

ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГИДРОГЕЛЕЙ КРАХМАЛА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ЛАТЕКСАМИ

И.П. Трифонова¹, В.А. Бурмистров¹, Н.В. Лосев², Ю.А. Родичева¹, И.М. Липатова², О.И. Койфман¹

¹Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр. 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: trifonova@isuct.ru

² Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, Академическая, 1, Иваново, Российская Федерация, 153045

E-mail: i_lipatova@bk.ru

Изучены реологические свойства крахмально-латексных композиций, подвергнутых механоактивации в роторно-импульсном аппарате. Показано, что для оценки эффективности модификации крахмала латексами на практике можно использовать подход, основанный на выборе нескольких интегральных критериев для описания свойств синтетического сополимера, как модификатора. Несколько интегральных критериев - гибкость, полярность и гидрофильность макромолекул, размер и электрокинетический потенциал частиц – были выбраны для оценки эффективности модификации крахмала синтетическими сополимерными латексами. Установлено, что рост вязкости композиций наблюдается для более гибких полимеров Binder RA, Binder A, Рузин с температурой стеклования (Tg) ниже 25 °С. Полимеры БАК Р и Аквапол с высокими значениями модуля E' снижают вязкость. Гидрофильность полимеров-допантов вносит определенный вклад в увеличение вязкости композиций. Отмечено повышение вязкости композиций при увеличении среднего размера частиц латексов.

Ключевые слова: кукурузный крахмал, стирол-акриловые сополимеры, полиуретановая дисперсия, роторно-импульсный аппарат, реология

FEATURES OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF STARCH HYDROGELS MODIFIED WITH SYNTHETIC LATEXES

I.P. Trifonova¹, V.A. Burmistrov¹, N.V. Losev², J.A. Rodicheva¹, I.M. Lipatova², O.I. Koifman¹

¹Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia, 153000

E-mail: trifonova@isuct.ru

²G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of Russian Academy of Science, 153045, Ivanovo, Russia

E-mail: i_lipatova@bk.ru

The rheological properties of starch-latex blends mechanically activated in a rotary-pulse apparatus were studied. Several integral criteria - flexibility, polarity and hydrophilicity of macromolecules, particle size and electrokinetic potential - were chosen to evaluate the effectiveness of starch modification with synthetic copolymer latexes. An increase in the blends viscosity was shown to observe for more flexible polymers Binder RA, Binder A, Ruzin with a glass transition temperature (Tg) below 25 °C. Polymers BAK R and Aquapol with high values of the modulus E' reduce viscosity. The hydrophilicity of synthetic copolymers and their particle size promote an increase in the blends viscosity.

Key words: corn starch, styrene-acrylic copolymers, polyurethane dispersion, rotary pulse apparatus, rheology

Для цитирования:

Трифорова И.П., Бурмистров В.А., Лосев Н.В., Родичева Ю.А., Липатова И.М., Койфман О.И. Особенности реологического поведения гидрогелей крахмала модифицированных синтетическими латексами. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 1. С. 19–27. DOI: 10.6060/R CJ.2023671.3.

For citation:

Trifonova I.P., Burmistrov V.A., Losev N.V., Rodicheva J.A., Lipatova I.M., Koifman O.I. Features of the rheological behavior of starch hydrogels modified with synthetic latexes. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 1. P. 19–27. DOI: 10.6060/R CJ.2023671.3.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с проблемами утилизации пластиковой упаковки в последние годы все более актуальной становится перспектива создания конкурентоспособных биоразлагаемых материалов на основе возобновляемого полимерного сырья [1–5]. Крахмал, который благодаря своей доступности и низкой стоимости занимает лидирующие позиции среди природных полимеров для производства биоразлагаемых материалов [6–8], имеет недостаточно хорошие пленкообразующие свойства и водостойкость. Смеси крахмала с пленкообразующими полимерами позволяют значительно улучшить эти свойства [9–13], но возникает проблема совмещения гидрофобного синтетического полимера и гидрофильного крахмала, особенно при высоком содержании последнего (> 30 мас.%), обусловленная особенностями надмолекулярной структуры крахмала [12–15]. Крахмал существует в нативном виде в виде дискретных полукристаллических гранул, которые при желатинизации теряют кристалличность, сильно набухают, но не разрушаются полностью [16,17]. Высокая дисперсность крахмально-синтетических смесей на основе гидрогелей крахмала может быть достигнута при разрушении набухших гранул крахмала. В литературе описаны различные способы воздействия, приводящие к разрушению набухших гранул: механический сдвиг, кавитация, пароструйная варка [18], ультразвуковая обработка [19, 20], микрофлюидизация [21], гидроакустическое воздействие [22]. Одним из наиболее эффективных способов повышения степени дисперсности гетерогенных жидких систем является их обработка в роторно-импульсном аппарате (РИА) [23, 24]. Такие устройства используются для производства эмульсий путем смешивания двух несмешивающихся жидкостей [25, 26], для ускорения химических процессов в гетерогенных системах [27], для интенсификации экстракции [28], для процессов деагломерации в наносуспензиях [29], а также для

расщепления гранул крахмала в гидрогелях [30, 31]. Механическая модификация жидкофазных материалов в РИА осуществляется за счет сочетания нескольких факторов (высокого напряжения сдвига, гидродинамической кавитации и турбулентности) обеспечивающих мощный массообмен на микроуровне [32, 33]. В наших более ранних исследованиях было установлено [34], что обработка жидких полисахаридных композиций в РИА обеспечивает значительное повышение однородности и прочностных свойств, формируемых из них пленок за счет структурной гомогенизации и снижения межфазного натяжения в дисперсиях.

