

Разработка программного обеспечения верхнего уровня системы управления процессом получения бентонит-содержащих биполярных мембран

Сабухи И. Нифталиев	¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Ольга А. Козадерова	¹	kozaderova-olga@mail.ru	 0000-0002-8135-5801
Андрей В. Иванов	¹	andrious@rambler.ru	 0000-0002-6034-9672
Иван А. Козенко	¹	kosenko211986@mail.ru	 0000-0002-1508-9875
Ксения Б. Ким	¹	kmkseniya@yandex.ru	 0000-0001-5564-8267
Максим С. Игумнов	¹	igumnov98.wot@mail.ru	 0000-0002-0856-2273

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход к автоматизации технологического процесса получения бентонит-содержащих ионообменных биполярных мембран. Приведены структуры автоматизированных систем, как с использованием локальных средств автоматизации, так и с применением промышленных контроллеров и рабочих станций. Описаны достоинства и недостатки каждой из структур. Предложена двухуровневая система управления с использованием датчиков, исполнительных механизмов и промышленного контроллера на нижнем уровне и рабочей станции на верхнем. Реализована схема комплекса технических средств. Разработана информационная модель программного обеспечения верхнего уровня системы управления, учитывающая особенности технологического процесса. Описана диаграмма потоков данных и предложены принципы функционирования программного обеспечения верхнего уровня. На языке C++ разработан программный модуль, предназначенный как для расчета управляющих воздействий для нижнего уровня управления, так и для моделирования периодического лабораторного биполярного электролиза раствора сульфата натрия с экспериментальными бентонит-содержащими биполярными мембранами для получения кислоты и щелочи. В ходе работы программного модуля возможно проследить зависимость технологических параметров электролиза (потока ионов, выхода по току, энергетических затрат на производство целевого продукта) от вида используемого модификатора бентонита (алкилдиметилбензиламмония хлорида (ПАВ) и стеариновой кислоты) и его количества в мембранах (1, 2, 3% по мас.) при различной плотности тока. Программный модуль может быть использован в действующих производствах в рамках функционирующих АСУТП с целью оптимизации режимных параметров при управлении процессами электролиза.

Ключевые слова: электролиз, биполярная мембрана, модифицирование, бентонит, сульфат натрия, автоматизация, система управления, промышленный контроллер, рабочая станция.

Development of top-level software for the process control system for bentonite-containing bipolar membranes

Sabukhi I. Niftaliev	¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Olga A. Kozaderova	¹	kozaderova-olga@mail.ru	 0000-0002-8135-5801
Andrey V. Ivanov	¹	andrious@rambler.ru	 0000-0002-6034-9672
Ivan A. Kozenko	¹	kosenko211986@mail.ru	 0000-0002-1508-9875
Kseniya B. Kim	¹	kmkseniya@yandex.ru	 0000-0001-5564-8267
Maksim S. Igumnov	¹	igumnov98.wot@mail.ru	 0000-0002-0856-2273

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. An approach to automating the technological process of obtaining bentonite-containing ion-exchange bipolar membranes is considered. The structures of automated systems are given, both with the use of local automation tools, and with the use of industrial controllers and workstations. The advantages and disadvantages of each of the structures are described. A two-level control system with the use of sensors, actuators, and an industrial controller at the lower level and a workstation at the upper level is suggested. The scheme of the complex of technical means is implemented. The information model of the upper level software of the control system taking into account the peculiarities of the technological process is developed. The data flow diagram is described and functioning principles of the upper level software are proposed. A software module, that is designed both to calculate control actions for the lower control level and to simulate periodic laboratory bipolar electroanalysis of a sodium sulfate solution with experimental bentonite-containing bipolar membranes to produce acid and alkali, has been developed in C++. During the operation of the software module, it is possible to trace the dependence of technological parameters of electroanalysis (ion flux, current efficiency, energy costs for the production of the target product) on the type of bentonite modifier used (alkyldimethylbenzylammonium chloride (surfactant) and stearic acid) and its quantity in membranes (1, 2, 3% wt.) at different current densities. The software module can be used in existing industries within the framework of functioning process control systems in order to optimize operating parameters during control of electroanalysis processes.

Keywords: electroanalysis, bipolar membrane, modification, bentonite, sodium sulfate, automation, control system, industrial controller, workstation.

Для цитирования

Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Иванов А.В., Козенко И.А., Ким К.Б., Игумнов М.С. Разработка программного обеспечения верхнего уровня системы управления процессом получения бентонит-содержащих биполярных мембран // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 4. С. 165–173. doi:10.20914/2310-1202-2022-4-165-173

For citation

Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Ivanov A.V., Kozenko I.A., Kim K.B., Igumnov M.S. Development of top-level software for the process control system for bentonite-containing bipolar membranes. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 165–173. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-4-165-173

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Электродиализ с биполярными мембранами – один из наиболее быстро развивающихся мембранных методов конверсии промышленных растворов в кислоты и щелочи [1, 2]. В настоящее время на отечественном рынке представлен достаточно небольшой ассортимент коммерчески доступных биполярных мембран. Актуальной задачей науки и промышленности является улучшение свойств уже имеющихся мембран и получение новых биполярных мембран [3, 4].

