

COMPARISON AND SELECTION OF MEMBRANE MATERIAL FOR THE SUPERCAPACITORS, BASED ON AQUEOUS ELECTROLYTES

*O.Kaupbai, K.Maldybayev, T.Kan, M.Kiyatova, S.Kokhmetova, A.Kurbatov, F.Malchik**

*Center of Physical-Chemical Methods of Research and Analysis,
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: frodo-007@mail.ru*

Abstract. *Introduction* The development of new batteries, their components, and their control systems is an important task in our days. One of the most important parts of electrochemical current sources are electrodes (cathode and anode), electrolyte, membrane, and the corps itself. The membrane/separator is an important part of electrochemical energy storage devices such as supercapacitors and batteries. However, the transport processes, which limit the rate capability of the charge/discharge are more pronounced for the supercapacitors, which can be charged in seconds, unlike batteries; therefore, a more detailed selection of the material and porosity of the membranes is required for them. The purpose. Using the method of cyclic voltammetry to develop a method for assessing the contribution of additional membrane resistance. *Methodology.* Cyclic voltammetry at various scan rates (from 1 to 100 mV/s) has shown that at the low scan rates there is no significant contribution of the membrane to the overall electrochemical response, however, at the high scan rates, their significant effect is observed due to the additional resistance of transport processes in the electrolyte. *Results and discussion.* As a result of a comparative analysis of 4 membranes (commercial and that are available in a laboratory) it has been determined that the membrane based on PVdF has the least additional resistance in the concentrated solution of LiCl, while in the concentrated solution of NaClO₄TF4050 has the least additional resistance. *Conclusion.* In general, for preliminary electrochemical studies, the possibility of using not specialized membranes under certain conditions has been shown.

Key words: membrane, cyclic voltammetry, transport processes, membrane resistance, comparative analysis

<i>Kaupbai Olzhas</i>	<i>Master, Junior researcher; E-mail: rustyryan799@gmail.com</i>
<i>Maldybayev Kaiyrgali</i>	<i>Master, Junior researcher; E-mail: kaiyrgali.m.m@mail.ru</i>
<i>Kan Tatyana</i>	<i>Bachelor, Junior researcher; E-mail: tatyana.qan@gmail.com</i>
<i>Kiyatova Marzhan</i>	<i>Master, Junior researcher; E-mail: kiyatova20.05@mail.ru</i>
<i>KokhmetovaSaule</i>	<i>Master, Junior researcher; E-mail: tornatore@mail.ru</i>
<i>Kurbatov Andrei</i>	<i>Doctor of chemical sciences, Professor; E-mail: kurbatovap@gmail.com</i>
<i>Malchik Fyodor</i>	<i>PhD, Assoc. Professor, Head of the Laboratory of Electrochemical Productions; E-mail: frodo-007@mail.ru</i>

Citation: Kaupbai O., Maldybayev K., Kan T., Kiyatova M., Kokhmetova S., Kurbatov A., Malchik F. Comparison and selection of membrane material for the supercapacitors, based on aqueous electrolytes. *Chem. J. Kaz.*, **2023**, 4(81), 24-33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2023-1.2710-1185.03>

СРАВНЕНИЕ И ПОДБОР МАТЕРИАЛА МЕМБРАНЫ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ ВОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

*О.Ш.Қауыпбай, Қ.М.Малдыбаев, Т.В.Кан, М.К.Киятова, С.Т.Кохметова,
А.П.Курбатов, Ф.И.Мальчик**

*Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: frodo-007@mail.ru*

Резюме: *Введение.* Разработка новых батарей, их комплектующих и систем их управления является важной задачей в наше время. Одними из важнейших частей электрохимических источников тока являются: электроды (катод и анод), электролит, мембрана и сам корпус. Мембрана/сепаратор является важным компонентом электрохимических накопителей энергии, таких как суперконденсаторы и батареи. Однако транспортные процессы, лимитирующие скоростные характеристики заряда/разряда, более выражены для суперконденсаторов, которые могут заряжаться за секунды, в отличие от батарей, поэтому к ним предъявляется более детальный подбор материала и пористости мембран. *Цель.* Методом циклической вольтамперометрии разработать способ оценки вклада дополнительного сопротивления мембраны. *Методология.* Циклические вольтамперные исследования при различных скоростях развертки (от 1 до 100 мВ/с) показали, что при низких скоростях развертки не наблюдается значительного вклада мембраны в общий электрохимический отклик, однако при высоких скоростях развертки наблюдается их значительное влияние, обусловленное дополнительным сопротивлением транспортных процессов в электролите. *Результаты и обсуждение.* В результате сравнительного анализа 4 мембран (коммерческих и тех, которые есть под рукой в лаборатории) определено, что наименьшим дополнительным сопротивлением обладает мембрана на основе PVdF в концентрированном растворе LiCl, а в концентрированном растворе NaClO₄ – TF4050. *Заключение.* В целом, для предварительных электрохимических исследований при определенных условиях показана возможность использования не специализированных мембран, а подручных фильтров.

