

06

Термогравиметрические исследования дегидратации ацетатцеллюлозного слоя в композиционных пленках УАМ-100, УАМ-150 и МГА-95

© С.И. Лазарев,¹ Ю.М. Головин,¹ С.В. Ковалев,^{1,2} Д.С. Лазарев,¹ А.А. Левин¹

¹ Тамбовский государственный технический университет,
392000 Тамбов, Россия

² Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
392000 Тамбов, Россия
e-mail: mig@tstu.ru, sseedd@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2020 г.

В окончательной редакции 29 августа 2020 г.

Принято к публикации 8 сентября 2020 г.

Представлен аналитический обзор по исследованию кинетических и физико-химических характеристик композитных мембранных пленок. Методом термогравиметрии исследованы композиционные пленки УАМ-100, УАМ-150 и МГА-95 в температурном интервале от 30–300°C. Проведен кинетический анализ экспериментальных данных по методу Фримена–Кэрролла. Установлено, что гидратная вода для всех исследуемых полупроницаемых пленок испаряется в температурном интервале от ~95 до ~180°C. Сопоставление отношений количества удаленной воды в образцах исследуемых пленок коррелируется с геометрическими параметрами пор. Величины энергии активации и предэкспоненциального множителя ($E = 26.9 \text{ кДж/моль}$ и $\ln(A \approx 6.3 \text{ (мин}^{-1}\text{)})$) в интервале $0.2 < \alpha < 0.7$ степени дегидратации указывают на одинаковую закономерность распределения молекул воды в полимолекулярном слое для всех композиционных пленок. Высокие значения дегидратации, например, для образца композиционной полупроницаемой пленки МГА-95 при температуре максимума на кривой термогравиметрии ($T_{\text{max}} = 169.6^\circ\text{C}$) свидетельствуют о том, что молекулы воды образуют водородные связи как с ионогенными группами ацетата целлюлозы, так и между собой.

Ключевые слова: термогравиметрия, структура, водородная связь, пленка, энергия активации, сорбционная емкость, предэкспоненциальный множитель.

DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50522.163-20

Введение

Современные тенденции развития методов разделения растворов продиктованы разработкой более совершенных по сравнению с предыдущими годами технологий очистки загрязненных промышленных жидкостей. Подобные технологии в настоящее время реализуются с применением различных комбинаций методов (химических, физико-химических, электрохимических, биологических) разделения технологических растворов и сточных вод. Перспективным вариантом для разделения подобных технологических растворов и сточных вод является использование баромембранных и электро-мембранных методов выделения ценных компонентов. При этом наиболее важным этапом работы является исследование системы „мембранная пленка–раствор“ при температурном воздействии, особенно при изменении пленками своих структурных характеристик, при варьировании температуры раствора и ряда других параметров.

Поэтому важным этапом настоящей работы является анализ влияния температуры на изменения кинетических характеристик в системе „мембранная пленка–раствор“ современным физическим методом.

1. Аналитический обзор

В работе [1] показана возможность повышения эффективности катализа и использования платины в электрохимических преобразователях энергии за счет использования химически функционализированных многостенных углеродных нанотрубок. Показана возможность изготовления на их основе мембранно-электродных блоков с удельной мощностью до 581 мВт/см^2 . В литературе [2] представлены данные о структуре катодных каталитических слоев воздушно-водородных топливных элементов и разработана модель тепломассопереноса и массопереноса в этих слоях. Авторами работы [3] проведена оценка состояния воды и предельных алифатических спиртов в катионообменных мембранных материалах различной химической природы. На основании результатов термогравиметрического анализа предложен расчет кинетических параметров процессов дегидратации и десольватации материалов, на основе которого сформулирован вывод о влиянии матрицы мембранного материала на состояние воды и спиртов в полимерах. Авторами [4] отмечается, что благодаря высокой скорости измерения дифракционных спектров удалось проследить эволюцию ламеллярной структуры липидного бислоя пленок в