Учитывая несомненную перспективность использования механоактивации при производстве гибридных биоразлагаемых пленок, целью настоящей работы было изучение реологических свойств формовочных растворов различного состава на основе крахмала и синтетических латексов различной природы, полученных с использованием РИА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были использованы кукурузный крахмал зольностью 0,30% (ОАО «Проксима», Россия), акриловые сополимеры: Рузин (ООО «СВАН-НН», Россия), Binder RA, Binder AF, («КЕМИТЕКС», Турция), БАК-Р (АО НИФХИ им. Л.Я. Карпова, Россия) и полиуретановая дисперсия Аквапол (ООО НПП Макромер, Россия) с массовой долей основного вещества 30-40%.

Водную суспензию, содержащую 5% кукурузного крахмала, нагревали при постоянном перемешивании на водяной бане до 95 °С, выдерживали 15 мин. до достижения желатинизации, обрабатывали в РИА при 80 °С в течение 10 с, охлаждали до 25 °С и смешивали с синтетическими латексами в необходимых соотношениях.

Реологические свойства крахмально-синтетических смесей исследовали на ротационном вискозиметре «Реотест-2». Температурный контроль на уровне 25 °С осуществляли с помощью термостата. Диапазон регулируемых скоро-

стей сдвига 1.5–1312 с⁻¹. Перед реологическими измерениями смеси выдерживали при комнатной температуре в течение 2 ч. Приведенные в статье результаты являются средним значением трех измерений (ошибка < 5%). Экспериментальные данные были описаны уравнением Оствальда – де Ваале [35]:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

где τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции (структурированности), Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – показатель неньютоновского течения раствора (индекс течения). Коэффициент корреляции составлял от 0.996 до 0.999.

ИК-Фурье-спектры высушенных до постоянного веса синтетических пленок регистрировали на спектрометре Nicolet 5700 (Thermo Nicolet Co., Waltham, США) в диапазоне длин волн 400 – 4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Для оценки содержания протонодонорных групп О-Н(N-H) по отношению к гидрофобным слабополярным связям С-Н были рассчитаны отношения интегральных интенсивностей S_{O-H}/S_{C-H} с использованием программы «OMNIC».

Размер коллоидных частиц синтетических модификаторов определяли методом динамического светорассеяния, а значения дзета-потенциала (ζ) – методом электрофоретического светорассеяния на приборе Malvern ZetaSizer Nano (Великобритания) при 25 °С с He-Ne 10 мВт лазере на длине волны 633 нм.

Динамические испытания образцов пленок проводили на приборе Eplexor 25N (NETZSCH-Gerätebau GmbH) в режиме растяжения с регистрацией действительной части модуля E' и тангенса угла механических потерь $tg\delta$. Температурные измерения проводили при частоте 1 Гц с шагом 1 °С/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтетические модификаторы могут быть охарактеризованы большим набором структурных параметров: соотношение звеньев сополимера, регулярность их расположения, степень разветвленности, стереорегулярность, молекулярная масса и молекулярно-массовое распределение и т.д. Очевидно, что все эти факторы будут влиять на взаимодействия модификатора с крахмалом и, следовательно, на их совместимость и свойства гибридного композита. Для практического использования более эффективным будет подход, основанный на выборе нескольких интегральных критериев для описания свойств синтетического сополимера, как модификатора.

Учитывая особенности строения и свойств крахмала, в качестве таких интегральных критериев допанта можно предложить следующие: гибкость, полярность и гидрофильность макромолекул, размер и электрокинетический потенциал частиц. В связи с этим, в настоящей работе было исследовано влияние этих факторов, характеризующих синтетические сополимеры разной химической природы, на реологические свойства композиционных материалов различного состава на основе кукурузного крахмала. Оценка гибкости макромолекул сложного состава и сополимеров была проведена с использованием таких параметров как температура стеклования и модуль упругости (получены из данных динамического механического анализа). Гидрофильность акриловых сополимеров: Рузина, Binder RA, Binder AF, БАК Р и полиуретановой дисперсии Аквапола оценивалась по ИК спектрам пленок на основе этих латексов. Размер и электрокинетический потенциал частиц определяли методом динамического светорассеяния синтетических дисперсий.

