

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА И МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО КРАХМАЛА

И.М. Липатова, Н.В. Лосев, И.П. Трифонова

Ирина Михайловна Липатова (ORCID 0000-0002-9348-3093), Николай Владимирович Лосев (ORCID 0000-0002-8514-2889)*

Научно-исследовательский отдел №4 Института химии растворов РАН, Академическая, 1, Иваново, Российская Федерация, 153045

E-mail: i_lipatova@bk.ru, nvl@isc-ras.ru*

Ирина Павловна Трифонова (ORCID 0000-0002-0892-6233)

Кафедра химии и технологии высокомолекулярных соединений, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: trifonova@isuct.ru

Натуральный каучук (НК) является ценным сырьем растительного происхождения, широко используемым в различных отраслях промышленности. Отходы натурального каучука трудно разлагаются при сбросе в окружающую среду, что обуславливает возрастающую проблему утилизации твердых отходов на его основе. В настоящей работе для повышения биodeградируемости в латекс НК вводили 10, 20 и 30% крахмала в клеестеризованном состоянии, затем из полученных дисперсий отливали пленки. Для повышения физико-механических характеристик гибридных пленок крахмальный гидрогель перед смешением с латексом каучука подвергали жидкофазной механоактивации в роторно-импульсном аппарате (РИА). В таких аппаратах жидкий материал подвергается комбинированному воздействию кавитации и высоких сдвиговых напряжений. В крахмальный гидрогель для стабилизации дисперсий вводили аммиак либо до обработки в РИА, либо после нее, соответственно активация осуществлялась при pH 10 или при pH 6. Установлено, что механическая активация вызывает снижение вязкости крахмальных гидрогелей за счет полного расщепления крахмальных гранул и увеличения содержания водорастворимой фракции. Размер коллоидных частиц гидрогеля уменьшается от 60-100 мкм до 0,150 и 0,195 мкм для активации при pH 10 и pH 6, соответственно. Механическая активация крахмала в присутствии аммиака обуславливает увеличение прочности гибридных пленок при разрыве на 50-75%, а при введении аммиака после активации прочность увеличивалась на 25-55% по сравнению с пленками, полученными на основе неактивированного крахмала. Установлено, что механическая активация крахмала способствовала увеличению скорости биodeградации в увлажненном грунте. Пленки из натурального каучука, содержащие 30% активированного в РИА крахмала, удовлетворяют стандартизированному критерию биodeградируемости.

Ключевые слова: натуральный каучук, крахмал, роторно-импульсный аппарат, механоактивация, биodeградируемость

FABRICATION AND PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON NATURAL RUBBER AND MECHANICALLY ACTIVATED STARCH

I.M. Lipatova, N.V. Losev, I.P. Trifonova

Irina M. Lipatova (ORCID 0000-0002-9348-3093), Nikolay V. Losev (ORCID 0000-0002-8514-2889)*

Research Department No. 4, Institute of Solution Chemistry of the RAS, Akademicheskaya st., 1, Ivanovo, 153045, Russia

E-mail: i_lipatova@bk.ru, nvl@isc-ras.ru*

Irina P. Trifonova (ORCID 0000-0002-0892-6233)

Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: trifonova@isuct.ru

Natural rubber (NR) is a valuable raw material of plant origin, widely used in various industries. Natural rubber waste is difficult to decompose when discharged into the environment, which causes an increasing problem of disposal of solid waste based on it. In the present work, 10, 20 and 30% starch in a gelatinized state was introduced into the NR latex to increase biodegradability, then films were cast from the resulting dispersions. To improve the mechanical characteristics of the hybrid films, the starch hydrogel was mechanically activated in a rotor-stator device (RSD) before mixing with the rubber latex. In RSD the liquid material is subjected to a combined effect of cavitation and high shear stresses. Ammonia was added to the starch hydrogel to stabilize the dispersions either before or after treatment in RSD, respectively, activation was carried out at pH 10 or pH 6. Mechanical activation has been found to cause a decrease in the viscosity of starch hydrogels by completely breaking down the starch granules and increasing the water-soluble fraction. Hydrogel colloidal particle size decreases from 60-100 μm to 0.150 μm and 0.195 μm for activation at pH 10 and pH 6, respectively. Mechanical activation of starch in the presence of ammonia leads to an increase in the tensile strength of hybrid films by 50-75%, and when ammonia was introduced after activation, the strength increased by 25-55% compared to films based on un-activated starch. Mechanical activation of starch has been found to increase the rate of biodegradation in humidified soil. Natural rubber films containing 30% RSD-activated starch meet a standardized biodegradability criterion.

Keywords: natural rubber, starch, rotor-stator device, mechanical activation, biodegradability

Для цитирования:

Липатова И.М., Лосев Н.В., Трифонова И.П. Получение и свойства композитов на основе натурального каучука и механоактивированного крахмала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 126–134. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7103.

For citation:

Lipatova I.M., Losev N.V., Trifonova I.P. Fabrication and properties of composites based on natural rubber and mechanically activated starch. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 126–134. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7103.

