



ISSN 1029-5151  
ISSN 1029-5143 (online)

A close-up photograph of several clusters of bright red berries, likely raspberries, heavily coated in a layer of white frost or snow. The background is blurred, showing more of the same scene. The overall tone is cool and wintry.

# ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

4 • 2021

УДК 676.2

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА ДО И ПОСЛЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СУЛЬФАТНОГО МЫЛА В ПРИСУТСТВИИ ДОБАВОК ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

© *О.С. Якубова\**, *Е.Ю. Демьянцева*, *Р.А. Смит*

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095 (Россия),  
E-mail: ilonichka3377@mail.ru*

При делигнификации древесины образуется черный щелок – отработанный раствор многокомпонентного состава, обогащенный ценными экстрактивными веществами, количество которых варьируется в зависимости от вида древесины. Извлечение этих веществ из производственных растворов и переработка их в биологически активные вещества, таловые продукты соответствует тенденции развития целлюлозно-бумажных предприятий – внедрению технологий, основанных на научных разработках с возможностью их технического применения, с сочетанием современных требований охраны окружающей среды. На современных предприятиях эффективность извлечения сульфатного мыла не превышает 75–80%, при этом получают продукт невысокого качества с большим количеством посторонних примесей, особенно при выделении из отработанных щелоков после варки листовых пород древесины. Это усложняет процесс переработки мыла, в том числе в ценные биологически активные вещества (бета-ситостерин и др.).

В работе для интенсификации выделения листового сульфатного мыла предлагается введение деэмульгирующих и коагулирующих добавок в черный щелок. Исследованы коллоидно-химические характеристики полученного листового сульфатного мыла. На изотермах поверхностного натяжения обнаружены две критические концентрации мицеллообразования (ККМ). Появление ККМ<sub>2</sub> (в области концентраций 0.9–1.0%) свидетельствует о перестроении мицелл в сфероцилиндрическую форму. Проведен сравнительный качественный и количественный анализ состава производственного сульфатного мыла и полученного в лаборатории в присутствии выбранных добавок. Введенные вещества способствуют извлечению фитостерина из черного щелока листовых пород древесины. Рассмотрено влияние добавок ПАВ на основные физико- и коллоидно-химические характеристики черного щелока до и после отделения сульфатного мыла. В результате введения добавок ПАВ наблюдается снижение вязкости и уменьшение пенообразования раствора черного щелока.

*Ключевые слова:* черный щелок, сульфатное мыло, биологически активные вещества, фитостерин, поверхностно-активные вещества.

### Введение

Полученный в процессе сульфатной делигнификации древесины черный щелок содержит ценные экстрактивные вещества. В процессе регенерации отработанного черного щелока из него выделяют лигнин, сульфатный скипидар, метиловый спирт, сульфатное мыло (СМ). В результате присутствия в щелоке компонентов сульфатного мыла, в связи с их высокой способностью к пенообразованию, ухудшается процесс обезвоживания щелоков, снижается эффективность упаривания, выводится из строя оборудование за счет загрязнения выпарных конденсатов компонентами черного щелока, пригорающих к стенкам выпарных аппаратов. Эффек-

*Якубова Ольга Сергеевна* – аспирант кафедры физической и коллоидной химии. e-mail: ilonichka3377@mail.ru

*Демьянцева Елена Юрьевна* – доцент кафедры физической и коллоидной химии, кандидат химических наук. e-mail: demyantseva@mail.ru

*Смит Регина Анатольевна* – старший преподаватель кафедры общей и неорганической химии. e-mail: zz1234567@yandex.ru

тивность выделения сульфатного мыла из черных щелоков, полученных периодической варкой, зависит от вида древесины (из хвойных щелоков до 200 кг на 1 т целлюлозы, а из листовых щелоков до 75 кг) и его состава [1]. Сульфатное мыло листовых пород древесины с боль-

\*Автор, ч которым следует вести переписку.

