

УДК 676.084
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675
Шифр специальности ВАК: 2.6.10

Оптимизация режимов синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины

Д.Ю. Островная[✉], А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, А.А. Луценко

НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Казахстан, г. Петропавловск

[✉]darya_ostrovnaya@mail.ru

Аннотация. Актуальность. При обработке древесины образуется до 40 % отходов, которые включают в себя стружку, опилки, древесную пыль, части коры и некондиционную древесину различной формы и размеров. Вторичные отходы древесины содержат в своем составе лигнин, являющийся источником для получения солей лигносульфоновых кислот – лигносульфонатов. Возможность применения этих соединений в качестве диспергаторов пигментов обусловлена амфифильным строением их молекул. Целенаправленный синтез лигносульфонатов из вторичных отходов древесины с одной стороны решает задачи обеспечения безотходных производств, а с другой – получения товарного продукта, обладающего диспергирующими свойствами. **Цель.** Оптимизация способа получения водорастворимого диспергатора из отходов древесины. **Методы.** Вероятностно-детерминированный метод планирования эксперимента, метод спектрофотометрии, метод компьютерной-микроскопии. **Результаты и выводы.** Показана возможность целенаправленного синтеза лигносульфоната ЛС_с из отходов распиловки березы. С применением методов вероятностно-детерминированного планирования проведена оптимизация режимов синтеза и получена обобщенная модель, позволяющая оценить выход лигносульфоната. Исследовано влияние трех модификаторов на диспергирование диоксида титана в водно-акриловой эмали. Показано, что введение ЛС_с, ЛС_т и Dispers 715w на уровне 1,0–0,5 г/дм³ приводит к более тонкому диспергированию пигмента. Лучшие показатели диспергирования отмечаются при содержании ЛС_с 0,5 г/дм³, при этом среднестатистический диаметр уменьшается в 3,1 раза (с 8,4 до 2,6 мкм). При содержании синтезированного ЛС_с на уровне 1,0 г/дм³ в составе водно-акриловом лакокрасочном покрытии степень защиты стали в сернокислых растворах составила не менее 62 %.

Ключевые слова: вторичные отходы древесины, сульфопроизводные лигнина, лигносульфонат, планирование эксперимента, акриловая дисперсия, синтез, коррозия

Для цитирования: Оптимизация режимов синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины / Д.Ю. Островная, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, А.А. Луценко // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

UDC 676.084
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

Optimization of the synthesis modes of water-soluble sulfonic derivatives of lignin from wood waste

D.Yu. Ostrovnaya[✉], A.N. Dyuryagina, K.A. Ostrovnoy, A.A. Lutsenko

North Kazakhstan University named after M. Kozhaybayev, Petropavlovsk, Kazakhstan

[✉]darya_ostrovnaya@mail.ru

Abstract. Relevance. When processing wood, up to 40% of waste is generated, which includes shavings, sawdust, wood dust, bark parts and substandard wood of various shapes and sizes. Secondary wood waste contains lignin, which is a source for the production of salts of lignosulfonic acids – lignosulfonates. The possibility of using these compounds as pigment dispersants is due to the amphiphilic structure of their molecules. The targeted synthesis of lignosulfonates from secondary wood waste, on the one hand, solves the problems of ensuring waste-free production, and on the other hand, obtaining a marketable

ble product with dispersing properties. **Aim.** Optimization of the method for obtaining a water-soluble dispersant from wood waste. **Methods.** Probabilistic deterministic method of experiment planning, spectrophotometry method, computer microscopy method. **Results and conclusions.** The paper shows the possibility of targeted synthesis of lignosulfonate LS_s from birch sawing waste. Optimization of synthesis modes was carried out using probabilistic-deterministic planning methods and a generalized model was obtained that allows estimating the yield of lignosulfonate. The authors studied the effect of three modifiers on the dispersion of titanium dioxide in aqueous acrylic enamel. It is shown that the introduction of LS_s, LS_t and Dispers 715w at the level of 1.0–0.5 g/dm³ leads to a finer dispersion of the pigment. The best dispersion indicators are observed at a LS_s content of 0.5 g/dm³, while the average diameter decreases by 3.1 times (from 8.4 to 2.6 microns). With the content of synthesized LS_s at the level of 1.0 g /dm³ in a water-acrylic paint coating, the degree of protection of steel in sulfuric acid solutions was at least 62%.

Keywords: secondary wood waste, lignin sulfates, lignosulfonate, experiment planning, acrylic dispersion, synthesis, corrosion

For citation: Ostrovnaya D.Yu., Dyuryagina A.N., Ostrovnay K.A., Lutsenko A.A. Optimization of the synthesis modes of water-soluble sulfonic derivatives of lignin from wood waste *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