В работах [5–7] исследованы характеристики электродиализа раствора сульфата натрия с экспериментальными образцами бентонит-содержащих биполярных ионообменных мембран. Результаты исследования показывают перспективность использования этих мембран для конверсии солевых растворов.

В настоящей работе рассмотрен вариант автоматизации технологической схемы получения экспериментальных бентонит-содержащих биполярных мембран, описанной в [6].

При разработке автоматизированной системы управления может быть использовано несколько вариантов [8, 9]:

- применение локальных средств регулирования в автоматическом режиме. В этом случае управление процессом контролируется локальными регуляторами. Задание локальным регуляторам выставляет технолог. Для этого действующую схему управления необходимо модернизировать, так как в ней будут использоваться современные локальные средства автоматического управления. Описанный метод достаточно простой, однако он не всегда позволяет проводить процесс в оптимальном режиме по одному из выбранных критериев, реализовать адаптацию в системе управления технически сложно, к тому же это экономически не выгодно. Надежность системы определяется надежностью локальных средств управления;

- применение супервизорного режима. Управление также осуществляется локальными средствами, но задание регуляторам выдает вычислительная машина, рассчитывающая настройки регуляторов на основе математической модели процесса. В этом случае появляется возможность оптимизации процесса по одному из выбранных критериев. Степень надежности системы управления процессом низкая и определяется надежностью локальных средств управления. Машина, которая ведет расчет, должна иметь среднюю производительность и надежность;

- применение вычислительной машины в режиме непосредственного цифрового управления. На первом этапе происходит сбор информации от первичных датчиков-преобразователей, на основе математической модели процесса рассчитываются оптимальные управляющие воздействия,

после чего вычислительная машина отправляет задание на исполнительные устройства. Степень надежности системы управления процессом определяется надежностью управляющей вычислительной машины, каналов связи машины с оборудованием. В этом случае необходимо ставить промышленную рабочую станцию, имеющую высокую производительность и надежность;

- применение управляющего вычислительного комплекса с использованием регулирующего микроконтроллера на нижнем уровне. Сначала необходимо собрать информацию от датчиков, далее по установленным алгоритмам формируются управляющие воздействия, которые направляются на исполнительные устройства и рабочую станцию на верхнем уровне. Рабочая станция решает задачи оптимального адаптивного управления технологическим процессом с использованием математической модели процесса, рассчитывает основные параметров процесса (рисунок 1).

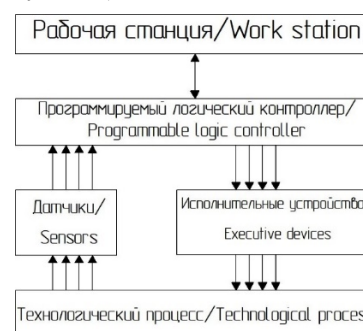


Рисунок 1. Схема комплекса технических средств
Figure 1. Scheme of a complex of technical means

Предлагаемые варианты реализации систем управления отличаются оперативностью управления. Первые три варианта представляют собой начальные этапы цифровизации производства. Оценивая результаты их работы, можно выделить следующие отрицательные стороны их реализации [10]:

- недостаточное использование или не использование управляющего вычислительного комплекса в режиме непосредственного цифрового управления;
- сложность организации непосредственного управления технологическими объектами из-за большой удаленности последних от устройств управления;
- длительные сроки создания систем, соизмеримые со сроками морального старения технических решений;
- большие затраты на разработку и освоение программных из-за не унифицированности;
- невозможность постепенного внедрения систем;
- низкая выживаемость.

Анализ работы автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), постановка и разработка новых задач управления; появление новых информационных технологий, в первую очередь микропроцессорной, позволили перейти к созданию распределенных систем управления, качественно отличающихся от АСУТП первого поколения. В связи с этим последний вариант является наиболее предпочтительным.

Для реализации такой системы управления необходимо осуществить подбор и настройку как технического обеспечения, так и необходимо разработать программную составляющую управления процессом.

Материалы и методы

Первым этапом создания программного обеспечения верхнего уровня системы управления является создание информационной модели, для реализации которой использована методология структурного анализа и проектирования (методология SADT) [11–14]. Данная методологии основывается на международном стандарте IDEF0 (Icam DEFinition), рекомендованным Госстандартом РФ, и используется в качестве стандарта для разработки программного обеспечения [15–16]. Методология IDEF0 основывается на графическом языке описания процессов. Модель в нотации IDEF0 представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм, при этом каждая диаграмма является единицей описания системы и располагается на отдельном листе [5–6].