Анализ данных ДМА показывает, что среди исследованных модификаторов наибольшей температурой стеклования T_g обладает БАК Р (42,2 °С), а особенностью полиуретана Аквапол является очень широкий температурный интервал этого релаксационного перехода (10 – 60 °С). Значения T_g остальных модификаторов близки и составляют: 7,2 °С для Binder AF, 9,3 °С для Binder RA и 11,3 °С для Рузина. В связи с этим для сравнительной оценки гибкости синтетических модификаторов следует привлечь данные по E' при температуре +25 °С. В этом случае ряд по мере уменьшения гибкости (увеличения жесткости) будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Binder RA} > \text{Binder AF} > \text{Рузин} > \text{Аквапол} > \text{БАК Р} \\ 3,3 \text{ МПа} \quad 3,9 \text{ МПа} \quad 7,6 \text{ МПа} \quad 27,3 \text{ МПа} \quad 74,9 \text{ МПа}$$

На рис. 1 представлены ИК спектры пленок на основе исследованных синтетических модификаторов. Анализ спектров показывает, что несмотря на их сложный характер можно выделить полосы характеристических валентных колебаний связей О-Н (N-H), участвующих в Н-связывании, при 3500-3200 см⁻¹, связей С-Н при 3000-2800 см⁻¹ и карбонильных групп С=О при 1740-1720 см⁻¹. Учитывая, что вышеуказанные полосы хорошо разрешены, они могут быть использованы для оценки содержания протонодонорных О-Н(N-H) групп и полярных карбонильных

связей относительно «гидрофобных» и слабополярных С-Н связей. С этой были рассчитаны соотношения интегральных интенсивностей S_{O-H}/S_{C-H} и $S_{C=O}/S_{C-H}$, представленные в табл. 1.

Следует отметить, что оценка гидрофильности используемых модификаторов по соотношению S_{O-H}/S_{C-H} предполагает, что основной вклад в это свойство вносят амфипротонные группы О-Н и N-Н, обладающие как протонодонорными, так и протоноакцепторными свойствами по отношению к гидроксильным группам крахмала. В то же время и остальные полярные заместители модификаторов (карбонильные, сложноэфирные, уретановые) также вносят вклад в донорно-акцепторные взаимодействия с крахмалом. Кроме того, следует учитывать и вклад ОН групп в полярность синтетического модификатора, принимая во внимание ее дипольный момент 1.5 D.

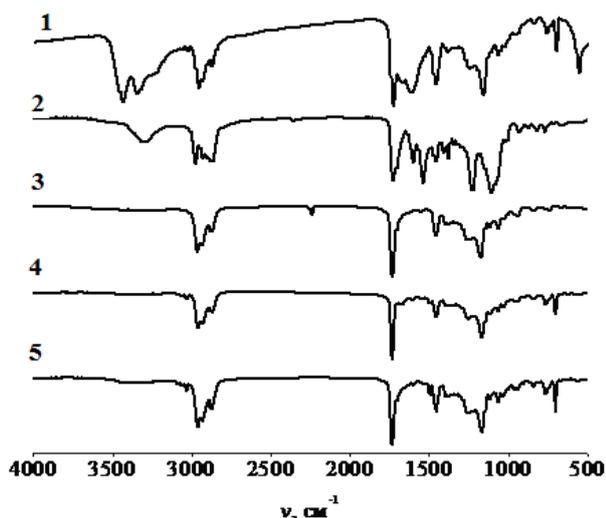


Рис. 1. ИК спектры синтетических модификаторов крахмала: 1 – Binder RA, 2 – Аквапол, 3 – БАК-Р, 4 – Рузин, 5 – Binder AF

Таблица 1
Характеристики ИК спектров модификаторов

Модификатор	Площадь полос			Соотношение площадей полос	
	S_{O-H}	$S_{C=O}$	S_{C-H}	$\frac{S_{O-H}}{S_{C-H}}$	$\frac{S_{C=O}}{S_{C-H}}$
Binder RA	21315,0	3863,2	10091,9	2,11	0,38
Binder AF	2380,0	4589,7	7540,1	0,32	0,61
БАК-Р	2501,8	4331,0	5836,7	0,43	0,74
Рузин	1265,5	2616,9	4542,8	0,28	0,58
Аквапол	5349,3*	4873,8	8711,8	0,61*	0,56

*общая полоса поглощения валентных колебаний О-Н и N-Н

Устойчивость и реологическое поведение крахмально-латексных смесей может быть связано с размером частиц модификатора, а также знаком и величиной электрокинетического потенциала дисперсии. Данные, полученные методом динамического рассеяния света на приборе Malvern ZetaSizer Nano, представлены в табл. 2. Исследуемая дисперсия стабилизирована двойным электрическим слоем, поверхность частиц дисперсной фазы заряжена отрицательно, а значения ζ -потенциала значительно различаются.

Таблица 2
Заряд и размер частиц модификаторов

Модификатор	Средний размер частиц, нм	ζ -потенциал, мВ
Binder RA	115	- 17,6
Binder AF	80	- 7,90
БАК-Р	310	- 35,1
Рузин	1055	- 1,10
Аквапол	600	- 10,6

Для оценки влияния содержания и свойств латексов на текучесть крахмальных гидрогелей были получены реологические кривые, которые приведены на рис. 2.

Полученные на основании реологических кривых параметры уравнения Оствальда – де Ваала [35, 36] приведены в табл. 3.