Введение

Древесина является одним из важнейших возобновляемых ресурсов и служит универсальным строительным материалом. Ежегодно в Северном Казахстане перерабатывается от 80 до 100 тысяч кубических метров древесины, 80 % которой составляют лиственные деревья [1]. При переработке древесины образуется до 40 % вторичных отходов [2], представляющих собой опилки, стружку, древесную пыль, куски коры и некондиционную древесину различной формы и размеров. Утилизация отходов переработки древесины является одним из направлений создания ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий получения модифицирующих добавок многофункционального действия. Известно, что в состав древесины входит целлюлоза и смесь полимеров ароматической природы – лигнин [3]. Он считается уникальным источником для получения солей лигносульфоновых кислот (лигносульфонатов). Особенностью лигносульфонатов (ЛС), в сравнении с другими лигнопроизводными, является высокая растворимость в воде, обусловленная наличием сульфогрупп в молекуле. Кроме того, амфифильная архитектура его молекул предполагает поверхностную активность [4]. Эти две отличительные черты лигносульфонатов позволили широко использовать их в строительстве и на гидрометаллургических предприятиях России и Казахстана [5–8]. Вместе с тем в литературе практически отсутствуют научные данные об их применении в составе водорастворимых лакокрасочных материалов (ЛКМ). Несмотря на безусловные экологические преимущества водных полимерных дисперсий – отсутствие органических растворителей и токсичных веществ, они, как известно [9, 10], значительно уступают органорастворимым лакокрасочным материалам по антикоррозионному эффекту покрытий. Физико-химической предпосылкой для разработки эффективных водных дисперсий пленкообразующих с применением

лигносульфонатов является возможность достижения диспергирующего эффекта поверхностно-активных веществ (ПАВ) по отношению к пигментам (адсорбционно-расклинивающий механизм понижения прочности). Следствием глубокой дезагрегации твердофазных частиц является формирование плотных, малопроницаемых покрытий, надежно изолирующих металл от контакта с агрессивными средами (кислород, вода).

Как свидетельствуют результаты физико-химического анализа лигносульфонатов, они существенно различаются по составу, что не только затрудняет оптимизацию их расходов, но и непосредственно влияет на их функциональные свойства [11, 12]. В ряду существенных отклонений отметим различия в молекулярно-массовом распределении лигносульфонатов (молекулярные массы варьируются от 5000 до 100000), в количественном содержании сульфонатных группировок, а также в катионном составе (натриевые, калиевые, кальциевые, магниевые и аммонийные соли). Вышеуказанные отклонения в составе лигносульфонатов определяют сорт перерабатываемой древесины и технологическими режимами (по номенклатуре реагентов и температуре) [13].

Исходя из вышеизложенного нами сформулирована следующая цель настоящей работы – оптимизация способа получения водорастворимого диспергатора из отходов древесины.

Для достижения данной цели были поставлены задачи:

1. Оптимизировать режимные параметры синтеза лигносульфоната на основе использования методов математического моделирования.
2. Оценить влияние концентрации синтезированного лигносульфоната на показатели диспергирования пигмента в водной дисперсии полимеров.
3. Установить влияние модификатора на антикоррозионные свойства формируемых покрытий лакокрасочных материалов.

Объекты и методика исследования

Для синтеза лигносульфоната использовали вторичные отходы переработки лиственной древесины, представляющие собой смесь опилко-стружечного материала и щепы. Опилки измельчали на дисковой циркулярной пиле и фракционировали на ситах разного диаметра (5–55 мм), что позволило отделить опилки от стружек и разделить их по крупности. В работе использовали фракцию опилок до 5 мм.

Лигносульфонат получали путем сульфитной варки древесных опилок в смеси, содержащей сульфит натрия (ГОСТ 5644-75) и оксид кальция (ГОСТ 9179-2018), в лабораторном автоклаве емкостью 0,4 дм³ (коэффициент заполнения по воде – 0,7) [14]. Для оптимизации режимов синтеза использовали вероятностно-детерминированный метод планирования эксперимента [15–18]. За основу построения плана эксперимента выбрана ортогональная матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях. В качестве влияющих факторов на выход лигносульфоната выбрали массу загрузки древесного материала (m_o , г), массу сульфита натрия ($m_{Na_2SO_3}$, г), массу негашёной извести (m_{CaO} , г) и температуру (t , °C). Числовые значения уровней факторов для построения план-матрицы указаны в табл. 1.

Таблица 1. Числовые значения уровней факторов

Table 1. Numerical values of factor levels

Уровень Level	Факторы/Factors (F)			
	Масса, г/Mass of, g			Температура Temperature t , °C
	опилок m_o sawdust, m_s	сульфита натрия $m_{Na_2SO_3}$ sodium sulfite $m_{Na_2SO_3}$	оксида кальция m_{CaO} calcium oxide m_{CaO}	
1	15	50	15	120
2	30	70	25	140
3	45	90	35	160

Древесный материал и негашеную известь взвешивали на электронных весах с точностью до 0,01 г, помещали в автоклав. Затем в смесь добавляли 250 мл предварительно приготовленного раствора сульфита натрия заданной концентрации. Автоклав плотно закрывали и помещали в заранее разогретую до нужной температуры печь. Продолжительность варки составляла 160 мин. Активный эксперимент проводили согласно матрице (табл. 2).

По завершении каждого опыта автоклав охлаждали. Пульпу разделяли фильтрацией на беззольном фильтре, осадок промывали водой. Фильтрат и промывные воды объединяли и доводили до постоянного объема 200 мл. Количественное содержание сульфо-производных оценивали спектрофотометрически.

Таблица 2. Ортогональная матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях

Table 2. Orthogonal matrix of a four-factor experiment on three levels

№ эксперимента Experiment number	Масса, г/Mass of, g			Температура Temperature t , °C
	опилок m sawdust m_s	сульфита натрия $m_{Na_2SO_3}$ sodium sulfite $m_{Na_2SO_3}$	оксида кальция m_{CaO} calcium oxide m_{CaO}	
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

В качестве функции отклика использовали определённый интеграл спектра ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$), который выражает площадь под спектральной линией $D=f(\lambda)$ и показывает общее количество извлечённых веществ в растворе: чем выше значение данного показателя, тем больше содержание сульфо-производных в растворе (рис. 1).

