

УДК 538.975

## ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В АЦЕТАТЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛЕНКАХ

© 2019 г. С. И. Лазарев<sup>1</sup> \*, Ю. М. Головин<sup>1</sup>, С. В. Ковалев<sup>1</sup>, Д. С. Лазарев<sup>1</sup><sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

\*E-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

После доработки 22.02.2019 г.

Принята к публикации 16.05.2019 г.

Проведены исследования по влиянию температуры на конформационные изменения структурных и теплофизических характеристик в ацетатцеллюлозных композиционных пленках вида УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95. Установлено, что в образцах УАМ-50 и УАМ-100 по данным дифференциально-сканирующей калориметрии на границе раздела фаз возникает межфазный слой. В водонасыщенных образцах на кривых данных калориметрии в интервале температур  $\Delta T = 125\text{--}226^\circ\text{C}$  проявляется экзотермический эффект с  $\Delta H = 20.7$  кДж/кг для УАМ-50 и с  $27.95$  кДж/кг для УАМ-100, что свидетельствует о гидратации полярных групп ацетатцеллюлозы и полиамида в межфазном слое композиционных пленок. При исследовании дифференциально-сканирующим методом композиционных пленок воздушно-сухого и водонасыщенного образцов отмечается перераспределение соотношения между количеством совершенных кристаллических структур в кристаллитах, имеющих разные величины энтальпии плавления. Для МГА-95 низкотемпературной фазы энтальпия плавления уменьшается с  $6.06$  до  $0.99$  кДж/кг, а высокотемпературной – с  $1.99$  до  $1.72$  кДж/кг, для УАМ-50 низкотемпературной фазы – с  $3.04$  до  $1.38$  кДж/кг, а высокотемпературной – с  $8.12$  до  $1.76$  кДж/кг и для УАМ-100 низкотемпературной фазы – с  $4.99$  до  $1.5$  кДж/кг, высокотемпературной – с  $2.33$  до  $0.77$  кДж/кг. Суммарная энтальпия плавления эндотермических пиков также уменьшается для всех трех образцов, что указывает на снижение кристалличности в водонасыщенных образцах композиционных пленок.

DOI: 10.1134/S0040364419050090

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы о влиянии температуры на изменения структурных и теплофизических характеристик пленок до настоящего времени остаются весьма актуальными [1–11]. В [1] исследовалась динамика пульсаций температуры на поверхности вертикально стекающей нагреваемой пленки воды. Установлено, что искусственные возмущения приводят к увеличению амплитуды, спектральной энергии и расширению частотного диапазона пульсаций температуры, а внешние возмущения вызывают увеличение средней интегральной энергии пульсаций температуры в единицу времени и, соответственно, приводят к повышению устойчивости пленки к разрыву. В [2, 3] отмечается, что в процессе эксплуатации мембран при повышении температуры и в области интенсивных токовых режимов [4] данные факторы способствуют увеличению их массопереносных характеристик [5], а значит, влияют на эффективность разделения с применением мембран.

Достаточно обширные исследования поведения ионообменных пленок в агрессивных средах при воздействии температуры выполнены в 60-х–

80-х гг. прошлого столетия [6, 7] в период становления мембранного процесса как науки о пленочных материалах и новых технологиях разделения растворов на молекулярном уровне. Авторами работы [8] на основании результатов термогравиметрического анализа представлен расчет структурно-кинетических параметров дегидратации и десольватации мембран и предложен вывод о влиянии матрицы пленки на состояние воды в ней. Исследованиям в пористой среде физических характеристик посвящена работа [9], где отмечается, что в результате теоретического анализа распределения насыщенности конденсированной фазы и интенсивности излучения имеют вид квазистационарных волн, а распределение давления определяется критериальным параметром, представляющим собой отношение двух характерных значений интенсивностей притока массы вещества за счет фазового перехода и фильтрации. Высокотемпературная фильтрация получила развитие в [10], где выполнено молекулярно-динамическое моделирование процесса перапокации раствора 95 мол. % этанола в воде при  $343$  К и показана селективность мембраны по воде, а

