УДК 66.081.6

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПОРИСТЫХ ПЛЕНОК

© 2020 г. С. И. Лазарев¹, Ю. М. Головин¹, С. В. Ковалев¹, Д. С. Лазарев^{1, *}, А. А. Левин¹

¹ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

**E-mail: mig@tstu.ru* Поступила в редакцию 21.10.2019 г. После доработки 25.03.2020 г. Принята к публикации 18.06.2020 г.

В работе получены экспериментальные данные и проведен анализ характеристик влагосодержания и проницаемости ацетатцеллюлозных пористых материалов методами термического воздействия. Обнаружено, что при исследовании методом динамического термогравиметрического анализа в воздушно-сухом образце мембраны при 21°С начинается процесс деструкции, который сопровождается потерей массы на 2% и эндотермическим эффектом. Деструкция заканчивается при 50°С. С последующим повышением температуры проявление эндотермического эффекта продолжается в интервале температур от 120 до 175°С с максимальной скоростью потери массы при 146°С. Потеря массы заканчивается около 190°С и составляет 6.5%. Исследование ацетатцеллюлозных пористых пленок МГА-80, МГА-95 при трансмембранном давлении и температурном воздействии показало, что при повышении температуры до 50°С проницаемость и удельный выходной поток по воде возрастает. Анализ зависимостей удельного выходного потока от температуры выявил, что при начальном росте температуры на 10°С удельный выходной поток по воде увеличивается на ~18%. Это обусловлено структурными изменениями в ацетатцеллюлозном слое. Дальнейшее повышение температуры на 15°C приводит к возрастанию проницаемости на ~10%. Данные явления связаны с процессом структурной перестройки в активном слое и полимерной подложке мембран МГА-95 и МГА-80П соответственно.

DOI: 10.31857/S0040364420060137

введение

Вопросы о воздействии температуры на транспортные характеристики мембранных материалов. влияющих на кинетику массо- и теплопереноса, до настоящего времени остаются весьма дискуссионными [1-20]. В работе [1] отмечается, что после термообработки сильнокислотной сульфокатионообменной мембраны, характеризующейся низкой каталитической активностью в реакции лиссоциации волы и высокой термостабильностью фиксированных групп, вследствие увеличения доли проводящей поверхности и развития микрорельефа мембраны происходит рост предельной диффузионной плотности тока и уменьшение длины плато вольт-амперной характеристики (ВАХ). В [2] мембраны исследованы при температурных режимах методом молекулярной динамики, что позволило рассчитать коэффициенты диффузии леннарда-джонсовых флюидов в мембране и получить зависимости коэффициентов диффузии от температуры, плотности и состава смеси.

Эксплуатация полимерных пленок при повышенных температурах [3, 4] и в интенсивных токовых режимах [5] позволяет в значительной мере увеличить их массопереносные характеристики [6], а значит, и эффективность электродиализных процессов. В работе [7] получил развитие молекулярно-статистический метод моделирования процесса первапорации на мембранах из гибридного оксида кремния, где показана селективность мембраны по воде, а также определено, что поток компонентов экспоненциально зависит от размера пор и температуры. В [8] методом растровой электронной микроскопии установлено, что в результате длительного воздействия повышенных температур происходит увеличение макропористости, появление новых дефектов структуры, уменьшение доли ионообменной фазы на поверхности мембран. Авторы [9] установили, что в сульфокатионообменной мембране МК-40 после химического конлиционирования и температурного воздействия при плотностях тока, превышающих предельные диффузионные, такие свойства поверхности мембран, как электрическая и геометрическая неоднородность, определяют интенсивность электроконвективного перемешивания раствора на межфазной границе и параметры диффузионных слоев. Корреляция между изменениями морфологии и степени гидрофобности поверхности мембран отмечена в [10]. В результате длительного термостатирования мембран при температурах выше комнатной степень гидрофобности снижается вследствие значительного увеличения размеров каверн и трещин.