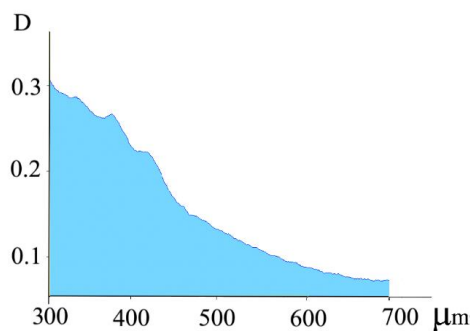


Рис. 1. Определённый интеграл спектра ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$)

Fig. 1. Definite integral of the spectrum $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$

Для нахождения определённого интеграла спектра в образцах растворов ЛС измеряли оптическую плотность в интервале длин волн 300–700 нм с шагом 0,5 на спектрофотометре СФ-2000. После получения спектров $D=f(\lambda)$ проводили расчет определённого интеграла спектра с использованием программы «Сканирование для спектрофотометра СФ 2000» версия 4.06.

Развитие процессов диспергирования пигмента (диоксид титана марки Р-02, ГОСТ 9804-84) исследовали в водных композициях на основе акрилового пленкообразующего (ТУ 2313-004-86926824-2014) компьютерно-микроскопическим методом [19]. Сущность метода заключается в получении растро-

вых изображений проб суспензии лакокрасочного материала с применением микроскопа и последующая обработка их в программе «Обработка изображений» версия 4.5.2. В методе задавали постоянным разрешение изображений (640×480) и увеличение микроскопической установки (×350), состоящей из микроскопа (Levenhuk MED D40T), веб-камеры (Industrial Digital Camera 16MP 1/2.33 COLOR USB 3.0 PANASONIC CMOS SENSOR) и персонального компьютера. После обработки изображений в программе получали процентное содержание фракций (Р, %) в суспензии, общее количество частиц на изображении (N, ед.) и их общую площадь (S_p, пиксель), которые использовали для расчета среднестатистического диаметра частиц (d_{ср}, мкм) по формуле (1) [20]:

$$d = 331.996 \cdot X^{-0.09585} \cdot \sqrt{\frac{S_p}{N}}, \quad (1)$$

где X – увеличение компьютерно-микрооптической установки; S_p – площадь частицы, выраженная в пикселях; N – количество частиц на изображении, шт.

В качестве критерия диспергирующего эффекта определили среднестатистический диаметр (d_{ср}) и содержание фракций (Р).

Для сравнительной оценки диспергирующего эффекта синтезированного лигносульфоната (ЛС_с) использовали промышленно изготовленный лигносульфонат технический «Краснокамский» (ЛС_т) (ТУ 2455-002-00281039-00) и диспергатор «Dispers 715w» (полиакрилат натрия) торговой марки «ТЕГО».

В композициях с постоянным содержанием диоксида титана (С_{ТiO2}=1 %) и плёнообразующего (С_{акр}=10 %) варьировали концентрацию модификаторов (С_м, г/дм³: 0–4).

Антикоррозионные свойства покрытий определяли в зависимости от количественных содержаний (0–4 г/дм³) ЛС_с. Определение скорости коррозии осуществляли по изменению массы образцов окрашенных стальных пластинок после удаления продуктов коррозии. Взвешивание проводили во времени после выдержки образцов в 10 % растворе серной кислоты. Скорость коррозии рассчитывают по формуле (2)

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}, \quad (2)$$

где m₁ – масса образца после удаления продуктов коррозии, г; m₀ – исходная масса образца, г; S – поверхность образца, м²; t – продолжительность, ч;

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты активного эксперимента по синтезу лигносульфоната, проведенного на основании использованной план-матрицы четырехфакторного эксперимента на трех уровнях, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты активного эксперимента

Table 3. Active experiment results

№ опыта Experiment number	Масса, г / Mass of, g			Температура Temperature t, °C	Определенный интеграл спектра $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$ Definite integral of the spectrum $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$
	опилок m ₀ sawdust m _s	сульфита натрия m _{Na2SO3} sodium sulfite m _{Na2SO3}	оксида кальция m _{CaO} calcium oxide m _{CaO}		
1	15	50	15	120	614,319
2	15	70	25	140	505,439
3	15	90	35	160	377,445
4	30	50	25	160	566,068
5	30	70	35	120	379,056
6	30	90	15	140	344,660
7	45	50	35	140	543,182
8	45	70	15	160	525,028
9	45	90	25	120	519,880

Из экспериментального массива данных была проведена выборка функции отклика по каждому уровню фактора. Частные зависимости показателя содержания сульфопроизводных от массы опилок, сульфита натрия, негашёной извести и температуры представлены на рис. 2. Частные зависимости имеют нелинейный характер и отличаются наличием экстремумов. Оптимальным значениям влияющих факторов отвечает максимальная величина определённого интеграла спектра на нелинейной зависимости. Расчет оптимального значения фактора рассчитывается по формуле (3).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = f(m). \quad (3)$$

