

Переработка и применение отходов производства бутадиен-стирольного каучука

Сергей С. Никулин	¹	nikulini.nikuli@ya.ru	 0000-0002-8141-8008
Наталья Ю. Санникова	¹	cnu@inbox.ru	 0000-0002-5583-2563
Надежда С. Никулина	²	nad.nikulina2013@ya.ru	 0000-0003-2586-7738
Артем И. Семеняченко	¹	artemsemenyachenko@ya.ru	 0009-0002-3990-1343
Инна Н. Пугачева	¹	eco-inna@mail.ru	 0000-0001-5850-2861
Лариса В. Молоканова	¹	larisa280272@ya.ru	 0000-0002-6267-6028







¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний, ул. Иркутская, 1, г. Воронеж, 394072, Россия

Аннотация. Одним из перспективных направлений в области переработки отходов действующих производств полимерных материалов является получение на их основе олигомерных материалов, которые широко используются в различных промышленных отраслях. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования по использованию олигомерных материалов, полученных на основе термоокислительной деструкцией отходов от производства эмульсионных каучуков в качестве добавки к выпускаемому бутадиен-стирольному каучуку на стадии его производства. Для этой цели был использован олигомерный продукт полученный термоокислительной деструкцией отходов от производства бутадиен-стирольного каучука марки SKC-30 АРК. Разрушение макромолекулярных цепей каучука SKC-30 АРК проводили до значения молекулярной массы $M_v = 4-8$ тыс. В качестве объекта исследования выбраны образцы каучука SKC-30 АРК, содержащие в качестве добавки деструктат каучука SKC-30 АРК в количестве от 1 до 3 %. Процесс термоокислительной деструкции в присутствии кислорода сопровождается образованием функциональных групп, включающих в свой состав кислород. В рамках проведенного эксперимента было установлено, что получаемые каучуки в основном по своим показателям соответствуют нормативным требованиям. Однако, введение деструктата приводит к небольшому снижению вязкости по Муни. Вулканизаты на основе экспериментальных образцов каучука соответствуют нормативным требованиям. Использование для защитной обработки продуктов приготовленных из отходов нефтехимии снижает загрязнение окружающей среды и способствует более полному использованию дорогих природных ресурсов.

Ключевые слова: отходы производства каучука, переработка, олигомеры, добавка, показатели.

Recycling and application of waste from butadiene-styrene rubber production

Sergey S. Nikulin	¹	nikulini.nikuli@ya.ru	 0000-0002-8141-8008
Natalia Yu. Sannikova	¹	cnu@inbox.ru	 0000-0002-5583-2563
Nadezhda S. Nikulina	²	nad.nikulina2013@ya.ru	 0000-0003-2586-7738
Artem I. Semenyachenko	¹	artemsemenyachenko@ya.ru	 0009-0002-3990-1343
Inna N. Pugacheva	¹	eco-inna@mail.ru	 0000-0001-5850-2861
Larisa V. Molokanova	¹	larisa280272@ya.ru	 0000-0002-6267-6028

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service, Irkutskaya Street, 1 Voronezh, 394072, Russia

Abstract. One of the promising directions in the field of waste recycling from operating polymer material production facilities is the production of oligomeric materials based on such waste, which are widely used in various industrial sectors. This work presents the results of an experimental study on the use of oligomeric materials obtained through thermal-oxidative degradation of waste from emulsion rubber production as an additive to manufactured butadiene-styrene rubber at the production stage. For this purpose, an oligomeric product obtained by thermal-oxidative degradation of waste from the production of butadiene-styrene rubber grade SKS-30 ARK was used. The destruction of the macromolecular chains of SKS-30 ARK rubber was carried out until the molecular weight reached $M_v=4-8$ thousand. Samples of SKS-30 ARK rubber containing 1 to 3 % of SKS-30 ARK rubber degradate as an additive were selected as the research object. The thermal-oxidative degradation process in the presence of oxygen is accompanied by the formation of functional groups containing oxygen. Within the framework of the experiment, it was found that the resulting rubbers generally meet the regulatory requirements in terms of their key parameters. However, the introduction of the degradate leads to a slight decrease in Mooney viscosity. Vulcanizates based on the experimental rubber samples meet the regulatory requirements. The use of protective treatment products prepared from petrochemical waste reduces environmental pollution and contributes to a more complete utilization of valuable natural resources.