Ключевые слова: мембрана, цикловольтамперометрия, транспортные процессы, сопротивление мембраны, сравнительный анализ

<i>Қауыпбай Олжас Шыңғысулы</i>	<i>Магистр химии, младший научный сотрудник</i>
<i>Малдыбаев Кайырғали Муратович</i>	<i>Магистр, младший научный сотрудник</i>
<i>Кан Татьяна Владимировна</i>	<i>Бакалавр химии, младший научный сотрудник</i>
<i>Киятова Маржан Қуанышбаевна</i>	<i>Магистр химии, младший научный сотрудник</i>
<i>Кохметова Сауле Талғатовна</i>	<i>Магистр химии, младший научный сотрудник</i>
<i>Курбатов Андрей Петрович</i>	<i>Доктор химических наук, профессор</i>
<i>Мальчик Федор Игоревич</i>	<i>PhD доктор</i>

1. Введение

Конденсаторы с запасанием заряда в двойном электрическом слое, известные также как суперконденсаторы, рассматриваются как одно из основных устройств для переработки и сбережения электрической энергии наряду с батареями и топливными элементами [1,2]. Суперконденсаторы могут быть использованы как самостоятельные устройства хранения/выделения энергии для электротранспорта, портативной электроники и др. [2], так и совместно с батареями при параллельном или последовательном подключении для компенсации мощности устройства. Основной отличительной характеристикой суперконденсаторов от

перезаряжаемых гальванических элементов является высокая удельная мощность, быстрое время заряда/разряда (до нескольких секунд) и высокий ресурс циклируемости (до 1000000 циклов) [3]. Тем не менее, суперконденсаторы по-прежнему страдают от низкой плотности энергии – малая емкость устройства. Конденсаторы с двойным электрическим слоем хранят энергию в приэлектродном слое (электрод/электролит) за счет электростатических сил, в то время как псевдоконденсаторы обладают другим механизмом хранения энергии. Это быстрая обратимая поверхностная Red/Ox реакция, однако удельные мощность и энергия суперконденсаторов и псевдоконденсаторов сопоставимы [4].

Как и любая электрохимическая система преобразования химической энергии в электрическую, суперконденсатор состоит из 5 основных элементов: катод, анод, мембрана, электролит и корпус устройства. Абсолютно все основные перечисленные компоненты важны и при недостаточной доработке могут лимитировать показатели всего устройства. Основное назначение мембраны — предотвращение электронного контакта между электродами с сохранением возможности ионного обмена. Однако в зависимости от типа суперконденсаторов мембрана может являться и барьером для проникновения определенного вида ионов из анодного пространства в катодное или наоборот.

Существует большое количество пористых материалов, способных выполнять роль мембраны для суперконденсаторов, однако основными коммерческими вариантами являются целлюлознобумажные, полимерные мембраны (полипропиленовые, полиэтиленовые, фторопластовые) и на основе стекловолокна [5]. Следует учитывать несколько ключевых факторов при выборе мембраны для суперконденсаторов: толщину, пористость, устойчивость на разрыв, смачиваемость электролитом, химическую стойкость в выбранном электролите. Толщина и пористость значительно влияют на мощностные показатели суперконденсатора, так как могут лимитировать скорость переноса ионов; малая толщина приведет к меньшему сопротивлению, а более высокая пористость будет способствовать быстрому переносу ионов между электродами.