На рисунке 2 представлена контекстная диаграмма (диаграмма верхнего уровня), которая является вершиной древовидной структуры диаграмм, показывающая назначение системы (основную функцию) и ее взаимодействие с внешней средой.

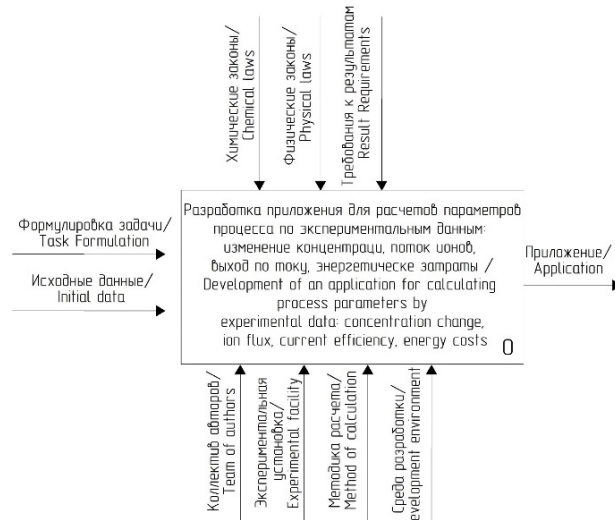


Рисунок 2. Контекстная диаграмма IDEF0

Figure 2. IDEF0 Context Diagram

Входами данной диаграммы являются технические требования к свойствам получаемой мембраны (формулировка задачи) и текущие значения технологических параметров процесса (исходные данные). Управляющими данными являются химические и физические законы и требования к результатам. Для повышения эффективности программного обеспечения и увеличения его быстродействия в качестве ресурсов диаграммы, в данной работе предложено использовать четыре механизма – коллектив авторов, обладающих знаниями и опытом работ; наличие экспериментальной установки; методика расчета параметров диаграммы и среда разработки программного обеспечения. В качестве выхода диаграммы будет получено программное приложение управления процессом.

С целью определения последовательности работ при создании программного обеспечения проведем декомпозицию контекстной диаграммы (рисунок 3).

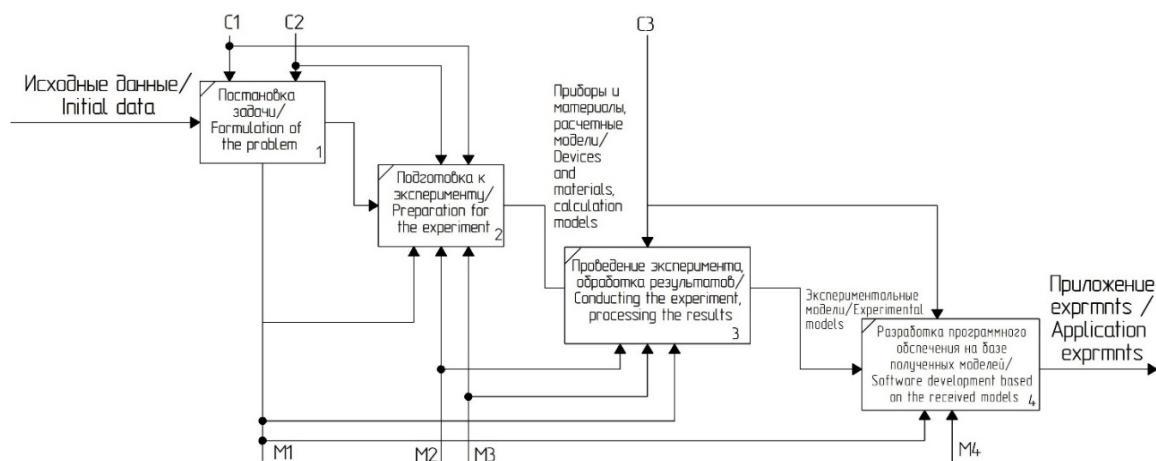


Рисунок 3. Декомпозиция контекстной диаграммы IDEF0

Figure 3. IDEF0 Context Diagram Decomposition

Электродиализ раствора сульфата натрия проводили в электродиализной ячейке (рисунок 4), состоящей из катионообменных (RalexCMH-PP) и анионообменных мембран (Ralex AMH-PP) производства МЕГА, Чехия [17] и одной из исследуемых биполярных мембран. Экспериментальную биполярную мембрану изготавливали путем нанесения на анионообменную мембраны МА-41 жидкого сульфокатионообменника, содержащего бентонитовые глины [5–6]. Также было исследовано влияние различных гидрофобизаторов – алкилдиметилбензиламмония хлорида (ПАВ) и стеариновой кислоты – на свойства экспериментальных мембран [7].