**Таблица 1.** Рабочие параметры ультрафильтрационных и обратноосмотических композиционных пленок УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95

Рабочие параметры	УАМ-50	УАМ-100	МГА-95
Рабочее давление, МПа	0.15	0.15	5.0
Удельный выходной поток (производительность по воде), м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	0.002	0.01	1.11 × 10 <sup>-5</sup>
Коэффициент задержания:			
по 0.15% NaCl	—	—	0.95
по миоглобину	98.5		—
Рабочий диапазон, рН	3–8	3–8	3–8
Толщина, м	1.2 × 10 <sup>-3</sup>	1.2 × 10 <sup>-3</sup>	1.2 × 10 <sup>-3</sup>
Средний размер пор, мкм	0.005	0.01	0.0005

также определено, что поток компонентов экспоненциально зависит от размера пор. Анализ влияния термического воздействия в водной, щелочной и кислотной средах показал, что при длительном (50 ч) термостатировании ионообменной мембраны степень ее гидрофобности снижается вследствие значительного увеличения размеров каверн и трещин, которые образуются в результате частичной деструкции инертного связующего (полиэтилена) и армирующей ткани (капрон) [11].

Анализ литературных данных, опубликованных в [1–11], позволяет говорить о необходимости исследования влияния тепловых воздействий на структурные и теплофизические характеристики ацетатцеллюлозных композиционных пленок универсальными и более информативными физическими методами. Это позволит объяснить механизм переноса веществ и разработать уравнения для расчета проницаемых, селективных и теплофизических характеристик в поверхностном слое и поровом пространстве полимерных пленочных материалов [12, 13].

Целью данной работы является исследование влияния температуры на конформационные изменения структурных и теплофизических характеристик ацетатцеллюлозных композиционных пленок вида УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95 методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

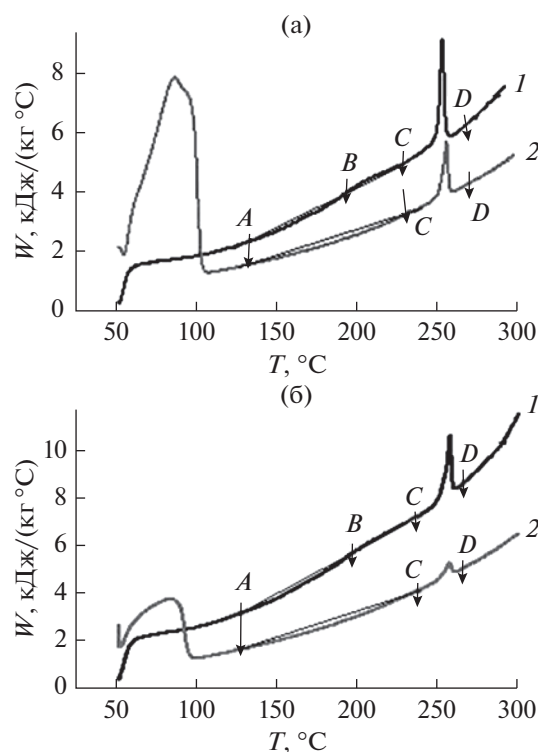
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальных исследованиях использовались промышленные полупроницаемые композиционные пленки УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Исследуемые образцы композиционных ацетатцеллюлозных ультрафильтрационных и обратноосмотической пленок (УАМ-50, УАМ-100, МГА-95) предварительно готовились к работе: один хранился в закрытом контейнере воздушно-сухой среды, а другой на 3 ч размещался в водной среде (дистиллированная вода) для водопоглощения

при комнатной температуре. Теплофизические характеристики образцов ацетатцеллюлозных пленок измерялись на дифференциальном сканирующем калориметре ДСК-2 со скоростью нагрева 10°С/мин в интервале температур от 20 до 300°С.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены кривые ДСК для образцов УАМ-50, УАМ-100 в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях.