реальном времени в ходе процессов его гидратации и дегидратации. В источнике [5] отмечается, что процесс дегидратации проходит в три стадии. Полимерная пленка образуется на второй ступени второй стадии, затем подвергается высокотемпературной дегидроциклизации (третья ступень $T = 453$ К), где проходит процесс отщепления воды с образованием имидных связей, а также удаление остатков растворителя из продукта. Авторами работы [6] на основе пространственно-энергетических представлений разработана методология оценки энергии активации диффузионных процессов в биологических пленках. В литературе [7] показаны результаты исследования золь-гель синтеза гибридных композитов на основе карбофункциональных кремний-органических мономеров тиокарбамид или пиридина и сополимеров этиленгликоля винилглицидилового эфира с винилхлоридом. Синтезированные подобным образом композиты содержат полупрозрачные полимерные сетки, состоящие из трехмерных и линейных полимеров, которые не могут быть разделены из-за механического переплетения их цепей. Авторами работы [8] представлены результаты золь-гель синтеза с участием тетраэтоксисилана и гетероароматических производных сульфокислот (2-фенил-5-бензимидазолсульфокислота и 3-пиридинсульфокислота) в присутствии ортофосфорной кислоты и поливинилбутираля, которые привели к получению пленок, обладающих хорошей протонной проводимостью, удельной электропроводностью при 353 К, ионообменной емкостью и энергией активации протонного переноса более 20 кДж/моль. В работе [9] отмечается, что золь-гель синтезом с участием таких сополимеров и тетраэтоксисилана получены гибридные пленки, состоящие из полимерной матрицы, в которой равномерно распределены частицы гидратированного диоксида кремния. Полимерные пленки характеризуются протонной проводимостью до $1.85 \cdot 10^{-2}$ S/cm, ионообменной емкостью — 2.1 meq/g, термостойкостью — 412°C. Энергия активации протонной проводимости составляет 12 ± 2 кДж/моль. Авторами работы [10] методом термогравиметрии установлено, что сорбция тирозина и применение мембран (гетерогенных катионообменных Fumasep FTSM и анионообменных Fumasep FTAM в водородной и гидроксильной формах соответственно, в форме, сорбирующей аминокислоту (тирозин)) в электролизе, вызывают уменьшение гидратации материалов, что влияет на массоперенос аминокислоты. В литературе [11] отмечается, что применение методов ИК-, РФЭ-спектроскопии, термогравиметрии и сканирующей растровой микроскопии позволяет получить удовлетворительные экспериментальные данные по исследованию структуры исследуемых образцов модифицированных трековых мембран на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ ТМ) с диаметром пор 450 ± 12 nm. В материалах исследования [12] показано, что на основе ионообменной МФ-4СК и полисульфамной кислоты получены протонпроводящие материалы, для которых исследованы их физико-химические свойства. Исследование зависимости проводимости протонов от температуры показывает,

что энергия активации уменьшается с допированием ионообменной МФ-4СК полисульфамной кислотой с 16.8 до 12.9 кДж/моль. Автором работы [13] было установлено, что энергии элементарного транспортного акта в ионообменниках для однозарядных ионов определяются преимущественно водородными связями, а для протонных ионов более высокого числа зарядов, кроме водородных связей, существенную роль играют ионные связи. В работе [14] показано влияние воздействия плазмы и стерилизации на уменьшение пропускной способности трековых мембран ТМ, связанных с увеличением степени кристалличности и образованием артефактов подобных материалов.

На основе проведенного аналитического обзора [1–14] можно отметить, что исследование композиционных пленок с применением метода термогравиметрии позволяет исследовать процесс гидратации и дегидратации ацетатцеллюлозного слоя, определять энергию активации и структурную организацию композиционных полимерных материалов и пленок.

2. Материалы и методика эксперимента

На основе проведенного аналитического обзора были выбраны для исследования полупроницаемые коммерческие пленки серии УАМ-100, УАМ-150, МГА-95, показатели которых представлены в табл. 1 (производитель ЗАО НТЦ „Владипор“, г. Владимир) [15–17].

Исследовались пленки, у которых активный слой имеет ионогенные группы одной природы (ацетатцеллюлозный) и одинаковым материалом дренажного слоя (лавсан), но с различной структурой порового пространства. Применение метода термогравиметрического (ТГ) анализа позволяет определить кинетические характеристики при дегидратации композитных пленок.

Значения энергии активации и предэкспоненциального множителя важно не только для оценки и понимания механизма взаимодействия материала пленки с молекулами воды, но и прогноза долговечности фильтрующих элементов в процессе регенерации.

Цель настоящей работы является исследование кинетических характеристик (энергии активации, сорбционной емкости) и температурных режимов дегидратации ацетатцеллюлозного слоя у пленок с различной поровой структурой.