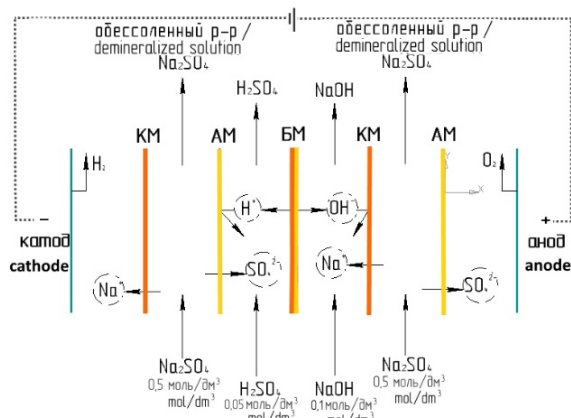


Рисунок 4. Схема биполярного электродиализа сульфата натрия: KM – катионообменная мембрана, AM – анионообменная мембрана, BM – исследуемая биполярная мембрана

Figure 4. Scheme of bipolar electrodiolysis of sodium sulfate: KM – cation exchange membrane, AM – anion exchange membrane, BM – investigated bipolar membrane

Исследуемые биполярные мембраны маркировались следующим образом:

- ВТ0% – биполярная ионообменная мембрана, не содержащая частицы бентонита;
- ВТ1%, ВТ2%, ВТ3% – биполярная ионообменная мембрана, в катионообменный слой которой был добавлен бентонит 1, 2 и 3% (по мас.) соответственно;
- АВ1%, ПАВ2%, ПАВ3% – биполярная ионообменная мембрана, в катионообменный слой которой был добавлен 1, 2 и 3% (по мас.) бентонита, обработанного ПАВ, соответственно;
- СТ1%, СТ2%, СТ3% – биполярная ионообменная мембрана, в катионообменный слой которой был добавлен 1, 2 и 3% (по мас.) бентонита, обработанного стеариновой кислотой, соответственно.

В работах [5–7] подробно рассмотрены методика проведения эксперимента и получены зависимости для расчета параметров мембран.

Результаты

Поскольку разрабатываемое программное обеспечение направлено на автоматизацию процедур расчета и моделирования параметров и свойств мембран, а также расчета режимных параметров технологического процесса необходимо упорядочить все расчеты, обеспечить поступление исходных данных во все модули программы; предусмотреть хранение промежуточных данных и предусмотреть вывод результатов в виде, удобном для дальнейшего использования. С этой целью разработана диаграмма потоков данных (рисунок 5).

На данной диаграмме первичными потоком данных являются значения силы тока и выбор мембраны. Эти потоки данных поступают в операционные блоки ОР1, ОР2, ОР4 и ОР6. На первом этапе в результате расчетов в блоке ОР1 определяется значения плотности тока. Введенные значения используются для проведения последующих расчетов, а также сохраняются в виде конечных данных и выводятся в виде таблиц или графических зависимостей. Значения плотности тока в виде потока данных поступают на вход операционных блоков ОР2, ОР3 и ОР4. Далее осуществляется расчет потока (выход блока ОР2) и значение напряжения (выход блока ОР4). На основе рассчитанного значения потока операционный блок ОР3 рассчитывает значение выхода по току, а операционный блок ОР5 вычисляет значение ΔC . Значение потока сохраняется в качестве выходных данных. На основе рассчитанных значений ΔC и ранее рассчитанных значений напряжения по экспериментальным данным в ОР6 осуществляется расчет энергетических затрат. Расчеты осуществляются по следующим зависимостям:

$$j_i = \frac{(C_o - C_i) \cdot V}{\tau \cdot S} \quad (1)$$

$$W = \frac{I \cdot U \cdot \tau}{m} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(C_o - C_i) \cdot V \cdot F}{\tau \cdot I} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\Delta C = C_o - C_i \quad (4)$$

где j_i – потоки ионов водорода и гидроксидов, генерированных внутри биполярной мембраны, моль/(м²·ч); C_o – исходная концентрация раствора, моль/дм³; C_i – концентрация ионов в исследуемой секции, моль/дм³; V – объем раствора, дм³; η – выход по току, %; F – число Фарадея А·с/моль; τ – время, ч; W – удельные энергозатраты на производство целевого продукта, Вт·ч/кг; I – сила тока, А; U – напряжение, В; S – площадь мембраны, м²; m – масса продукта, кг; ΔC – изменение концентрации, моль/дм³.