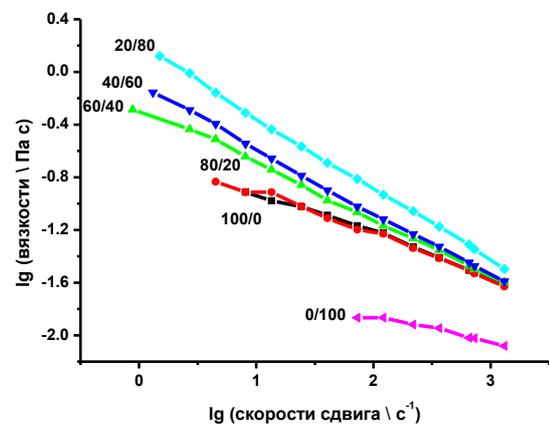
Полученные данные свидетельствуют, что все крахмально-латексные композиции являются псевдопластичными жидкостями, поскольку при предельно низких скоростях сдвига наблюдается течение, но эффективная вязкость уменьшается при увеличении скорости сдвига (или напряжения сдвига), и наблюдается так называемое сдвиговое разжижение [37].

Общая структурная особенность неньютоновских жидкостей состоит в присутствии единиц течения, размеры которых намного превышают размеры молекул жидкости. Таким образом, вязкая жидкость рассматривается как сплошная дисперсионная среда, а любые частицы — как дисперсная фаза [37]. Ситуация осложняется тем, что частицы при взаимодействии между собой образуют некие агрегата, кластеры, то есть система становится структурированной.

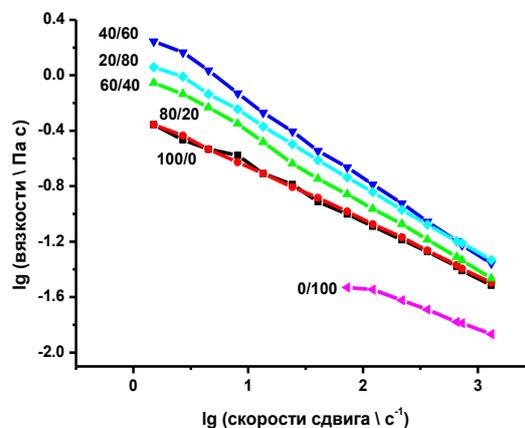
Увеличение содержания крахмала в латексе приводит к росту вязкости для всех композиций кроме Аквапола, для которого вязкость растет монотонно (табл. 3). Концентрационные зависимости вязкости для композиций, содержащих Binder AF, Binder RA, БАК Р и Рузин имеют экс-

тремальный характер. Если сравнивать вязкость смесей с вязкостью крахмального гидрогеля без добавок, то можно отметить смеси с Акваполлом, демонстрирующие вязкость меньше аддитивных значений (табл. 3, рис. 3). Для БАК Р наблюдается

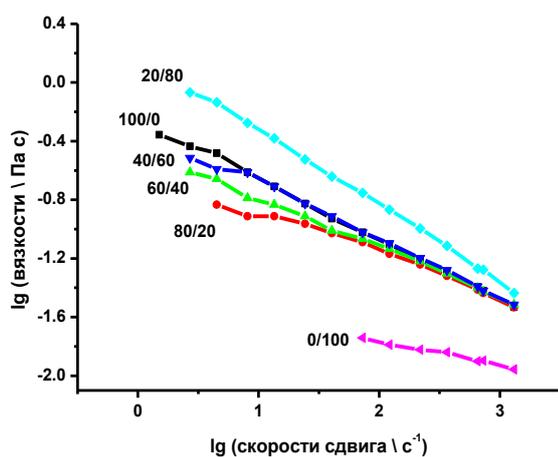
необычное влияние состава смеси на вязкость: при содержании БАК Р от 0 до 50% вязкость композиции выше аддитивной, а от 50 до 100% - ниже аддитивной (рис. 3).



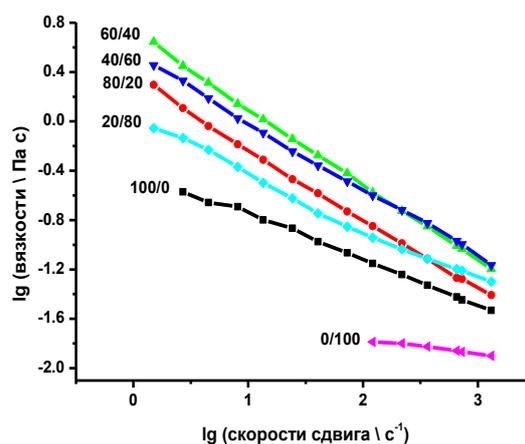
а



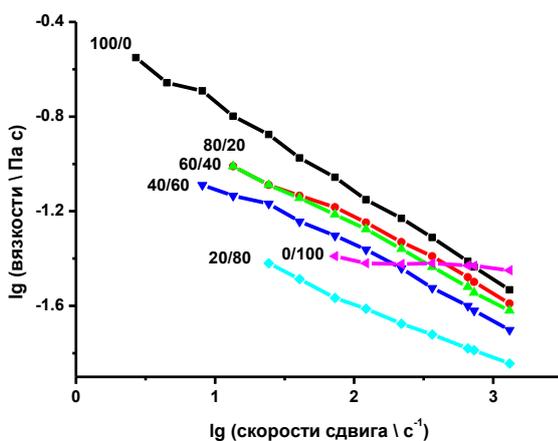
б



в



г



д

Рис. 2. реологические кривые для смесей крахмал-модификатор: а – Binder RA; б – Binder AF; в – БАК-Р; г – Рузин; д – Аквапол.
Первая цифра в обозначении кривых – содержание крахмала, вторая – модификатора в смеси