Экспериментальные исследования проводились на термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter (выпускаемый фирмой „Netzsch Gerätebau GmbH“ (Германия)), работающем в динамическом режиме при постоянной скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{min}$, воздушная атмосфера, предельный интервал температур 20–1400°C, нагревание проводили в тиглях из Al_2O_3). Были исследованы образцы водонасыщенных и воздушно-сухих пленок серий УАМ-100, УАМ-150 и МГА-95. Процесс набухания в дистилляционной воде продолжался порядка 3 h, излишки поверхностной влаги удалялись фильтровальной

Таблица 1. Качественные показатели исследуемых пленок

Показатель	Ультрафильтрационные		Обратноосмотические
	УАМ-100	УАМ-150	МГА-95
Внешний вид	Полимерные полупрозрачные или белого цвета пленки на основе ацетатов целлюлозы на подложках: нетканый полипропилен, лавсан		
Толщина подложки пленки, μm	50–150 [16] 100–200 [17]		
Толщина активного слоя пленки, μm	0.1–1.0 [16] 0.25–0.5 [17]		
Размер пор, μm	0.01	0.015	0.0005

бумагой и затем образец помещался в ячейку прибора. Эксперимент проводился с массами образцов от 4.230 до 5.850 mg. Протокол экспериментальных данных ТГ импортировался в программное обеспечение Origin 7.5 для дальнейшего анализа и определения кинетических параметров процесса дегидратации воды [18–20].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены интегральные кривые зависимости изменения образца пленки (ТГ кривая) от температуры.

ТГ кривые имеют S-образную форму зеркально отраженную плоскостью проходящей через точку перегиба кривой, что свидетельствует о монотонной скорости испарения воды из образцов при повышении температуры. При постоянной скорости повышения температуры первыми испаряются слабосвязанные молекулы воды с самой низкой, а затем с высокой энергиями активации. На термограммах фиксируется две стадии эффекта потери массы. Первая стадия, в широком интервале

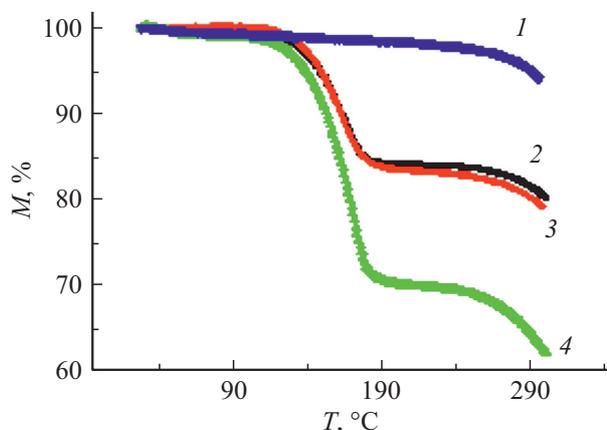


Рис. 1. Температурная зависимость степени дегидратации образцов пленок: 1 — воздушно-сухая УАМ-100 (график представлен для сравнения); 2 — водонасыщенная УАМ-100; 3 — водонасыщенная УАМ-150; 4 — водонасыщенная МГА-95.

температур ($\Delta T \approx 90$ до 170°C , рис. 1, кривые 2–4), которая обусловлена дегидратацией молекул воды, взаимодействующих с ионогенными группами макромолекул ацетата целлюлозы. Убыль массы в температурном интервале от $T = 200$ до 300°C (потеря массы ≈ 3 –6%) наблюдается и в воздушно-сухих образцах (рис. 1, кривая 1), можно объяснить термической деструкцией молекул ацетата целлюлозы, вызванной разрывом внутри- и межмолекулярных водородных связей и сопровождается выделением водорода [21]. Поверхностная вода была исключена из анализа ввиду малого процента потери на ТГ кривой или ее отсутствия в пленках УАМ-100, УАМ-150. Массу десорбции воды в водонасыщенных образцах пленок определяли методом интегрирования кривой (ТГ) в интервале от $T_n \approx 90^\circ\text{C}$ до $T_k \approx 210^\circ\text{C}$ с одновременным определением температуры (T_{\max}) точки перегиба на интегральной ТГ кривой (рис. 2).

