

**Г. А. МУН^{1,3*}, З. М. ЕГЕМБЕРДИЕВА², Э. К. ТЕМЫРКАНОВА², С. В. КОНЬШИН²,
А. Ж. АЛИКУЛОВ^{1,3}, KINAM PARK⁴**

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

³Национальная инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Казахстан

⁴Purdue University, West Lafayette, USA

e-mail mungrig@yandex.ru, egem.zm@mail.ru, e.temyrkanova@aues.kz, s.konshin@aues.kz, alikulov.adilet@gmail.com

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Теоретически предсказано, что при протекании раствора низкомолекулярной соли через полиэлектrolитные сетку могут возникать электродвижущие силы, знак которых зависит от знака заряда сетки. Данное явление может быть использовано при разработке новых опреснительных систем, но для его дальнейшего изучения требуется разработка специфических измерительных инструментов и методик экспериментального исследования. Такие методики могут быть созданы за счет того, что системы на основе гидрогелей рассматриваемого типа обладают эквивалентными радиотехническими схемами, в состав которых входят реактивные компоненты (конденсаторы). Наличие конденсаторов в эквивалентной схеме связано с формированием двойных электрических слоев на границе гидрогеля и раствора. Для сеток с большой плотностью заряда амплитуда таких слоев может быть определена непосредственно на основе анализа баланса ионных токов в системе. Емкость конденсаторов, входящих в эквивалентную схему, может быть измерена за счет регистрации зависимости сдвига фазы между током и напряжением от частоты. Это, в свою очередь, позволяет разработать методику экспериментального исследования систем рассматриваемого типа при помощи зондирующих переменных токов малой амплитуды (метод радиотехнического зондирования).

Ключевые слова: радиотехническое зондирование, эквивалентные схемы, разность потенциалов, полиэлектrolитные гидрогели, деминерализация воды, двойной электрический слой, индуцированная электродвижущая сила.

Введение. Еще в основополагающих работах [1,2] было продемонстрировано особое значение двойных электрических слоев, возникающих на границе полиэлектrolитного гидрогеля и раствора, которые, в частности, определяют степень набухания полиэлектrolитных сеток. На этой основе, в том числе удастся развить последовательную теорию набухания полиэлектrolитных гидрогелей, основанную на получении первых интегралов уравнений, описывающих распределение низкомолекулярных ионов в рассматриваемой системе [1].

Данный подход, в котором для описания свойств гидрогелей используется приближение сплошной среды и базовые уравнения электростатики может быть распространен на изучение воздействия электрического тока на полиэлектrolитные сетки, что впервые было показано в [3]. В цитированной работе было доказано, что вариации электростатических сил, приводящих к изменению степени набухания полиэлектrolитных

* Адрес для переписки. E-mail: mungrig@yandex.ru

литного гидрогеля под воздействием электрического тока, могут быть определены на основе только лишь анализа баланса ионных токов, развивающихся в системе. Именно такой подход позволил обосновать обобщенный закон Фарадея, впервые экспериментально установленный в [4], на той же основе оказывается возможным проводить последовательно описание явлений, связанных с сосуществованием нескольких фаз при набухании полиэлектролитных гидрогелей [5].

В данной работе показано, что возможность сведения теоретического описания стационарной неравновесной системы, в которой через гидрогель протекают ионные токи, к анализу баланса токов позволяет перейти к эквивалентным радиотехническим схемам такого рода систем. Это, в свою очередь, позволяет далее перейти к разработке методики радиотехнического зондирования систем рассматриваемого типа, которая позволяет непосредственно определять характеристики двойных электрических слоев, определяющих ее поведение.

Данный метод становится особенно актуальным в свете необходимости совершенствования методов опреснения засоленных грунтовых вод для РК, в частности потому, что столица государства находится в регионе, где имеются в основном источники именно такой воды [6]. Нужно также принимать во внимание, что общая ориентация на зеленую энергетику неразрывно связана со снижением энергозатрат на любые процессы промышленного масштаба, а также со снижением нагрузки на окружающую среду.

Результаты и их обсуждение. Наиболее экологически приемлемыми являются методики опреснения, основанные на использовании цикла сжатия – набухания гидрогелей. В настоящее время известен целый ряд разновидностей такого рода методик опреснения [6,7], причем теоретическое описание любой из них укладывается в концепцию, восходящую к [1].

Однако их практическое использование затруднено необходимостью создавать ионные токи (например, вызывающие коллапс гидрогелей) при помощи сторонних сил (электрический ток [6] или механическое воздействие [7]). В то же время существует возможность реализовать ионный ток непосредственно при помощи протекания раствора через гель (Рис.1).

