

ВЛИЯНИЕ НАНОДИСПЕРСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА АГРЕГАТИВНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО ЛАТЕКСА ПРИ ЖИДКОФАЗНОМ НАПОЛНЕНИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

© В. И. Корчагин, А. В. Протасов, И. С. Киселев

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394000, г. Воронеж, пр. Революции, д. 19
E-mail: kvi-vgta@rambler.ru

Поступила в Редакцию 20 апреля 2023 г.
После доработки 20 июля 2023 г.
Принята к публикации 24 августа 2023 г.

Изучены факторы влияния морфологии дисперсных частиц, сорбционной способности и кислород-содержащих групп технического углерода на дестабилизацию латекса эмульсионного каучука СКС-30АРК при жидкофазном наполнении нанодисперсным техническим углеродом в ультразвуковом поле. Показано, что нарушение агрегативной устойчивости латекса происходит в результате сорбции техническим углеродом эмульгирующих агентов с защитной поверхности латексных глобул, что косвенно подтверждается повышением коэффициента поверхностного натяжения латексной системы. Установлено, что полная коагуляция бутадиен-стирольного латекса достигается без применения коагулирующих агентов в процессе жидкофазного наполнения техническим углеродом при соотношении компонентов технический углерод:каучук = 100:100 (мас. ч.) и $pH \leq 4.3$ с использованием технического углерода К354, а в случае использования технического углерода П324 при соотношении компонентов технический углерод:каучук = 100:100 (мас. ч.) и $pH \leq 3.6$. Жидкофазное наполнение эмульсионных каучуков на стадии их выделения из латекса обеспечивает равномерное распределение нанодисперсного технического углерода по объему эластомерной композиции за счет диспергирующего действия эмульгирующих компонентов латекса, которые мигрируют с поверхности латексных глобул на развитую активную поверхность технического углерода в результате воздействия ультразвукового поля.

Ключевые слова: агрегативная устойчивость; бутадиен-стирольный латекс; водная дисперсия технического углерода; жидкофазное наполнение; технический углерод; ультразвуковое воздействие; эластомерные композиции

DOI: 10.31857/S0044461823020056; EDN: OUKKVP

Жидкофазное наполнение эмульсионного каучука нанодисперсным техническим углеродом в ультразвуковом поле способствует получению эластомерных композиций с равномерным распределением высокоактивного наполнителя по матрице. Наполнение бутадиен-стирольного каучука нанодисперсным техническим углеродом на стадии выделения из латекса

минимизирует структурные превращения в эластомерной матрице композиции за счет применения энергоэффективного жидкофазного совмещения дисперсии технического углерода и латекса. Выделение соагломерированных частиц эластомерной композиции из латексной системы достигается без использования коагулирующих агентов [1]. Использование

эластомерной композиции, полученной жидкофазным способом, при изготовлении резиновых смесей позволит сократить технологический цикл и организовать экологически безопасное производство резинотехнических изделий.

Стабилизация латексов, получаемых при производстве эмульсионных бутадиен-стирольных и бутадиен-нитрильных каучуков, достигается при использовании анионных поверхностно-активных веществ. Повышение агрегативной устойчивости латекса в производстве эмульсионного каучука направлено на предотвращение дестабилизации латексной системы при полимеризации и отгонке мономеров, т. е. на исключение преждевременной коагуляции [2, 3]. При разработке технологии жидкофазного наполнения эмульсионных каучуков наноструктурным техническим углеродом приходится решать обратную задачу — нарушение агрегативной устойчивости латексной системы без использования коагулирующих агентов, что исключает их негативное воздействие на окружающую среду. Нарушение агрегативной устойчивости латекса находится в прямой зависимости от содержания эмульгаторов и электролитов, структуры и состояния межфазных адсорбционных слоев эмульгаторов. При эмульсионной полимеризации бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК используют в качестве эмульгирующих компонентов соли смоляных и жирных кислот и диспергатор лейканол, которые образуют смешанные адсорбционные слои на поверхности латексных частиц. Коагуляция латекса, стабилизированного ионогенными эмульгаторами, сопровождается дестабилизацией электростатической и гидратационной защиты адсорбированного слоя при использовании минеральных солей и органических коагулянтов [4].