Величину степень дегидратации (α) рассчитывали при температурах $T \approx 147, 159^\circ\text{C}$, $T_{\max} \approx 170^\circ\text{C}$, как отношение количества удаленной воды при данной температуре к общему количеству сорбированной воды, что соответствует диапазону $0.2 < \alpha < 0.7$. Данные степени дегидратации (α), относительные величины (ΔM) потери массы воды в образцах и T_{\max} приведены в табл. 2.

Поскольку общий объем десорбированной воды (ΔM_0) характеризует сорбционную емкость пленок, то из табл. 2 следует, что снижение потери массы воды, на первый взгляд, коррелируется с размерами пор активного слоя исследуемых образцов [16,17]. Однако сорбционная емкость пленок зависит не только от геометрических параметров порового пространства, но и от образования дополнительных межмолекулярных каналов в процессе набухания. Как отмечалось в работах [22,23], при набухании ацетата целлюлозы происходит разрыв межмолекулярных связей (С–Н...О), приводящий к раскрытию дополнительных ионогенных групп (гидроксильных, карбинольных), доступных для молекул воды, повышая тем самым степень водопоглощения. Вследствие чего образуется полимолекулярный слой связанной воды с различными по энергиям внутри и межмолекулярными водородными связями. Полимолекулярный слой с физи-

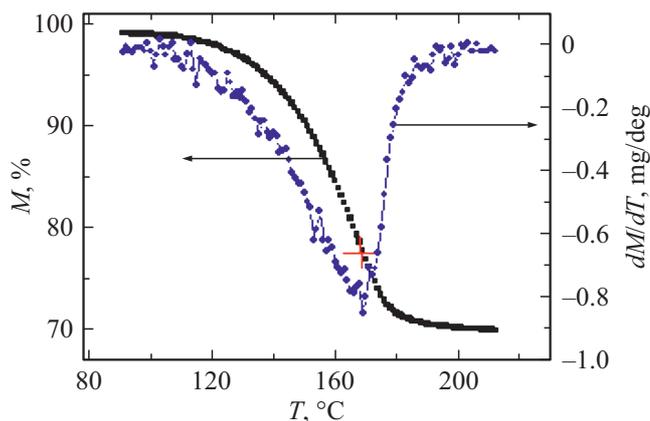


Рис. 2. Интегральная и дифференциальная зависимости степени дегидратации водонасыщенного образца (в качестве примера) крестик указывает на точку перегиба кривой ТГ ($T_{\max} = 169.6^\circ\text{C}$) пленки МГА-95.

ческой точки зрения, безусловно, представляет двойной электрический слой — с иерархической слоевой структурой распределения дипольных молекул (ионов) воды от плотного (слой Штерна) слоя до диффузного (слой Гуи) [24,25].

Определить структуру гидратной воды, а так же ее объем в макропорах и мезопорах (межмолекулярных каналах) прямыми методами не представляется возможным. Тем не менее если предположить, что структура воды в макропорах несколько отличается от структуры в мезопорах (межмолекулярных каналах), то качественную оценку, очевидно, можно дать по значениям энергии активации (E) и предэкспоненциальному множителю (A) кинетического уравнения Аррениуса. Отметим, что элементарный акт любого физического или химического процесса происходит при некоторой избыточной энергии (E) реагирующей частицы (молекулы) по сравнению со средней энергией молекул активированного комплекса (объем активных частиц, участвующих в процессе) при данной температуре. При этом предэкспоненциальный множитель (A) предопределяет стерический фактор частицы (молекулы), взаимодействующей с молекулами комплекса и характеризует частоту столкновения.

Кинетические параметры процесса дегидратации определяли методом неизотермического анализа [18–20], используя дифференциальное уравнение Аррениуса:

$$\frac{dm}{M dT} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (1)$$

В рамках линеаризации модели этого уравнения нами был выбран метод Фримена–Кэрролла. Заменяя в (1) $dT = \beta dt$, получим

$$\frac{dm}{M \beta dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2)$$

где $(dm/M\beta dt)$ — скорость дегидратации, в котором E — энергия активации, [kJ/mol]; $R = 8.31$ — универ-