В статье [11] авторы проводили исследования на термогравиметрическом анализаторе эпоксилных композитов с различными армирующими наполнителями. Исследование кинетики термического превращения образцов показало, что материалы из композитов, армированных тканями, наиболее перспективны для применения в технологических процессах. Авторы [12] исследовали методом термогравиметрического анализа креветочного хитина и хитозана с различной степенью деацетилирования. Отмечается, что температура, при которой скорость разложения исследуемых образцов максимальна, составляет 290-295°С и не зависит от степени деацетилирования образцов. Скорость потери массы образцов при 290-295°С обусловлена степенью деацетилирования. В материалах [13] показано исследование термической имидизации полиамидокислоты и полимера с молекулярным отпечатком на ее основе. Установлено, что процесс дегидратации проходит в три стадии. Полимерная пленка образуется на второй ступени второй стадии, затем она подвергается высокотемпературной дегидроциклизации (третья ступень при T = 453 K), при которой проходит процесс отщепления воды с образованием имидных связей, а также удаление остатков растворителя из продукта.

Авторами работы [14] оценено влияние температуры раствора, солесодержания и скорости циркуляции раствора на поток пермеата и содержание в нем растворенных веществ. Отмечается, что время ресурсной эксплуатации мембраны и производительность зависят от ряда факторов (концентрационной поляризации, осадкообразования). Особым фактором при исследовании мембран является чувствительность полимера к температурному воздействию при обработке растворов с температурой 20-40°С, которая вызывает увеличение проницаемости до 60% как при наличии, так и при отсутствии в жидкости растворенных веществ. Исследования, проведенные в [15, 16], выявляют, что изучение прямого осмоса привлекает большое внимание к очистке сточных вод, опреснению соленой морской воды и выработке электроэнергии. Исследование влияния рабочей температуры раствора в диапазоне 20-45°С на разделительную лабораторную установку прямого осмоса показало, что более высокая температура обеспечивает высокие характеристики производительности, более высокое извлечение воды и высокие коэффициенты концентрирования, что связано с улучшением массообмена в примембранном пограничном слое. Однако более высокая температура вызывает неблагоприятные воздействия на очистку мембраны. В работе [17] показано, как влияние температуры на систему прямого осмоса инициирует большую проницаемость растворителя и растворенного вещества, что связано с изменением термодинамических свойств растворов и проявлением различных поляризационных явлений.

Авторами работы [18] проведены исследования кинетики кристаллизационных процессов и фазовых превращений в сплаве ЖС6У методами термического анализа. Показано, что модифицирование приводит к изменению строения расплава и условий кристаллизации, а также выделению основных и избыточных фаз. Эти изменения заключаются в уменьшении интервала кристаллизации сплава за счет снижения температуры ликвидуса и увеличения темпа роста твердой фазы в начальный период кристаллизации. В [19] исследовано влияние ориентации мембраны, скорости разделяемого раствора, температуры раствора и комбинированного влияния как температуры, так и скорости раствора на проницаемость мембраны для целей повышения производительности процесса прямого осмоса. В [20] показано. что низкие тепловая эффективность и производительность по воде являются одной из основных проблем, препятствующих коммерциализации процесса мембранной дистилляции. Авторами обнаружено, что явление инверсии общей производительности воды, которое было подтверждено с использованием двух различных математических моделей и продемонстрировано экспериментально, имеет место в связи с уменьшением потока водяного пара через мембрану, а также увеличением потерь тепла за счет теплопроводности при увеличении геометрических размеров мембраны.