Таким образом, выбор мембраны для суперконденсатора является ответственной задачей. Причем при исследовании непосредственно электродных материалов (катада или анода) необходимо быть уверенным, что мембрана не вносит отрицательного вклада в электрохимический отклик. Зачастую в лабораторных исследованиях электродных материалов суперконденсаторов при использовании разных электролитов не уделяют достаточного внимания выбору мембраны для суперконденсатора. Однако это может повлиять на электрохимический отклик при высоких скоростях развертки (циклическая вольтамперометрия (ЦВА)) или при испытании высокими токами (гальваностатический анализ (ГСА)).

В данной статье показан пример влияния мембраны и способ ее подбора для суперконденсатора методом ЦВА, а также возможность

использования подручных пористых материалов в качестве мембран для точных лабораторных испытаний суперконденсаторов.

2. Экспериментальная часть

В работе исследованы 4 вида мембран/сепараторов для суперконденсаторов на основе водных электролитов: целлюлозно-бумажный сепаратор TF4050 и VL100 (Nippon Kodoshi Corporation, Япония); фильтровальная бумага – синяя лента «ООО Мелиор XXI» (filter); фильтр на основе PVdF (DuraPore® Membrane Filter, 0,45 мкм). Для испытания мембран использовали трехэлектродную ячейку типа «T-cell» с постоянными компонентами ячейки, которые не должны вносить изменения в электрохимический отклик методом ЦВА. В качестве рабочего электрода выступал 2D материал $Ti_3C_2T_x$ «MXene», метод синтеза и основные физико-химические характеристики которого описаны в [6].

Вспомогательный электрод – углеродная ткань с избытком по емкости относительно рабочего электрода. Электрод сравнения – стандартный хлорсеребряный электрод (Ag/AgCl). В качестве электролита использовали насыщенные растворы LiCl (≈ 14 М) и NaClO₄ (≈ 10 М), которые зарекомендовали себя как водные электролиты для Li и Na источников тока с расширенным окном электрохимической стабильности (ОЭС), соответственно [7,8]. Все эксперименты для достоверности воспроизводились по 2 раза. Электрохимические испытания ЦВА были выполнены на приборе Biologic SP-300. Для исследования морфологии мембран был использован оптический микроскоп Leica DM 6000 M.

3. Результаты и обсуждение

Основная идея данной статьи – показать возможность использования обычных мембран/сепараторов для достоверных лабораторных испытаний материалов суперконденсаторов, а также показать способ сравнения вклада мембраны в электрохимический отклик методом ЦВА. Для этой цели были выбраны две коммерческие целлюлозно-бумажные мембраны, использующиеся для металл-ионных батарей на водной основе: TF4050 и VL100, а также обычная целлюлозно-бумажная фильтровальная бумага (далее – filter) и обычный мембранный фильтр на основе PVdF.

Толщины исследуемых мембран, измеренные микрометром, составляют 50, 80, 140 и 120 мкм для TF4050, VL100, filter и PVdF, соответственно. Структура целлюлозных мембран представлена волокнистой составляющей, которая и образует поры при перекрещивании волокон. Наименьшая толщина волокон до величины наноразмерных наблюдается для мембраны TF4050. Мембраны Filter и VL100 имеют более равномерные волокна с диаметром от 2 до 20 мкм (рисунок 1a,b,c). Морфологию и пористость PVdF фильтра не удаётся изучить при данном увеличении, однако производитель заявляет, что средний диаметр пор равен 450 нм (рисунок 1d).

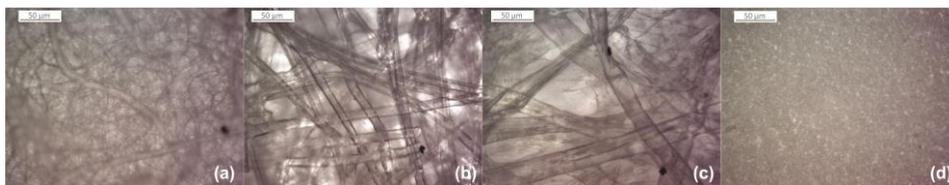


Рисунок 1– Микрофотографии исследуемых мембран, полученные на оптическом микроскопе: а) TF4050; б) VL100; в) filter; д) PVdF фильтр.

Вид циклической вольтамперной кривой материала $Ti_3C_2T_x$, как и многих электродных материалов обладающих механизмом накопления заряда в двойном электрическом слое, представляет собой прямоугольную форму [6,8,9]. Мембрана в данном случае играет роль сепаратора и не должна влиять на форму кривой при низких скоростях развертки, где диффузионные ограничения не выражены.