Механическая обработка латекса сополимера бутадиена со стиролом со стадии выделения эмульсионного каучука СКС-30АРК приводит к уменьшению его агрегативной устойчивости. Данный эффект обусловлен частичным разрушением гидратных слоев на поверхности латексных частиц при обработке латекса в поле сдвиговых напряжений. Нарушение агрегативной устойчивости способствует снижению удельного расхода коагулянтов [5].

Снижению агрегативной устойчивости бинарной системы способствует кислая среда (рН 3.5). Дестабилизация смешанных дисперсий акрилового, стирол-бутадиенового латексов с каолином и диоксидом титана сопровождается образованием хлопьевидного нередиспергируемого осадка в результате наступивших процессов гомо- и гетерокоагуляции.

Однако высокая устойчивость бинарных смесей достигается в щелочной среде (рН 9.5) [6].

Совмещение латекса с дисперсией нанодисперсного технического углерода в ультразвуковом поле сопровождается нарушением агрегативной устойчивости за счет перераспределения эмульгирующих агентов с поверхности латексных глобул на вновь образующуюся поверхность технического углерода. Ультразвуковое воздействие способствует частичному разрушению вторичных агрегатов и диспергированию технического углерода в латексной системе. В результате ультразвукового воздействия происходит соагломерация латексных частиц с агрегатами технического углерода. Нарушение агрегативной устойчивости латексной системы, содержащей нанодисперсный технический углерод, в ультразвуковом поле позволяет исключить использование коагулирующих агентов при выделении соагломерированных частиц эластомерной композиции [7]. Следует отметить, что диспергирование технического углерода в латексной системе при ультразвуковом воздействии достигается в результате стабилизации поверхности углерода эмульгирующими компонентами латекса.

Активация поверхности технического углерода при ультразвуковом воздействии способствует изменению его микроструктуры, возникновению пространственных дефектов и дополнительных активных центров. Научные представления об активности наполнителя, в частности нанодисперсного технического углерода, базируются на поверхностных явлениях, происходящих на разделе фаз.

Основными характеристиками технического углерода, обеспечивающего эффект усиления вулканизатов, являются [8]:

- высокая удельная внешняя поверхность (адсорбция цетилтриметиламмония бромида более $70 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$);
- повышенная структурность — морфология дисперсных частиц (адсорбция дибутилфталата более $100 \text{ мл}/100 \text{ г}$ технического углерода);
- энергетическая активность и неоднородность поверхности.

Энергетическая активность характеризуется высоким содержанием на поверхности технического углерода кислородсодержащих групп (карбоксильных, гидроксильных, карбонильных, гидроперекисных, хиноновых, лактоновых и т. п.). В качестве косвенного показателя энергетической активности технического углерода может быть использован показатель рН водной дисперсии. В частности, повышенной энергетической активностью обладает технический углерод К354, полученный канальным способом,

значение показателя pH водной суспензии которого составляет 3.7–4.5 [8].

Создание эластомерной композиции с однородной структурой позволит получить вулканизаты с высокими значениями модуля упругости, показателя прочности и износостойкости. Недостаточная диспергируемость технического углерода в каучуке ограничивает адгезию каучука к поверхности наполнителя. Следствием ограничения межфазного взаимодействия поверхности технического углерода с макромолекулами каучука является возникновение трения между частицами (эффект Пейна) в агломератах, что способствует выделению тепла в резине при воздействии динамических нагрузок [9].

Максимальная степень диспергирования агломератов технического углерода в каучуке при изготовлении резиновых смесей достигается повышением структурности — морфологией дисперсных частиц технического углерода. Известно, что вторичные агрегаты в виде агломератов образуются из прочных первичных агрегатов технического углерода. Вторичные агрегаты технического углерода менее прочные, чем первичные, и способны разрушаться и восстанавливаться при переработке в смесительном оборудовании [8].

В работе [10] показано, что агломераты технического углерода неустойчивы к ультразвуковому воздействию, так как доля вторичных агрегатов при диспергировании в органическом растворителе снижается. Диспергирование технического углерода с использованием ультразвукового воздействия способствует уменьшению среднего эквивалентного диаметра агрегатов с 120 до 45 нм после 30–40-минутного ультразвукового воздействия. Дальнейшее ультразвуковое воздействие сопровождается увеличением эквивалентного диаметра агрегатов до 80 ± 5 нм, что соизмеримо с размерами макроассоциатов.