Keywords: rubber production waste, recycling, oligomers, additives, indicators .

Для цитирования

Никулин С.С., Санникова Н.Ю., Никулина Н.С., Семеняченко А.И., Пугачева И.Н., Молоканова Л.В. Переработка и применение отходов производства бутадиен-стирольного каучука // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 341–347. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-341-347

For citation

Nikulini S.S., Sannikova N.Yu., Nikulina N.S., Semenyachenko A.I., Pugacheva I.N., Molokanova L.V. Recycling and application of waste from butadiene-styrene rubber production. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 341–347. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-341-347

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Непрерывный рост промышленного потенциала неизбежно приводит к увеличению количества образующихся отходов и побочных продуктов. Это в свою очередь приводит к повышению загрязнения окружающей среды разноплановыми отходами. Разработка новых технологий и внедрение их в промышленных масштабах должны базироваться в первую очередь на экологически проработанных системах, предусматривающих использование вторичного сырья, некондиционной продукции и отходов производств. Положительное решение данных вопросов позволит более полно и рационально использовать ценные сырьевые ресурсы [1–3].

В настоящее время количество отходов непрерывно возрастает. Отходы, которые образуются при производстве полимерных материалов, а также отслужившие свой срок полимерные изделия требуют проведения поисковых исследований по их наиболее перспективной переработки. Одним из таких перспективных направлений по переработке отходов является их деструкция [4]. Вторичная переработка полимерных материалов в ряде случаев позволяет получить исходные мономеры; пиролиз полимерных отходов – газообразное топливо. Однако при этом необходимо учитывать не только проблемы охраны окружающей среды, но и то обстоятельство, что добыча нефти становится все дороже. Это будет отражаться и на стоимости сырья для производства полимеров. Поэтому поиск новых сырьевых источников – важная и актуальная задача.

Материалы и методы

Для деструкции использовали полимерные отложения образующиеся на технологическом оборудовании при производстве каучука СКС-30 АРК (отложения полимеров на перемешивающих устройствах и стенках реакторов, сушилках и др.) отобранные с действующего технологического оборудования производства эмульсионных каучуков [5], обладающих комплексом свойств, необходимых для изготовления шин и резино-технических изделий [6, 7]. Процесс проводили следующим образом.

В реактор загружали 10 г коагулюма и 130 г растворителя (толуола) и при постоянном перемешивании вводили 7,0 г 4,0%-ного раствора соли металла переменной степени окисления в бутаноле-1 и гидропероксид пинана (ГП). Процесс проводили в контакте с кислородом воздуха при постоянном перемешивании и заданной температуре в течение установленного времени.

Ход процесса деструкции контролировали гравиметрически, по изменению сухого остатка в углеводородной фазе, по изменению характеристической вязкости $[\eta]$ и визуально.

На первом этапе исследований необходимо установить влияние дозировки ГП на процесс термоокислительной деструкции коагулюма, образующегося при производстве каучука СКС-30 АРК. Из данных таблицы 1 следует, что оптимальная дозировка ГП составляет 1,0–7,0% на коагулюм.

Таблица 1.

Влияние дозировки гидропероксида пинана (ГП) на деструкцию коагулюма каучука СКС-30 АРК

Table 1.

Influence of pinane hydroperoxide (HP) dosage on the degradation of SKS-30 ARK rubber coagulum

Дозировка ГП, мас. ч. на 100 мас. ч коагулюма Dosage of HP, wt. parts per 100 wt. parts of coagulum	Растворение Dissolution, %	Характеристическая вязкость, дл/г Characteristic viscosity, dl/g
0,10	54,3–56,2	1,95–2,00
0,25	71,0–74,5	1,33–1,37
0,75	92,1–95,6	1,19–1,23
1,00	100	0,58–0,62
3,00	100	0,40–0,44
7,00	100	0,37–0,40
10,0	100	0,42–0,45
12,0	100	0,46–0,49

Примечание: температура 60 °С; продолжительность деструкции 5 часов; растворитель – толуол
Note: temperature 60 °С; duration of destruction 5 hours; solvent – toluene

Применение более высоких дозировок ГП приводит к возрастанию вязкости системы, что свидетельствует о появлении конкурирующего вторичного процесса структурирования, хотя при этом достигается полное растворение коагулюма.