сальная газовая постоянная, [J/(K·mol)]; T — абсолютная температура, [K]; β — скорость нагрева. Далее логарифмируя выражение (2), получим

$$\ln\left(\frac{dm}{M\beta dt}\right) = -\frac{E}{RT} + \ln(A). \quad (3)$$

Построив зависимость $\ln(dm/M\beta dt) = f(1/T)$, можно определить значения E , поскольку тангенс угла наклона прямой соответствует $(-E/R)$, а $\ln(A)$ суть пересечения прямой с осью $\ln(dm/M\beta dt)$ при установлении распределения гидратной воды в образцах проводили аппроксимацию на трех участках кривой скорости дегидратации в интервалах температур $\Delta T \approx 137\text{--}147^\circ\text{C}$, $147\text{--}159$ и $159\text{--}170^\circ\text{C}$, что соответствует диапазону $0.2 < \alpha < 0.7$. Значения параметров E , $\ln(A)$ сведены в табл. 3, а в качестве наглядности приведены графики линейных участков при максимальной скорости дегидратации воды со значением коэффициента корреляции $R^2 = 0.9998$ (рис. 3).

Сопоставление отношений количества удаленной воды при температурах для трех значений (α) степени дегидратации (ΔM) (табл. 2) указывает на одинаковую закономерность распределения молекул гидратной воды во всех пленках. Однако уменьшения значений энергий активации и предэкспоненциальных множителей при дегидратации молекул воды в интервале $0.2 < \alpha < 0.7$ дают основания утверждать, что активированный слой воды обладает аномальными свойствами. Так, десорбция молекул воды при T_{\max} происходит при высоких значениях стерического фактора и энергии активации, например, для образца пленки МГА-95 ($\ln(A \approx 6.3 \text{ (min}^{-1})$) и $E = 26.9 \text{ kJ/mol}$), а при меньших температурах — $\ln(A \approx 4 \text{ (min}^{-1})$ и $E = 18.6 \text{ kJ/mol}$) (табл. 3), т.е. молекулы воды за счет водородных связей в активированном объеме распределены с различной плотностью структурного кластера от более плотного к менее плотному. Молекулы воды в плотном слое образуют водородные

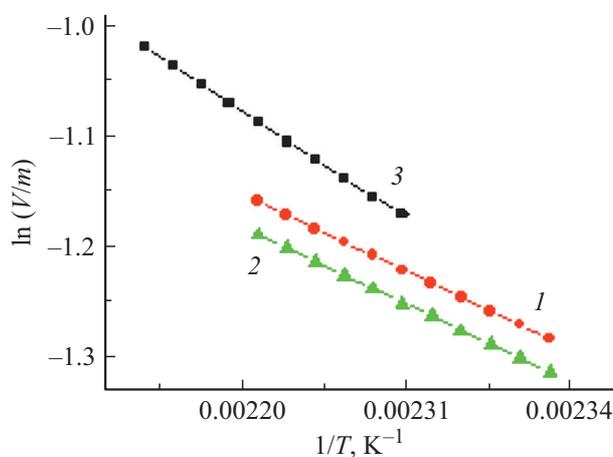


Рис. 3. Графики линеаризации кривой ТГ при температурах в точках перегиба для определения энергии активации (E) и предэкспоненциального множителя (A): 1 — пленка УАМ-100; 2 — пленка УАМ-150, 3 — пленка МГА-95.

Таблица 2. Показатели потери массы и соответствующие им значения степени дегидратации (α), T_{\max} — температура максимума на кривой ТГ

Параметр	T_{\max} °C	ΔM_0 %	Δm_{\max}^* %	Δm_1 %	Δm_2 %	α_{\max}	α_1	α_2
УАМ-100	165.0	15.4	25	19	12	0.69	0.44	0.25
УАМ-150	164.0	15.4	23	17	11	0.6	0.37	0.21
МГА-95	169.6	29.4	25	19	12	0.72	0.47	0.28

Примечание. * Относительные величины изменения массы: Δm_{\max}^* , Δm_1 , Δm_2 определялись в интервалах температур $\Delta T = 170-159$; $159^\circ\text{C}-147^\circ\text{C}$; $147^\circ\text{C}-137^\circ\text{C}$ соответственно; ΔM_0 — общая потеря массы воды; α_{\max} — максимальная степень дегидратации.