Натуральный каучук (НК) является ценным сырьем растительного происхождения, широко используемым в различных отраслях промышленности благодаря таким свойствам, как упругость, эластичность, износостойкость, ударопрочность [1-3]. Продолжающийся рост спроса на изделия из НК обуславливает возрастающую проблему утилизации твердых отходов на его основе [4]. Отходы НК трудно разлагаются при сбросе в окружающую среду, что приводит к чрезмерному их накоплению с течением времени [5, 6]. Одним из способов решения этой экологической проблемы является введение биodeградируемых наполнителей в состав НК, приводящее к улучшению его биodeградируемости в естественной среде. Примеры таких полимерных наполнителей включают хитозан [7], полигидроксиспирты со средней длиной цепи [8], микрокристаллическую целлюлозу [9]. Одним из натуральных биodeградируемых материалов, имеющих

хорошие перспективы для использования в качестве наполнителя НК, является крахмал. Крахмал представляет интерес как натуральный биodeградируемый материал благодаря его экономической эффективности, возобновляемости, доступности и нетоксичности [10, 11]. Включение крахмала в композиты на основе НК для усиления их фрагментации и деградации в окружающей среде отражено в ряде научных публикаций [12-14]. Вследствие гидрофобной природы НК он термодинамически несовместим с гидрофильным крахмалом. Поэтому в большинстве публикаций по данной теме отмечается снижение механических свойств конечных материалов с увеличением содержания крахмала [13, 14]. Химическая модификация крахмала, обеспечивающая снижение межфазного натяжения и, соответственно, увеличение прочности композита, ведет к удорожанию материала и требует использования химических реагентов [15, 16]. Прочность

композиционных материалов может быть увеличена также за счет уменьшения размера частиц каждой фазы. Размер коллоидных частиц латекса НК имеет субмикронный порядок [17], поэтому уровень дисперсности смесей НК-крахмал определяется размером частиц крахмальной составляющей. В качестве примера способов уменьшения размера крахмальных частиц можно привести химический гидролиз и микрофлюидизацию [18], а также измельчение сухого крахмала на шаровой мельнице и ультразвуковое воздействие [19]. В настоящей работе для уменьшения размера коллоидных частиц клейстеризованного крахмала использовано кратковременное (10 с) гидроакустическое воздействие, реализуемое в роторно-импульсном аппарате (РИА). В таких аппаратах в обрабатываемом жидкофазном материале генерируются механические колебания широкого диапазона частот, включая ультразвуковые, что обуславливает возникновение кавитации [20, 21]. Химические эффекты кавитации связаны с сонолизом молекул воды и возникновением свободных радикалов. Коллапс кавитационных пузырьков сопровождается гидравлическими ударами, что обуславливает диспергирующее действие кавитации [21, 22]. Активирующее действие ультразвуковой кавитации на крахмальные гранулы было подтверждено на примере крахмальных дисперсий [23]. Вторым важным фактором активации жидких полимерных систем при обработке в РИА являются высокоградиентные напряжения сдвига, которым материал подвергается в узких зазорах между элементами ротора и статора [20]. Высокая эффективность использования РИА для повышения степени дисперсности крахмальных гидрогелей была продемонстрирована в предыдущих работах [24-27].

Целью данной работы было получить композитные пленки на основе натурального каучука и добавок крахмала с использованием механоактивации в РИА и исследовать влияние содержания крахмала на физико-механические свойства и биodeградируемость полученных пленок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе был использован латекс натурального каучука («Ah Yau Rubber Factory», Малайзия) с содержанием сухого каучука 60,0%, кукурузный крахмал с содержанием амилозы 25%, золы 0,4% (ЗАО «Proksima», Россия) и аммиак водный 25% ГОСТ 61-75 (АО «Химмед», Россия).

Крахмальный гидрогель получали путем нагревания 3% крахмальной дисперсии до 90 °С и

выдерживания при этой температуре 15 мин до желатинизации. Механическую активацию гидрогеля осуществляли в лабораторном роторно-импульсном аппарате (Модель RPA-100, «Текмаш», Россия) в течение 10 с при 50 °С. Скорость вращения ротора 5000 об·мин⁻¹, чему соответствует градиент скорости сдвига $1,74 \cdot 10^5$ с⁻¹. Средняя ширина зазора между перфорированным ротором и статором 0,25 мм. В крахмальные гидрогели вводили аммиак до pH 10 двумя способами: до активации в РИА (Серия А1) или после активации (Серия А2).

Содержание водорастворимой фракции в крахмальных гидрогелях определяли методом горячей экстракции. В отделенном центрифугированием супернатанте определяли содержание водорастворимого крахмала спектрофотометрическим методом, основанным на образовании J₂-крахмального комплекса (длина волны 620 нм).

Размер коллоидных частиц в крахмальных гидрогелях определяли методом динамического светорассеивания на приборе Malvern ZetaSizer Nano (UK) при 25 °С с He-Ne 10 mW лазером, при длине волны 633 нм. Перед измерением гидрогели разбавляли дистиллированной водой 1:5.