шим количеством неомыляемых веществ, но с пониженным содержанием фитостерина, неперспективно для переработки как в плане масштабного производства БАВ, так и получения из него жирных кислот, в отличие от хвойного сульфатного мыла [2]. Сложность удаления сульфатного мыла из отработанного раствора связана с тем, что находящиеся в черном щелоке органические вещества представляют собой трудноразделяемый адсорбционный «лигниноуглеводный комплекс со смолистыми веществами» [3], полнота и скорость извлечения которого определяется течением процессов высаливания, гетерокоагуляции. В соответствии с современными тенденциями развития рынка для повышения эффективности получения качественных вторичных продуктов с минимальным количеством присутствующих в них примесей необходимо совершенствовать существующие технологии [4, 5]. В работах [6–16] были предложены способы извлечения и переработки вторичных продуктов (СМ) при введении различных веществ. В работах были исследованы физико-химические свойства, однако анализ коллоидно-химических свойств органических веществ в присутствии добавок, а также влияние их на физико-химические свойства черного щелока не проводились. Цель данной работы – исследование влияния катионного поверхностно-активного вещества (КПАВ) и неионогенного поверхностно-активного вещества (НПАВ) на агрегативную устойчивость органических веществ лиственной древесины в черном щелоке, компонентный состав извлекаемого сульфатного мыла, пенообразующую способность отработанного раствора.

### *Экспериментальная часть*

В качестве объектов исследования были выбраны: поверхностно-активные вещества катионного (катамин АБ) и неионогенного (неонол АФ 9-6) типов отечественного производства; черный щелок после периодической сульфатной варки лиственных пород древесины, преимущественно березы, параметры варки: конечная температура варки 178 °С, время стоянки 1 ч, полученная целлюлоза 23 ед. Каппа, расход активной щелочи в Na<sub>2</sub>O от абс. сух. древесины 18%; сульфатное мыло, извлеченное из данного черного щелока в производственных условиях в соответствии с применяемой технологией, а также выделенное в условиях лаборатории из черного щелока отстаиванием при введении добавок ПАВ, тем самым моделируя процесс извлечения сульфатного мыла. Время отстаивания – 4 ч при температуре отработанного щелока 25–30 °С.

Исследования коллоидно-химических характеристик растворов проводили тензиометрическим методом отрыва кольца дю Нуи. Диаметр платинового кольца составил 22 мм. На всех полученных изотермах поверхностного натяжения выбранных ПАВ отсутствует минимум, характерный для примесей, поэтому все объекты исследования дополнительной очистке не подвергали. Погрешность измерения поверхностного натяжения составила 5%.

Содержание в сульфатном мыле неомыляемых веществ определяли по ГОСТ 50482-93, в том числе β-систостерина, сумму омыляемых кислот по ГОСТ Р 50378-92, минеральных веществ согласно методике [17]. Определение вязкости и плотности черного щелока проводили согласно ГОСТ 9070-75 и ГОСТ 18995.1-73. Общая щелочность производственного раствора была определена согласно методике [18]. Доли сухих веществ, неорганической и органической частей, массовые доли лигнина, нейтральных веществ в черном щелоке оценивали согласно методикам, описанным [18]. Пенообразование, устойчивость и кратность пены определяли по ГОСТ 6948-70. Степень достоверности результатов работы обеспечена трехкратным проведением экспериментов и их воспроизводимостью.

### *Результаты и их обсуждения*

В черный щелок после варки лиственной древесины (березы) плотностью 1.095 г/см<sup>3</sup> были введены в разной последовательности добавки КПАВ (катамин АБ) и НПАВ (неонол АФ 9-6), при соотношении веществ 10 : 90, концентрация ПАВ в черном щелоке составила 0.1%. Для установления равновесия растворы выдерживали в течение 4 ч при температуре 25–30 °С, тем самым моделируя процесс отстаивания при выделении сульфатного мыла из черных щелоков. После извлечения сульфатное мыло было обезвожено до влажности 50%. Результаты проведенного качественного и количественного анализа состава полученного лиственного сульфатного мыла и исследования его коллоидно-химических характеристик представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