Однако при больших скоростях развертки (большие плотности тока), где диффузионные ограничения более выражены, мембрана может вносить дополнительное сопротивление движению сольватированных ионов от положительного электрода к отрицательному и наоборот. На рисунке 2 представлены графики ЦВА кривых материала MXene в трехэлектродной ячейке в электролитах LiCl и NaClO₄. При относительно медленной скорости развёртки (1 мВ/с) наблюдаются прямоугольные формы кривых и практически полная их сходимость вне зависимости от мембраны, что свидетельствует о несущественном вкладе мембраны в полное сопротивление электрохимической ячейки при таком режиме.

Два обратимых пика (-152 мВ катодный; + 172 мВ анодный), прослеживающиеся только в литий хлоридном электролите, соответствуют де/интекаляции десольватированных катионов лития, что приводит к резкому изменению межслоевого расстояния между пластинами MXene. Это необычное поведение позволяет внедриться дополнительному количеству ионов лития при положительных потенциалах, тем самым увеличивая количество запасенной энергии, что выражается в появлении дополнительных пиков на ЦВА кривой [10].

При увеличении скорости развертки более выражено проявляются транспортные ограничения в электролите, что выражается в уменьшении общей накопленной емкости в двойном электрическом слое и в изменении формы кривой, поскольку наблюдается сужение прямоугольной формы.

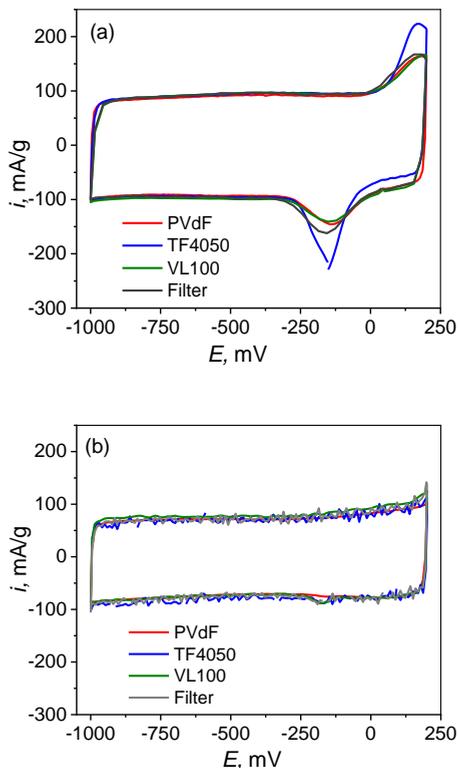


Рисунок 2 – ЦВА кривые материала MXene в концентрированных электролитах LiCl (а) и NaClO₄ (б), $v = 1$ мВ/с, 5^{милл} цикл.

Дополнительное сопротивление, накладывающееся при увеличении скорости развертки, из-за транспортных ограничений выражается в «сглаживании» углов прямоугольной формы ЦВА кривой [3,11] до практически эллипсоидной формы, как видно на примере материала MXenes мембраной PVdF в обоих электролитах (рисунок 3). ЦВА кривые с другими мембранами выглядят аналогичным образом, но полной сходимости в форме кривых с различными мембранами при высокой скорости развертки уже не наблюдается, также как в случае с малой скоростью развертки 1 мВ/с (рисунок 2), что обсуждено ниже.

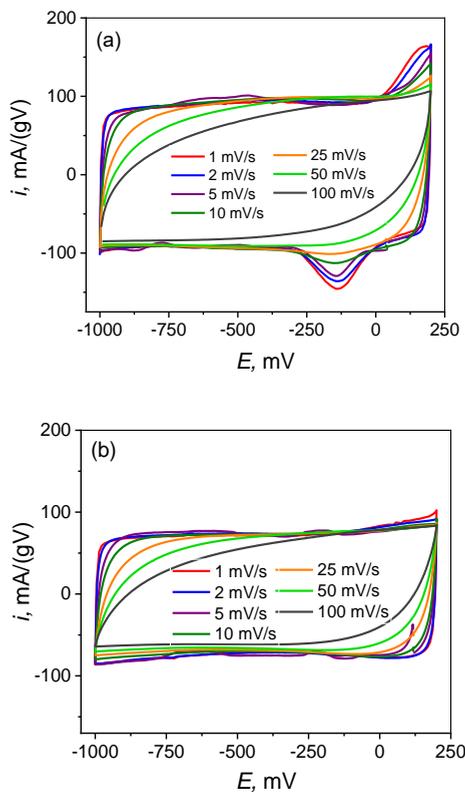


Рисунок 3 – ЦВА кривые материала МХене в концентрированных электролитах LiCl (а) и NaClO₄ (б) с мембраной PVdF при различных скоростях развертки.