Параметры уравнения Оствальда – де Ваале и вязкость крахмально-синтетических композиций

Соотношение Крах-мал/Латекс	$k, \text{Па} \cdot \text{с}^n$	n	Вязкость при 1.5 с^{-1}	Степень загущения (η_2^* / η_1^*)
Binder RA				
100/0	0,476	0,616	0,331	
80/20	0,497	0,606	0,387	1,17
60/40	0,807	0,549	0,662	2,00
40/60	1,079	0,514	1,324	4,00
20/80	2,446	0,436	3,057	9,24
0/100	0,039	0,787	0,015	
Binder AF				
100/0	0,476	0,616	0,331	
80/20	0,477	0,621	0,332	1,01
60/40	0,913	0,537	0,661	1,99
40/60	1,802	0,472	1,321	3,99
20/80	1,107	0,552	0,859	2,60
0/100	0,121	0,695	0,031	
БАК-Р				
100/0	0,476	0,616	0,331	
80/20	0,315	0,677	0,125	0,38
60/40	0,343	0,670	0,196	0,59
40/60	0,456	0,627	0,254	0,77
20/80	1,470	0,485	0,703	2,12
0/100	0,042	0,814	0,021	
Рузин				
100/0	0,476	0,616	0,331	
80/20	2,214	0,444	2,178	6,58
60/40	5,754	0,383	4,840	14,62
40/60	4,016	0,447	3,145	9,50
20/80	0,743	0,628	0,968	2,92
0/100	0,032	0,871	0,017	
Аквапол				
100/0	0,476	0,616	0,331	
80/20	0,295	0,664	0,119	0,36
60/40	0,263	0,670	0,118	0,35
40/60	0,210	0,675	0,094	0,28
20/80	0,070	0,773	0,047	0,14
0/100	0,052	0,949	0,045	

η_1^* , Pa·s – вязкость крахмального гидрогеля;

η_2^* , Pa·s – вязкость крахмально-синтетической смеси

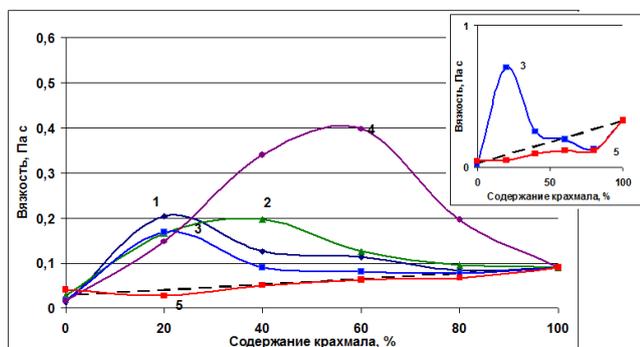


Рис. 3. Зависимость вязкости от состава смеси крахмал-модификатор при скорости сдвига 1.5 с^{-1} : 1 – Binder AF; 2 – Binder RA; 3 – БАК Р; 4 – Рузин; 5 – Аквапол

Наблюдается корреляция между ростом вязкости композиций крахмал-латекс и такими параметрами полимера-молификатора как температура стеклования и гибкость (см. выше). Полимеры БАК Р и Аквапол с высокими значениями модуля E' , у которых T_g превышает температуру измерения вязкости композиций, снижают вязкость. Более гибкие при комнатной температуре Binder AF, Binder RA и Рузин увеличивают вязкость.

В этих двух группах «гибких» и «жестких» полимеров прослеживается достаточно четкая корреляция, как с гибкостью, так и с размером и зарядом частиц.

Гибкий модификатор	Жесткий модификатор
Гибкость	
Binder AF ≈ Binder RA > Рузин	Аквапол > БАК Р
Размер частиц	
Рузин > Binder RA > Binder AF	Аквапол > БАК Р
Дзета-потенциал	
Binder RA > Binder AF > Рузин	БАК Р > Аквапол
Гидрофильность	
Binder RA > Binder AF > Рузин	Аквапол > БАК Р
Загущающая способность	
Рузин > Binder RA > Binder AF	БАК Р > Аквапол

Таким образом, высокие значения вязкости для смесей с Рузином связаны с его самым большим размером частиц и их малым зарядом, что приводит к дополнительному структурированию системы.

ВЫВОДЫ

Для оценки взаимодействия модификатора с крахмалом были выбраны и определены следующие критерии: гибкость и гидрофильность макромолекул, размер и электрокинетический потенциал частиц. Из температурных зависимостей модуля E' и тангенса угла механических потерь, полученных методом ДМА, определена температура стеклования полимеров-модификаторов и их гибкость при температуре 25 °С. Установлено, что рост вязкости композиций наблюдается для более

гибких полимеров с температурой стеклования ниже 25 °С. Гидрофильность полимеров-допантов, определенная из соотношения интегральных интенсивностей SO-H/SC-H и SC=O/SC-H, вносит определенный вклад в увеличение вязкости композиций. Но наиболее явное соответствие наблюдается между повышением вязкости композиций и размером частиц модификатора.