Таким образом, увеличение межфазового взаимодействия каучук–наполнитель в эластомерной композиции способствует эффекту усиления вулканизатов. Межфазное взаимодействие каучука с техническим углеродом находится в прямой зависимости от размеров вторичных агрегатов и внешней удельной поверхности нанодисперсного технического углерода. Эффект усиления вулканизатов, полученных с использованием эластомерных композиций, может быть достигнут увеличением межфазной поверхности, что требует использования высокоэффективного ультразвукового воздействия при жидкофазном наполнении каучука.

Цель работы — изучение влияния ультразвукового воздействия на дестабилизацию латекса при жидкофазном наполнении техническим углеродом.

Экспериментальная часть

В качестве объекта изучения использовали латекс бутадиен-стирольного каучука марки СКС-30АРК (концентрация каучука в латексе 20.4 мас%, pH 9.8, АО «Воронежсинтезкаучук»), технический углерод марок П234 (ООО «Омсктехуглерод»), К354, П324, П514 и П803 (ООО ПКФ «Экопольза»). Морфологические характеристики и основные свойства промышленных марок технического углерода представлены в табл. 1. Эквивалентный радиус частиц технического углерода в водной дисперсии, полученной с использованием генератора марки УЗГ 13-0.1/22 (ООО «Ультразвуковая техника»), определяли с помощью спектрометра динамического и статического рассеяния Photocor-Complex (ООО «Фотокор») при длине волны $\lambda = 647$ нм.

Определение содержания мыл смоляных и жирных кислот проводили путем прямого титрования 10%-ным раствором NaOH после извлечения из модельных стоков с пониженной кислотностью хлороформом (х.ч.),* содержание лейканола в модельном стоке определяли с помощью спектрофотометра СФ-46 (ОАО «ЛОМО»). Полосы поглощения, характерные для лейканола, отмечают в ультрафиолетовой области 227 и 235 нм, погрешность измерения содержания лейканола составляла не более 5.0 мас%.

Состояние агрегативной устойчивости латексной системы при введении технического углерода оценивали по коэффициенту поверхностного натяжения, который определяли по эталонной изотерме поверхностного натяжения на тензомере дю Нуи (ЗАО «Полимермаш»).

Обсуждение результатов

Ультразвуковое воздействие на водную дисперсию технического углерода сопровождается снижением значения эквивалентного гидродинамического диаметра агломератов (рис. 1) за счет разрушения вторичных агрегатов, что способствует повышению адсорбционной поверхности. Следует отметить, что снижение pH водной дисперсии с 8.0 до 4.1 способствует увеличению степени диспергирования технического углерода П324 после 5-минутного ультразвукового воздействия, так как уменьшается эквивалентный диаметр агломератов технического углерода с 135 до 90 нм.

* Лурье Л. Л. Аналитическая химия промышленных сточных вод: Учебник для вузов. М.: Химия, 1984. С. 353–355.

Таблица 1
Основные физико-химические показатели технического углерода

Марка технического углерода	Средний диаметр частиц,* нм	pH водной суспензии,** усл. ед.	Удельная адсорбционная поверхность,** м ² ·г ⁻¹	Адсорбция дибутилфталата,** см ³ /100 г технического углерода
К354	25–30	3.7–4.5	≥150	—
П234	19–25	6.0–8.0	104–114	97–105
П324	25–30	7.0–9.0	80–88	95–105
П514	39–48	6.0–8.0	—	97–105
П803	100–200	7.0–9.0	12–20	76–90

* По данным [8].