Вязкость гидрогелей измеряли на ротационном вискозиметре «RHEOTEST-2» (Германия) с измерительным узлом «цилиндр-цилиндр» при температуре 22 °С.

Исходный и активированные крахмальные гидрогели с добавками аммиака смешивали с латексом НК при температуре 30 °С и высушивали на рамках из оргстекла для получения гибридных пленок.

СЭМ-изображения поверхности пленок получали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Quattro S» («Thermo Fisher», Чехия).

Физико-механические характеристики пленок снимали на разрывной машине 2099-P-5 («Точприбор», Россия). Образцы размером 10×120 мм перед измерением кондиционировали при влажности 50%. Расстояние между зажимами 100 мм, скорость растяжения 100 мм/мин.

Биodeградируемость композитных пленок измеряли в соответствии с международным методом испытаний ISO 846:1997 [28]. С этой целью образцы пленки были полностью захоронены на глубине 2-3 см в торфяной почве, предназначенной для выращивания растений («ТорфАгроПром» Россия), с содержанием влаги 60%. Контейнеры с грунтом помещали в термощкаф и выдерживали при 30 °С в течение 3 мес. Скорость биodeградации контролировали по убыли массы образца, измеряемой каждые 20 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе крахмал вводили в латекс НК в клейстеризованном состоянии. Исходный крахмальный гидрогель является криптогетерогенной системой и представляет собой дисперсию набухших крахмальных гранул в растворе водорастворимой фракции (преимущественно амилозы). При обработке в РИА активирующее и диспергирующее воздействие на жидкофазные системы осуществляется за счет гидродинамической кавитации, высокого напряжения сдвига, турбулентности на микроуровне и мощного массообмена [20]. При обработке в РИА комбинированное действие перечисленных факторов вызывает полное механическое разрушение набухших крахмальных гранул. Латекс НК представляет собой водную дисперсию цис-1,4-полиизопреновых частиц, имеющих оболочку из липидов, белков и жирных кислот, что обеспечивает коллоидную стабильность [17]. Высокие напряжения сдвига, реализуемые в РИА, инициируют коагуляцию латекса НК, поэтому механической активации подвергали только крахмальный гидрогель перед его введением в латекс НК. Для электростатической стабилизации в латекс НК и смеси на его основе вводили аммиак, который усиливает отрицательный заряд на коллоидных частицах. В нашем случае аммиак вводили в крахмальный гидрогель либо до (серия А1), либо после (серия А2) механической активации в РИА. В соответствии с этим механическая активация в первом случае осуществлялась при pH 10, а во втором случае – при pH 6. Для оценки влияния pH в момент механической активации на эффективность механического расщепления крахмального гидрогеля определяли размер коллоидных частиц, содержание водорастворимой фракции и вязкость гидрогеля до и после обработки в РИА. Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание водорастворимой фракции (B), средний размер коллоидных частиц (d) и вязкость (η) исходных и механически активированных 3% крахмальных гидрогелей

Table 1. Content of water-soluble fraction (B), average size of colloidal particles (d) and viscosity (η) of starting and mechanically activated 3% starch hydrogels

	Серия А1 (pH10)		Серия А2 (pH6)	
	Исходный	РИА	Исходный	РИА
B, %	20±1	26,8±0,8	21±1	25,3±0,6
d, мкм	60-100	0,15±0,02	60-100	0,19±0,04
η^* , мПа·с	86,2	6,8	50,3	8,4

Примечание: *) η – эффективная вязкость при 37 °C

Note: *) η – effective viscosity at 37 °C

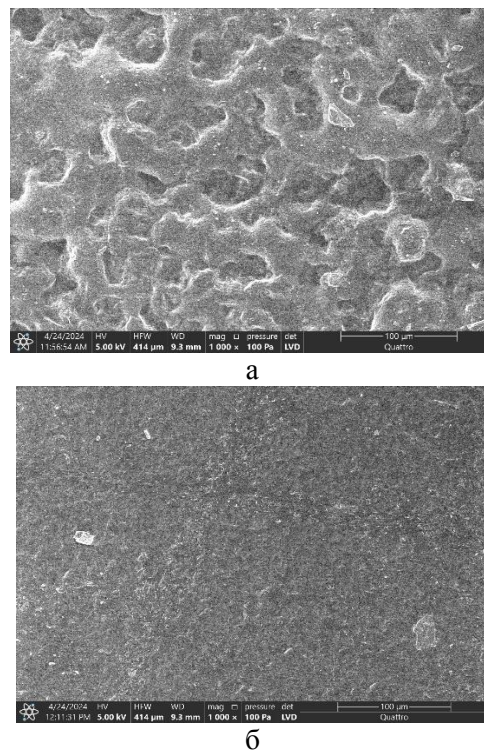


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности гибридных пленок на основе НК и крахмала (30%), полученных без использования (а) и с использованием (б) механической активации

Fig 1 SEM images of surface of hybrid films based on NR and starch (30%), obtained without (a) and using (b) mechanical activation