Исследованиями установлено, что увеличение продолжительности процесса свыше 5 часов приводит к возрастанию вязкости системы из-за протекания вторичного процесса структурирования. Аналогично и влияние температуры. Повышение температуры до 100 °С ускоряет как процессы деструкции, так и структурирования.

Полученный толуольный раствор деструктированного отхода от производства каучука СКС-30 АРК подвергали эмульгированию в водном растворе соапстока.

Соапсток – это отход, образующийся при производстве подсолнечного масла, (ТУ10–04–02–80–91). Он образуется при щелочной нейтрализации подсолнечного масла [8–10].

Используется для промышленной переработки с целью получения жирных кислот, мыла и других продуктов. Соапсток не имеет в своем составе твердых примесей. Оттенок от желтого до светло коричневого, при температуре 20 °С имеет маслообразную консистенцию и специфический запах, свойственный подсолнечному маслу. Показатели подсолнечного соапстока, (массовые доли, %): общий жир – 46, в том числе натриевые соли жирных кислот -15; нейтральный жир – 31; влага – 42; фосфолипиды – 2; мыла – 7; неомыляемые и воскоподобные вещества – 3. Основными компонентами в составе его жировой части являются глицериды и жирные кислоты – насыщенные (стеариновая) и ненасыщенные (олеиновая, линолевая). Соапсток хорошо растворяется в нефтепродуктах, в воде нерастворим, но образует с ней устойчивую эмульсию. Состав неоднозначен и зависит от вида рафинируемого масла, условий рафинации и хранения. В соапстоке выделяют два блока соединений: вещества жировой природы (мыла, жирные кислоты, нейтральный жир) и нежировые примеси (органические кислоты, растворимые в воде соли этих кислот, углеводороды, спирты). В зависимости от температуры вязкость соапстока меняется (при повышении температуры до 60–90 °С вязкость снижается в 4–5 раз).

В дальнейшем на основе водного раствора соапстока готовили эмульсию на основе толуольного раствора деструктированного коагулюма от производства бутадиен-стирольного каучука. Дозировку соапстока выдерживали ~ 5,0% мас. исходя из содержания в нем анионных ПАВ. Массовое соотношение водной фазы: толуольный раствор деструктированного коагулюма выдерживали 200 : 100. Отгонку водно-толуольного азеотропа проводили под вакуумом, создаваемым водоструйным насосом при температуре 60–70 оС на водяной бане. Содержание деструктированного коагулюма в получаемой эмульсии выдерживали 30–50%. рН приготовленной латексной дисперсии составлял 10,5. В полученной эмульсии диспергировали антиоксидант ВС-30А. Дозировку антиоксиданта выдерживали согласно требованиям ТУ 1,5% на каучук СКС-30 АРК. Приготовленную дисперсию, включающую в свой состав деструктированный коагулюм, масляную фракцию содержащуюся в соапстоке и антиоксидант совмещали с каучуковым латексом СКС-30АРК.

Выделение каучука из латекса осуществляли на коагуляционной установке, представляющей собой емкость, снабженную перемешивающим устройством, помещенную в термостат для поддержания заданной температуры (~ 20 °С) [11]. В качестве коагулирующих агентов использовали водный раствор хлорида натрия (~ 20% мас.) ГОСТ 4233–77; в качестве подкисляющего агента – водный раствор серной кислоты (~ 2% мас.) ГОСТ 2184–2013.