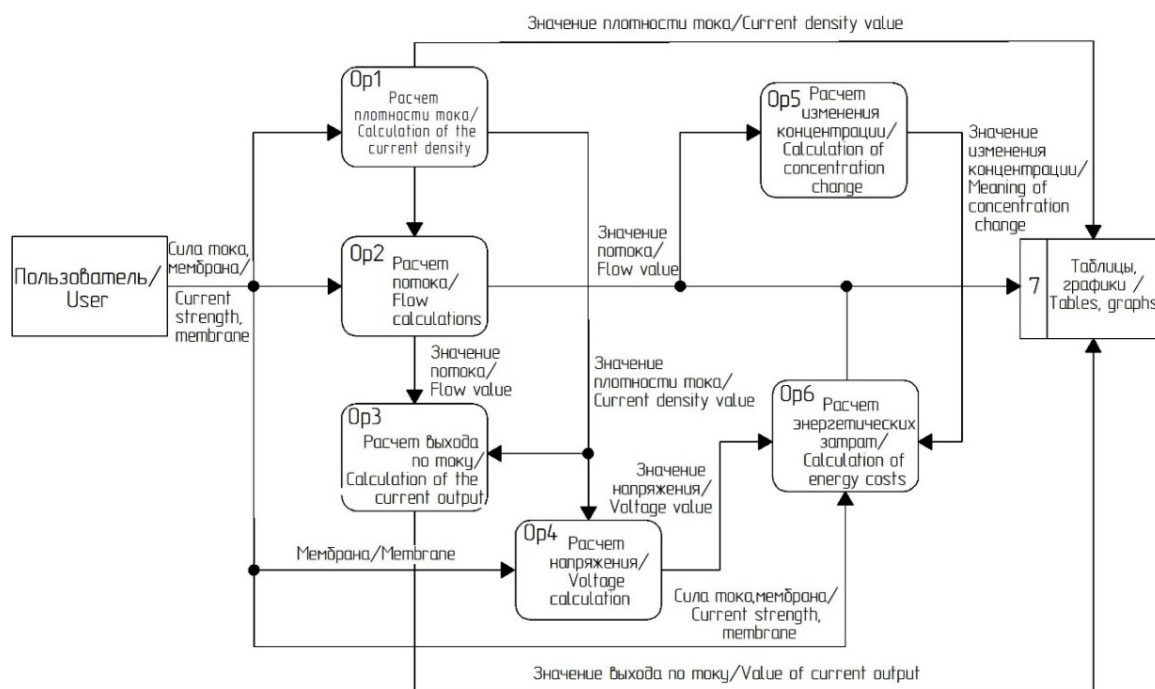


Рисунок 5. Диаграмма потоков данных
Figure 5. Data Flow Diagram (DFD)

Обсуждение

Таким образом, полученные значения могут быть использованы для моделирования параметров свойств мембран. Кроме того, они могут быть переданы на нижний уровень управления и выступать в качестве сигнала коррекции хода технологического процесса. На основе вышесказанного, а также с помощью

расчетных зависимостей, на языке C++ разработано приложение для расчета и моделирования характеристик мембран [18].

При входе в приложение пользователю в верхней строке необходимо выбрать, по какому целевому продукту будет вестись расчет: серная кислота (H_2SO_4) или гидроксид натрия (NaOH). Далее слева указать, для каких мембран необходимо произвести расчет и вывести данные (рисунок 6).