Анализ литературных данных [1-20] показывает необходимость исследования влияния температурных воздействий на влагосодержание и характеристики проницаемости других полимерных мембранных материалов, например ацетатцеллюлозных пленок, более информативными физическими методами. Это позволит объяснить и спрогнозировать механизм массо- и теплопереноса веществ и разработать уравнения для теоретического расчета транспортных характеристик в поверхностном слое и поровом пространстве полимерных пленочных материалов [21, 22]. Целью данной работы является исследование термического воздействия на транспортные характеристики пленочных ацетатцеллюлозных пористых пленок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования использовался термогравиметрический анализатор EXSTAR TG/DTA 7200,

| Таблица | 1. | Рабочие характеристики ацетатцеллюлозных пленок | ΜГА | -80П, | ΜΓΑ-95 |
|---------|----|---|-----|-------|---------------|
|---------|----|---|-----|-------|---------------|

| Параметры | МГА-95 | МГА-80П | | |
|--|-----------------------|-----------------------|--|--|
| Трансмембранное давление, МПа | 5.0 | | | |
| Минимальная производительность по фильтрату при 25°C, м ³ /(м ² с) | 9.16×10^{-6} | 1.75×10^{-5} | | |
| Коэффициент задерживания по 0.15% NaCl не менее | 0.95 | 0.80 | | |
| Рабочий диапазон рН | 3-8 | | | |
| Максимальная температура, °С | 50 | | | |

Япония. Кривые термической потери масс (ТГ), дифференциально-термической потери масс (ДТГ), дифференциально-термического анализа (ДТА) записывались со скоростью 5°С/мин в интервале от 16°С до 200°С.

Для исследования проницаемости использовалась экспериментальная установка, подробно описанная в [23]. Расчет коэффициента проницаемости по экспериментальным данным проводился по следующей зависимости:

$$\alpha = \frac{V}{F_m \tau P},$$

где V – объем собранного пермеата, м³; F_m – площадь рабочей поверхности пленки прямоугольного образца, м²; τ – время проведения эксперимента, с; P – трансмембранное давление, МПа.

В экспериментальных исследованиях использовались образцы серийно выпускаемых промышленностью ацетатцеллюлозных пленок МГА-80, МГА-95, один из которых хранился в закрытом контейнере воздушно-сухой среды, а другой на 3 ч размещался в водной среде (дистиллированная вода) для водопоглощения при комнатной температуре. Характеристики ацетатцеллюлозных пористых мембран приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные на рис. 1 данные, полученные термогравиметрическим анализом, позволили выявить общее влагосодержание ацетатцеллюлозной пленки и степень ее заполнения водой. Полученные данные дают возможность выявить различия между мембранами, отличающимися химическим строением и структурой образующей из макромолекул. Для воздушно-сухого и водонасыщенного образцов мембран получены термоаналитические кривые, описывающие процесс дегидратации мембран. Для исследуемых образцов ацетатцеллюлозных пленок с различным влагосодержанием в интервале температур 21-200°С на кривых ДТА наблюдался эндоэффект, сопровождающийся изменением массы на кривых ТГ, что соответствовало удалению растворителя из фазы пористой пленки. Термогравиметрические кривые в координатах $\alpha - T$, построенные при дегидратации воздушно-сухого и водонасыщенного

образцов мембран, имеют S-образный вид, что подтверждает сложный характер взаимодействия растворителя (воды) с мембраной и предполагает различную скорость выделения растворителя на разных стадиях дегидратации [24].

Для более четкого понимания и установления температурного интервала и количества удаляемого растворителя регистрировалась дифференциальная кривая ДТА и кривые потери массы при линейном возрастании температуры. Обнаружено, что при 21°С в воздушно-сухом образце начинается процесс деструкции, который заканчивается при 50°С с потерей массы на 2% и эндотермическим эффектом. При последующем повышении температуры от 120 до 175°С продолжается проявление эндотермического эффекта с максимальной скоростью потери массы при 146°С. Около 190°С потеря массы прекращается со значением 6.5%.

Вполне вероятно, что в этом температурном интервале происходит удаление с поверхности сорбированной влаги, но самое главное – процесс разрушения неравновесных водородных связей с выделением воды.