Из представленных частных зависимостей (рис. 2) следует, что оптимальным режимом синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов распиловки березы ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda > 500$) является m₀=45 г, m_{Na2SO3}=50 г, m_{CaO}=25 г, t=120 °C. В случае масштабного производства при объеме реактора 1 м³ (с учетом объема используемого в работе реактора 0,4 дм³ и расходов воды 0,25 дм³) оптимальные режимы синтеза соответствуют m₀=112,5 кг, m_{Na2SO3}=125 кг, m_{CaO}=62,5 кг, t=120 °C. Нелинейные частные зависимости адекватно аппроксимируются квадратичной функцией, которую отражает уравнение (4).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = \pm aF^2 \pm bF \pm c. \quad (4)$$

Нахождение коэффициентов a, b, c уравнений осуществляли по методу наименьших квадратов. Для функции отклика однопараметрические уравнения принимают вид:

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = 0.374m_0^2 - 21.467m_0 + 736.78, \quad (5)$$

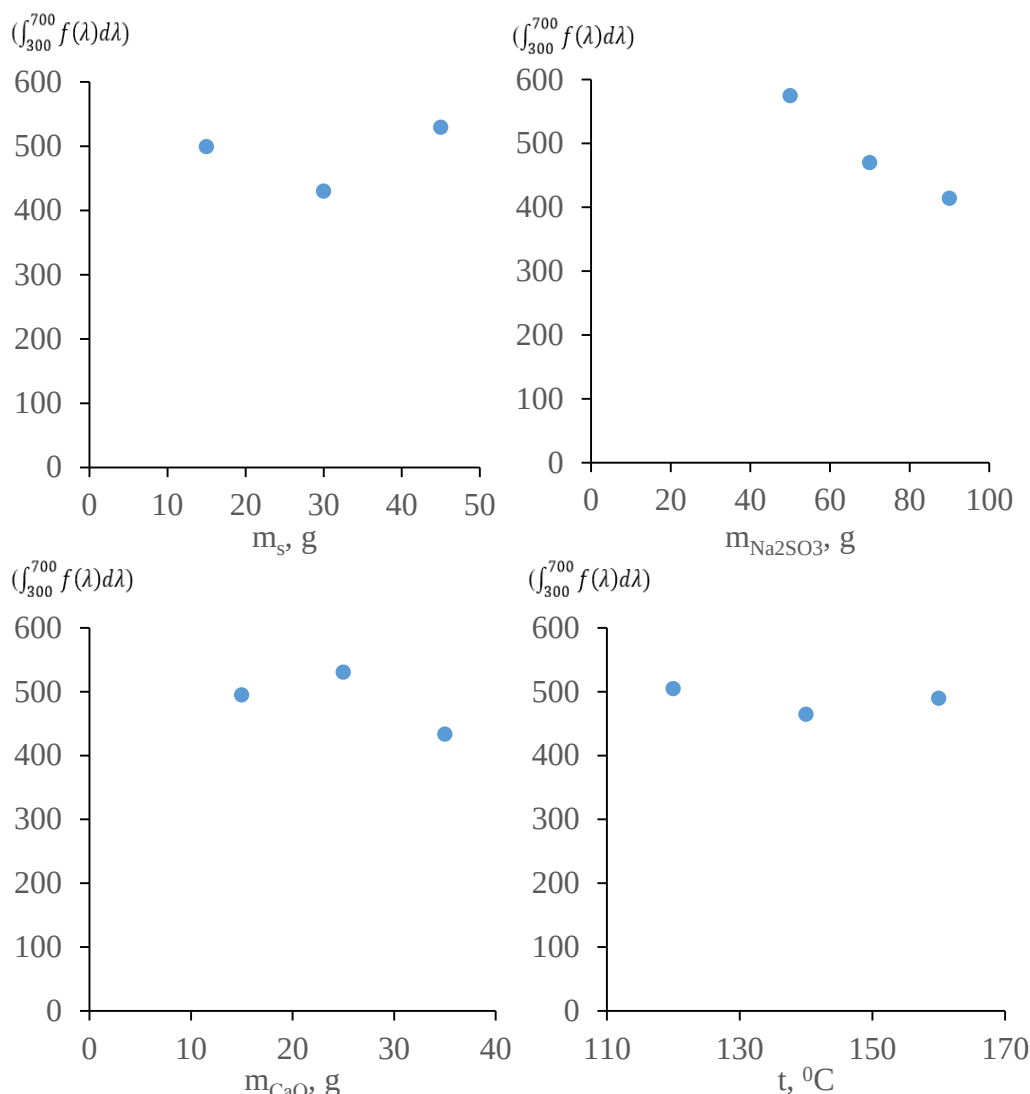


Рис. 2. Частные зависимости показателя содержания сульфопроизводных от параметров оптимизации
Fig. 2. Partial dependences of the content of sulfoderivatives on optimization parameters

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = 0.061 m_{Na_2SO_3}^2 - 12.56 m_{Na_2SO_3} + 1049.9, \quad (6)$$

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = -0.6651 m_{CaO}^2 + 30.185 m_{CaO} + 191.55, \quad (7)$$

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = 0.0813 t^2 - 23.15 t + 211. \quad (8)$$

Рассчитанные величины достоверности аппроксимации для уравнений (5)–(8) составили значения свыше 0,95.