Если рассматривать латексы, как добавки для регулирования вязкости крахмального гидрогеля, то необходимо оценивать влияние их небольших количеств (до 40%). В этой области загущающей способностью обладают Binder AF, Binder RA и Рузин, снижают вязкость БАК и Аквапол.

Работа выполнена в рамках госконтрактов (изучение модификаторов – Тема № FZZW-2023-0009, изучение реологии – Тема № 01201260484). Размер и электрокинетический потенциал определяли с помощью оборудования Центра коллективного пользования «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований». Динамический механический анализ выполнен с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

- Ahmed T., Shahid M., Azeem F., Rasul I., Shah A.A., Noman M., Hameed A., Manzoor N., Manzoor I., Muhammad S. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. P. 7287–7298.
- Jayasekara R., Harding I.H., Bowater I., Lonergan G. Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation. *J. Polym. Environ.* 2005. V.13. P. 231–251.
- Leja K., Lewandowicz G. Polymer biodegradation and biodegradable polymers – A review. *Pol. J. Environ. Stud.* 2010. V. 19. P. 255–266.
- Carvalho A.J.F. Starch: Major sources, properties and applications as thermoplastic materials, in: *M.N. Belgacem, A. Gandini (Eds.), Monomers, polymers and composites from renewable resources*, Science, Elsevier, 2008. P. 321–342.
- Gandini A., Lacerda T.M., Carvalho A.J., Trovatti E. Progress of polymers from renewable resources: furans, vegetable oils, and polysaccharides. *Chem. Rev.* 2016. V. 116. P. 1637–1669.
- Yu L., Dean K., Li L. Polymer blends and composites from renewable resources. *Prog. Polym. Sci.* 2006. V. 31. P. 576–602.

REFERENCES

- Ahmed T., Shahid M., Azeem F., Rasul I., Shah A.A., Noman M., Hameed A., Manzoor N., Manzoor I., Muhammad S. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. P. 7287–7298.
- Jayasekara R., Harding I.H., Bowater I., Lonergan G. Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation. *J. Polym. Environ.* 2005. V.13. P. 231–251.
- Leja K., Lewandowicz G. Polymer biodegradation and biodegradable polymers – A review. *Pol. J. Environ. Stud.* 2010. V.19. P. 255–266.
- Carvalho A.J.F. Starch: Major sources, properties and applications as thermoplastic materials, in: *M.N. Belgacem, A. Gandini (Eds.), Monomers, polymers and composites from renewable resources*, Science, Elsevier, 2008. P. 321–342.
- Gandini A., Lacerda T.M., Carvalho A.J., Trovatti E. Progress of polymers from renewable resources: furans, vegetable oils, and polysaccharides. *Chem. Rev.* 2016. V. 116. P. 1637–1669.
- Yu L., Dean K., Li L. Polymer blends and composites from renewable resources. *Prog. Polym. Sci.* 2006. V. 31. P. 576–602.