Таблица 3. Значения энергии активации (E) и предэкспоненциального множителя (A), рассчитанные для интервала $0.2 < \alpha < 0.7$ степени дегидратации

Параметры	E_{\max} , kJ/mol	$\ln A_{\max}$, min^{-1}	E_1 , kJ/mol	$\ln A_1$, min^{-1}	E_2 , kJ/mol	$\ln A_2$, min^{-1}
УАМ-100	19.5	4.2	17.8	3.7	16.0	3.2
УАМ-150	19.3	4.1	17.2	3.5	15.3	2.9
МГА-95	26.9	6.3	22.7	5.1	18.6	3.97

Примечание. E_{\max} — энергия активации, максимально наибольшая величина в точке перегиба кривой потери массы воды, [kJ/mol], $\ln A_{\max}$ — в точке перегиба кривой (логарифм предэкспоненциального множителя (A) [min^{-1}]).

связи как с ионогенными группами ацетата целлюлозы, так и между собой. Кластерная структура воды в менее плотных слоях обусловлена лишь водородными связями между молекулами воды. Такие суждения объясняют и заметное уменьшение энергии активации в образцах пленок УАМ-100 от 19.5 до 16.0 kJ/mol, а в УАМ-150 от 19.3 до 15.3 kJ/mol. В точном соответствии наблюдаются и изменения величин предэкспоненциального множителя $\ln(A)$.

Заключение

Выполненные термогравиметрические исследования ацетатцеллюлозного слоя в композиционных мембранных пленках УАМ-100, УАМ-150 и МГА-95 позволяют сделать следующие выводы:

1. Что дегидратация водонасыщенных образцов композиционных полупроницаемых пленок происходит в интервале температур от ~ 95 до $\sim 180^\circ\text{C}$. Относительные величины изменения массы (ΔM), соответствующие степени дегидратации для интервала $0.2 < \alpha < 0.7$, свидетельствуют об анизотропной структуре гидратной воды в полимолекулярном слое. Образованный полимолекулярный слой с физической точки зрения, представляет двойной электрический слой с иерархической слоевой структурой распределения дипольных молекул (ионов) воды от плотного слоя Штерна до диффузного слоя Гуи.

2. Молекулы воды, удаляемые при T_{\max} , образуют более плотный слой со смещенными водородными связями как с ионогенными группами ацетата целлюлозы,

так и между собой. Полученные значения энергий активации на трех линейных участках полимолекулярного слоя, описывающих удаление гидратной воды различной степени (связанности). На первом участке температура изменяется в интервале $\Delta T \approx 137-147^\circ\text{C}$, и происходит дегидратация слабосвязанной воды. На втором участке $\Delta T \approx 147-159^\circ\text{C}$, выделяется вода средней гидратации, молекулы которой расположены вблизи функциональных групп и противоионов. На третьем участке $\Delta T \approx 159-170^\circ\text{C}$ выделяются молекулы воды ближней гидратации, т.е. связанные с противоионами ацетата целлюлозы.