Результаты и обсуждение

Предлагаемый в данной работе способ совмещения всех компонентов присутствующих в приготовленной латексной дисперсии позволяет комплексно решить вопросы касающиеся одновременному введению в состав изготавливаемого композита на основе каучука СКС-30 АРК деструктированного отхода от его производства, масляной добавки, содержащейся в соапстоке, и антиоксиданта в матрицу каучука. Данный прием позволяет получить композит с равномерным распределением всех компонентов в каучуке СКС-30 АРК. Совмещение латекса, приготовленного на основе деструктированного отхода от производства каучука СКС-30 АРК, с антиоксидантом ВС-30А способствует тому, что стабилизатор будет растворяться как в растительном масле соапстока, так и деструктированном коагулюме. Данный прием должен снизить потере дорогого и дефицитного антиоксиданта и увеличить общий выход получаемого каучукового композита. Таким образом, повышается производительность процесса, решается экологическая проблема за счет использования отхода от производства каучука получаемого эмульсионной полимеризацией. Данный прием введения антиоксиданта в состав каучукового композита позволяет снизить в 1,3–1,5 раза потери антиоксиданта.

Анализ влияния комплексной добавки (соапсток + деструктированный коагулюм + антиоксидант) в латекс бутадиен-стирольного каучука на процесс коагуляции в присутствии солевого коагулянта показал, что такая добавка не приводит к уменьшению расхода хлорида натрия, необходимых для полного выделения каучука из латекса (таблица 2). Дозировку комплексной добавки выдерживали от 5 до 20 кг/т каучука (по сухому остатку). Расход подкисляющего агента составлял 15 кг/т каучука. Выделение каучукового композита из латекса проводили при 20 °С.

Таблица 2.

Выделение каучука из латекса СКС-30 АРК различными коагулянтами

Table 2.

Extraction of rubber from SKS-30 ARK latex using various coagulants

Коагулянт Coagulant	Полученные данные / Received data						
Расход хлорида натрия, кг/т каучука Sodium chloride consumption, kg/t rubber	10	30	50	70	100	120	150
Выход крошки каучука, % Rubber crumb yield, %	32,7	55,2	73,1	80,2	86,3	89,5	96,2
Оценка полноты коагуляции Coagulation completeness assessment	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп
Расход приготовленной эмульсии по сухому остатку, кг/т каучука Consumption of prepared emulsion by dry residue, kg/t rubber	5						
Выход крошки каучука, % Rubber crumb yield, %	33,0	56,2	73,4	80,7	87,2	89,6	96,6
Оценка полноты коагуляции Coagulation completeness assessment	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп
Расход приготовленной эмульсии, кг/т каучука Consumption of prepared emulsion, kg/t rubber	10						
Выход крошки каучука, % Rubber crumb yield, %	34,1	56,9	74,0	81,2	87,8	90,1	97,2
Оценка полноты коагуляции Coagulation completeness assessment	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп
Расход приготовленной эмульсии, кг/т каучука Consumption of prepared emulsion, kg/t rubber	15						
Выход крошки каучука, % Rubber crumb yield, %	34,5	57,3	74,5	81,7	88,2	90,3	97,8
Оценка полноты коагуляции Coagulation completeness assessment	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	да	да!
Расход приготовленной эмульсии, кг/т каучука Consumption of prepared emulsion, kg/t rubber	20						
Выход крошки каучука, % Rubber crumb yield, %	34,9	57,6	74,9	81,8	88,9	90,7	98,0
Оценка полноты коагуляции Coagulation completeness assessment	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп

Примечание: температура 20 °С; расход серной кислоты 15 кг/т каучука; рН водной фазы 2,9–3,1; оценка полноты коагуляции: коагуляция неполная – кнп; коагуляция полная – кп

Note: temperature 20 °С; sulfuric acid consumption 15 kg/t of rubber; pH of the aqueous phase 2.9–3.1; assessment of the completeness of coagulation: incomplete coagulation – кнп; complete coagulation – кп

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что дополнительное введение в латекс на основе каучука СКС-30 АРК приготовленной олигомерно-масляно-антиоксидантной дисперсии не оказывает влияния на процесс выделения каучука из латекса с использованием в качестве коагулирующего агента хлорида натрия. Отсутствие влияния расхода коагулирующего агента (хлорида натрия) на процесс выделения каучука из латекса связано с тем, что данная вносимая добавка находилась на низком уровне и не превышала 20 кг/т каучука.