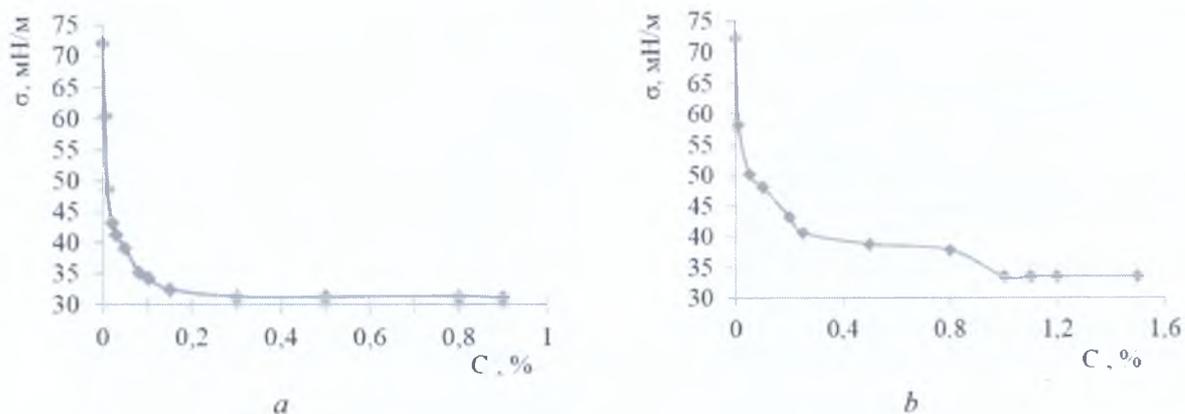


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения ( $\sigma$ , мН/м) от концентрации ( $C$ , %): *a* – сульфатное мыло, полученное на производстве, *b* – сульфатное мыло, полученное в лаборатории

Таблица 1. Основные качественные и количественные характеристики сульфатного мыла

Сульфатное мыло лиственных пород древесины	Неомыляемые вещества, % от а.с. мыла	Минеральные вещества, % от а.с. мыла	Смоляные+ жирные, % от а.с. мыла	Фитостерин, % от а.с. мыла
Производственное	27.0%±0.4%	38.0%±0.1%	35.0%±0.5%	8.7%
Лабораторное	24.0%±0.4%	36.0%±0.1%	40.0%±0.5%	10.5%

Как видно из рисунка 1, в растворе лиственного мыла, полученного на производстве, мицеллообразование начинается в области значений 0,15 %, поверхностное натяжение снижается до 30 мН/м (рис. 1а). Однако характер изотермы поверхностного натяжения раствора сульфатного мыла, извлеченного в лабораторных условиях в присутствии выбранных добавок, отличается. На изотерме можно выделить две области мицеллообразования. С ростом концентрации поверхностное натяжение сначала снижается до 37 мН/м, после достижения значения ККМ<sub>1</sub> – 0,25 % начинают образовываться агрегаты и раствор становится гетерогенным. Смещение ККМ в область больших концентраций, вероятно, происходит за счет солюбилизации полярных веществ, входящих в состав нейтральных веществ сульфатного мыла. В области концентраций 0,9–1,0% происходит снижение поверхностного натяжения до 32 мН/м с появлением ККМ<sub>2</sub>, которая свидетельствует о возможном перестроении мицелл из сферической формы в цилиндрическую за счет более плотной упаковки молекул (рис. 1b). В результате образованные сфероцилиндрические мицеллы обладают большей солюбилизирующей емкостью [19], что должно повлиять на состав полученного сульфатного мыла. В связи с этим был проведен сравнительный анализ состава сульфатных мыл, полученных на производстве и в лабораторных условиях (табл. 1). Содержание в производственном и лабораторном сульфатных мылах неомыляемых, омыляемых и минеральных веществ коррелируют с составом мыла из древесины европейской части России [17]. Однако выбранные добавки способствуют повышенному извлечению фитостерина из черного щелока [17], что делает данное лиственное мыло перспективным для получения широкой гаммы БАВ и их смесей из неомыляемых веществ.

Необходимо было рассмотреть влияние добавок ПАВ на основные физико- и коллоидно-химические характеристики раствора черного щелока до и после отделения сульфатного мыла, влияющие на параметры процессов выпарки [19–27]. Данные представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

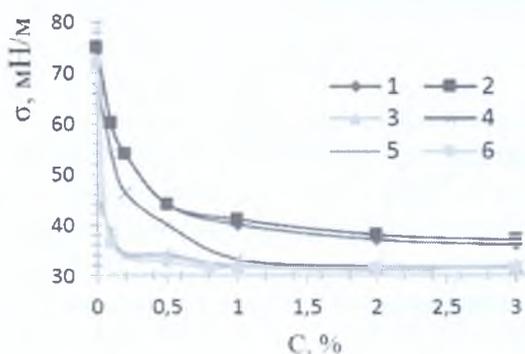


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения ( $\sigma$ , мН/м) от концентрации ( $C$ , %) черного щелока лиственных пород древесины: 1 – до съема мыла, 2 – после съема мыла, 3 – с катамином АБ и неололом АФ9-6, 4 – скатамином АБ, 5 –неололом АФ 9-6, 6 – с неололом АФ 9-6 и катамином АБ

Таблица 2. Физико-химические характеристики сульфатного щелока лиственных пород древесины