Для построения обобщенной модели использовали многофакторное математическое выражение М.М. Протодяконова [21]:

$$y = \frac{f(x_1)f(x_2)f(x_3)...f(x_m)}{g^{m-1}}, \quad (9)$$

где g – генеральное среднее, рассчитанное по уравнению (10); m – количество факторов; $f(x_1)f(x_2)f(x_3)...f(x_m)$ – произведение уравнений аппроксимации.

$$g = \frac{\sum \int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda}{n}. \quad (10)$$

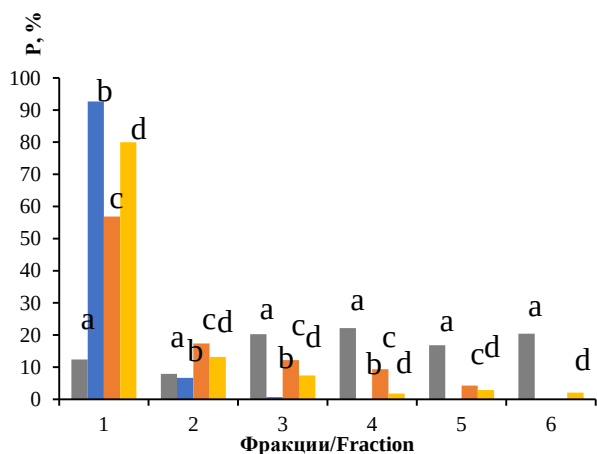
Многофакторная модель процесса синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов распила березы с учетом уравнений (5)–(10) в общем виде отражает уравнение (11).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = \frac{f(m_o)f(m_{Na_2SO_3})f(m_{CaO})f(t)}{486.12^3}. \quad (11)$$

В оптимизированных режимах ($m_o=45$ г, $m_{Na_2SO_3}=50$ г, $m_{CaO}=25$ г, $t=120$ °С) проведены балансовые опыты и наработаны опытные партии продукта.

По результатам компьютерно-микрооптического анализа суспензий диоксида титана в растворе

пленкообразующего было установлено, что в отсутствие модификатора содержание мелких фракций (≤ 10 мкм) не превышает 12,41 % (рис. 3, а), а среднестатистический размер частиц составляет 8,4 мкм (рис. 4).



Фракции, мкм/Fraction, μm : 1) ≤ 10 ; 2) +10–20; 3) +20–44; 4) +44–63; 5) +63–99; 6) +99–140;

а) $C_m=0$ г/дм³ (g/dm³); б) $C_{\text{ЛСс}}=0,5$ г/дм³ (g/dm³);

в) $C_{\text{Dispers 715w}}=0,5$ г/дм³ (g/dm³); г) $C_{\text{ЛСТ}}=0,5$ г/дм³ (g/dm³)

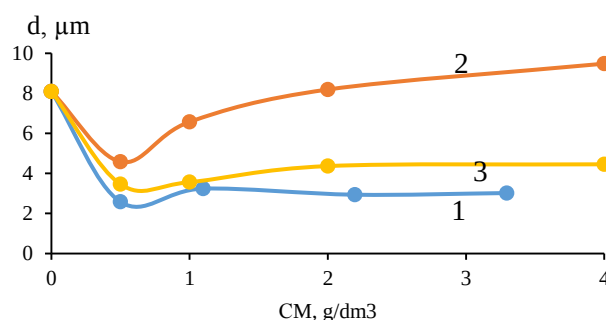
Рис. 3. Влияние содержания модификаторов на фракционный состав акриловой композиции

Fig. 3. Effect of the content of modifiers on the fractional composition of the acrylic composition

При введении модификаторов в акриловые дисперсии отмечали существенные изменения дисперсного состава пигмента (рис. 4). Максимуму диспергирующей эффективности отвечает минимум значений среднестатистического диаметра $d_{\text{ср}}$ и максимум содержания мелких фракций P .

Максимальный диспергирующий эффект по отношению к диоксиду титана, судя по характеру изменения среднестатистического диаметра и содержания мелких фракций, фиксировали при содержании в суспензии синтезированного лигносульфоната на

уровне 0,5 г/дм³. Так, при изменении концентрации ЛСс от 0 до 0,5 г/дм³ среднестатистический диаметр частиц уменьшился в 3,1 раза и составил 2,6 мкм (рис. 4). Сравнительный анализ показал, что полученный диспергирующий эффект лучше, чем с промышленно изготавливаемым ЛСТ ($C_{\text{ЛСТ}}=0,5$ г/дм³, $d_{\text{ср}}=3,5$ мкм) и значительно превышает Dispers 715w ($C_{\text{Dispers 715w}}=0,5$ г/дм³, $d_{\text{ср}}=4,58$ мкм).



$C_{\text{пл}}=10\%$

1 – ЛСс; 2 – Dispers 715w, 3 – ЛСТ

Рис. 4. Влияние концентрации модификаторов на среднестатистический диаметр частиц диоксида титана в акриловой композиции

Fig. 4. Effect of the concentration of modifiers on the average diameter of titanium dioxide particles in an acrylic composition

Диспергирование пигмента, связанное с процессами адсорбции, раскалывающим действием лигносульфоната (Эффект Ребиндера), эффектом электростатического отталкивания (за счет наличия монослоя ориентированных молекул ЛС на поверхности пигмента) приводит к появлению более мелких твердофазных частиц, стабилизированных в дисперсной фазе, и к формированию более плотной упаковки диоксида титана в пленке ЛКМ, что наглядно иллюстрируют представленные микроизображения (рис. 5) [22, 23].