**Рис. 1.** Экспериментальные кривые ДСК для ультрафильтрационных пленок УАМ-50 (а) и УАМ-100 (б): 1 – воздушно-сухой образец, 2 – водонасыщенный.

Виды кривых ДСК воздушно-сухих и водонасыщенных образцов существенно отличаются друг от друга. Прежде всего, при нагревании на кривых ДСК мембран УАМ-50 и УАМ-100 воздушно-сухих образцов четко фиксируется растеклование при температуре  $T_c = 61^\circ\text{C}$ . Выше температуры стеклования теплоемкость образцов увеличивается. Если воспользоваться графиком линейного повышения удельной теплоемкости  $c_p$  и провести линию от точки *A* до *C*, то данная линия пересекает кривые ДСК в точке *B*, деля экспериментальную кривую на два участка. В частности, для образца УАМ-50 кривые ДСК делятся на два участка: *AB* –  $\Delta T = 125\text{--}197^\circ\text{C}$  с экзотермическим эффектом  $\Delta H = 10.17$  кДж/кг и *BC* –  $\Delta T = 197\text{--}226^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 0.87$  кДж/кг. Аналогично с кривыми для УАМ-100: *AB* –  $\Delta T = 125\text{--}197^\circ\text{C}$  – экзотермический эффект с  $\Delta H = 11.74$  кДж/кг и *BC* –  $\Delta T = 197\text{--}226^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 0.93$  кДж/кг. Однако, согласно данным [14–16], подобные термические превращения для индивидуальных соединений полиамида (ПА-66) и ацетата целлюлозы в интервале  $\Delta T = 125\text{--}226^\circ\text{C}$  авторами не наблюдались. Следовательно, термодинамические релаксационные процессы, фиксируемые на экспериментальных кривых ДСК, скорее всего следует объяснить образованием межфазного слоя, который возникает за счет взаимодействия полярных групп (NH) полиамида с контактирующими группами (COO-) ацетатцеллюлозы. Для водонасыщенных образцов на кривых ДСК мембраны УАМ-50 (рис. 1а, кривая 2) испарение воды происходит в интервале  $\Delta T = 51.46\text{--}106.9^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 198.4$  кДж/кг и полушириной пика  $31.3^\circ\text{C}$  и наблюдается широкий экзотермический пик в интервале температур  $\Delta T = 125\text{--}226^\circ\text{C}$  (*AC*) с  $\Delta H = 20.7$  кДж/кг. В водонасыщенном образце УАМ-100 (рис. 1б, кривая 2) вода испаряется в интервале температур  $\Delta T = 52.8\text{--}101.5^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 66.8$  кДж/кг с полушириной пика  $30.8^\circ\text{C}$ , а в интервале  $\Delta T = 125\text{--}226^\circ\text{C}$  (*AC*) наблюдается экзотермический пик с  $\Delta H = 27.95$  кДж/кг (табл. 2). Такой характер изменения  $c_p$ , по-видимому, обусловлен пространственной упорядоченностью взаимодействующих полярных NH и (COO-)-групп макромолекул ацетатцеллюлозы и полиамида в межфазном слое мембраны [17].

Плавление кристаллитов ПА-66 происходит на участке *CD* (рис. 1а, кривая 1) для УАМ-50 в интервале  $\Delta T = 241\text{--}258.1^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 11.76$  кДж/кг и пиком плавления  $T_{\text{max}} = 253.8^\circ\text{C}$  для воздушно-сухого образца, а для водонасыщенного образца – в интервале  $\Delta T = 244\text{--}261.1^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 7.45$  кДж/кг и  $T_{\text{max}} = 256.5^\circ\text{C}$  (рис. 1, кривая 2). Снижение энтальпии плавления свидетельствует об уменьшении кристалличности на 37% за счет улучшения структурной однородности кристаллической составляющей полиамида, на что указывает смеще-