Начальная вязкость при pH 10 была выше вязкости гидрогеля при pH 6 в результате большего набухания крахмальных гранул [29]. Это обуславливает более сильный отклик на действие напряжения сдвига для образцов серии А1. После механической активации вязкость в обоих случаях значительно снижается из-за разрушения набухших гранул крахмала. Как следует из данных табл. 1, содержание водорастворимой фракции в исходном гидрогеле крахмала меньше заявленного производителем содержания амилозы в крахмале (25%). Это связано с тем, что без механического воздействия не вся амилоза переходит из набухших гранул в раствор. После активации доля водорастворимой фракции может превысить заявленные значения (26,4% Серия А1), возможно, из-за механически инициированного отрыва боковых ветвей амилопектина. Как показано в табл. 1, доля водорастворимой фракции в случае активации при pH 10 была выше, чем в случае активации при pH 6. Механическая активация крахмального гидрогеля в РИА вызывает уменьшение частиц коллоидной дисперсной фазы крахмального гидрогеля от 60-100 мкм до фрагментов субмикронного размера (более чем на 2 порядка). Средний конечный размер частиц для

серии А1 был меньше (0,150 мкм), чем для серии А2 (0,195 мкм). Исходя из этого и принимая во внимание большее увеличение водорастворимой фракции, можно заключить, что при осуществлении активации в присутствии аммиака, т.е. при pH 10 достигается более эффективное воздействие на состояние крахмального гидрогеля, по сравнению с активацией в нейтральной среде.

На рис. 1 представлены СЭМ изображения

поверхности пленок на основе НК и крахмала, не обработанного и обработанного в РИА в течение 10 с. Присутствие нерасщепленных крахмальных гранул обуславливает выраженную неоднородность пленок. При использовании механически активированного крахмала малый размер коллоидных частиц позволяет им внедряться между соизмеримыми частицами латекса НК, что позволяет добиться более высокой гомогенности пленок.

Таблица 2

Физико-механические характеристики пленок, полученных на основе НК и неактивированного (НА) и механически активированного (А) крахмала

Table 2. Physicomechanical characteristics of films based on NR and non-activated (НА) and mechanically activated (А) starch

Содержание крахмала, %	Серия	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %		Модуль Юнга, МПа	
		НА	А	НА	А	НА	А
0	-	1,8±0,2	-	1154 ± 83	-	0,13±0,02	-
10	A1	2,3±0,1	3,5±0,2	885±28	999±54	0,32±0,03	0,33±0,04
	A2		2,8±0,1		966±65		0,32±0,04
20	A1	3,7±0,3	5,6±0,2	512±32	870±52	0,54±0,06	0,65±0,05
	A2		4,5±0,2		852±50		0,62±0,05
30	A1	4,1±0,4	7,3±0,6	429±33	750±43	0,66±0,09	0,90±0,09
	A2		6,4±0,6		711±33		0,87±0,07

В табл. 2 приведены физико-механические характеристики для пленок из одного только НК и для гибридных пленок на основе НК и крахмала. В целом прочность пленок на основе невулканизированного НК оказалась ниже, чем гибридных пленок. Относительное удлинение пленок из одного только НК существенно выше. Повышение однородности структуры пленок, полученных на основе активированного крахмала, по сравнению с пленками, полученными без использования активации, сказывается на физико-механических свойствах пленок. Как следует из данных табл. 2, механическая активация крахмального гидрогеля позволила повысить прочность пленок, содержащих разное количество крахмала, на 50-75% для пленок серии А1 и на 25-55% для серии А2. При этом относительное удлинение пленок не только не уменьшается, но и увеличивается в результате активации. Это объясняется тем, что гибридные пленки на основе НК и неактивированного крахмала содержат высохшие крахмальные гранулы, которые в исходной формовочной смеси присутствовали в набухшем состоянии. Присутствие крупных частиц в матрице НК делает эти пленки более дефектными и, соответственно, более разрушаемыми по сравнению с пленками, содержащими механически активированный, тонко диспергированный крахмал с частицами субмикронного размера. Модуль Юнга заметно увеличился за счет активации крахмала

только для его содержания в пленках 20% и 30%. Для обеих серий модуль Юнга был одинаковым в пределах погрешности. Для пленок серии А1, содержащих крахмал, активированный при pH 10, получены более высокие механические характеристики, по сравнению с пленками серии А2. Это объясняется меньшим размером частиц крахмала и более высоким содержанием водорастворимой фракции в гидрогеле, введенном в латекс НК. Улучшение физико-механических характеристик пленок НК-крахмал как следствие уменьшения размера частиц крахмала было получено также в других работах [18, 19, 24].