7. *Siracusa V., Rocculi P., Romani S., Rosa M.D.* Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 2008. V. 19. P. 634–643.
8. *Tharanathan R.N.* Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends Food Sci. Technol.* 2003. V. 14. P. 71–78.
9. *Lipatova I.M., Losev N.V., Makarova L.I., Rodicheva J.A., Burmistrov V.A.* Effect of composition and mechanoactivation on the properties of films based on starch and chitosans with high and low deacetylation. *Carbohydr. Polym.* 2020. 239. 116245.
10. *Burmistrov V.A., Lipatova I.M., Tifonova I.P., Losev N.V., Rodicheva J.A., Koifman O.I.* Polyurethane and styrene-acrylic copolymer as modifiers for starch composites preparation under the mechanochemical activation: a multifactorial approach. *Mater. Lett.* 2022. 132502.
11. *Tabasum S., Younas M., Zaeem M.A., Majeed I., Majeed M., Noreen A., Iqbal M.N., Zia K.M.* A review on blending of corn starch with natural and synthetic polymers, and inorganic nanoparticles with mathematical modeling. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 122. P. 969–996.
12. *Kalambur S., Rizvi S.S.H.* An overview of starch-based plastic blends from reactive extrusion. *J. Plast. Film Sheet.* 2006. V. 22. P. 39–58.
13. *Averous L.* Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review. *J. Macromol. Sci., Part C: Polym. Rev.* 2004. V. 44. P. 231–274.
14. *Kalambur S., Rizvi S.S.H.* Biodegradable and functionally superior starch–polyester nanocomposites from reactive extrusion. *J. Appl. Polym. Sci.* 2005. V. 96. N 4. P. 1072–1082.
15. *Zhu J., Li L., Chen L., Li X.* Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules. *Food Hydrocol.* 2012. V. 29. N 1. P. 116–122.
16. *Chen P., Yu L., Simon G.P., Liu X., Dean K., Chen L.* Internal structures and phasetransitions of starch granules during elatinization. *Carbohydr. Polym.* 2011. V. 83. N 4. P. 1975–1983.
17. *Chen X., Du X., Chen P., Guo L., Xu Y., Zhou X.* Morphologies and gelatinization behaviours of high-amylose maizestarches during heat treatment. *Carbohydr. Polym.* 2017. V. 157. P. 637–642.
18. *Fernga L.-H., Chen S.-H., Lin Y.-A.* Effect of steam jet cooking on the destruction of corn starches. *Procedia Food Sci.* 2011. V. 1. P. 1295–1300.
19. *Pareta R., Edirisinghe M.J.* A novel method for the preparation of starch films and coatings. *Carbohydr. Polym.* 2006. V. 63. P. 425–431.
20. *Zuo Y.Y.J., Hebraud P., Hemar Y., Ashokkumar M.* Quantification of high-power ultrasound induced damage on potato starch granules using light microscopy. *Ultrason. Sonochem.* 2012. V. 19. P. 421–426.
21. *Augustin M.A., Sanguansri P., Htoon A.* Functional performance of a resistant starch ingredient modified using a microfluidiser. *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 2008. V. 9. P. 224–231.
22. *Jimenez A., Fabra M.J., Talens P., Chiralt A.* Influence of hydroxypropylmethylcellulose addition and homogenization conditions on properties and ageing of corn starch based films. *Carbohydr. Polym.* 2012. V. 89. P. 676–686.
23. *Zhang J., Xu S., Li W.* High shear mixers: a review of typical applications and studies on power draw, flow pattern, energy dissipation and transfer properties. *Chem. Eng. Process.* 2012. V. 57–58. P. 25–41.
24. *Patil P.N., Gogate P.R., Csoka L., Dregelyi-Kiss A., Siracusa V., Rocculi P., Romani S., Rosa M.D.* Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 2008. V. 19. P. 634–643.
8. *Tharanathan R.N.* Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends Food Sci. Technol.* 2003. V. 14. P. 71–78.
9. *Lipatova I.M., Losev N.V., Makarova L.I., Rodicheva J.A., Burmistrov V.A.* Effect of composition and mechanoactivation on the properties of films based on starch and chitosans with high and low deacetylation. *Carbohydr. Polym.* 2020. 239. 116245.
10. *Burmistrov V.A., Lipatova I.M., Tifonova I.P., Losev N.V., Rodicheva J.A., Koifman O.I.* Polyurethane and styrene-acrylic copolymer as modifiers for starch composites preparation under the mechanochemical activation: a multifactorial approach. *Mater. Lett.* 2022. 132502.
11. *Tabasum S., Younas M., Zaeem M.A., Majeed I., Majeed M., Noreen A., Iqbal M.N., Zia K.M.* A review on blending of corn starch with natural and synthetic polymers, and inorganic nanoparticles with mathematical modeling. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 122. P. 969–996.
12. *Kalambur S., Rizvi S.S.H.* An overview of starch-based plastic blends from reactive extrusion. *J. Plast. Film Sheet.* 2006. V. 22. P. 39–58.
13. *Averous L.* Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review. *J. Macromol. Sci., Part C: Polym. Rev.* 2004. V. 44. P. 231–274.
14. *Kalambur S., Rizvi S.S.H.* Biodegradable and functionally superior starch–polyester nanocomposites from reactive extrusion. *J. Appl. Polym. Sci.* 2005. V. 96. N 4. P. 1072–1082.
15. *Zhu J., Li L., Chen L., Li X.* Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules. *Food Hydrocol.* 2012. V. 29. N 1. P. 116–122.
16. *Chen P., Yu L., Simon G.P., Liu X., Dean K., Chen L.* Internal structures and phasetransitions of starch granules during elatinization. *Carbohydr. Polym.* 2011. V. 83. N 4. P. 1975–1983.
17. *Chen X., Du X., Chen P., Guo L., Xu Y., Zhou X.* Morphologies and gelatinization behaviours of high-amylose maizestarches during heat treatment. *Carbohydr. Polym.* 2017. V. 157. P. 637–642.
18. *Fernga L.-H., Chen S.-H., Lin Y.-A.* Effect of steam jet cooking on the destruction of corn starches. *Procedia Food Sci.* 2011. V. 1. P. 1295–1300.
19. *Pareta R., Edirisinghe M.J.* A novel method for the preparation of starch films and coatings. *Carbohydr. Polym.* 2006. V. 63. P. 425–431.
20. *Zuo Y.Y.J., Hebraud P., Hemar Y., Ashokkumar M.* Quantification of high-power ultrasound induced damage on potato starch granules using light microscopy. *Ultrason. Sonochem.* 2012. V. 19. P. 421–426.
21. *Augustin M.A., Sanguansri P., Htoon A.* Functional performance of a resistant starch ingredient modified using a microfluidiser. *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 2008. V. 9. P. 224–231.
22. *Jimenez A., Fabra M.J., Talens P., Chiralt A.* Influence of hydroxypropylmethylcellulose addition and homogenization conditions on properties and ageing of corn starch based films. *Carbohydr. Polym.* 2012. V. 89. P. 676–686.
23. *Zhang J., Xu S., Li W.* High shear mixers: a review of typical applications and studies on power draw, flow pattern, energy dissipation and transfer properties. *Chem. Eng. Process.* 2012. V. 57–58. P. 25–41.