Существенное различие в форме кривых наблюдается с 10 мВ/с и выше для различных мембран, объясняющееся различным вкладом в общее сопротивление процесса заряда в электролите. Лимитирование заряда/разряда двойного электрического слоя поверхности материала МХене при использовании различных мембран объясняется ионно-пропускной способностью мембран, зависящей не только от пористости и толщины, но и от возможных взаимодействий проходящих ионов с материалом мембраны (электростатические, адсорбционные и др.) Поэтому при использовании различных мембран при высокой скорости развертки мы можем наблюдать некоторый вклад дополнительного сопротивления (рисунок 4).

Из рассмотренных кривых на рисунке 4 видно, что мембрана на основе PVdF дает наименьший вклад в общее сопротивление в LiCl концентрированном электролите, в то же время она обладает худшими показателями в NaClO₄ электролите.

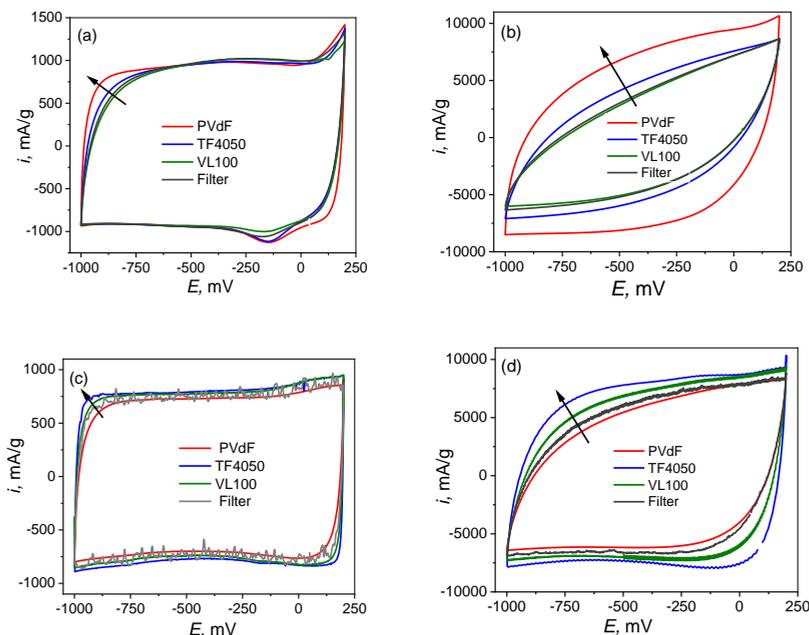


Рисунок 4 – ЦВА кривые материала MXene в концентрированных электролитах LiCl (а – 10 мВ/с; б – 100 мВ/с) и NaClO₄ (с – 10 мВ/с; д – 100 мВ/с) с различными мембранами, 5^{ый} цикл.

Увеличение вклада мембраны на основе PVdF в общее сопротивление при смене электролита может объясняться как различным взаимодействием Na⁺ и ClO₄⁻ ионов с материалом мембраны, так и их различной пропускной способностью в гидратированной форме через поры мембраны в сравнении с Li⁺ и Cl⁻.

Коммерческая мембрана TF4050 в литиевом электролите обладает немного большим сопротивлением по сравнению с PVdF, однако в натриевом электролите она имеет наилучшие показатели (рисунок 4, синяя кривая) поэтому, в нашем случае она является более универсальной. Мембраны VL100 и обычный фильтр (filter) имеют наихудшие показатели в литиевом электролите и средние показатели в натриевом электролите (относительно других выбранных мембран).