** По данным ГОСТ 7885–86. Углерод технический для производства резины.

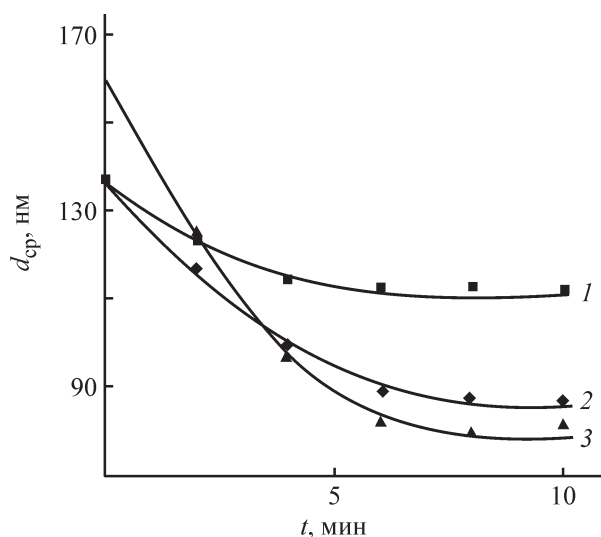


Рис. 1. Зависимость эквивалентного диаметра агломератов технического углерода в водной дисперсии от продолжительности ультразвукового воздействия.

1 — ПЗ24 при pH 8.0, 2 — ПЗ24 при pH 4.1, 3 — К354 при pH 4.1.

Существенным фактором при введении активного наполнителя в эластомерную матрицу композиции является энергетическая неоднородность поверхности технического углерода. Проявление энергетической неоднородности поверхности активного наполнителя при диспергировании в латексной системе сопровождается способностью к агломерации частиц или преждевременной коагуляцией латекса. Использование ультразвукового поля при жидкофазном наполнении позволяет устранить агломерирование частиц технического углерода при введении в латекс.

pH водной дисперсии с содержанием 100 г·дм⁻³ технического углерода К354, для которого характерно наличие кислородсодержащих групп на поверхности, составляет 4.1 ± 0.1 , а водной дисперсии с содержанием 100 г·дм⁻³ технического углерода ПЗ24 —

7.9 ± 0.1 . Наличие кислородсодержащих групп на поверхности оказывает влияние на значение pH водной дисперсии технического углерода, т. е. технический углерод К354 проявляет кислотные свойства (табл. 2).

Введение в латексную систему технического углерода К354, содержащего на своей поверхности кислородсодержащие группы, способствует хемосорбции эмульгирующих агентов из водной фазы латекса. В связи с этим нарушение агрегативной устойчивости латекса (рис. 2) находится в прямой зависимости от снижения содержания мыл смоляных и жирных кислот в водной фазе латекса, что косвенно подтверждается повышением коэффициента поверхностного натяжения водной фазы при жидкофазном наполнении (рис. 2).

Снижение значения pH водной дисперсии технического углерода ПЗ24 способствует повышению

Таблица 2
Влияние содержания технического углерода в водной дисперсии на величину pH

Марка технического углерода	Значение pH при содержании технического углерода в водной дисперсии, г·дм ⁻³			
	25.0	50.0	75.0	100.0
К354	5.3–5.7	4.9–5.2	4.7–4.4	4.1–4.3
П234	7.1–7.4	7.5–7.7	7.7–7.9	8.0–8.2
П324	6.9–7.2	7.3–7.5	7.5–7.7	7.8–8.0
П514	7.3–7.6	7.7–8.0	8.0–8.2	8.2–8.4
П803	7.5–7.9	8.3–8.7	8.4–8.8	8.9–9.3

сорбирующей способности технического углерода по отношению к эмульгирующим агентам, с использованием которых синтезирован эмульсионный бутадиен-стирольный каучук СКС-30АРК. Кислая среда способствует конверсии мыл смоляных и жирных кислот в плохо растворимые соединения в воде, что обусловлено повышением энергии сорбционного взаимодействия за счет снижения энергии гидратации эмульгирующих агентов в водной фазе латекса.

Сорбция мыл смоляных и жирных кислот и их производных техническим углеродом П324 при водородном показателе pH 7.9 ± 0.1 обусловлена энергией взаимодействия этих молекул с поверхностью адсорбента. Адсорбция нанодисперсным техническим углеродом П324 происходит за счет образования водородных связей и ван-дер-ваальсового взаимодействия, при этом молекулы органических кислот и их производных адсорбируются внешней поверхностью технического углерода, представляющего собой не-

пористый сорбент. При сорбции эмульгирующих агентов из водной фазы латекса техническим углеродом П324, представляющим собой непористый сорбент с незначительным содержанием полярных групп (менее 1.0%), наблюдается физическая сорбция органических веществ.