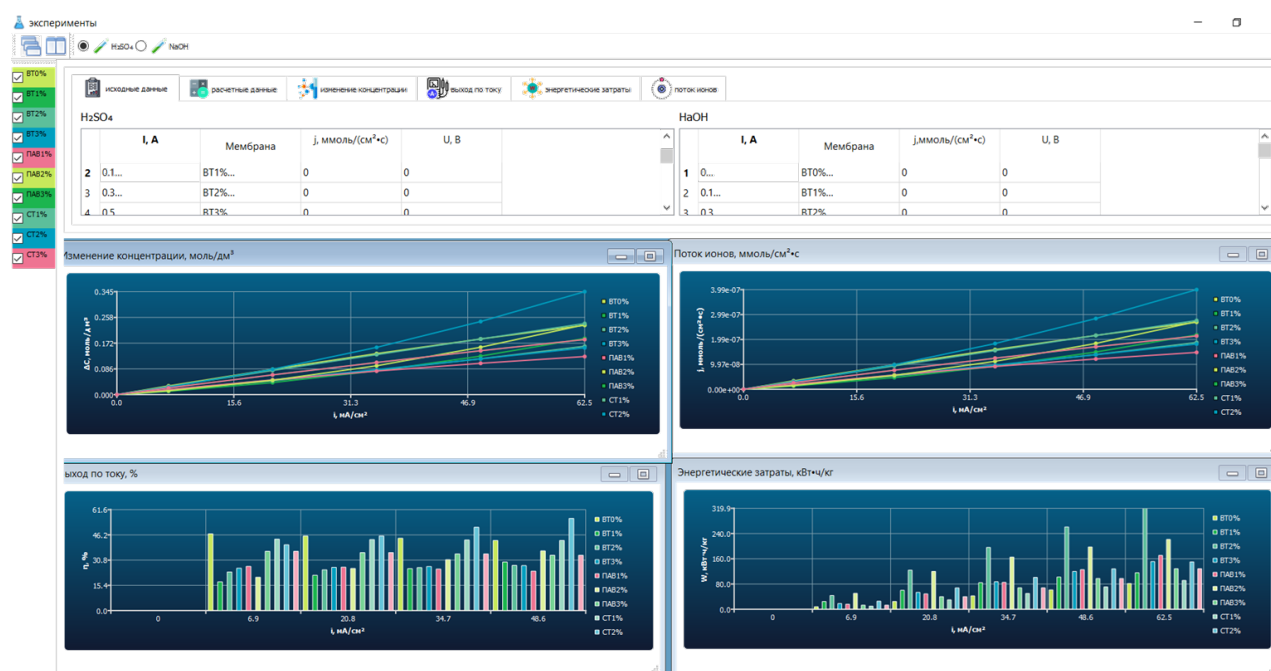


Рисунок 6. Интерфейс программы
Figure 6. Program interface

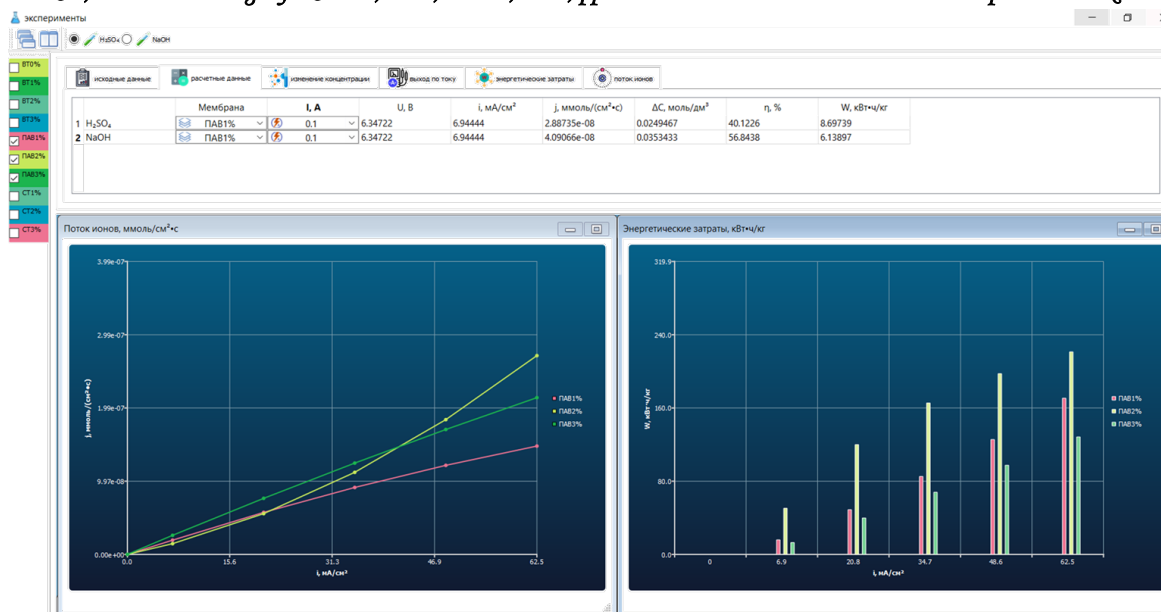


Рисунок 7. Вывод результатов расчета

Figure 7. Calculation results output

В окне «Исходные данные» выводятся начальные параметры процесса.

В отдельном окне «Расчетные данные» пользователь может выбрать мембрану, плотность тока и увидеть расчетные значения по выбранным параметрам в виде таблицы.

В окнах «Изменение концентрации», «Выход по току», «Энергетические затраты», «Поток ионов» приведены зависимости рассчитанного параметра от силы тока для всех исследуемых мембран в виде таблицы. При необходимости можно отдельно вывести графические зависимости для каждой определяемой характеристики процесса от плотности тока, а также выбрать исследуемые мембраны. Например, на рисунке 7 показаны зависимости потока ионов и энергетических затрат от плотности тока, при этом в верхнем углу выбрана кнопка «H₂SO₄». Анализ полученных зависимостей показывает, что при добавлении в катионообменный слой 2% по мас. ПАВ увеличивается поток ионов и значительно снижаются энергетические затраты.

Разработанный программный модуль может быть использован в качестве программного

обеспечения верхнего уровня управления разрабатываемой системой.

Работа программы обеспечивается выполнением следующих действий:

- выбор мембраны;
- ввод исходных данных;
- расчет параметров процесса;
- вывод рассчитанных параметров процесса на экран;
- вывод графических зависимостей технологических параметров как функции плотности тока на экран.