Совершенно удивительная картина наблюдается в водонанасыщенном образце мембраны (рис. 16). Начало потери массы происходит при 21°С, заканчивается около 65°С с максимальной скоростью при 51°С и составляет 42% при общей влагоемкости в 70% и более. Процесс происходит с одним эндотермическим эффектом от 20 до 65°С. Отметим, что легко удаляемые молекулы воды при низких температурах находятся на наружных поверхностях пор мембраны и не образуют водородных связей. Однако в образце остается 28% воды — той воды, которая участвует в формировании структурированной жидкокристаллической фазы с образованием гидратной оболочки. Деструкция данной гидратной оболочки происходит в интервале температур от 125 до 175°С. Удаление влаги с поверхности пленки и из ее пор, вероятно, связано со структурой и видом смесей целлюлозы, как наблюдалось в работах [25, 26]. Например, в [26] отмечается, что термограммы ацетатцеллюлозных пленок и их сополимерных смесей имеют несколько этапов потери массы. В данном случае для водонасыщенного образца



Рис. 1. Кривые динамического термогравиметрического анализа ацетатцеллюлозной пленки МГА-95: (а) – водонасыщенный образец, (б) – воздушно-сухой образец; *1* – кривая ДТА, 2 – ТГ, *3* – ДТГ.

(рис. 16) потеря массы происходит в два этапа (кривая 3) из-за удаления адсорбированной влаги в интервале температур 50–200°С из-за обширной деградации ацетатцеллюлозы (область значительной потери влаги).

Анализ данных — зависимостей удельного выходного потока от температурного воздействия и трансмембранного давления (рис. 2, кривые l u 2) позволяет отметить, что с повышением температуры удельный выходной поток на небольшом интервале резко возрастает как для ацетатцеллюлозной пленки МГА-95, так и МГА-80П, а затем до температуры 45°С монотонно увеличивается, о чем свидетельствует более плавный наклон кривой проницаемости в сторону возрастания. Трансмембранное давление является движущей силой баромембранного процесса, поэтому с ростом трансмембранного давления увеличивается производительность процесса мембранного разделения по воде.

Значения проницаемостей через исследуемые ацетатцеллюлозные пористые пленки от температурного воздействия при выбранном диапазоне варьирования температуры отличаются друг от друга (табл. 2). Это, вероятно, свидетельствует о различной структуре активного слоя и подложек пленок (мембраны), диаметра пор и их форме в поверхностном (активном) слое и поровом (межволоконном) пространстве подложки. Поры имеют различную форму и образуют сорбционное пространство мембраны, которое, вероятно, у мембраны МГА-80П больше, чем у мембраны МГА-95. Количественный анализ проницаемости мембран по воде показывает, что у мембраны МГА-80П она выше, чем у мембраны МГА-95. Подобное вызвано высокой скоростью поглощения воды материалом мембраны, т.е. большей сорбционной способностью по воде мембраны МГА-80П. При сорбции мембранами МГА-95 и МГА-80П воды, по всей видимости, изменяется надмолекулярная структура кристаллической фазы, уменьшаются размеры области когерентного рассеяния и кристалличность. Структура дренажного слоя аморфной фазы меняется на молекулярном и надмолекулярном уровнях. Предположительно, происходит образование межфазного слоя, который возникает за счет взаимодействия полярных групп NH и COO- контактирующих полимеров. Вода, выступая как пластификатор, структурирует в межфазном слое пленки макромолекулы ацетатцеллюлозы за счет гидратации полярных групп макромолекул [27, 28].

Подводя итог, можно отметить, что кривые 1 и 2 (рис. 2) удельного выходного потока и приведенные данные о проницаемости (табл. 2) иллюстрируют процесс повышения удельного выходного потока в зависимости от возрастания температурного воздействия при прочих равных условиях для исследуемых перегородок. Анализ зависимостей удельного выходного потока от температуры выявил, что при начальном росте температуры на 10°С отмечается возрастание удельного выходного потока по воде на ~18%. Это обусловлено структурными изменениями в ацетатцеллюлозном слое. Дальнейшее повышение температуры на 15°С приводит к менее интенсивному возрастанию проницаемости – на ~10%. Подобные явления связаны с процессом структурной перестройки в активном слое и полимерной подложке мембран МГА-95 и МГА-80П соответственно.