С увеличением количества введенного технического углерода К354 в латекс СКС-30АРК повышается степень извлечения мыл смоляных и жирных кислот с поверхности латексных глобул, что способствует нарушению термодинамической устойчивости наполненной латексной системы. При введении технического углерода К354 в количестве 100 г на 1.0 дм³ латекса содержание эмульгирующих агентов снижается с 500 до 7 мг·дм⁻³, при этом отмечается повышение коэффициента поверхностного натяжения с 41.8 до 72.1 мН·м⁻¹, что свидетельствует о высокой степени извлечения мыл смоляных и жирных кислот и их производных из водной фазы латекса.

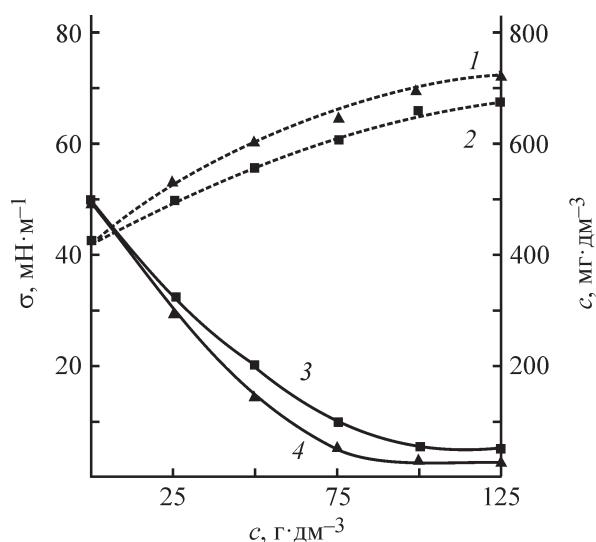


Рис. 2. Зависимость содержания мыл смоляных и жирных кислот и их производных (3, 4) и коэффициента поверхностного натяжения (1, 2) от содержания в латексной системе: 1, 4 — технического углерода К354; 2, 3 — технического углерода П324.

Степень извлечения мыл смоляных и жирных кислот и их производных из латексной системы техническим углеродом ПЗ24 составляет $23 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$, при этом коэффициент поверхностного натяжения водной фазы латекса — $67.7 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$.

Следует отметить, что на сорбционную емкость технического углерода при извлечении мыл смоляных и жирных кислот и их производных из латексной системы оказывает влияние содержание лейканола, который входит в состав эмульгирующей системы латекса. Во многих существующих рецептах синтеза эмульсионных каучуков для повышения степени защиты адсорбционного слоя полимер-мономерных частиц и стабильности латекса в технологическом процессе вводится диспергатор — лейканол в количестве 3–10 мас.% по отношению к эмульгатору [2]. Лейканол хорошо растворяется в воде, но обладает низкой поверхностной активностью, поэтому самостоятельно как эмульгатор не используется, но весьма эффективен при стабилизации различных дисперсий, в том числе латексов. Лейканол в отличие от парафинатов и канифолевых мыл сохраняет стабилизирующую способность и в кислой среде, что может осложнять процесс выделения каучука.

Наличие лейканола в латексе оказывает влияние на сорбирующую способность технического углерода, так как уменьшает поверхность сорбции по

отношению к мылам смоляных и жирных кислот и их производным. Графическая зависимость (рис. 3) сорбционной емкости от содержания лейканола в модельной дисперсии имеет S-образный изгиб, характерный при образовании нескольких слоев на поверхности технического углерода, что обусловлено структурой непористого адсорбента — технического углерода.

Анализ влияния pH на полноту дестабилизации латексной системы при введении дисперсии технического углерода (табл. 3) показывает, что содержание технического углерода К354 свыше 40 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука способствует нарушению агрегативной устойчивости латекса, однако полная коагуляция достигается в кислой среде, что требует подкисления латексной системы. Безреагентная коагуляция латексной системы достигается при степени наполнения техническим углеродом К354 не менее 100 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука в латексе. Достижение полной коагуляции наполненной латексной системы в ультразвуковом поле предпочтительно при максимальном наполнении 100 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Использование в качестве усиливающего наполнителя технического углерода ПЗ24, полученного печным способом, требует подкисления наполненной латексной системы для проведения коагуляции, при этом с увеличением степени наполнения латекса расход кислоты понижается.