Исходя из проведенного исследования, можно с уверенностью сказать, что выбранные целлюлозно-бумажные мембраны, как коммерческие, так и обычный пористый фильтр, а также мембрана на основе PVdF пригодны для электрохимического исследования материалов суперконденсаторов при низких скоростях развертки методом ЦВА. Однако при исследовании скоростных характеристик заряда/разряда и для длительного циклирования необходимо использовать специализированные мембраны для металл-ионных батарей (на органической или водной основе), причем для каждого катиона будут свои требования для мембраны. Исследованная мембрана для

фильтрация на основе PVdF также пригодна в качестве сепаратора для детального исследования литий-ионных суперконденсаторов.

4. Заключение

В работе показан сравнительный анализ мембран для металл-ионных суперконденсаторов на водной основе. Показано, что вид мембраны существенно влияет на электрохимический отклик в связи с возрастанием влияния транспортных ограничений в электролите при высоких скоростях развертки или плотностях тока. Показано, что возможно использовать подручные мембраны как пористый целлюлознобумажный фильтр или фильтр на основе PVdF для предварительных электрохимических исследований материалов суперконденсатора при низких скоростях развертки, где мембраны не вносят существенного вклада. Фильтр на основе PVdF наиболее подходит для детальных исследований материалов суперконденсаторов в водном LiCl электролите.

Финансирование: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09058354).

Благодарности: Выражаем благодарность Nippon Kodoshi Corporation за предоставление мембран TF4050 и VL100.

Конфликт интересов: В работе отсутствует конфликт интересов между авторами.

СУЛЫ ЭЛЕКТРОЛИТТЕР НЕГІЗІНДЕГІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРЛАРҒА ҚАЖЕТ МЕМБРАНА ҮШІН МАТЕРИАЛДЫ САЛЫСТЫРУ ЖӘНЕ ТАҢДАУ

*О.Ш.Қауыпбай, Қ.М.Малдыбаев, Т.В.Кан, М.К.Киятова, С.Т.Кохметова, А.П.Курбатов, Ф.И.Мальчик**

*Физика-химиялық талдау және зерттеу орталығы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: frodo-007@mail.ru*

Түйіндеме: *Кіріспе.* Портативті өнімдердің өсу қарқынына байланысты электромобильдерге сұраныстың артуы және тұтастай алғанда қалалардың энергия тұтынуының артуы жаңартылатын энергияны пайдалануды ынталандырды. Сондықтан жана аккумуляторларды, олардың құрамдас бөліктерін және оларды басқару жүйелерін жасау біздің заманымыздың маңызды міндеті болып табылады. Электрохимиялық ток көздерінің маңызды бөліктерінің бірі: электродтар (катод және анод), электролит, мембрана және дененің өзі. *Мақсаты.* Мембрана / сепаратор – бұл суперконденсаторлар мен батареялар сияқты электрохимиялық энергия қоймаларының маңызды құрамдас бөлігі. Алайда, аккумуляторлардан айырмашылығы бір секунд ішінде зарядтауға болатын суперконденсаторлар үшін зарядтың/разрядтың жылдамдық сипаттамаларын шектейтін тасымалдау процестері анағұрлым айқын, сондықтан оларға мембраналардың материалы мен кеуектілігін егжей-тегжейлі таңдау ұсынылады. *Мақсаты.* Жұмыста циклдік вольтамперометрия әдісімен мембрананың қосымша кедергісінің үлесін бағалау әдісі көрсетілген. *Нәтижелер.* Әр түрлі жайылу жылдамдығындағы (1-ден 100 мВ/с-қа дейін) циклдік вольтамперометрия зерттеулері төменгі жайылу жылдамдығында мембрананың жалпы электрохимиялық реакцияға айтарлықтай үлесі жоқ екенін көрсетті, алайда жоғары жайылу жылдамдығында олардың айтарлықтай әсері байқалады, ол электролиттегі тасымалдау процестерінің қосымша кедергісі. 4 мембрананы салыстырмалы талдау нәтижесінде: TF4050 және VL100 целлюлоза-қағаз сепараторы (Nippon Kodoshi Corporation, Жапония); сүзгі қағазы – "ООО melior XXI" жөк таспасы (filter); поливинилиденфторид негізіндегі сүзгі (PVdF) (Durapore® Membrane Filter), PVDF негізіндегі

каныққан LiCl ерітіндідегі мембрана ең аз қосымша қарсылыққа ие екендігі анықталды, ал концентрацияланған ерітіндіде NaClO_4 – TF4050. Қорытынды. Жалпы, алдын-ала электрохимиялық зерттеулер үшін арнайы жасалған мембраналарды емес, белгілі бір жағдайларда импровизацияланған сүзгілерді қолдану мүмкіндігі көрсетілген.