На завершающем этапе данных исследований необходимо было установить, какое влияние оказывает присутствие в каучуке СКС-30 АРК деструктурированная добавка от производства

бутадиен-стирольного каучука, а также подсолнечного масла, содержащегося в соапстоке, на показатели каучука и вулканизатов на его основе.

В таблице 3 представлены показатели каучука СКС-30 АРК и вулканизатов на его основе. По всем основным показателям экспериментальные образцы соответствуют требованиям ГОСТ. При этом необходимо отметить, что в каучуке повышается содержание жирных кислот, что может быть связано за счет их дополнительного присутствия в соапстоке и повышается устойчивость вулканизатов к термоокислительному старению. Это связано с более низкими потерями антиоксиданта при выделении каучука из латекса и его сушке.

Таблица 3.
Свойства контрольного и экспериментальных образцов каучука и вулканизатов на их основе

Table 3.
Properties of control and experimental samples of rubber and vulcanizates based on them

Показатели Indicators	ГОСТ 15627–2019 на каучук СКС-30 АРК GOST 15627–2019 for SKS-30 ARK rubber	Расход приготовленной эмульсии по сухому остатку, кг/т каучука Consumption of prepared emulsion based on dry residue, kg/t of rubber				
		0	5	10	15	20
Вязкость по Муни каучука МБ 1 + 4 (100 °С) Mooney viscosity of MB 1 + 4 rubber (100°C)	53 ± 5	55	54	53	52	50
Массовая доля летучих веществ, % Volatile matter, %	не более 0,8	0,20	0,21	0,21	0,22	0,24
Массовая доля золы, % Ash, %	не более 0,5	0,18	0,17	0,15	0,16	0,14
Массовая доля связанного стирола, % Bound styrene, %	23,5 ± 1	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7
Массовая доля органических кислот, % Organic acid, %	5,0–7,0	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6
Массовая доля мыл органических кислот, %, не более Soaps of organic acids, %, max	0,3	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13
Условное напряжение при 300% удлинении, МПа Nominal stress at 300% elongation, MPa	не менее 13,0	13,5	13,4	13,3	13,2	13,0
Условная прочность при растяжении, МПа Nominal tensile strength, MPa	не менее 22,5	24,6	25,0	24,2	24,9	24,5
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	не менее 420	520	540	530	550	550
Относительная остаточная деформация после разрыва, % Relative residual strain after break, %	-	11	12	13	12	14
Коэффициент старения: – по прочности – по относительному удлинению Aging coefficient: – by strength – by relative elongation	- - -	0,61 0,44	0,66 0,48	0,72 0,50	0,74 0,53	0,73 0,51

Заключение

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

– отходы масложировой промышленности могут быть использованы как целевой продукт при приготовлении эмульсии при получении наполненных эмульсионных каучуков, в качестве добавки в эмульсионные каучуки;

– для снижения потерь антиоксидантов в технологии получения эмульсионных каучуков предложен перспективный прием его введения в составе комплексной добавки, включающей в свой состав деструктурированный отход от производства эмульсионного каучука;

– такой подход позволяет уменьшить потери антиоксиданта в 1,3–1,6 раза, что подтверждается

повышением устойчивости к термоокислительному старению у вулканизатов, изготовленных на основе экспериментального каучука;

– использование отхода масложировой промышленности позволяет найти новое направление по его применению – в производстве каучуков, получаемых эмульсионной полимеризацией.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБОУ «Воронежский государственный университет инженерных технологий» № FZGW-2026-0006 «Научно-практические основы синтеза, модификации и переработки полимеров с применением природоподобных (интеллектуальных) технологий».