Таблица 3

Условия получения эластомерной композиции на стадии выделения каучука СК-30АРК из латекса с использованием ультразвукового воздействия

Марка технического углерода	Степень наполнения техническим углеродом, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука	pH среды	Условия выделения наполненного каучука из латекса
К354	40	5.3 ± 0.1	Требуется подкисление до pH 3.6. Коагуляция достигается в течение 3.0–5.0 мин
	60	4.7 ± 0.1	Требуется подкисление до pH 3.9. Коагуляция достигается в течение 2.0–3.0 мин
	100	4.3 ± 0.1	Не требуется подкисления. Коагуляция достигается в течение 2.0–3.0 мин
ПЗ24	40	9.4 ± 0.1	Требуется подкисление до pH 3.0. Коагуляция достигается в течение 3.0–5.0 мин
	60	9.1 ± 0.1	Требуется подкисление, менее pH 3.3. Коагуляция достигается в течение 2.0–3.0 мин
	100	8.7 ± 0.1	Требуется подкисление до pH 3.6. Коагуляция достигается в течение 2.0–3.0 мин

П р и м е ч а н и е. При жидкофазном наполнении водная дисперсия технического углерода предварительно подвергается ультразвуковому воздействию в течение 3–7 мин, а затем проводят совмещение с латексом в ультразвуковом поле.

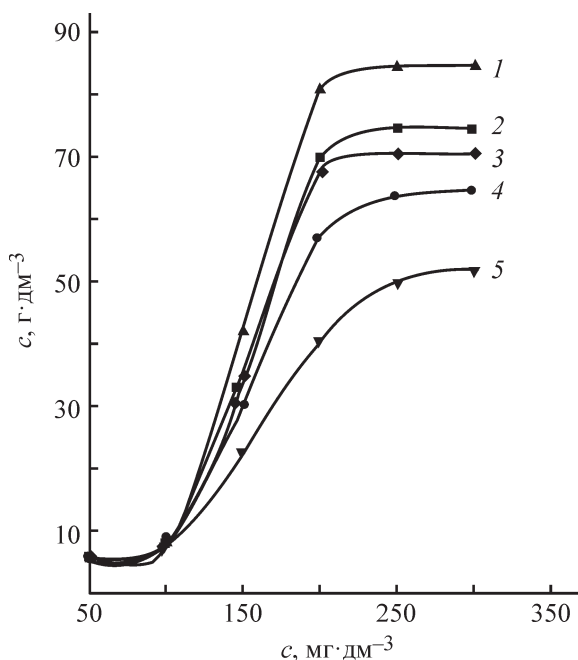


Рис. 3. Сорбционная емкость при pH 4.5 по лейканолу технического углерода: 1 — К354, 2 — П234, 3 — П324, 4 — П514, 5 — П803.

Выводы

Жидкофазное наполнение эмульсионного каучука нанодисперсным техническим углеродом в ультразвуковом поле сопровождается нарушением агрегативной устойчивости латекса. Дестабилизация латекса происходит за счет уменьшения защитного слоя латексных частиц в результате сорбции техническим углеродом эмульгирующих компонентов из латексной системы при жидкофазном наполнении в ультразвуковом поле.

Нарушение агрегативной устойчивости системы при введении нанодисперсного технического углерода возрастает при использовании ультразвукового воздействия, которое способствует повышению структурности, увеличению сорбционной способности и энергетической активности технического углерода.

Увеличение содержания в латексной системе технического углерода К354 при жидкофазном наполнении в ультразвуковом поле приводит к проявлению кислотных свойств, что способствует глубокому сорбционному извлечению эмульгирующих агентов — солей смоляных и жирных кислот и их производных из водной фазы латекса. Полная дестабилизация латексной системы без использования коагулирующих агентов достигается при максимальном введении технического углерода К354. Использование технического углерода П324, проявляющего основные свойства при

введении в латексную систему, требует подкисления при получении эластомерной композиции.

Получение эластомерной композиции на стадии выделения каучука СКС-30АРК из латекса без использования коагулирующих агентов позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду в производстве эластомеров.