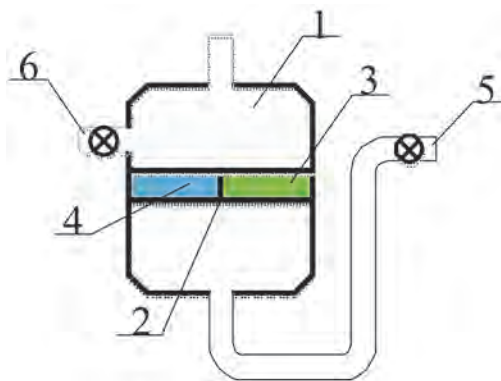


Рисунок 1 – Вариант схемы установки для обессоливания воды с использованием автодиализа

На данном рисунке показан вариант схемы, предназначенной для деионизации воды (обеднения воды по низкомолекулярным солям).

Данная схема включает в себя:

- емкость, в которую заливается обессоливаемая вода (1),
- мембранный слой (2), состоящий из катионообменной (3) и анионообменной (4) частей;
- трубки для отвода раствора, обогащенного (5) и обедненного (6) по низкомолекулярной компоненте, соответственно.

Устройство работает следующим образом. При истечении раствора низкомолекулярной соли через среду, в которой существует разность между концентрациями низкомолекулярных ионов противоположного знака заряда возникает потоковая разность потенциалов.

Механизм возникновения данной разности потенциалов иллюстрирует Рис.2, на котором показан пример, относящийся к ситуации, когда концентрация подвижных катионов в рассматриваемой среде превышает концентрацию подвижных анионов.

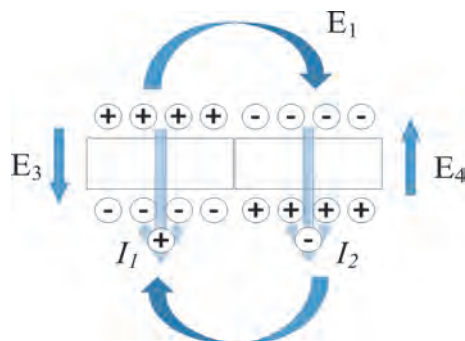


Рисунок 2 – Возникновение ЭДС при движении потока жидкости через составной мембранный слой гидрогеля

При условии, что через рассматриваемую среду протекает постоянный поток жидкости, содержащей низкомолекулярные ионы, данный поток вовлекает в свое движение, в том числе и те подвижные заряженные частицы, которые образуются вследствие диссоциации функциональных групп сетки. Так как концентрации подвижных, противоположно заряженных частиц в объеме сетки не совпадают, то такое движение (вместе с потоком жидкости) должно было бы приводить к нарушению условия электрической нейтральности среды внутри сетки. Иначе говоря, в этом случае потоки заряженных частиц противоположного знака заряда были бы не равны друг другу. Условие нейтральности соблюдается в том случае, когда внутри сетки (мембраны) развивается электрическое поле, которое препятствует движению тех ионов, которых имеется избыток. Очевидно, это же поле будет ускорять движение тех ионов, в которых имеется недостаток, т.е. возникновение такого поля обеспечивает баланс токов противоположно заряженных частиц в условиях, когда их концентрации не совпадают. Физический механизм возникновения этого поля связан с деформацией двойных электрических слоев, развивающихся на границе полиэлектролитной сетки и раство-

ра, которая имеет место при ненулевом потоке раствора через сетку, соответствующее теоретическое описание может быть развито непосредственно на основе результатов [1-3].

Применительно к схеме Рис. 1 и Рис. 2. это соответствует возникновению двух ЭДС, генерирующих встречное поле. Формально токи, развивающиеся в левой и правой частях составной мембраны, показанной на рис. 1, направлены навстречу друг другу, но это отвечает тому, что через одну часть мембраны движутся преимущественно положительно заряженные частицы, а через другую – отрицательно. Это приводит к тому, что совокупный поток заряженных частиц через мембранный элемент превышает поток тех же частиц через отвод, расположенный над мембраной, т.е. рассматриваемое устройство решает задачу по разделению исходного раствора на обогащенный и обедненный по низкомолекулярной компоненте. При этом такое разделение само по себе не требует затрат энергии, так как движение жидкости, обуславливающей разделение, происходит под воздействием гравитационного поля Земли.

Для экспериментального исследования процессов, способных обеспечить создание опреснительных методик такого типа критически важно разработать методику, позволяющую экспериментально измерять основные электрические характеристики ее элементов при протекании через них раствора. Вариант с использованием прямых электродных измерений не представляется оптимальным в силу легко прогнозируемого возникновения систематических ошибок. Наиболее перспективным является вариант с использованием зондовых переменных токов малой амплитуда, протекающих через систему или ее отдельные части.