Описанное изменение проницаемости, вероятно, связано с зависимостью изменения потока от наноскопических параметров мембран (поры, дефекты), а также с различием толщины активного слоя мембран МГА-95 и МГА-80П. При этом стоит учитывать и то, что дренажный слой ацетатцеллюлозных мембран МГА-80П, МГА-95 выполнен из нетканого лавсана и полипропилена.

Как видно из данных рис. 2 и табл. 2, кинетический процесс изменения удельного выходного потока и проницаемости от температурного воздействия и трансмембранного давления описывается функцией [29, 30]

| · · · 1 | | - | | | | | |
|----------|---------------|----------------|--|--|-------|-------|-------|
| Мембрана | <i>T</i> , °C | <i>Р</i> , МПа | $\alpha \times 10^5$, $m^3/(m^2 c M \Pi a)$ | $\alpha_{\rm pacy} \times 10^5$, m ³ /(m ² c MПa) | т | n | d, % |
| МГА-95 | 22 | 3.0 | 0.195 | 0.203 | 1.054 | 3.717 | -4.27 |
| | 30 | | 0.236 | 0.225 | | | 4.84 |
| | 38 | | 0.248 | 0.247 | | | 0.23 |
| | 45 | | 0.265 | 0.269 | | | -1.42 |
| | 22 | 4.0 | 0.193 | 0.198 | 1.026 | 3.730 | -2.61 |
| | 30 | | 0.227 | 0.219 | | | 3.60 |
| | 38 | | 0.239 | 0.241 | | | -0.90 |
| | 45 | | 0.261 | 0.262 | | | -0.40 |
| МГА-80П | 22 | 3.0 | 0.446 | 0.471 | 1.119 | 2.886 | -5.60 |
| | 30 | | 0.541 | 0.509 | | | 5.95 |
| | 38 | | 0.556 | 0.548 | | | 1.34 |
| | 45 | | 0.570 | 0.585 | | | -2.62 |
| | 22 | 4.0 | 0.421 | 0.438 | 1.041 | 2.814 | -4.12 |
| | 30 | | 0.496 | 0.473 | | | 4.71 |
| | 38 | | 0.512 | 0.509 | | | 0.66 |
| | 45 | | 0.532 | 0.541 | | | -1.78 |

Таблица 2. Зависимость проницаемости от температуры и трансмембранного давления для мембраны МГА-95, МГА-80П при $\tau = 900$ с

Примечание: *d* – отклонение экспериментальных значений водопроницаемости от значений, рассчитанных по формуле (2).



Рис. 2. Зависимость удельного выходного потока для ацетатцеллюлозных пленок МГА-95 (а) и МГА-80П (б) от температурного воздействия и трансмембранного давления: I - P = 3 МПа, 2 - 4.

$$\alpha_{\text{pacy}} = \frac{J_{\text{pacy}}}{P}, \quad J_{\text{pacy}} = m\alpha_0 P\left(\frac{T_0}{T}\right)^n, \quad (1)$$

где α_0 – проницаемость по дистиллированной воде при 22°С, м³/(м² с МПа); *m*, *n* – эмпирические коэффициенты; *T*₀, *T* – начальная и текущая температуры раствора, °С.

Значения эмпирических коэффициентов *m*, *n* и других расчетных параметров для уравнения (1) приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований по термогравиметрическому анализу воздушно-сухого и водонасыщенного образцов и влиянию температуры на проницаемость ацетатцеллюлозных пористых пленок можно сделать следующие выводы.