Литература

- 1 Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК. М.: ФГБНУ, 2011. 296 с.
- 2 Пояркова Т.Н., Шестаков А.С., Прокофьев Ю.И., Шаталов Г.В., Селеменев В.Ф. Изучение коллоидно-химических свойств латексов, синтезированных на основе мыл соапстока, очищенного различными органическими растворителями // Вестник ВГУ. Химия. Биология. Фармация. 2016. № 4. С. 32–36.
- 3 Шпербер Д.Р., Брюшков Р.В., Губа Е.Н., Бабаков А.Н. Использование отходов производства жирных кислот, полученных кислотным гидролизом соапстока // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 4. С. 28–33.
- 4 Пояркова Т.Н., Прокофьев Ю.И., Кудрина Г.В., Тарасова А.В., Сотникова Е.В. Влияние температуры, pH и времени щелочного гидролиза на изменение жирнокислотного состава соапстока // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 9. С. 1399–1403.

- 5 Аксёнов В.И., Насыров И.Ш. Производство синтетического каучука в России: анализ итогов за 2022 г. перспективы развития // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2023. № 1. С. 3–14. doi: 10.24412/2071-8268-2023-1-3-14
- 6 Тезикова С.Л. Охрана окружающей среды при производстве синтетического каучука // *Каучук и резина*. 2020. Т. 79. № 4. С. 204–210. doi: 10.47664/0022-9466-2020-79-4-204-210
- 7 Папков В.Н., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-стирольные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж: ВГУИТ, 2015. 315 с.
- 8 Sytnik N., Kunitsia E., Mazaeva V., Chernukha A. et al. Rational conditions of fatty acids obtaining by soapstock treatment with sulfuric acid // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No. 6 (10 (108)). doi: 10.15587/1729-4061.2021.236984
- 9 Li B., Sun S., Chen X. et al. Enzymatic conversion of soapstock fatty acids from oil refining waste to biosurfactant using a low-cost liquid lipase and a new application as an antioxidant // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14. P. 3839–3851. doi: 10.1007/s13399-022-02612-z
- 10 Ciurko D., Czyżnikowska Ż., Kancelista A., Łaba W., Janek T. Sustainable production of biosurfactant from agro-industrial oil wastes by *Bacillus subtilis* and its potential application as antioxidant and ACE inhibitor // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. No. 18. Article 10824. doi: 10.3390/ijms231810824
- 11 Dumont M.J., Narine S.S. Soapstock and deodorizer distillates from North American vegetable oils: review on their characterization, extraction and utilization // *Food Research International*. 2007. Vol. 40. No. 8. P. 957–974. doi: 10.1016/j.foodres.2007.06.006
- 12 Zhang Z., Li J., Wan C., Zhang Y., Wang S. Understanding H₂O₂-induced thermo-oxidative reclamation of vulcanized styrene butadiene rubber at low temperatures // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 5. P. 2378–2387. doi: 10.1021/acssuschemeng.0c08867
- 13 Zhang Z., Ma L., Fang J., Wang S. Thermal-oxidative degradation behavior and process of vulcanized styrene-butadiene rubber // *Hecheng Xiangjiao Gongye*. 2021. Vol. 44. No. 6. P. 488–494. doi: 10.19908/j.cnki.ISSN1000-1255.2021.06.0488
- 14 Solanky S.S., Campistron I., Laguerre A., Pilard J.-F. Telechelic oligomers obtained by metathetic degradation of both polyisoprene and styrene-butadiene rubbers: applications for recycling waste tyre rubber // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98. No. 1. P. 53–60. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.10.030
- 15 Pivovarov O.A., Tishchenko A.P. Coagulation of styrene-butadiene rubber latex with modified flocculants // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022. No. 2. P. 79–85. doi: 10.32434/0321-4095-2022-141-2-79-85
- 16 Tang M., Yang B., Sun X., Pan Y. et al. Mechanism of styrene-butadiene-vinylpyridine latex coagulation by polymer flocculants and inorganic salts // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 8. Article 1894. doi: 10.3390/polym15081894
- 17 Ho V.T.T., Chuc H.D., Tu T.H., Pham V.M.H. Treatment of rubber industry wastewater review: recent advances and future prospects // *Journal of Water Process Engineering*. 2023. Vol. 52. Article 103559. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103559
- 18 Папков В.Н., Ривин Э.М., Блинов Е.В., Юдин В.П. Современное состояние и перспективы развития производства эмульсионных бутадиен-стирольных каучуков // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2021. № 3. С. 3–14. doi: 10.24412/2071-8268-2021-3-3-14
- 19 Карманова О.В., Попова Л.В., Пойменова О.В., Гусев Ю.К. Создание активирующих систем для эффективной вулканизации эластомеров // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2014. № 3. С. 126–129. doi: 10.20914/2310-1202-2014-3-126-129
- 20 Балабанова М.Ю., Панов С.Ю., Марнов А.Ю. Исследование технического решения экологических и энергетических проблем при пиролизной переработке крупнотоннажных твердых органических отходов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2025. Т. 87. № 1. С. 243–249. doi: 10.20914/2310-1202-2025-1-243-249