Применение данной компьютерной программы позволит моделировать и рассчитывать основные параметры процесса биполярного электролиза, а также прогнозировать дальнейшие эксперименты.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-685.2021.1.3)

Литература

- 1 Al-Dhubhani E., Pärnamäe R., Post J.W. et. al. Performance of five commercial bipolar membranes under forward and reverse bias conditions for acid-base flow battery applications // J. Memb. Sci. 2021. V. 640. P. 1–12. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119748
- 2 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б. Применение биполярного электролиза с модифицированными мембранами при очистке хромсодержащих сточных вод гальванического производства // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 10. С. 4–9. doi: 10.18412/1816-0395-2021-10-4-9
- 3 Козадерова О.А., Нифталиев С.И., Ким К.Б. Применение биполярных мембран МБ-2, модифицированных гидроксидом хрома (III), для конверсии сульфата натрия // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. № 3. С. 30–36. doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5811
- 4 Kozaderova O.A. Electrochemical characterization of an MB-2 bipolar membrane modified by nanosized chromium (III) hydroxide // Nanotechnologies in Russia. 2018. V. 13. № 9–10. P. 508–515. doi: 10.1134/S1995078018050075

- 5 Kozaderova O.A., Kim K.B., Belousov P.E. et al. Electrodialysis of a sodium sulphate solution with experimental bentonite-modified bipolar membranes // *Condensed Matter and Interphases*. 2021. V. 23. №. 4. P. 518–528. doi: 10.17308/kcmf.2021.23/3670
- 6 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б. и др. Получение бентонит-модифицированных биполярных ионообменных мембран и изучение их электрохимических характеристик // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 3. С. 216–225. doi: 10.20914/2310–1202–2021–3–216–225
- 7 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б. и др. Влияние гидрофобизатора на свойства экспериментальных бентонит-содержащих биполярных мембран // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. № 10. С. 120–127. doi: 10.6060/ivkkt.20226510.6686
- 8 Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М. Интегрированное проектирование энерго-и ресурсосберегающих химико-технологических процессов в системе управления: стратегия, методы и применение // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 1. С. 29–30.
- 9 Егوشина О.В., Большакова Н.А. Разработка системы контроля и управления водным режимом с учетом влияния нарушений химико-технологических процессов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): материалы международной научно-технической конференции. Иваново, 2019. С. 139–141.
- 10 Alekseev M.V., Kudryashov V.S., Gavrilov A.N. et al. Development and research of a digital control system for juice consumption after the diffusion apparatus in sugar production // International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021). 2022. V. 1052. P. 1–7. doi: 10.1088/1755–1315/1052/1/012140
- 11 Иванников А.Д., Кулагин В.П., Тихонов А.Н. и др. Геоинформатика. М.: МАКС Пресс, 2001. 349 с.
- 12 Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 592 с.
- 13 Кудряшов В.С., Иванов А.В., Алексеев М.В. и др. Поиск оптимальной тарелки питания колонны ректификации в производстве этилбензола при вариации расхода и состава питания // Автоматизация в промышленности. 2022. № 3. С. 32–37. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2022.03.05>
- 14 Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.
- 15 ГОСТ Р ИСО 10303–43–2002. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч. 43. Интегрированные обобщенные ресурсы. Представление структур. М.: Госстандарт России, 2003. 12 с.
- 16 ГОСТ Р 50.1.031–2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1: стадии жизненного цикла продукции. М.: Изд-во стандартов, 2004. 18 с.
- 17 Свойства мембран. URL: <http://www.ralex.eu/Membrany/Uvod.aspx>
- 18 Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б., Иванов А.В. и др. Программный модуль для расчета технологических параметров конверсии сульфата натрия с экспериментальными бентонит-модифицированными биполярными мембранами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664621. 2022.
- 19 Pärnamäe R., Mareev S., Nikonenko V., Melnikov S. et al. Bipolar membranes: A review on principles, latest developments, and applications // *Journal of Membrane Science*. 2021. V. 617. P. 118538. doi: 10.1016/j.memsci.2020.118538
- 20 Oener S.Z., Foster M.J., Boettcher S.W. Accelerating water dissociation in bipolar membranes and for electrocatalysis // *Science*. 2020. V. 369. №. 6507. P. 1099–1103. doi: 10.1126/science.aaz1487