ние максимума температуры плавления на  $\Delta T = 2.7^\circ\text{C}$  в сторону высоких температур. Для УАМ-100 (рис. 1б) в интервале  $\Delta T = 246.3\text{--}262.5^\circ\text{C}$  участок *CD* с  $\Delta H = 8.15$  кДж/кг, пик плавления  $T_{\text{max}} = 258.3^\circ\text{C}$  для воздушно-сухого образца (рис. 1б, кривая 1), а для водонасыщенного образца – в интервале  $\Delta T = 246.8\text{--}261.8^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 2.71$  кДж/кг  $T_{\text{max}} = 258.1^\circ\text{C}$  (рис. 1б, кривая 2). Из соотношения энтальпий плавления видно, что кристалличность образца мембраны УАМ-100 при набухании уменьшается практически на 67%. Подобное снижение, как отмечалось выше, происходит из-за анизотропного уменьшения поверхности кристаллитов в ламелях, образующихся при прядении нейлоновых нитей для изготовления дренажного слоя. С целью детального анализа кристаллических образований в ПА-66 выполнено разложение эндотермических пиков кривой ДСК на гауссовы контуры. Число гауссовых контуров определялось из соображений достижения максимального значения коэффициента регрессии  $R = 0.99$ .

Результаты деконволюции эндотермических пиков пленок УАМ-50 и УАМ-100 воздушно-сухих образцов представлены на рис. 2а и 3а, а для водонасыщенных образцов на рис. 2б и 3б. Теплофизические характеристики образцов представлены в табл. 2.

Наиболее удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических кривых получено суперпозицией трех гауссианов с индексом регрессии  $R = 0.99$ . Как следует из результатов расчетов (табл. 2), на кривых ДСК, приведенных на рис. 2 и 3, присутствуют три гауссиана разной интенсивности и эндотермически узкий, широкий пики и пик промежуточной интенсивности для воздушно-сухого и водонасыщенного образцов. Это свидетельствует о наличии гетерогенности кристаллической фазы композитного материала, включающего низкотемпературную и высокотемпературную составляющие, где энтальпия плавления уменьшается для УАМ-50 низкотемпературной фазы с 3.04 до 1.38 кДж/кг, высокотемпературной – с 8.12 до 1.76 кДж/кг и для УАМ-100 низкотемпературной фазы – с 4.99 до 1.5 кДж/кг, высокотемпературной – с 2.33 до 0.77 кДж/кг.

На кривых ДСК 1 и 2 для обратноосмотической пленки МГА-95 (рис. 4) в интервале температур  $250\text{--}265^\circ\text{C}$  проявляется сложный эндотермический пик, который, согласно справочным данным, соответствует плавлению кристаллической фазы полиамида ПА-66. Характерной особенностью пика для воздушно-сухого образца (рис. 5а) является медленный рост со стороны низких температур и резкий спад в области высоких температур, а для водонасыщенного образца (рис. 5б) в этом же интервале температур наблюдается бимодальный узкий пик. Исходя из того, что начало плавления обусловлено разрушением

**Таблица 2.** Теплофизические характеристики образцов пленок УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95, рассчитанные по данным ДСК