На рис. 2 представлены зависимости убыли массы пленочных образцов от времени их выдерживания во влажном грунте при температуре 30 °С и влажности 60%. Для всех образцов в течение первых 20 сут. получено увеличение массы, что объясняется адсорбцией влаги и некоторых примесей пленками. Масса пленки из одного только НК за 90 сут. уменьшилась только на 5%. Скорость снижения массы образцов ожидаемо увеличивается с увеличением содержания в них крахмала. Как следует из данных рис. 2, механическая активация крахмала, инкорпорируемого в матрицу НК, значительно увеличивает скорость биodeградации гибридной пленки. Так для пленки, содержащей 20% исходного крахмала, потеря массы за 90 сут. составила 34%, а для пленки, содержащей столько

же механически активированного крахмала, этот показатель составил 67%. По-видимому, более равномерное распределение биodeградируемого компонента в матрице каучука способствует более быстрой фрагментации пленки.

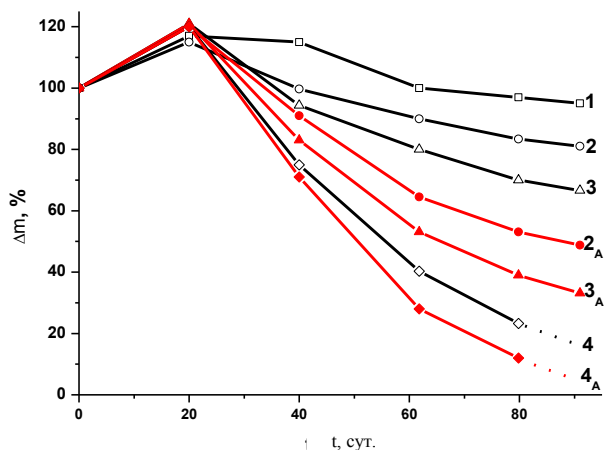


Рис. 2. Кинетические кривые убыли массы (Δm) при выдерживании в почве образцов пленок на основе НК, содержащих исходный и механически активированный (цифры с индексом А) крахмал. Соотношение НК/Крахмал: 1 – 100/0, 2 – 90/10, 3 – 80/20, 4 – 70/30

Fig. 2. Mass loss (Δm) kinetic curves during soaking in soil of samples of NR-based films containing initial and mechanically activated (numbers with index A) starch. NR/Starch ratio: 1 – 100/0, 2 – 90/10, 3 – 80/20, 4 – 70/30

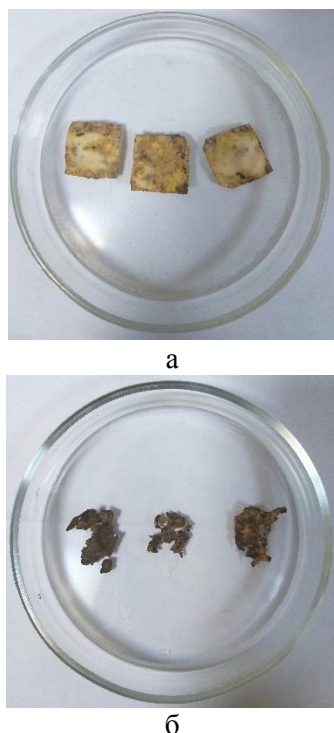


Рис 3. Пленки НК-крахмал (30%) после выдерживания во влажном грунте 20 сут. (а) и 60 сут. (б)

Fig. 3. NR-starch films (30%) after exposure to moist soil for 20 days (a) and 60 days (б)

С течением времени можно было визуально наблюдать сначала поверхностную эрозию, увеличение пористости и дефектности пленок (рис. 3, а), затем наблюдалась их заметная фрагментация (рис. 3, б). Для образцов с содержанием крахмала 30% после 80 сут. выдерживания в грунте пленка была полностью разрушена, а ее фрагменты практически невозможно было отделить от частиц грунта для взвешивания. Поэтому на этом участке кривые, продленные методом экстраполяции, изображены пунктиром. Известно, что полимерный материал может быть сертифицирован как биodeградируемый, если 90% его массы может разлагаться в условиях компостирования в течение 90 сут. [30]. Для образца пленки, содержащей 30% механически активированного крахмала, потеря массы через 80 сут. составила около 90%. Таким образом можно говорить о соответствии этого материала стандартизованному критерию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность и эффективность введения клейстеризованного крахмала, имеющего pH 10 за счет добавки аммиака, в латекс НК с целью придания биodeградируемости пленкам, формируемым из этих смесей. С целью улучшения физико-механических свойств гибридных пленок клейстеризованный крахмал подвергался жидкофазной механической активации в роторно-импульсном аппарате в течение 10 с. При сравнении двух способов осуществления активации, а именно в присутствии аммиака (pH 10) и без него (pH 6), было установлено, что в первом случае достигается более сильное диспергирующее воздействие на крахмальный гидрогель. Набухшие крахмальные гранулы, имеющие размер 60-100 мкм, в результате механической активации разрушаются до частиц со средним размером 0,150 мкм в случае первого способа приготовления в отличие от второго способа (0,195 мкм).

Установлено, что механическая активация крахмала позволяет увеличить прочность пленок при разрыве в среднем на 50-75% для первого способа активации и на 25-55% – для второго способа. Введение механически активированного крахмала позволило существенно увеличить скорость биodeградации гибридных пленок НК-крахмал.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований».

Работа выполнена в рамках Государственного задания министерства науки и высшего образования РФ на выполнение НИР (тема № 125032604508-8).