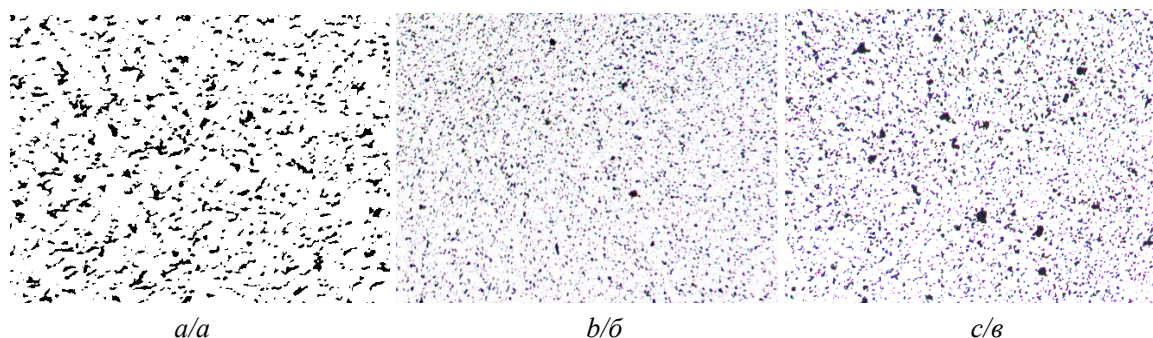


Рис. 5. Микроизображения распределения диоксида титана в ЛКМ: $C_{\text{ЛСс}}$, г/дм³: а) 0; б) 0,5; в) 1,0

Fig. 5. Microimages of titanium dioxide distribution in paint materials: $C_{\text{ЛСс}}$, g/dm³: а) 0; б) 0,5; в) 1,0

Формирование плотных, малопористых покрытий препятствует проникновению агрессивной среды к металлической подложке, что подтверждается полученными результатами исследования кислотной коррозии, представленными в табл. 4.

Таблица 4. Показатели защиты стали от кислотной коррозии в присутствии ЛСс

Table 4. Indicators of steel protection against acid corrosion in the presence of LSs

Содержание модификатора ЛСс, г/дм ³ Content of the LSs modifier, g/dm ³	Скорость коррозии, г/м ² ·ч Corrosion rate, g/m ² ·h
0	0,524
1	0,199
2	2,490
4	2,646

Анализ полученных результатов, согласно табл. 4, показал, что при низком содержании ЛСс ($C_{\text{ЛСс}}=1,0$ г/дм³) в составе акриловой эмали скорость коррозии уменьшается в 2,5 раза (от 0,524 до 0,199 г/м²·ч), а степень защиты стали в сернокислых растворах при этом составляет 62 %. При дальнейшем увеличении содержания лигносульфоната натрия (более 1 г/дм³) наблюдается рост скорости кислотной коррозии и снижение защитных свойств покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Апокина Л.Ю., Лежнева М.Ю. Изучение рациональной технологии получения биологически активных веществ из отходов деревообрабатывающей промышленности (коры березы) // Материалы МНПК Актуальные проблемы естественных наук. – Петропавловск: СКУ им. М.Козыбаева, 2021. – С. 52–55.
- Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова. – 2012. – № 3. – С. 83–88.
- Никитин В.М., Оболевская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 367 с.
- Афанасьев Н.И., Тельтевская С.Е., Пазухина Г.А. Поверхностная активность лигносульфонатов, выделенных на последовательных стадиях делигнификации // Лесной журнал. – 1996. – № 1–2. – С. 136–141.
- Чельшева Т.В. Применение лигносульфонатов для укрепления и обеспыливания лесовозных автомобильных дорог // Лесной журнал. – 2001. – № 5–6. – С. 64–70.
- Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения / Г.А. Тептерева, С.И. Пахомов, И.А. Четвертнева, Э.Х. Каримов, М.П. Егоров, Э.М. Мовсумзаде, Э.И. Евстигнеев, А.В. Васильев, М.В. Севастьянова, А.И. Волошин, Н.Э. Нифантьев, В.В. Носов, В.А. Докичев, Э.Р. Бабаев, С.З. Роговина, А.А. Берлин, А.В. Фахреева, О.А. Баулин, Г.Ю. Колчина, М.С. Воронов, Д.В. Староверов, И.А. Козловский, Р.А. Козловский, Н.П. Тарасова, А.А. Занин, Е.Г. Кривобородов, О.Х. Каримов, В.Р. Флид, М.Е. Логинова // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64. – Вып. 9. – С. 5–122. DOI:10.6060/ivkkt.20216409.6465
- Lugovitskaya T.N., Danilin L.M., Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V. Behavior of surface-active substances in a nitric acid medium and prospects for using them in hydrometallurgy // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2023. – Vol. 97. – P. 2822–2828. DOI: 10.1134/S003602442312021X
- Lugovitskaya T.N., Naboychenko S.S. Lignosulfonates as charge carriers and precursors for the synthesis of nanoparticles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2020. – Vol. 602. – 125127. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125127
- Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. – СПб.: Химиздат, 2017. – 448 с.
- Куис О.В., Прокопчук Н.Р. Антикоррозионная защита металлов: перспективы получения и применения алкидно-уретановых материалов (обзор) // Труды БГТУ. – 2016. – № 4. – С. 25–34.
- Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B. Associative behavior of lignosulphonates in moderately concentrated water, water–salt, and water–alcoholic media // Biomacromolecules. – 2021. – Vol. 22 (8). – P. 3323–3331. DOI: doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00441