Түйінді сөздер: мембрана, цикловольтамперометрия, тасымалдау процестері, мембраналық қарсылық, салыстырмалы талдау

Қауыпбай Олжас Шыңғысұлы	<i>Химия магистрі, кіші ғылыми қызметкер</i>
Малдыбаев Кайырғали Муратович	<i>Химия магистрі, кіші ғылыми қызметкер</i>
Кан Татьяна Владимировна	<i>Химия бакалаві, кіші ғылыми қызметкер</i>
Киятова Маржан Қуанышбаевна	<i>Химия магистрі, кіші ғылыми қызметкер</i>
Кохметова Сауле Талғатовна	<i>Химия магистрі, кіші ғылыми қызметкер</i>
Курбатов Андрей Петрович	<i>Химия ғалымдарының докторі, профессор</i>
Мальчик Федор Игоревич	<i>PhD доктор</i>

References

1. Poonam, Sharma K., Arora A., Tripathi S.K. Review of supercapacitors: Materials and devices. *J. Energy Storage*, **2019**, *21*, 801–825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010>
2. Sharma P., Kumar V. Current Technology of Supercapacitors: A Review. *J. Electron. Mater.* **2020**, *49*, 3520–3532. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07992-4>
3. Abdel Maksoud M.I.A., Fahim R.A., Shalan A.E., AbdElkoudou M., Olojede S.O., Osman A.I., Farrell C., Al-Muhtaseb A.H., Awed A.S., Ashour A.H., Rooney D.W.. Advanced materials and technologies for supercapacitors used in energy conversion and storage: a review, *Springer International Publishing*. **2021**, *19*, 375–439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01075-w>
4. Dubal D.P., Ayyad O., Ruiz V., Gómez-Romero P. Hybrid energy storage: The merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chem. Soc. Rev.* **2015**, *44*, 1777–1790. DOI: <https://doi.org/10.1039/c4cs00266k>
5. Ahankari S., Lasrado D., Subramaniam R. Advances in materials and fabrication of separators in supercapacitors. *Mater. Adv.* **2022**, *3*, 1472–1496. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1MA00599E>
6. Malchik F., Shpigel N., Levi M.D., Mathis T.S., Mor A., Gogotsi Y., Aurbach D. Superfast high-energy storage hybrid device composed of MXene and Chevrel-phase electrodes operated in saturated LiCl electrolyte solution. *J. Mater. Chem. A*. **2019**, *7*, 19761–19773. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ta08066j>
7. Lee M.H., Kim S.J., Chang D., Kim J., Moon S., Oh K., Park K.Y., Seong W.M., Park H., Kwon G., Lee B., Kang K. Toward a low-cost high-voltage sodium aqueous rechargeable battery. *Mater. Today*. **2019**, *29*, 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.02.004>
8. Greaves M., Barg S., Bissett M.A. MXene-Based Anodes for Metal-Ion Batteries. *Batter. Supercaps*. **2020**, *batt.201900165*. DOI: <https://doi.org/10.1002/batt.201900165>
9. Vijayakumar M., Elsa G., Nirogi A., Navaneethan R., Sankar A.B., Karthik M. MXenes and their composites for hybrid capacitors and supercapacitors: a critical review, *Emergent Mater.* **2021**, *4*, 655–672. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00204-7>
10. Wang X., Mathis T.S., Sun Y., Tsai W., Shpigel N., Shao H., Zhang D., Hantanasirisakul K., Malchik F., Balke N., Jiang D., Simon P., Gogotsi Y. Titanium Carbide MXene Shows an Electrochemical Anomaly in Water-in-Salt Electrolytes. *ACS Nano*. **2021**, *15*, 15274–15284. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c06027>
11. Mathis T.S., Kurra N., Wang X., Pinto D., Simon P., Gogotsi Y. Energy Storage Data Reporting in Perspective—Guidelines for Interpreting the Performance of Electrochemical Energy Storage Systems. *Adv. Energy Mater.* **2019**, *9*, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201902007>