Величина	Воздушно-сухой образец	Водонасыщенный образец
Мембрана УАМ-50		
$T_{пл. 1}, ^\circ\text{C}$	251.8	252.5
$S_{пл. 1}, \text{кДж/кг}$	3.04	1.38
$T_{пл. 2}, ^\circ\text{C}$	251.7	255.3
$S_{пл. 2}, \text{кДж/кг}$	0.82	4.23
$T_{пл. 3}, ^\circ\text{C}$	253.7	256.5
$S_{пл. 3}, \text{кДж/кг}$	8.12	1.76
$\sum_1^3 S_i, \text{кДж/кг}$	11.98	7.37
$c_1 = \frac{S_1}{\sum_1^3 S_i}$	0.25	0.19
$c_2 = \frac{S_2}{\sum_1^3 S_i}$	0.07	0.57
$c_3 = \frac{S_3}{\sum_1^3 S_i}$	0.68	0.24
Мембрана УАМ-100		
$T_{пл. 1}, ^\circ\text{C}$	255.4	254.2
$S_{пл. 1}, \text{кДж/кг}$	4.99	1.50
$T_{пл. 2}, ^\circ\text{C}$	257.5	256.9
$S_{пл. 2}, \text{кДж/кг}$	2.69	2.04
$T_{пл. 3}, ^\circ\text{C}$	258.5	258.6
$S_{пл. 3}, \text{кДж/кг}$	2.23	0.77
$\sum_1^3 S_i, \text{кДж/кг}$	9.91	4.31
$c_1 = \frac{S_1}{\sum_1^3 S_i}$	0.50	0.35
$c_2 = \frac{S_2}{\sum_1^3 S_i}$	0.27	0.47
$c_3 = \frac{S_3}{\sum_1^3 S_i}$	0.22	0.18
Мембрана МГА-95		
$T_{пл. 1}, ^\circ\text{C}$	254.3	252.5
$S_{пл. 1}, \text{кДж/кг}$	6.06	0.99
$T_{пл. 2}, ^\circ\text{C}$	255.8	257.6

Таблица 2. Окончание

Величина	Воздушно-сухой образец	Водонасыщенный образец
$S_{пл. 2}$ , кДж/кг	0.52	3.84
$T_{пл. 3}$ , °C	257.4	257.9
$S_{пл. 3}$ , кДж/кг	1.99	1.72
$\sum_1^3 S_i$ , кДж/кг	8.57	6.55
$c_1 = \frac{S_1}{\sum_1^3 S_i}$	0.71	0.15
$c_2 = \frac{S_2}{\sum_1^3 S_i}$	0.06	0.57
$c_3 = \frac{S_3}{\sum_1^3 S_i}$	0.23	0.26

наименее, а окончание наиболее совершенных кристаллических образований полимера, общий интервал плавления может быть характеристикой его структурной неоднородности.

Для выявления возможных фазовых превращений данные эндотермических пиков на кривых ДСК (рис. 5) разложены на гауссовы контуры. Наиболее удовлетворительное совпадение

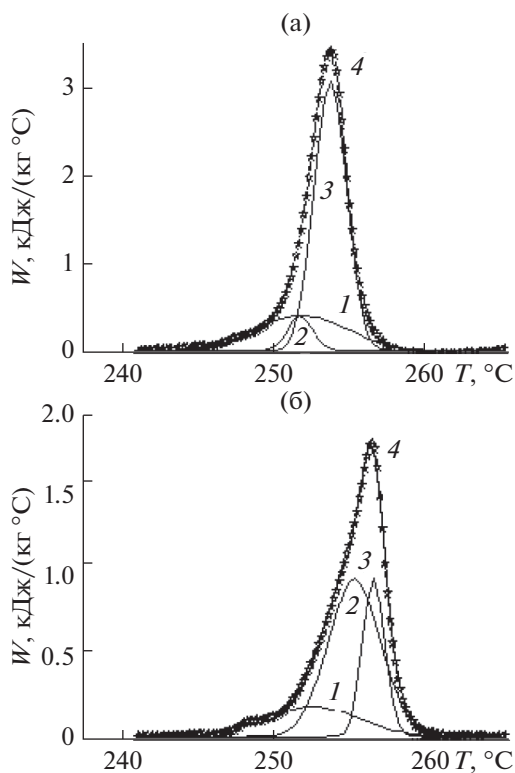


Рис. 2. Результаты деконволюции воздушно-сухого (а) и водонасыщенного (б) образцов ультрафильтрационной пленки УАМ-50: 1–3 – результат аппроксимации (гауссианы), 4 – эксперимент.