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

The study was conducted using equipment from the shared use center "Upper Volga Regional Center for Physicochemical Research."

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of research and development (topic No. 125032604508-8).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Kurian T., Mathew N.M. Natural rubber: production, properties and applications. *Biopolym.: Biomed. Environ. Appl.* 2011. P. 403-436. DOI: 10.1002/9781118164792.ch14.
2. Wichaita W., Promlok D., Sudjaipraparat N., Sripraphat S., Suteewong T., Tangboriboonrat P. A concise review on design and control of structured natural rubber latex particles as engineering nanocomposites. *Eur. Polym. J.* 2021. V. 159. P. 110740. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110740.
3. Guerra N.B., Pegorin G.S., Boratto M.H., de Barros N.R., de Oliveira Graeff C.F., Herculano R.D. Biomedical applications of natural rubber latex from the rubber tree *Hevea brasiliensis*. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2021. V. 126. P. 112126. DOI: 10.1016/j.msec.2021.112126.
4. Ali M.F., Akber M.A., Smith C., Aziz A.A. The dynamics of rubber production in malaysia: potential IMPACTS, challenges and proposed interventions. *Forest Policy Econ.* 2021. V. 127. P. 102449. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102449.
5. Rose K., Steinbuchel A. Biodegradation of natural rubber and related com-pounds: recent insights into a hardly understood catabolic capability of microorganisms. *Appl. Envir. Microbiol.* 2005. V. 71. N 6. P. 2803-2812. DOI:10.1128/AEM.71.6.2803-2812.2005.
6. Xie Y., Hassan A.A., Song P., Zhen Z. High scission of butadiene rubber vulcanizate under thermo-oxidation. *Polym. Degrad. Stab.* 2019. V. 167. P. 292–301. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.07.015.
7. Yoyyei R., Siwayaprahm P., Lertsarawut P., Saenboonruang K. Synergistic effects of chitosan and gamma irradiation on enhanced fungal growth inhibition and biodegradability of natural rubber latex film. *Res. Eng.* 2024. N 5-6. P. 102674. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102674.
8. Bhatt R., Shah D., Patel K., Trivedi U. PHA-rubber blends: Synthesis, characterization and biodegradation. *Bioresource Technol.* 2008. 99. V. 11. P. 4615-4620. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.054.
9. Chuayjuljit S., Su-Uthai S., Tunwattanaseree C., Charuchinda S. Preparation of microcrystalline cellulose from waste-cotton fabric for biodegradability enhancement of natural rubber sheets. *J. Reinf. Plast. Comp.* 2008. V. 28. N 10. P. 1245-1254. DOI: 10.1177/0731684408089129.
10. Alcázar-Alay S.C., Meireles M.A.A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Sci. Techn. (Campianas)*. 2015 V. 35. N 2. P. 215-236. DOI: 10.1590/1678-457X.6749.
11. Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Драгула С.Е. Биоразложение криогелей на основе поливинилового спирта и крахмала с глицерином и борной кислотой. *Изв. вузов.*

REFERENCES

1. Kurian T., Mathew N.M. Natural rubber: production, properties and applications. *Biopolym.: Biomed. Environ. Appl.* 2011. P. 403-436. DOI: 10.1002/9781118164792.ch14.
2. Wichaita W., Promlok D., Sudjaipraparat N., Sripraphat S., Suteewong T., Tangboriboonrat P. A concise review on design and control of structured natural rubber latex particles as engineering nanocomposites. *Eur. Polym. J.* 2021. V. 159. P. 110740. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110740.
3. Guerra N.B., Pegorin G.S., Boratto M.H., de Barros N.R., de Oliveira Graeff C.F., Herculano R.D. Biomedical applications of natural rubber latex from the rubber tree *Hevea brasiliensis*. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2021. V. 126. P. 112126. DOI: 10.1016/j.msec.2021.112126.
4. Ali M.F., Akber M.A., Smith C., Aziz A.A. The dynamics of rubber production in malaysia: potential IMPACTS, challenges and proposed interventions. *Forest Policy Econ.* 2021. V. 127. P. 102449. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102449.
5. Rose K., Steinbuchel A. Biodegradation of natural rubber and related com-pounds: recent insights into a hardly understood catabolic capability of microorganisms. *Appl. Envir. Microbiol.* 2005. V. 71. N 6. P. 2803-2812. DOI:10.1128/AEM.71.6.2803-2812.2005.
6. Xie Y., Hassan A.A., Song P., Zhen Z. High scission of butadiene rubber vulcanizate under thermo-oxidation. *Polym. Degrad. Stab.* 2019. V. 167. P. 292–301. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.07.015.
7. Yoyyei R., Siwayaprahm P., Lertsarawut P., Saenboonruang K. Synergistic effects of chitosan and gamma irradiation on enhanced fungal growth inhibition and biodegradability of natural rubber latex film. *Res. Eng.* 2024. N 5-6. P. 102674. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102674.
8. Bhatt R., Shah D., Patel K., Trivedi U. PHA-rubber blends: Synthesis, characterization and biodegradation. *Bioresource Technol.* 2008. 99. V. 11. P. 4615-4620. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.054.
9. Chuayjuljit S., Su-Uthai S., Tunwattanaseree C., Charuchinda S. Preparation of microcrystalline cellulose from waste-cotton fabric for biodegradability enhancement of natural rubber sheets. *J. Reinf. Plast. Comp.* 2008. V. 28. N 10. P. 1245-1254. DOI: 10.1177/0731684408089129.
10. Alcázar-Alay S.C., Meireles M.A.A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Sci. Techn. (Campianas)*. 2015 V. 35. N 2. P. 215-236. DOI: 10.1590/1678-457X.6749.
11. Ovsyannikova V.S., Fufaeva M.S., Dragula S.E. Biodegradation of cryogels based on polyvinyl alcohol and starch with glycerol and boric acid. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 126-134 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.7t.

- Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 126-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.7t.
12. **Misman M.A., Rashid A.A., Yahya S.R.** Modification and application of starch in natural rubber latex composites. *Rubber Chem. Technol.* 2018. V. 91. N 1. P. 184-204. DOI: 10.5254/rct-18-82604.
 13. **Misman M.A., Azura A.R.** Effect of sago starch loadings on soil decomposition of Natural Rubber Latex (NRL) composite films mechanical properties. *Int. Biodeter. Biodegrad.* 2013. V. 85. P. 139-149. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.06.016.
 14. **Duy N.Q., Rashid A.A., Ismail H.** Effects of filler loading and different preparation methods on properties of cassava starch/natural rubber composites. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2012. V. 51. N 9. P. 940-944. DOI: 10.1080/03602559.2012.679377.
 15. **Senna M.M., Mohamed R.M., Shehab-Eldin A.N. El-Hamouly S.** Characterization of electron beam irradiated natural rubber/modified starch composites. *J. Industr. Eng. Chem.* 2012. V. 18. N 5. P. 1654-1661. DOI: 10.1016/J.JIEC.2012.03.004.
 16. **Kahar A.W.M., Sarifuddin N., Ismail H.** Structural, thermal and physico-chemical properties of high density polyethylene/natural rubber/modified cassava starch blends. *Iran. Polym. J.* 2017. V. 26. N 2. P. 149-159. DOI: 10.1007/s13726-017-0507-3.
 17. **Mooibroek H., Cornish K.** Alternative sources of natural rubber. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. V. 53. N 4. P. 355-365. DOI: 10.1007/s002530051627.
 18. **Jong L.** Particle size and particle-particle interactions on tensile properties and reinforcement of corn flour particles in natural rubber. *Eur. Polym. J.* 2016. V. 74. P. 136-147. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.11.018.
 19. **Mat Sukia F.M., Azura A.R., Azahari B.** Effect of Ball Milled and Ultrasonic Sago Starch Dispersion on Sago Starch Filled Natural Rubber Latex (SSNRL) Films. *Procedia Chem.* 2016. V. 19. P. 782 – 787. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.085.
 20. **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.* 2014. V. 22. P. 272–277. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.05.017.
 21. **Crudo D., Bosco V., Cavaglià G., Grillo G., Mantegna S., Cravotto G.** Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2016. V. 33. P. 220–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.05.001.
 22. **Пешнев Б.В., Бурляева Е.В., Никишин Д.В., Николаев А.И., Кузнецов А.С.** Оценка эффективности кавитационной обработки темных нефтепродуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 7. С. 103-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.7006.
 23. **Трифорова И.П., Лосев Н.В., Подшивалова И.М., Липатова И.М., Бурмистров В.А.** Механические и реологические свойства композиций на основе поликапролактона и модифицированного крахмала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 4. С. 47-55. DOI: 10.6060/ivkkt.20266904.6973.
 24. **Lipatova I.M., Yusova A.A., Makarova L.I.** A simple method for fabrication Natural Rubber/BaSO₄ radiation shielding materials using mechanical activation techniques. *Mater. Chem. Phys.* 2025. V. 347. P. 131486. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.131486.
 12. **Misman M.A., Rashid A.A., Yahya S.R.** Modification and application of starch in natural rubber latex composites. *Rubber Chem. Technol.* 2018. V. 91. N 1. P. 184-204. DOI: 10.5254/rct-18-82604.
 13. **Misman M.A., Azura A.R.** Effect of sago starch loadings on soil decomposition of Natural Rubber Latex (NRL) composite films mechanical properties. *Int. Biodeter. Biodegrad.* 2013. V. 85. P. 139-149. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.06.016.
 14. **Duy N.Q., Rashid A.A., Ismail H.** Effects of filler loading and different preparation methods on properties of cassava starch/natural rubber composites. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2012. V. 51. N 9. P. 940-944. DOI: 10.1080/03602559.2012.679377.
 15. **Senna M.M., Mohamed R.M., Shehab-Eldin A.N. El-Hamouly S.** Characterization of electron beam irradiated natural rubber/modified starch composites. *J. Industr. Eng. Chem.* 2012. V. 18. N 5. P. 1654-1661. DOI: 10.1016/J.JIEC.2012.03.004.
 16. **Kahar A.W.M., Sarifuddin N., Ismail H.** Structural, thermal and physico-chemical properties of high density polyethylene/natural rubber/modified cassava starch blends. *Iran. Polym. J.* 2017. V. 26. N 2. P. 149-159. DOI: 10.1007/s13726-017-0507-3.
 17. **Mooibroek H., Cornish K.** Alternative sources of natural rubber. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. V. 53. N 4. P. 355-365. DOI: 10.1007/s002530051627.
 18. **Jong L.** Particle size and particle-particle interactions on tensile properties and reinforcement of corn flour particles in natural rubber. *Eur. Polym. J.* 2016. V. 74. P. 136-147. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.11.018.
 19. **Mat Sukia F.M., Azura A.R., Azahari B.** Effect of Ball Milled and Ultrasonic Sago Starch Dispersion on Sago Starch Filled Natural Rubber Latex (SSNRL) Films. *Procedia Chem.* 2016. V. 19. P. 782 – 787. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.085.
 20. **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.* 2014. V. 22. P. 272–277. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.05.017.
 21. **Crudo D., Bosco V., Cavaglià G., Grillo G., Mantegna S., Cravotto G.** Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2016. V. 33. P. 220–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.05.001.
 22. **Peshnev B.V., Burlyaeva E.V., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Kuznetsov A.S.** Evaluation of the efficiency of cavitation treatment of dark oil products. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 7. P. 103-110 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.7006.
 23. **Trifonova I.P., Losev N.V., Podshivalova I.M., Lipatova I.M., Burmistrov V.A.** Mechanical and rheological properties of composites based on polycaprolactone and modified starch. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 4. P. 47-55 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20266904.6973.
 24. **Lipatova I.M., Yusova A.A., Makarova L.I.** A simple method for fabrication Natural Rubber/BaSO₄ radiation shielding materials using mechanical activation techniques. *Mater. Chem. Phys.* 2025. V. 347. P. 131486. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.131486.

