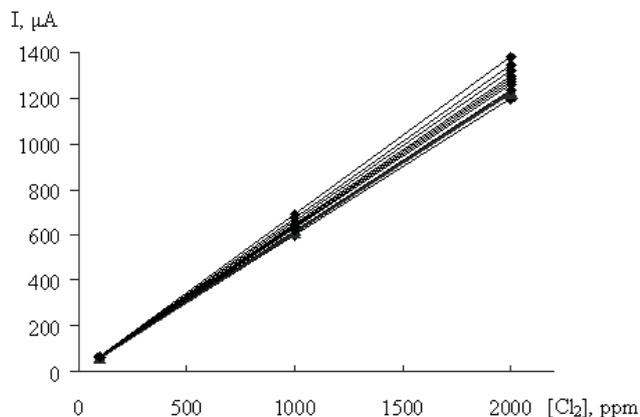


Рис. 9. Семейство номинальных статических характеристик серии из десяти сенсоров хлора

Сравнивая полученные результаты в табл. 1 с техническими характеристиками зарубежных аналогов [7, 8] и существующим сенсором унифицированной серии [3], можно утверждать, что цель работы, – расширение диапазона измерений в 7 раз, – была успешно достигнута.

6. Выводы

Использование гомогенного медиаторного катализа йод-йодидной редокс-системой сделало возможным разработку индикаторного электрода сенсора хлора, оптимизация которого по pH электролита (pH5) и потенциалу катодного восстановления хлора (–0,25 В) позволила повысить верхний предел измерений на порядок. Благодаря этому при некотором повышении фонового тока было обеспечено фактическое расширение диапазона измерений в 7 раз по сравнению с существующими сенсорами.

Разработанный йод-серебряный вспомогательный электрод обеспечивает функционирование индикаторного электрода в выбранном режиме и, после оптимизации электрохимической системы в целом, обеспечивает расчетное превышение длительности эксплуатации в 6 раз над гарантийным сроком в один год.

Испытания опытной партии из 10 сенсоров показали стабильность их выше указанного превосходства по диапазону измерений над существующими в мире образцами в течение не менее 2 лет эксплуатации, при остальных технических характеристиках на уровне зарубежных сенсоров.

Литература

- Zhang, H. NASICON-based potentiometric Cl_2 sensor combining NASICON with Cr_2O_3 sensing electrode [Text] / H. Zhang, J. Li, H. Zhang, X. Liang, C. Yin, Q. Diao, J. Zheng, G. Lu // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2013. – Vol. 180. – P. 66–70. doi: 10.1016/j.snb.2012.03.024
- Liang, X. Progress in NASICON-based mixed-potential type gas sensors [Text] / X. Liang, B. Wang, H. Zhang, Q. Diao, B. Quan, G. Lu // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2013. – Vol. 187. – P. 522–532. doi: 10.1016/j.snb.2013.03.032
- Чвірук, В. П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ [Текст]: навч. посіб. / В. П. Чвірук, С. Г. Поляков, Ю. С. Герасименко. – К.: Академперіодика, 2007. – 322 с.
- Olivé-Monllau, R. Integration of a sensitive carbon nanotube composite electrode in a ceramic microanalyzer for the amperometric determination of free chlorine [Text] / R. Olivé-Monllau, C. S. Martínez-Cisneros, J. Bartrol, M. Baeza, F. C. Spedes // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2011. – Vol. 151, Issue 2. – P. 416–422. doi: 10.1016/j.snb.2010.10.017
- Sun, G. Electrochemical chlorine sensor with multi-walled carbon nanotubes as electrocatalysts [Text] / G. Sun, S. Liu, K. Hua, X. Lv, L. Huang, Y. Wang // *Electrochemistry Communications*. – 2007. – Vol. 9, Issue 9. – P. 2436–2440. doi: 10.1016/j.elecom.2007.07.015
- Olivé-Monllau, R. Highly sensitive CNT composite amperometric sensors integrated in an automated flow system for the determination of free chlorine in waters [Text] / R. Olivé-Monllau, A. Pereira, J. Bartrol, M. Baeza, F. C. Spedes // *Talanta*. – 2010. – Vol. 81, Issue 4–5. – P. 1593–1598. doi: 10.1016/j.talanta.2010.03.008
- Product Data Handbook City Technology Ltd. [Text] / Portsmouth: City Technology Center. – 1997. – Vol. 1, Issue 4.0. – P. 3
- Электрохимический первичный преобразователь концентрации хлора (сенсор) 2E- Cl_2 0-10 ppm Cl_2 [Электронный ресурс] / Паспорт технический. – Санкт-Петербург (Россия); ООО «Информаналитика», 2014. – 2 с. – Режим доступа: <http://www.infogas.ru/doc/passports/sensors/senspassportCl2.doc>
- Огибин, Ю. Н. Органический электросинтез с использованием медиаторных систем окисления [Текст] / Ю. Н. Огибин, М. Н. Элинсон, Г. И. Никишин // *Успехи химии*. – 2009. – Т. 78, № 2. – С. 99–150.
- Mehtaab, A. A novel multivalent nanomaterial based hydrogen peroxide sensor [Text] / A. Mehtaab, S. Patilbc, H. Bangd, H. J. Choab, S. Seal. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2010. – Vol. 134. – P. 146–151. doi: 10.1016/j.sna.2006.05.028
- Mentus, S. V. Oxygen reduction on anodically formed titanium dioxide [Text] / S. V. Mentus // *Electrochimica Acta*. – 2004. – Vol. 50, Issue 1. – P. 27–32. doi: 10.1016/j.electacta.2004.07.009
- Линючева, О. В. Гомогенный медиаторный катализ для повышения коэффициента преобразования амперометричного сенсора [Текст] / О. В. Линючева, А. И. Букет, А. В. Нагорный // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2012. – Т. 3 (9), № 4. – С. 89–94.
- ГОСТ 13320-81. Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия [Текст] / М.: Изд-во стандартов, 1992. – 32 с.
- А.с. 1684600 СССР, МКИ G 01 F 11/00. Кулонометрический дозатор хлора [Текст] / Чвирук В. П., Яцюк Л. А., Герасименко М. А., Нефедов С. В. – № 4471646/31; Заявл. 3.07.1989; Опубл. 15.10.1991, Бюл. № 38.
- Справочник химика. У 6 т. Т.3 [Текст] / М.-Л.: Химия, 1964. – 705 с.