1. Полученные данные термогравиметрического анализа позволяют установить как общее влагосодержание, так и степень заполнения влагой пористой пленки. Здесь становится возможным выявление отличий между пленками, различающимися по влагосодержанию как на поверхности, так и в поровом пространстве. Для каждого образца пленки получены термоаналитические кривые, описывающие процесс дегидратации мембран. Для всех исследуемых образцов пористых пленок с различным влагосодержанием в интервале температур 21–200°С на кривых дифференциально-термического анализа наблюдался эндотермический эффект, сопровождающийся изменением массы на кривых термической потери массы, что соответствует удалению растворителя из фазы пористой пленки.

2. Анализ зависимостей удельного выходного потока от температуры выявил, что при начальном росте температуры на 10° С удельный выходной поток по воде возрастает на $\sim 18\%$, а при дальнейшем повышении температуры на 15° С проницаемость возрастает на $\sim 10\%$. Для аналитического описания проницаемости, удельного выходного потока в кинетическом процессе обработки жидкой фазы при варьировании температуры, трансмембранного давления для исследуемых ацетатцеллюлозных пористых пленок предложено математическое выражение и рассчитаны значения эмпирических коэффициентов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Васильева В.И., Акберова Э.М., Заболоцкий В.И. Электроконвекция в системах с гетерогенными ионообменными мембранами после температурной модификации // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 4. С. 452.
- 2. Анашкин И.П., Клинов А.В., Анашкина А.В. Температурная зависимость коэффициентов диффузии леннарда-джонсовых флюидов в твердофазной мембране // Вестник технол. ун-та. 2017. Т. 20. № 22. С. 48.
- Smagin V.N., Zhurov N.N., Yaroshevsky D.A., Yevdokimov O.Y. Optimization of Electrodialysis Process at Elevated Temperatures // Desalination. 1983. V. 46. № 1–3. P. 253.
- Onuki K., Hwang G.J., Arifal, Shimizu S. Presence of Iodine at Elevated Temperature // J. Membr. Sci. 2001. V. 192. № 1–2. P. 193.
- Pourcelly G., Nikonenko V.V., Pismenskaya N.D., Yaroslavtsev A.V. Applications of Charged Membranes in Separation, Fuel Cells, and Emerging Processes. In: Ionic Interactions in Natural and Synthetic Macromolecules. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. P. 761.
- 6. Письменская Н.Д., Никоненко В.В., Мельник Н.А., Пурселли Ж., Ларше К. Влияние характеристик границы ионообменная мембрана/раствор на массоперенос при интенсивных токовых режимах // Электрохимия. 2012. Т. 48. № 6. С. 677.
- 7. *Клинов А.В., Анашкин И.П., Акберов Р.Р.* Моделирование первапорации смеси этанол—вода на мембране из гибридного оксида кремния методом молекулярной динамики // ТВТ. 2018. Т. 56. № 1. С. 71.
- Акберова Э.М., Яцев А.М., Кожухова Е.Ю., Васильева В.И. Микроскопический анализ поверхности гетерогенных мембран с разной степенью дисперсности ионообменника после температурного воздействия // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 2. С. 158.