25. **Burmistrov V.A., Trifonova I.P., Losev N.V., Larina J.N., Lipatova I.M.** Modifiers for the preparation of starch composites under mechanochemical activation: An extended set of criteria. *Europ. Polym. J.* 2024. V. 221. N 3. P. 113560. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113560.
26. **Трифопова И., Бурмистров В., Лосев Н., Родичева Ю., Липатова И., Коифман О.** Особенности реологического поведения гидрогелей крахмала, модифицированных синтетическими латексами. *Рос. хим. ж.* 2023. Т. LXVII. № 1. 19-27. DOI: 10.6060/rcj.2023671.3.
27. **Липатова И.М., Юсова А.А., Макарова Л.И.** Формоустойчивые гидрогелевые носители на основе хитозана и альгината натрия для пролонгированного высвобождения лекарственных препаратов. *Рос. хим. ж.* 2026. Т. LXX. № 1. С. 88-95. DOI: 10.6060/rcj.2026701.10.
28. ISO 846. Plastics—evaluation of the action of microorganisms. <https://www.iso.org/standard/20578> 1997.
29. **Builders P.F., Mbah C.C., Adama K.K., Audu M.M.** Effect of pH on the physicochemical and binder properties of tigernut starch. *Starch – Starke*. 2014. V. 66. N 3–4. P. 281–293. DOI: 10.1002/star.201300014.
30. DIN EN 13432, Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging. <https://www.en-standard.eu>.
25. **Burmistrov V.A., Trifonova I.P., Losev N.V., Larina J.N., Lipatova I.M.** Modifiers for the preparation of starch composites under mechanochemical activation: An extended set of criteria. *Europ. Polym. J.* 2024. V. 221. N 3. P. 113560. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113560.
26. **Trifonova I., Burmistrov V., Losev N., Rodicheva Yu., Lipatova I., Koifman O.** Features of the rheological behavior of starch hydrogels modified with synthetic latexes. *Ros. Khim. Zhurn.* 2023. V. LXVII. N 1. P. 19-27. DOI: 10.6060/rcj.2023671.3.
27. **Lipatova I.M., Yusova A.A., Makarova L.I.** Dimensionally stable hydrogel carriers based on chitosan and sodium alginate for prolonged drug release. *Ros. Khim. Zhurn.* 2026. V. LXX. N 1. P. 88-95. DOI: 10.6060/rcj.2026701.10.
28. ISO 846. Plastics—evaluation of the action of microorganisms. <https://www.iso.org/standard/20578> 1997.
29. **Builders P.F., Mbah C.C., Adama K.K., Audu M.M.** Effect of pH on the physicochemical and binder properties of tigernut starch. *Starch – Starke*. 2014. V. 66. N 3–4. P. 281–293. DOI: 10.1002/star.201300014.
30. DIN EN 13432, Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging. <https://www.en-standard.eu>.

Поступила в редакцию 02.03.2026

Принята к опубликованию 20.03.2026

Received 02.03.2026

Accepted 20.03.2026