- Horvath M. Intensification of biogas production using pre-treatment based on hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2016. V. 30. P. 79–86.
25. Scholz P., Keck C.M. Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. *Int. J. Pharm.* 2015. V. 482. P. 110–117.
 26. Hall S., Cooke M., El-Hamouz A., Kowalski A.J. Droplet break-up by in-line Silverson rotor-stator mixer. *Chem. Eng. Sci.* 2011. V. 66. P. 2068–2079.
 27. Losev N.V., Lipatova I.M. Application of hydroacoustic treatment for intensification of alkaline deacetylation of chitin. *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. V. 88. P. 356–361.
 28. Promtov M., Stepanov A., Aleshin A., Kolesnikova M. Intensification of humic acid extraction by pulse flow of vermicompost and sapropel slurries. *Chem. Eng. Res. Des.* 2016. V. 108. P. 217–221.
 29. Baldyga J., Makowski L., Orciuch W., Sauter C., Schuchmann H.P. Deagglomeration processes in high-shear devices. *Chem. Eng. Res. Des.* 2008. V. 86 P. 1369–1381.
 30. Cano A.I., Chafer M., Chiralt A., Gonzalez-Martinez C. Physical and microstructural properties of biodegradable films based on pea starch and PVA. *J. Food Eng.* 2015. V. 167. P. 59–64.
 31. Losev N.V., Lipatova I.M. Prediction of the dispersity of starch hydrogels prepared under hydroacoustic treatment. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83 P. 1309–1313.
 32. Rodgers T.L., Cooke M. Rotor-stator devices: The role of shear and the stator. *Chem. Eng. Res. Des.* 2012. V. 90. P. 323–327.
 33. Badve M.P., Alpar T., Pandit A.B., Gogate P.R., Csoka L. Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrason. Sonochem.* 2015. V. 22. P. 272–277.
 34. Burmistrov V.A., Lipatova I.M., Rodicheva J.A., Losev N.V., Trifonova I.P., Koifman O.I. Rheological, dynamic mechanical and transport properties of compatibilized starch/synthetic copolymer blends. *Eur. Polym. J.* 2019. V. 120. 109209.
 35. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб: Профессия, 2007. 560 с.
 36. Логинова М.Е., Мовсумзаде Э.М., Четвертнева И.А., Шаммазов А.М. О профилях скоростей биополимерных буровых растворов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 3. С. 50–55. DOI: 10.6060/rcj.2022663.7.
 37. Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Неньютоновское поведение структурированных систем. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 384 с.
 24. Patil P.N., Gogate P.R., Csoka L., Dregelyi-Kiss A., Horvath M. Intensification of biogas production using pre-treatment based on hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2016. V. 30. P. 79–86.
 25. Scholz P., Keck C.M. Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. *Int. J. Pharm.* 2015. V. 482. P. 110–117.
 26. Hall S., Cooke M., El-Hamouz A., Kowalski A.J. Droplet break-up by in-line Silverson rotor-stator mixer. *Chem. Eng. Sci.* 2011. V. 66. P. 2068–2079.
 27. Losev N.V., Lipatova I.M. Application of hydroacoustic treatment for intensification of alkaline deacetylation of chitin. *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. V. 88. P. 356–361.
 28. Promtov M., Stepanov A., Aleshin A., Kolesnikova M. Intensification of humic acid extraction by pulse flow of vermicompost and sapropel slurries. *Chem. Eng. Res. Des.* 2016. V. 108. P. 217–221.
 29. Baldyga J., Makowski L., Orciuch W., Sauter C., Schuchmann H.P. Deagglomeration processes in high-shear devices. *Chem. Eng. Res. Des.* 2008. V. 86 P. 1369–1381.
 30. Cano A.I., Chafer M., Chiralt A., Gonzalez-Martinez C. Physical and microstructural properties of biodegradable films based on pea starch and PVA. *J. Food Eng.* 2015. V. 167. P. 59–64.
 31. Losev N.V., Lipatova I.M. Prediction of the dispersity of starch hydrogels prepared under hydroacoustic treatment. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83 P. 1309–1313.
 32. Rodgers T.L., Cooke M. Rotor-stator devices: The role of shear and the stator. *Chem. Eng. Res. Des.* 2012. V. 90. P. 323–327.
 33. Badve M.P., Alpar T., Pandit A.B., Gogate P.R., Csoka L. Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrason. Sonochem.* 2015. V. 22. P. 272–277.
 34. Burmistrov V.A., Lipatova I.M., Rodicheva J.A., Losev N.V., Trifonova I.P., Koifman O.I. Rheological, dynamic mechanical and transport properties of compatibilized starch/synthetic copolymer blends. *Eur. Polym. J.* 2019. V. 120. 109209.
 35. Malkin A.Ya., Isayev A.I., *Rheology. Concept, Methods, and Applications.* (3th ed.), Toronto: ChemTech Publishing, 2017. 486 p.
 36. Loginova M.E., Movsumzade E.M., Chetvertneva I.A., Shammazov A.M. On velocity profiles of biopolymer drilling fluids. *Ros. Chem. J. (J. Ros. chemical society)*. 2022. V. LXVI. N 3. P. 50–55 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2022663.7.
 37. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Non-Newtonian behavior of structured systems. Moscow: TECHNOSPHERE. 2016. 384 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 18.01.2023
Принята к опубликованию 13.03.2023

Received 18.01.2023
Accepted 13.03.2023