Такого вариант является реализуемым на практике потому, что возможно указать эквивалентную радиотехническую схему (рис.3) любой из систем, подобных той, что показана на Рис. 1.

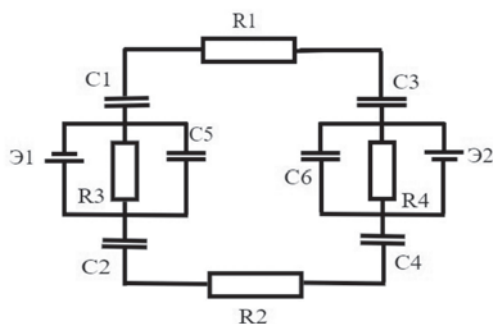


Рисунок 3 – Эквивалентная радиоэлектронная схема системы, реализующей автодиализ солевого раствора, представленной на Рис. 1

Данная схема соответствует схеме баланса токов, показанной на Рис. 4 и построенной по методике [2]. Она включает в себя резисторы R_1 и R_2 , отвечающие отдельным участкам раствора, разделенного мембранным слоем, резисторы R_3 и R_4 , отвечающие собственно мембранному слою, а также ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , возникающие вследствие описанного выше эффекта, связанного с протеканием раствора через область, заполнен-

ную полиэлектролитной сеткой. Основной ее особенностью является наличие конденсаторов $C_1 - C_4$, отражающих как существование двойных электрических слоев, так и конденсаторов C_5 и C_6 , возникающих вследствие накопления заряда на противоположных торцах мембранных слоев.

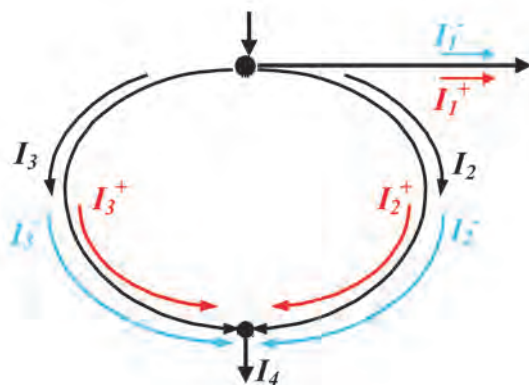


Рисунок 4 – Схема баланса электрических токов в рассматриваемой системе

С точки зрения классической радиотехники, такого рода схему можно рассматривать как «черный ящик», восстановление схемы которого и определение значений радиоэлектронных компонент, входящих в нее, подлежит определению на основании амплитудно-частотной и фазовых характеристик.

Это обстоятельство доказывает возможность использования переменных зондирующих токов малой амплитуды для доказательства адекватности теоретических подходов, положенных в основу автодиализных систем деминерализации. Действительно, в простейшем случае существует возможность экспериментально измерить сдвиг фаз между гармоническим током, протекающим через систему или ее отдельные элементы и создаваемым им падением напряжения. Наличие реактивных компонент (конденсаторов) неизбежно приведет к возникновению ненулевого сдвига фазы, зависящему от частоты. Преимуществом использования переменных зондирующих токов достаточно высокой также является тот факт, что они не вызывают коллапс геля, а также не приводят к появлению паразитных электрохимических явлений.

Таким образом, метод построения эквивалентных радиотехнических схем систем на основе полиэлектролитных гидрогелей является весьма перспективным с точки зрения изучения их свойств, особенно в плане совершенствования технологии деминерализации воды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Budtova T. V., Suleimenov I. E., Frenkel S. A diffusion approach to description of swelling of polyelectrolyte hydrogels // Polymer science. – 1995. – Т. 37, № 1. – P. 10-16.
- 2 Mun G.A., Suleimenov I.E., Nurkeeva Z.S., Kudaibergenov S.E., Nam I.K., Kan V.A. Effect of the Structural Inhomogeneity of Polyelectrolyte Gels on Their Thermal Sensitivity // Polymer Science, Ser. A.- 1998.-V.40, N 3.-P.253-259.

3 Suleimenov I., Pereladov I., Bekturov E. Theoretical Description of Polyelectrolyte Hydrogel Collapse in Electric Field //Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2002. – Т. 4, № 4. – P. 243-247.

4 Budtova T., Suleimenov I., Frenkel S. Electrokinetics of the contraction of a polyelectrolyte hydrogel under the influence of constant electric current //Polymer Gels and Networks. – 1995. – Т. 3, № 3. – P. 387-393.

5 Suleimenov I. E., Budtova T. V., Bekturov E. A. The kinetics of swelling of highly swelling hydrogels under the coexistence of two phases //Polymer science. Series A. – 2002. – Т. 44, № 9. – P. 1010-1015.