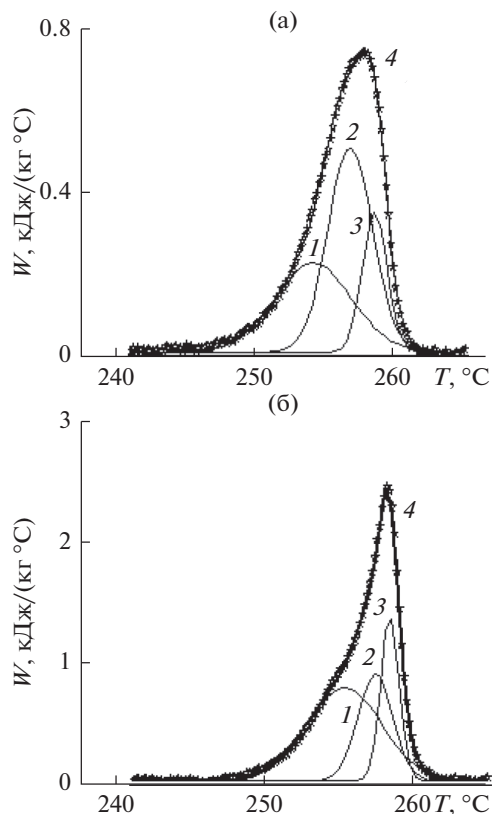


Рис. 3. Результаты деконволюции воздушно-сухого (а) и водонасыщенного (б) образцов пленки УАМ-100: 1–4 – см. рис. 2.

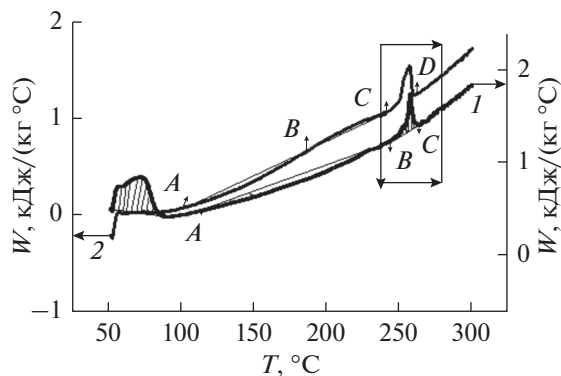


Рис. 4. Экспериментальные кривые ДСК для обратноосмотической пленки МГА-95: 1 – воздушно-сухой образец, 2 – водонасыщенный.

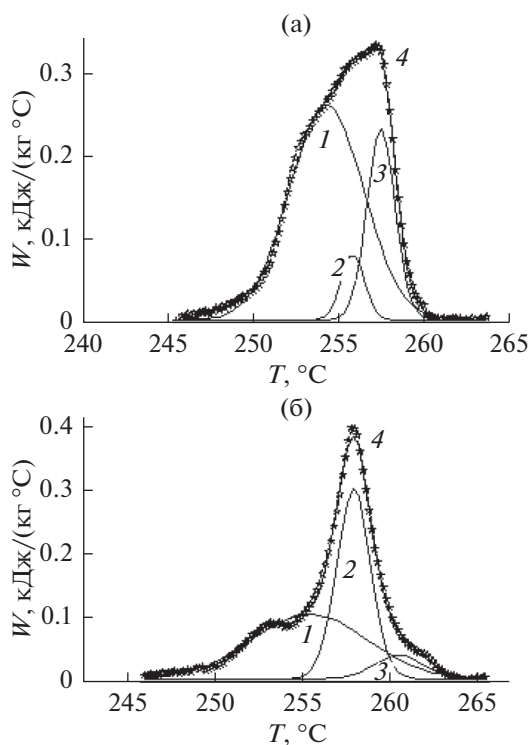


Рис. 5. Результаты деконволюции воздушно-сухого (а) и водонасыщенного (б) образцов обратноосмотической пленки МГА-95: 1–4 – см. рис. 2.

экспериментальных и теоретических кривых получено суперпозицией трех гауссианов с индексом регрессии  $R = 0.99$ . Теплофизические характеристики образцов пленки МГА-95, рассчитанные по данным ДСК, представлены в табл. 2.