- 9. Акберова Э.М. Диффузионные пограничные слои в растворе на границе с сульфокатионообменной мембраной после температурной модификации // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 3. С. 314.
- Васильева В.И., Письменская Н.Д., Акберова Э.М., Небавская К.А. Влияние термохимического воздействия на морфологию и степень гидрофобности поверхности гетерогенных ионообменных мембран // ЖФХ. 2014. Т. 88. № 7–8. С. 1114.
- Шустов И.И., Койтов С.А., Мельников В.Н. Исследование термической устойчивости композитов, армированных тканями с микродисперсным наполнителем // Вестн. Самарск. гос. аэрокосм. унта. 2014. № 1(43). С. 181.
- Кучина Ю.А., Долгопятова Н.В., Новиков В.Ю., Коновалова И.Н., Принцева М.Ю., Сагайдачный В.А. Термическое разложение природных полисахаридов // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2015. № 1. С. 94.
- Семилетова Е.С., Зяблов А.Н., Селеменев В.Ф. Термогравиметрический анализ полимеров с молекулярным отпечатком валина // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. Вып. 5. С. 734.
- Goosen M.F.A., Sablani S.S., Al-Maskari S.S., Al-Belushi R.H., Wilf M. Effect of Feed Temperature on Permeate Flux and Mass Transfer Coefficient in Spiralwound Reverse Osmosis Systems // Desalination. 2002. V. 144. № 1–3. P. 367.
- 15. *Zhao S., Zou L.* Effects of Working Temperature on Separation Performance, Membrane Scaling and Cleaning in Forward Osmosis Desalination // Desalination. 2011. V. 278. № 1–3. P. 157.
- You S.-J., Wang X.-H., Zhong M., Zhong Y.-J., Yu C., Ren N.-Q. Temperature as a Factor Affecting Transmembrane Water Flux in Forward Osmosis: Steadystate Modeling and Experimental Validation // Chem. Eng. J. 2012. V. 198–199. P. 52.
- Phuntsho S., Vigneswaran S., Kandasamy J., Hong S., Lee S., Shon H.K. Influence of Temperature and Temperature Difference in the Performance of Forward Osmosis Desalination Process // J. Membr. Sci. 2012. V. 415–416. P. 734.
- Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Миннеханов Г.Н., Лопаев Б.Е. Исследование фазовых превращений в сплаве ЖСБУ методами термического анализа // Омск. науч. вестн. 2013. № 1(117). С. 63.
- Hawari Al.H., Kamal N., Altaee A. Combined Influence of Temperature and Flow Rate of Feeds on the Performance of Forward Osmosis // Desalination. 2016. V. 398. P. 98.
- Lee J.-G., Alsaadi A.S., Karam A.M., Francis L., Soukane S., Ghaffour N. Total Water Production Capacity Inversion Phenomenon in Multi-stage Direct Contact Membrane Distillation: a Theoretical Study // J. Membr. Sci. 2017. V. 544. P. 126.
- Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Уравнения состояния полимерных материалов при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 1. С. 64.
- 22. Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Уравнения состояния насыщенных орга-

2020

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР том 58 № 6

нических соединений при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 5. С. 97.

- 23. Лазарев С.И., Лазарев К.С., Ковалева О.А., Казаков В.Г., Стрельников А.Е. Исследование кинетических коэффициентов электрогиперфильтрационного извлечения химических веществ из технологических растворов анилинсодержащего производства // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. Вып. 5. С. 74.
- 24. *Котова Д.Л., Селеменев В.Ф.* Термический анализ ионообменных материалов. М.: Наука, 2002. 157 с.
- Zavastin D., Cretescu I., Bezdadea M., Bourceanu M., Drăgan M., Lisa G., Mangalagiu I., Vasić V., Savić J. Preparation, Characterization, and Applicability of Cellulose Acetate-polyurethane Blend Membrane in Separation Techniques // Colloids Surf., A. 2010. V. 370. № 1-3. P. 120.
- 26. Kamal H., Abd-Elrahim F.M., Lotfy S. Characterization and Some Properties of Cellulose Acetate-co-polyethylene Oxide Blends Prepared by the use of Gamma Ir-

radiation // J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2014. V. 7. № 2. P. 146.

- 27. Лазарев С.И., Головин Ю.М., Ковалев С.В., Лазарев Д.С. Влияния температуры на конформационные изменения структурных и теплофизических характеристик в ацетатцеллюлозных композиционных пленках // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 670.
- 28. Мельникова Г.Б., Жавнерко Г.К., Чижик С.А., Бильдюкевич А.В. Структура и механические свойства ультрафильтрационных мембран, модифицированных пленками Ленгмюра–Блоджетт // Мембраны и мембранные технологии. 2016. Т. 6. № 2. С. 144.
- 29. Лазарев С.И., Головин Ю.М., Хорохорина И.В., Ковалев С.В., Левин А.А. Кинетические и структурные характеристики ультрафильтрационных мембран при разделении растворов, содержащих лаурилсульфат натрия // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 10. С. 89.
- 30. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.