3. Отмечается, что в интервале температур от 200 до 300°C как в водонасыщенных, так и воздушно-сухих образцах пленок происходит термическая деструкция молекул ацетата целлюлозы, вызванная разрывом внутри- и межмолекулярных водородных связей с выделением водорода.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90117).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Г. Забродский, Н.В. Глебова, А.А. Нечитайлов, Е.Е. Терукова, Е.И. Теруков, А.А. Томасов, Н.К. Зеленина. Письма в ЖТФ, **36** (23), 98 (2010).
- [2] В.М. Кожевин, А.А. Томасов, С.А. Гуревич, А.Г. Забродский. Электрохимия, **52** (4), 438 (2016). DOI: 10.7868/S042485701604006X [V.M. Kozhevin, A.A. Tomasov, S.A. Gurevich, A.G. Zabrodskii. Rus. J. Electrochem., **52** (4), 385 (2016). DOI: 10.1134/S1023193516040066]
- [3] В.В. Котов, Г.А. Нетесова, О.В. Перегончая, И.В. Кузнецова. Сорбционные и хроматографические процессы, **10**, 208 (2010).
- [4] Н.Ю. Рябова, М.А. Киселев, А.И. Бескровный, А.М. Балагуров. ФТТ, **52**, 984 (2010).
- [5] Е.С. Семилетова, А.Н. Зяблов, В.Ф. Селеменев, О.В. Дьяконова, С.А. Соколова. Сорбционные и хроматографические процессы, **12**, 734 (2012).
- [6] Г.А. Кораблев, Г.Е. Заиков. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, **1** (4), 72 (2013).
- [7] Y. Pozhidaev, O. Lebedeva, E. Sipkina, A. Chesnokova, N. Ivanov. Adv. Mater. Res., **749**, 283 (2013). DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.749.283
- [8] О.В. Лебедева, А.Н. Чеснокова, Т.В. Бадлуева, Е.И. Сипкина, А.Э. Ржечицкий, Ю.Н. Пожидаев. Мембраны и мембранные технологии, **5** (2), 87 (2015). DOI 10.1134/S2218117215010046 [O.V. Lebedeva, A.N. Chesnokova, T.V. Badlueva, E.I. Sipkina, A.E. Rzhchitskii, Y.N. Pozhidaev. Petroleum Chemistry, **55** (5), 333 (2015). DOI 10.1134/S0965544115040040]
- [9] О.В. Лебедева, Е.И. Сипкина, Ю.Н. Пожидаев. Мембраны и мембранные технологии, **6** (2), 138 (2016). DOI: 10.1134/S2218117216020097 [O.V. Lebedeva, E.I. Sipkina, Y.N. Pozhidaev. Petroleum Chemistry, **56** (5), 401 (2016). DOI 10.1134/S0965544116050091]
- [10] Н.И. Майгурова, Ф. Рёсснер, Т.В. Елисеева, В.Ф. Селеменев. Известия вузов. Химия и химическая технология, **59** (4), 73 (2016). DOI <https://doi.org/10.6060/tcct.20165904.5336>
- [11] И.В. Корольков, А.А. Машенцева, О. Гювен, М.В. Здоровец. Мембраны и мембранные технологии, **7** (6), 414 (2017). DOI: 10.1134/S2218117217060062 [I.V. Korolkov, A.A. Mashentseva, M.V. Zdorovets, O. Güven. Petroleum Chemistry, **57** (13), 1233 (2017). DOI: 10.1134/S0965544117130060]
- [12] Ф.А. Ярошенко, В.А. Бурмистров. Мембраны и мембранные технологии, **8** (4), 249 (2018). DOI: 10.1134/S2218117218040119 [F.A. Yaroshenko, V.A. Burmistrov. Petroleum Chemistry, **58** (9), 770 (2018). DOI: 10.1134/S0965544118090116]
- [13] В.А. Шапошник. Сорбционные и хроматографические процессы, **20** (1), 48 (2020). DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/2379>
- [14] Е.О. Филиппова, В.И. Корепанов, В.Ф. Пичугин. ЖТФ, **90** (4), 665 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49093.325-19 [E.O. Filippova, V.I. Korepanov, V.F. Pichugin. Tech. Phys., **65**, 640 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220040076]
- [15] Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vladipor.ru/> (дата обращения: 29.04.2020).
- [16] М. Мулдер. Введение в мембранные технологии (Мир, М., 1999)
- [17] Ю.И. Дытнерский. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 2 (Химия, М., 2002)
- [18] В.А. Логвиненко. Термический анализ координационных соединений и клатратов (Наука, М., 1982)
- [19] Я. Шестак. Теория термического анализа (Мир, М., 1987)
- [20] У. Уэндландт. Термические методы анализа (Мир, М., 1978)
- [21] Т.А. Савицкая, Т.Н. Шибайло, К.А. Селевич, С.Е. Макаревич. Вестник БГУ. Сер. 2., **3**, 38 (2008).
- [22] С.И. Лазарев, Ю.М. Головин, О.А. Ковалева, В.Н. Холодилин, И.В. Хорохорина. Физикохимия поверхности и защита материалов, **54** (5), 466 (2018). DOI: 10.1134/S0044185618050285 [S.I. Lazarev, Yu.M. Golovin, O.A. Kovaleva, V.N. Kholodilin, I.V. Khorokhorina. Protection Metal. Phys. Chem. Surf., **54** (5), 804 (2018). DOI: 10.1134/S2070205118040081]
- [23] С.И. Лазарев, Ю.М. Головин, И.В. Хорохорина, П.А. Холлов. Физикохимия поверхности и защита материалов, **56** (2), 132 (2020). DOI: 10.31857/S0044185620020151
- [24] J. Lyklema. Curr. Opin. Colloid Interface Sci., **15**, 125 (2010).
- [25] А.С. Смолин, Р.О. Шабиев, П. Яккола. Химия растительного сырья, **1**, 177 (2009).