На кривых ДСК присутствуют три гауссиана разной интенсивности: эндотермический узкий пик при 257.4 и 257.9°C; широкий, менее интенсивный пик при 254.3 и 252.5°C; пик промежуточной интенсивности при температурах 255.8 и 257.6°C для воздушно-сухого и водонасыщенного

образцов соответственно. Это свидетельствует о гетерогенности кристаллической фазы композитного материала МГА-95, включающей низкотемпературную – 252.5°C и высокотемпературную – 257.9°C составляющие. Поскольку гетерогенная система представляет собой аддитивную сумму вкладов каждой фазы, то площади пиков характеризуют содержание кристаллических фаз в образцах. По рассчитанным площадям пиков определены относительные содержания кристаллических фаз в образцах и их изменения при сорбции воды (табл. 2). Величина суммарного теплового потока эндотермических пиков указывает на снижение кристалличности в водонасыщенном образце ацетатцеллюлозной пленки, так как удельная теплота плавления (энтальпия) изменяется с 8.57 до 6.55 кДж/кг.

На кривой ДСК водонасыщенного образца (рис. 4, кривая 1) эндотермический эффект при  $T_{\max} = 72.8^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = 8.95$  Дж/кг соответствует удалению поверхностной влаги и молекул воды, слабо связанных водородными связями с полимерными макромолекулами аморфных фаз композиционной пленки МГА-95. При дальнейшем увеличении температуры в интервале от 115 до 244°C (AB) проявляется экзотермический эффект с энтальпией  $\Delta H = -0.97$  Дж/кг, что указывает на структурирование молекул аморфных фаз, которые при набухании переходят в неравновесное состояние. В интервале температур 50–65°C для воздушно-сухого образца (рис. 4, кривая 1) четко фиксируется расстеклование структуры. Затем кривая ДСК от точки A с температурой 105°C стремится вверх, что соответствует увеличению теплоемкости за счет кинетической подвижности сегментов макромолекул аморфных фаз композита МГА-95. Если провести касательную к кривой ДСК от точки A с температурой 105°C к точке C с температурой 240°C, то касательная пересечет кривую ДСК в точке B с температурой 185°C (рис. 4, кривая 2). Приведение кривой ДСК к нулевому уровню (рис. 4, кривая 2) позволило выявить в интервале 105–240°C два эффекта. Первый в интервале 105–185°C – экзотермический эффект при  $T_{\max} = 145^\circ\text{C}$  с  $\Delta H = -2.38$  кДж/кг. В подтверждение полученных результатов в [18, 19] представлены эксперименты по ДСК целлюлозы с различной степенью ацетилирования в диапазоне от 190 до 220°C и отмечено, что изменение теплоемкости полимеров связано с увеличением подвижности молекул, которые не очень велики для жесткой ацетатцеллюлозы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что на изменение структурных и теплофизических характеристик

влияет температура. Это позволяет сделать следующие выводы:

1. Для воздушно-сухих и водонасыщенных образцов композиционных пленок вида УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95 получены термоаналитические кривые, описывающие процесс дегидратации полупроницаемых мембран. Эксперименты по ДСК целлюлозы с различной степенью ацетилирования в диапазоне от 190 до 220°C показывают, что изменение теплоемкости полимеров связано с увеличением подвижности молекул, которая не велика в жесткой ацетатцеллюлозе и где близость молекул мешает процессу кристаллизации, происходящему в структуре ацетатцеллюлозной пленки.