References

- 1 Golubev I.G., Shvanskaya I.A., Konovalenko L.Yu., Lopatnikov M.V. Recycling of waste in the agro-industrial complex. Moscow: FGBNU, 2011. 296 p. (in Russian).
- 2 Poyarkova T.N., Shestakov A.S., Prokofiev Yu.I., Shatalov G.V., Selemenev V.F. Study of colloidal-chemical properties of latices synthesized on the basis of soapstock soaps purified by various organic solvents. *Bulletin of VSU. Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2016. no. 4. pp. 32–36. (in Russian).
- 3 Shperber D.R., Bryushkov R.V., Guba E.N., Babakov A.N. Use of waste from the production of fatty acids obtained by acid hydrolysis of soapstock. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. vol. 29. no. 4. pp. 28–33. (in Russian).
- 4 Poyarkova T.N., Prokofiev Yu.I., Kudrina G.V., Tarasova A.V., Sotnikova E.V. Influence of temperature, pH and time of alkaline hydrolysis on the change in the fatty acid composition of soapstock. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. vol. 85. no. 9. pp. 1399–1403. (in Russian).
- 5 Aksenov V.I., Nasyrov I.Sh. Production of synthetic rubber in Russia: analysis of results for 2022 and development prospects. *Industrial Production and Use of Elastomers*. 2023. no. 1. pp. 3–14. doi: 10.24412/2071-8268-2023-1-3-14 (in Russian).
- 6 Tezikova S.L. Environmental protection in the production of synthetic rubber. *Rubber and Resin*. 2020. vol. 79. no. 4. pp. 204–210. doi: 10.47664/0022-9466-2020-79-4-204-210 (in Russian).
- 7 Papkov V.N., Rivin E.M., Blinov E.V. Butadiene-styrene rubbers. Synthesis and properties. Voronezh: VSUET, 2015. 315 p. (in Russian).
- 8 Sytnik N., Kunitsia E., Mazaeva V., Chernukha A. et al. Rational conditions of fatty acids obtaining by soapstock treatment with sulfuric acid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. no. 6 (10 (108)). [Online first]. doi: 10.15587/1729-4061.2021.236984.
- 9 Li B., Sun S., Chen X. et al. Enzymatic conversion of soapstock fatty acids from oil refining waste to biosurfactant using a low-cost liquid lipase and a new application as an antioxidant. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. vol. 14. pp. 3839–3851. doi: 10.1007/s13399-022-02612-z.
- 10 Ciurko D., Czyżnikowska Ż., Kancelista A., Łaba W., Janek T. Sustainable production of biosurfactant from agro-industrial oil wastes by *Bacillus subtilis* and its potential application as antioxidant and ACE inhibitor. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. vol. 23. no. 18. article 10824. doi: 10.3390/ijms231810824.
- 11 Dumont M.J., Narine S.S. Soapstock and deodorizer distillates from North American vegetable oils: review on their characterization, extraction and utilization. *Food Research International*. 2007. vol. 40. no. 8. pp. 957–974. doi: 10.1016/j.foodres.2007.06.006.

12 Zhang Z., Li J., Wan C., Zhang Y., Wang S. Understanding H₂O₂-induced thermo-oxidative reclamation of vulcanized styrene butadiene rubber at low temperatures. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021. vol. 9. no. 5. pp. 2378–2387. doi: 10.1021/acssuschemeng.0c08867.