Конфликт интересов

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

Информация об авторах

Корчагин Владимир Иванович, д.т.н., проф.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7212-1627>

Протасов Артём Викторович, к.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0196-7734>

Киселев Иван Сергеевич
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6318-7648>

Список литературы

- [1] Пат. РФ 2640522 (опубл. 2018). Способ изготовления наполненного высокоактивным техуглеродом каучука.
- [2] Береснев В. Н., Крайник И. И., Баранец И. В., Агibalова Л. В. Влияние диспергатора лейканола на

- агрегативную устойчивость синтетических латексов // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 7. С. 998–1006.
<https://doi.org/10.1134/S0044461818070101>
 [Beresnev V. N., Kraynik I. I., Baranets I. V., Agibalova L. V. The influence of leucanol on the aggregative stability of synthetic latexes // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 7. P. 1151–1158.
<https://doi.org/10.1134/S107042721807011X>].
- [3] Крайник И. И., Береснев В. Н., Агibalова Л. В., Курова А. В. К вопросу о стабильности полимер-мономерных частиц синтетических латексов // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 10 С. 1449–1461.
<https://doi.org/10.1134/S0044461818100092>
 [Kraynik I. I., Beresnev V. N., Agibalova L. V., Kurova A. V. Stability of polymer–monomer particles of synthetic latexes // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 10. P. 1642–1653.
<https://doi.org/10.1134/S0044461818100092>].
- [4] Один А. П., Рачинский А. В. Усовершенствованный метод выделения эмульсионных бутадиен-стирольных каучуков с использованием органических коагулянтов // Каучук и резина. 2009. № 3. С. 2–4.
<https://www.elibrary.ru/tachnn>
- [5] Вережников В. Н., Никулин С. С., Зорина А. В., Ермолаева А. К., Крeтинина Н. И. Влияние механической обработки на агрегативную устойчивость латекса и расход коагулянтов при выделении каучука // ЖПХ. 2016. Т. 89. № 10. С. 1345–1350.
<https://www.elibrary.ru/owurhu>
 [Verezhnikov V. N., Zorina A. V., Ermolaeva A. K., Kretinina N. I., Nikulin S. S. Effect of mechanical treatment on the aggregative stability of latex and on consumption of coagulants in rubber recovery // Russ. J. Appl. Chem. 2016. V. 89. N 10. P. 1662–1666.
<https://doi.org/10.1134/S1070427216100153>].
- [6] Кошевар В. Д., Кажуро И. П. Агрегативная устойчивость водных дисперсий минеральных порошков в латексах // Лакокрасоч. материалы и их применение. 2021. № 5. С. 10–18.
<https://www.elibrary.ru/gvkxzy>
- [7] Корчагин В. И., Киселев И. С., Челноков П. А., Протасов А. В., Мальцев М. В. Жидкофазное наполнение печным техуглеродом бутадиен-стирольных каучуков в ультразвуком поле // Каучук и резина. 2022. Т. 81. № 3. С. 128–131. <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2022-81-3-128-131>
- [8] Гюльмисарян Т. Г., Капустин В. М., Левенберг И. П. Технический углерод: морфология, свойства, производство. М.: Каучук и Резина, 2017. 586 с.
- [9] Моисеевская Г. В., Раздьяконова Г. И., Петин А. А. Новый высокоструктурный технический углерод серии OMCARB для снижения гистерезиса в резине. Ч. 1. Особенности строения и свойства технического углерода // Каучук и резина. 2016. № 2. С. 36–40. <https://www.elibrary.ru/vxgmkx>
 [Moiseevskaya G. V., Petin A. A., Razd'yakonova G. I., Strizhak E. A., Karavaev M. Y. A comparative investigation of conductive grades of carbon black of the omcarb series and rubber compounds based on natural rubber // Int. Polym. Sci. Technol. 2016. V. 43. N 2. P. 23–28.
<https://doi.org/10.1177/0307174x1604300206>].
- [10] Чалый А. Е., Герасимов В. К., Горшкова О. В., Матвеева В. В. Фрактальная размерность саженатолненных полимеров и эластомеров // Каучук и резина. 2017. Т. 76. № 3. С. 138–143.
<https://www.elibrary.ru/ZCRLQN>