2. Высокотемпературный эндотермический пик в интервале температур 250–265°C определяет плавление кристаллитов основы (ПА-66) композитной пленки МГА-95. Снижение степени кристалличности при сорбции воды связано с перераспределением соотношения между количеством совершенных кристаллических фаз в кристаллитах, имеющих разные величины энтальпии плавления. Величина суммарного теплового потока эндотермических пиков для мембраны МГА-95 изменяется с  $\Delta H = 8.57$  кДж/кг для воздушно-сухого до 6.55 для водонасыщенного образцов, для мембраны УАМ-50 – соответственно с 11.76 до 7.45 кДж/кг и для мембраны УАМ-100 – с 8.15 до 2.71 кДж/кг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиннов Е.А. Влияние внешних возмущений на энергию пульсаций температуры в нагреваемой пленке жидкости // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 485.
2. 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.
3. Onuki K., Hwang G.J., Arifal, Shimizu S. Electro-electrodialysis of Hydriodic Acid in the Presence of Iodine at Elevated Temperature // J. Memb. Sci. 2001. V. 192. № 1–2. P. 193.
4. Pourcelly G., Nikonenko V.V., Pismenskaya N.D., Yaroslavtsev A.B. Applications of Charged Membranes in Separation, Fuel Cells, and Emerging Processes. In: Ionic Interactions in Natural and Synthetic Macromolecules. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2012. P. 761.
5. Письменская Н.Д., Никоненко В.В., Мельник Н.А., Пурцели Ж., Ларше К. Влияние характеристик границы ионообменная мембрана/раствор на массоперенос при интенсивных токовых режимах // Электрохимия. 2012. № 6. С. 677.
6. Полянский Н.Г., Тулунов П.Е. Термическая устойчивость катионообменных смол // Успехи химии. 1971. Т. 11. Вып. 12. С. 2250.
7. Тулунов П.Е. Стойкость ионообменных материалов. М.: Химия, 1984. 232 с.
8. Котов В.В., Нетесова Г.А., Перегончая О.В., Кузнецова О.В. Неизотермическая дегидратация и десольватация катионообменных мембран // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. Вып. 2. С. 208.
9. Хабибуллин И.Л., Хамитов А.Т., Назмутдинов Ф.Ф. Моделирование процессов тепло- и массообмена в пористых средах при фазовых превращениях, инициируемых микроволновым нагревом // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 727.
10. Анашкин И.П., Клинов А.В., Акберов Р.Р. Моделирование первапорации смеси этанол–вода на мембране из гибридного оксида кремния методом молекулярной динамики // ТВТ. 2018. Т. 56. № 1. С. 71.
11. Васильева В.И., Письменская Н.Д., Акберова Э.М., Небавская К.А. Влияние термического воздействия на морфологию и степень гидрофобности поверхности гетерогенных ионообменных мембран // ЖФХ. 2014. Т. 88. № 8. С. 1114.
12. Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Хищенко К.В. Уравнения состояния полимерных материалов при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 1. С. 64.
13. Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Хищенко К.В. Уравнения состояния насыщенных органических соединений при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 5. С. 97.
14. Xiaoping G. Crystallization of Polyamide 66 Copolymers at High Supercoolings. PhD thesis. Tennessee: University of Tennessee, 2004. 261 p.
15. Савицкая Т.А., Шибайло Т.Н., Селевич К.А., Макаревич С.Е. Термические свойства интерполиэлектролитных комплексов хитозана и сульфата ацетата целлюлозы // Вестник БГУ. 2008. Сер. 2. № 3. С. 38.
16. Новиков С.Н., Ермолаева А.И., Тимошенков С.П., Коробова Н.Е., Горюнова Е.П. Влияние полимерных пористых пленок (трековых мембран) на кинетику изотермического испарения воды // ЖФХ. 2016. Т. 90. № 6. С. 913.
17. Угрозов В.В. Влияние нелинейности сорбции на проницаемость двухслойной мембраны // ЖФХ. 2015. Т. 89. № 3. С. 476.
18. Meier M.M., Kanis L.A., Soldi V. Characterization and Drug-permeation Profiles of Microporous and Dense Cellulose Acetate Membranes: Influence of Plasticizer and Pore Forming Agent // Int. J. Pharm. 2004. V. 278. № 1. P. 99.
19. Bernal-Ballén A., Kuritka I., Saha P. Preparation and Characterization of a Bioartificial Polymeric Material: Bilayer of Cellulose Acetate-PVA // Int. J. Polymer Science. 2016. V. 2016. P. 1.