References

- 1 Al-Dhubhani E., Pärnamäe R., W. Post J. et al. Performance of five commercial bipolar membranes under forward and reverse bias conditions for acid-base flow battery applications. *J. Memb. Sci.* 2021. vol. 640. pp. 1–12. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119748
- 2 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Application of bipolar electrodialysis with modified membranes for the purification of chromic wastewater from galvanic production // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. vol. 25. no. 10. pp. 4–9. doi: 10.18412/1816–0395–2021–10–4–9 (in Russian).
- 3 Kozaderova O.A., Niftaliev S.I., Kim K.B. Application of bipolar membranes MB-2 modified by chromium (III) hydroxide for sodium sulfate conversion process *ChemChemTech*. 2019. vol. 62. no. 3. pp. 30–36. doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5811 (in Russian).
- 4 Kozaderova O.A. Electrochemical characterization of an MB-2 bipolar membrane modified by nanosized chromium (III) hydroxide. *Nanotechnologies in Russia*. 2018. vol. 13. no. 9–10. pp. 508–515. doi: 10.1134/S1995078018050075
- 5 Kozaderova O.A., Kim K.B., Belousov P.E. et al. Electrodialysis of a sodium sulphate solution with experimental bentonite-modified bipolar membranes. *Condensed Matter and Interphases*. 2021. vol. 23. no. 4. pp. 518–528. doi: 10.17308/kcmf.2021.23/3670
- 6 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Obtaining bentonite-modified bipolar ion-exchange membranes and study of their electrochemical characteristics. *Proceedings of VSUET*. 2021. vol. 83. no. 3. pp. 216–225. doi: 10.20914/2310–1202–2021–3–216–225 (in Russian).
- 7 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. et al., Influence of a water repellent on the properties of experimental bentonite-containing bipolar membranes. *ChemChemTech*. 2022. vol. 65. no. 10. pp. 120–127. doi: 10.6060/ivkkt.20226510.6686 (in Russian).
- 8 Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Ostrovsky G.M. Integrated design of energy and resource-saving chemical-technological processes in the control system: strategy, methods and application. *Theoretical foundations of chemical technology*. 2008. vol. 42. no. 1. pp. 29–30. (in Russian).
- 9 Egoshina O.V., Bolshakova N.A. Development of a system for monitoring and managing the water regime, taking into account the impact of violations of chemical and technological processes. *Proceedings of the international scientific and technical conference "The state and prospects for the development of electrical and thermal technologies (Benardos readings)"*. Ivanovo. 2019. pp. 139–141. (in Russian).
- 10 Alekseev M.V., Kudryashov V.S., Gavrilov A.N. et al. Development and research of a digital control system for juice consumption after the diffusion apparatus in sugar production. *International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021)*. 2022. vol. 1052. pp. 1–7. doi: 10.1088/1755–1315/1052/1/012140

- 11 Ivannikov A.D., Kulagin V.P., Tikhonov A.N. etc. Geoinformatics. Moscow, MAKS Press, 2001. 349 p. (in Russian).
- 12 Kharazov V.G. Integrated control systems for technological processes. St. Petersburg, Profession, 2009. 592 p. (in Russian).
- 13 Kudryashov V.S., Ivanov A.V., Alekseev M.V. Search for the optimal feed plate of the distillation column in the production of ethylbenzene with variations in the flow rate and composition of the feed. Automation in industry. 2022. no. 3. pp.32–37. doi: 10.25728/avtprom.2022.03.05 (in Russian).
- 14 Tsvetkov V.Ya. Geoinformation systems and technologies. Moscow, Finance and statistics, 1998. 288 p. (in Russian).
- 15 GOST R ISO 10303–43–2002. Production automation systems and their integration. Presentation of product data and exchange of this data. Part 43. Integrated generalized resources. Representation of structures. Moscow, Gosstandart of Russia, 2003. 12p. (in Russian).
- 16 GOST R 50.1.031–2001. Recommendations for standardization. Information technologies for product life cycle support. Terminological dictionary. Part 1: stages of the product life cycle. Moscow, Publishing house of standards, 2004. 18p. (in Russian).
17. Properties of membranes. Available at: <http://www.ralex.eu/Membrany/Uvod.aspx> (in Russian).
- 18 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B., Ivanov A.V. et al. Software module for calculating technological parameters of sodium sulfate conversion with experimental bentonite-modified bipolar membranes. Certificate of state registration of the computer program. no. 2022664621. 2022. (in Russian).
- 19 Pärnamäe R., Mareev S., Nikonenko V., Melnikov S. et al. Bipolar membranes: A review on principles, latest developments, and applications. Journal of Membrane Science. 2021. vol. 617. pp. 118538. doi: 10.1016/j.memsci.2020.118538
- 20 Oener S.Z., Foster M.J., Boettcher S.W. Accelerating water dissociation in bipolar membranes and for electrocatalysis. Science. 2020. vol. 369. no. 6507. pp. 1099–1103. doi: 10.1126/science.aaz1487

Сведения об авторах

Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sabukhi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Ольга А. Козадерова д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kozaderova-olga@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8135-5801>

Андрей В. Иванов к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, andrious@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6034-9672>

Иван А. Козенко к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kosenko211986@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1508-9875>

Ксения Б. Ким к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kmkseniya@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

Максим С. Игумнов студент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, igumnov98.wot@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0856-2273>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sabukhi I. Niftaliev Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sabukhi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Olga A. Kozaderova Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, avenue Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, kozaderova-olga@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8135-5801>

Andrey V. Ivanov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, automated control systems for processes and productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, avenue Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, andrious@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6034-9672>

Ivan A. Kozenko Cand. Sci. (Engin.), associate professor, automated control systems for processes and productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, avenue Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, kosenko211986@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1508-9875>

Kseniya B. Kim Cand. Sci. (Chem.), associate professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, avenue Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, kmkseniya@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

Максим С. Игумнов Student, Department of Inorganic Chemistry and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, avenue Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia, igumnov98.wot@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0856-2273>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 19/09/2022	После редакции 25/10/2022	Принята в печать 22/11/2022
Received 19/09/2022	Accepted in revised 25/10/2022	Accepted 22/11/2022