Заключение

- Показана возможность целенаправленного синтеза сульфопроизводных лигнина из отходов распиловки березы. С применением методов вероятностно-детерминированного планирования проведена оптимизация режимов синтеза и получена обобщенная модель, позволяющая оценить выход лигносульфоната. Оптимальными режимами синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины в автоклаве емкостью 0,4 дм³ (коэффициент заполнения по воде – 0,7) являются $m_0=45$ г, $m_{\text{Na}_2\text{SO}_3}=50$ г, $m_{\text{CaO}}=25$ г, $t=120$ °С.
- Исследовано влияние трех модификаторов на диспергирование диоксида титана в водно-акриловой эмали. Показано, что введение ЛСс, ЛСт и Dispers 715w на уровне 1,0–0,5 г/дм³ приводит к увеличению доли мелких фракций. Лучшие показатели диспергирования отмечаются при содержании ЛСс 0,5 г/дм³, при этом среднестатистический диаметр уменьшается в 3,1 раза (с 8,4 до 2,6 мкм).
- При содержании синтезированного ЛСс на уровне 1,0 г/дм³ в составе водно-акрилового лакокрасочного покрытия степень защиты стали в сернокислых растворах составила не менее 62 %.

12. Fechter C., Brelid H., Fischer S. Possibilities for optimization of industrial alkaline steeping of wood-based cellulose fibers // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25 (24). – 5834. DOI: doi.org/10.3390/molecules25245834
13. Komisarz K., Majka T.M., Pieliowski K. Chemical transformation of lignosulfonates to lignosulfonamides with improved thermal characteristics // *Fibers*. – 2022. – Vol. 10 (2). – 20. DOI: doi.org/10.3390/fib10020020
14. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков / Б.Д. Богомолов, С.А. Сапоницкий, О.М. Соколов и др. – М.: Лесная промышленность, 1989 – 360 с.
15. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алматы: Наука, 1981. – 116 с.
16. Zaverl M., Misra M., Mohanty A. Use of the Taguchi method for optimization of poly (butylene terephthalate) and poly (Trimethylene Terephthalate) blends through injection molding // *Int. Polym. Process*. – 2013. – Vol. 28. – P. 454–462. DOI: doi.org/10.3139/217.2714
17. Optimization of blending parameters and fiber size of kenaf-bast fiber-reinforced the thermoplastic polyurethane composites by Taguchi method / Y.A. El-Shekeil, M.S. Sapuan, M.D. Azaman, M. Jawaid // *Adv. Mater. Sci. Eng*. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 686452. – P. 1–5. DOI: doi.org/10.1155/2013/686452
18. Оптимизация процессов водоподготовки оборотной воды завода по вторичной переработке пластмасс / А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, И.В. Голодова, З.Н. Шаймерденова, Д.Ю. Козик, А.К. Дюсикеева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. С. 187–195. DOI: doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3368
19. Exploration of the adsorption reduction of the pigment aggregates strength under the effect of surfactants in water-dispersion paints / A.N. Dyuryagina, A.A. Lutsenko, K.A. Ostrovnoy, V.Yu. Tyukanko, M.D. Akanova, A.V. Demyanenko // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (5). – 996. DOI: doi.org/10.3390/polym14050996
20. Исследование зависимости геометрических размеров частиц от увеличения компьютерно-микроскопических комплексов / Т.Е. Есауленко, А.К. Дюсикеева, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной // *Молодежь и наука – 2018: V Международная студенческая научно-практическая конференция*. – Петропавловск, СКУ им. М.Козыбаева, 2018. – С. 840–845.
21. Optimization of titanium dioxide wetting in alkyd paint and varnish materials in the presence of surfactants / K.A. Ostrovnoy, A.N. Dyuryagina, A.V. Demyanenko, V.Yu. Tyukanko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 4 (6 (112)). – P. 41–50. DOI: doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237879
22. Полищук С.А., Попов Е.В., Горелик М.В. Влияние состава и степени сульфирования лигносульфоната натрия на его коллоидно-химические свойства // *Журнал прикладной химии*. – 1983. – Т. 38. – Вып. 10. – С. 2285–2289.
23. Merkus H.G. Particulate products // *Tailoring Properties for Optimal Performance*. – 2014. – Vol. 19. – P. 343–370. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00714-4_12.

Информация об авторах

Дарья Юрьевна Островная, магистрант кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; darya_ostrovnoy@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2843-472X

Антонина Николаевна Дюрягина, кандидат химических наук, профессор кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; adyuryagina@inbox.ru, adyuryagina@ku.edu.kz; https://orcid.org/0000-0002-9109-8159

Кирилл Александрович Островной, старший преподаватель кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; kostrovnoy@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3309-0965

Аида Александровна Луценко, доктор PhD, доцент кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; l-a.13@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8047-5916

Поступила в редакцию: 01.05.2024

Поступила после рецензирования: 08.07.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Apokina L.Yu., Lezhneva M.Yu. The study of rational technology for obtaining biologically active substances from waste from the woodworking industry (birch bark). *Materials of the MNPK Actual Problems of Natural Sciences*. Petropavlovsk, SKU M. Kozybaev Publ., 2021. pp. 52–55. (In Russ.)
2. Stepanov V.I., Mezina N.A. Waste from the forest industry and their use in the national economy. *Bulletin of the Plekhanov RUE*, 2012. no. 3, pp. 83–88. (In Russ.)
3. Nikitin V.M., Sobolevskaya A.V., Shchegolev V.P. *Chemistry of wood and cellulose*. Moscow, Forest industry Publ., 1987. 367 p. (In Russ.)
4. Afanasyev N.I., Teltevskaia S.E., Pazukhina G.A. Surface activity of lignosulfonates isolated at successive stages of delignification. *Lesnoy zhurnal*, 1996, no. 1–2, pp. 136–141. (In Russ.)
5. Chelysheva T.V. The use of lignosulfonates for strengthening and dedusting logging roads. *Forest Magazine*, 2001, no. 5–6, pp. 64–70. (In Russ.)

6. Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.Kh., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantiev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.H., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials, structure, properties, application prospects. *Bulletin of HEI. Chemistry and chemical technology*, 2021, vol. 64, Iss. 9, pp. 5–122. (In Russ.) DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465
7. Lugovitskaya T.N., Danilin L.M., Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V. Behavior of surface-active substances in a nitric acid medium and prospects for using them in hydrometallurgy. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2023, vol. 97, pp. 2822–2828. DOI: 10.1134/S003602442312021X
8. Lugovitskaya T.N., Naboychenko S.S. Lignosulfonates as charge carriers and precursors for the synthesis of nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 602, 125127. DOI: doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125127
9. Yakovlev A.D. *Chemistry and technology of paint coatings*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2017. 448 p. (In Russ.)
10. Kuis O.V., Prokopchuk N.R. Anticorrosive protection of metals: prospects for the production and application of alkyd-urethane materials (review). *Proceedings of BSTU*, 2016, no. 4, pp. 25–34. (In Russ.)
11. Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B. Associative behavior of lignosulphonates in moderately concentrated water, water–salt, and water–alcoholic media. *Biomacromolecules*, 2021, vol. 22 (8), pp. 3323–3331. DOI: doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00441
12. Fechter C., Brelid H., Fischer S. Possibilities for optimization of industrial alkaline steeping of wood-based cellulose fibers. *Molecules*, 2020, vol. 25 (24), 5834. DOI: doi.org/10.3390/molecules25245834
13. Komisarz K., Majka T.M., Pielichowski K. Chemical transformation of lignosulfonates to lignosulfonamides with improved thermal characteristics. *Fibers*, 2022, vol. 10 (2), 20. DOI: doi.org/10.3390/fib10020020
14. Bogomolov B.D., Sapotnitsky S.A., Sokolov O.M. *Processing of sulfate and sulfite liquors*. Moscow, Forest industry Publ., 1989. 360 p. (In Russ.)
15. Malyshev V.P. *Probabilistic deterministic experiment planning*. Almaty, Nauka Publ., 1981. 116 p. (In Russ.)
16. Zaverl M., Misra M., Mohanty A. Use of the Taguchi method for optimization of poly (butylene terephthalate) and poly (trimethylene terephthalate) blends through injection molding. *Int. Polym. Process*, 2013, vol. 28, pp. 454–462. DOI: doi.org/10.3139/217.2714
17. El-Shekeil Y.A., Sapuan M.S., Azaman M.D., Jawaid M. Optimization of blending parameters and fiber size of kenaf-bast fiber-reinforced the thermoplastic polyurethane composites by Taguchi method. *Adv. Mater. Sci. Eng*, 2013, vol. 2013, pp. 1–5. DOI: doi.org/10.1155/2013/686452
18. Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Golodova I.V., Shaimerdenova Z.N., Kozik D.Yu., Dyusikeeva A.K. Optimization of water treatment processes of recycled water of a plastics recycling plant. *Bulletin of the TPU. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 187–195. (In Russ.) DOI: doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3368
19. Dyuryagina A.N., Lutsenko A.A., Ostrovnoy K.A., Tyukanko V.Yu., Akanova M.D., Demyanenko A.V. Exploration of the adsorption reduction of the pigment aggregates strength under the effect of surfactants in water-dispersion paints. *Polymers*, 2022, vol. 14 (5), pp. 996. DOI: doi.org/10.3390/polym14050996
20. Esaulenko T.E., Dyusikeeva A.K., Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A. Investigation of the dependence of geometric particle sizes on the magnification of computer microscopic complexes. *V international student scientific and practical conference. Youth and Science – 2018*. Petropavlovsk, M. Kozybaev SKU Publ., 2018. pp. 840–845.
21. Ostrovnoy K.A., Dyuryagina A.N., Demyanenko A.V., Tyukanko V.Yu. Optimization of titanium dioxide wetting in alkyd paint and varnish materials in the presence of surfactants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, vol. 4 (6 (112)), pp. 41–50. DOI: doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237879
22. Polishchuk S.A., Popov E.V., Gorelik M.V. Influence of the composition and degree of sulfation of sodium lignosulfonate on its colloidal chemical properties. *Journal of Applied Chemistry*, 1983, vol. 38, Iss. 10, pp. 2285–2289. (In Russ.)
23. Merkus H.G. Particulate products. *Tailoring Properties for Optimal Performance*, 2014, vol. 19, pp. 343–370. DOI: doi.org/10.1007/978-3-319-00714-4_12.

Information about the authors

Darya Yu. Ostrovnoy, Master Student, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; darya_ostrovnoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2843-472X>
Antonina N. Dyuryagina, Cand. Sc., Professor, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; adyuryagina@inbox.ru, adyuryagina@ku.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-9109-8159>

Kirill A. Ostrovnoy, Senior Lecturer, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; kostrovnoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3309-0965>

Aida A. Lutsenko, PhD, Associate Professor, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; l-a.13@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8047-5916>

Received: 01.05.2024

Revised: 08.07.2024

Accepted: 31.01.2025