13 Zhang Z., Ma L., Fang J., Wang S. Thermal-oxidative degradation behavior and process of vulcanized styrene-butadiene rubber. *Hecheng Xiangjiao Gongye*. 2021. vol. 44. no. 6. pp. 488–494. doi: 10.19908/j.cnki.ISSN1000-1255.2021.06.0488.

14 Solanky S.S., Campistron I., Laguerre A., Pilard J.-F. Telechelic oligomers obtained by metathetic degradation of both polyisoprene and styrene-butadiene rubbers: applications for recycling waste tyre rubber. *Polymer Degradation and Stability*. 2013. vol. 98. no. 1. pp. 53–60. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.10.030.

15 Pivovarov O.A., Tishchenko A.P. Coagulation of styrene-butadiene rubber latex with modified flocculants. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022. no. 2. pp. 79–85. doi: 10.32434/0321-4095-2022-141-2-79-85.

16 Tang M., Yang B., Sun X., Pan Y. et al. Mechanism of styrene-butadiene-vinylpyridine latex coagulation by polymer flocculants and inorganic salts. *Polymers*. 2023. vol. 15. no. 8. article 1894. doi: 10.3390/polym15081894.


17 Ho V.T.T., Chuc H.D., Tu T.H., Pham V.M.H. Treatment of rubber industry wastewater review: recent advances and future prospects. *Journal of Water Process Engineering*. 2023. vol. 52. article 103559. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103559.


18 Papkov V.N., Rivin E.M., Blinov E.V., Yudin V.P. Current state and prospects for the development of emulsion butadiene-styrene rubbers production. *Industrial Production and Use of Elastomers*. 2021. no. 3. pp. 3–14. doi: 10.24412/2071-8268-2021-3-3-14 (in Russian).


19 Karmanova O.V., Popova L.V., Poymenova O.V., Gusev Yu.K. Creation of activating systems for effective vulcanization of elastomers. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014. no. 3. pp. 126–129. doi: 10.20914/2310-1202-2014-3-126-129 (in Russian).


20 Balabanova M.Yu., Panov S.Yu., Marnov A.Yu. Investigation of technical solutions for environmental and energy problems during pyrolysis processing of large-tonnage solid organic waste. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 243–249. doi: 10.20914/2310-1202-2025-1-243-249 (in Russian).


Сведения об авторах


Сергей С. Никулин д.т.н, профессор, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nikulin.nikuli@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8141-8008>

Наталья Ю. Санникова к.х.н., доцент, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, cnu@inbox.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-5583-2563>

Надежда С. Никулина к.х.н., доцент, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nad.nikulina2013@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-2586-7738>

Артем И. Семеняченко аспирант, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, artemsemenyachenko@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-3990-1343>

Инна Н. Пугачева д.т.н, профессор, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, eco-inna@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-5850-2861>

Лариса В. Молоканова к.б.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, larisa280272@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6267-6028>


Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат


Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Information about authors


Sergey S. Nikulin Dr. Sci. (Tech.) professor, Department of Organic Synthesis Technology and Polymer Processing, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nikulin.nikuli@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8141-8008>

Natalia Yu. Sannikova Cand. Sci. (Chem.), docent, Department of Organic Synthesis Technology and Polymer Processing, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, cnu@inbox.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-5583-2563>

Nadezhda S. Nikulina Cand. Sci. (Chem.), docent, Department of Organic Synthesis Technology and Polymer Processing, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nad.nikulina2013@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-2586-7738>

Artem I. Semenyachenko graduate student, Department of Organic Synthesis Technology and Polymer Processing, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, artemsemenyachenko@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-3990-1343>

Inna N. Pugacheva Dr. Sci. (Tech.) professor, Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, eco-inna@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-5850-2861>

Larisa V. Molokanova Cand. Sci. (Biolog.), docent, Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, larisa280272@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6267-6028>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/03/2026

После редакции 22/04/2026

Принята в печать 25/04/2026

Received 11/03/2026

Accepted in revised 22/04/2026

Accepted 25/04/2026