6 Suleimenov I.E., Mun G.A., Pak I.T., Kabdushev Sh.B., Kopishev E.E. Redistribution of the concentrations in polyelectrolyte hydrogels contacts as the basis of new desalination technologies // News of the national academy of sciences of the RK, Ser. of geology and technical sciences. – 2017. – Vol. 3, N 423. - P. 198-205.

7 Budtova T., Suleimenov I. Physical principles of using polyelectrolyte hydrogels for purifying and enrichment technologies //Journal of applied polymer science. – 1995. – Т. 57, №13. – P. 1653-1658.

**Г. А. МУН^{1,3}, З. М. ЕГЕМБЕРДИЕВА², Э. К. ТЕМЫРКАНОВА², С. В. КОНЬШИН²,
А. Ж. АЛИКУЛОВ^{1,3}, KINAM PARK⁴**

¹Әль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Қазақстан Республикасының ұлттық инженерлік академиясы, Алматы қ., Қазақстан

⁴Purdue University, West Lafayette, USA

ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТТИ ГИДРОГЕЛЬДЕР НЕГІЗІНДЕГІ ЭКВИВАЛЕНТТІ РАДИОТЕХНИКАЛЫҚ СХЕМА ЖҮЙЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ПРАКТИКАЛЫҚ ҚОЛДАНУ

Төменмолекулалы тұздың ерітіндісі полиэлектрoлит торы арқылы ағып жатқанда электр қозғаушы күштер пайда болуы мүмкін, оның белгісі тор зарядының белгісіне байланысты болады деп теориялық тұрғыдан болжам жасалынған. Бұл құбылысты жаңа тұзсыздандыру жүйелерін дамытуда қолдануға болады, бірақ оны одан әрі зерттеу үшін нақты өлшеу құралдары мен эксперименттік зерттеу әдістерін жасау қажет. Мұндай әдістерді қарастырылып отырған типтегі гидрогельдерге негізделген жүйелер реактивті компоненттерді (конденсаторларды) қамтитын балама радиотехникалық схемаларға ие болғандықтан жасауға болады. Эквивалентті тізбектегі конденсаторлардың болуы гидрогель мен ерітінді арасындағы шекарада қос электрлік қабаттардың пайда болуымен байланысты. Заряд тығыздығы жоғары торлар үшін мұндай қабаттардың амплитудасын жүйеде ион ағындарының тепе-теңдігін талдау арқылы тікелей анықтауға болады. Эквиваленттік схемаға енгізілген конденсаторлардың сыйымдылығын ток пен кернеу арасындағы фазалық ығысудың жиілікке тәуелділігін тіркеу арқылы өлшеуге болады. Бұл өз кезегінде кішігірім амплитудасының айнымалы токтарын зондтау (радиотехникалық зондтау әдісі) арқылы қарастырылып отырған типтегі жүйелерді эксперименттік зерттеудің әдістемесін жасауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: радиотехникалық зондтау, эквивалентті тізбектер, потенциалдар айырмасы, полиэлектрoлитті гидрогельдер, судың деминерализациясы, қос электр қабаты, индукцияланған электр қозғаушы күш.

**G. A. MUN^{1,3}, Z. M. YEGEMBERDYEVA², E. K. TEMYRKANOVA², S. V. KONSHIN²,
A. ZH. ALIKULOV^{1,3}, KINAM PARK⁴**

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

³ National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

⁴ Purdue University, West Lafayette, USA

EQUIVALENT RADIO ENGINEERING SCHEMES OF SYSTEMS BASED ON POLYELECTROLYTE HYDROGELS AND THEIR PRACTICAL USE

It is theoretically predicted that when a solution of a low-molecular salt flows through a polyelectrolyte grid, electromotive forces can occur, the sign of which depends on the sign of the grid charge. This phenomenon can be used in the development of new desalination systems, but its further study requires the development of specific measuring instruments and experimental research methods. Such techniques can be created due to the fact that systems based on hydrogels of the type in question have equivalent radio engineering circuits, which include reactive components (capacitors). The presence of capacitors in the equivalent circuit is associated with the formation of double electrical layers at the boundary of the hydrogel and the solution. For grids with a high charge density, the amplitude of such layers can be determined directly based on the analysis of the balance of ion currents in the system. The capacitance of the capacitors included in the equivalent circuit can be measured by recording the phase shift between current and voltage as a function of frequency. This, in turn, allows us to develop a methodology for experimental research of systems of the type under consideration using probing alternating currents of small amplitude (the method of radio-technical sounding).

Key words: radio engineering sensing, equivalent circuits, potential difference, polyelectrolyte hydrogels, water demineralization, double electric layer, induced electromotive force.