Физико-химические характеристики	Черный щелок	Черный щелок с катамином АБ (КПАВ)	Черный щелок с неонолом АФ9-6 (НПАВ)	Черный щелок с КПАВ и НПАВ	Черный щелок с НПАВ и КПАВ
	до съема мыла Черный щелок после съема мыла				
Относительная вязкость	<u>1.033</u>	0.988	1.029	1.026	1.025
	1.030				
Плотность, г/см <sup>3</sup>	<u>1.115</u>	1.094	1.095	1.094	1.095
	1.098				
Депрессия ПН, мН/м	<u>31.0</u>	35.0	30.0	36.5	37.7
	30.0				
Ккм. %	<u>2.50</u>	1.20	0.90	0.83	0.79
	2.40				
Общая щелочность, г/л в ед. паош	<u>4.88</u>	4.56	4.52	4.48	4.56
	4.70				
Доля сухих веществ, %	<u>20.41</u>	18.59	18.76	18.46	18.42
	19.50				
Доля неорганической части сухих веществ, %	<u>1.17</u>	2.30	2.68	1.46	1.24
	1.16				
Доля органической части сухих веществ, %	<u>19.23</u>	16.29	15.78	17.00	17.18
	18.34				
Массовая доля лигнина к щелоку, %	<u>6.4</u>	5.8	5.9	5.6	5.7
	6.2				
Массовая доля нейтральных веществ в щелоке, %	<u>0.190</u>	0.025	0.018	0.016	0.017
	0.180				
Массовая доля омыляемых кислот, %	<u>0.2600</u>	0.0030	0.0035	0.0022	0.0025
	0.2500				
Кратность пены	<u>0.30</u>	0.15	0.10	0	0
	0.29				
Устойчивость, %	<u>30</u>	12	9	0	0
	29				
Пенообразование, %	<u>20</u>	20	20	21	20
	19				

Как следует из рисунка 2, при введении амфифильных веществ в раствор черного щелока наблюдается заметное снижение поверхностного натяжения и ККМ. Изменения физико-химических показателей и состава черного щелока в результате введения поверхностно-активных веществ представлены в таблице 2. Как следует из таблицы, в черном щелоке после извлечения сульфатного мыла снижается количество растворенных веществ, происходит понижение плотности растворов, а также наблюдается изменение количеств нейтральных веществ, натриевых солей омыляемых кислот в фильтрате вследствие перехода данных компонентов в состав сульфатного мыла. Последовательное введение добавок ПАВ усиливает данные изменения. Адсорбция ПАВ на макромолекулах лигнина и образование гидрофильного «комплекса ПАВ – лигнин» приводит к понижению вязкости раствора черного щелока. Кроме того, выбранные ПАВ, не способные стабилизировать пену, но с высокой способностью к адсорбции, разрушают адсорбционный слой на поверхности пленки пены, образованной поверхностно-активными компонентами черного щелока, и тем самым понижают пенообразование отработанных щелоков. Все наблюдаемые изменения физико-химических свойств черного щелока позволяют снизить нагрузку на оборудование при перекачивании щелока для дальнейшей переработки и регенерации химикатов и уменьшить количество отложений на выпарных установках.

### Заключение

Исследовано влияние ПАВ катионного и неионогенного типов на растворы черных щелоков после варки лиственных пород древесины до и после съема сульфатного мыла. Обнаружено, что при последовательном введении добавок улучшается качество листового сульфатного мыла с перспективой извлечения из него БАВ – бета-ситостерина. Кроме того, введенные добавки приводят к изменению физико-химических свойств (относительной вязкости, плотности, мицеллообразования черного щелока и др.), способствующие снижению энергозатрат процесса подачи щелоков на дальнейшую переработку производственных растворов.

## Список литературы

1. Богомолов Б.Д., Сапотноцкий С.А., Соколов О.М. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков. М., 1989. 360 с.
2. Неленин Ю.Н. Производство сульфатной целлюлозы: учебное пособие для вузов. М., 1990. 601 с.
3. Лысогорская Н.П., Демьянцева Е.Ю., Клубин В.В. О гетерогенности водно-щелочных растворов сульфатного лигнина и смолы древесины // Коллоидный журнал. 2002. Т. 64. №3. С. 427–429. DOI: 10.1023/A:1015989330575.
4. Wang Z., Shen T., Yang Y., Gao B., Wan Y., Li Y.C., Yao Y., Liu L., Tang Y., Xiea J., Ding F., Chen J. Fulvic acid-like substance and its characteristics, an innovative waste recycling material from pulp black liquor // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 243. 118585. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118585.
5. Aryan V., Kraft A. The crude tall oil value chain: Global availability and the influence of regional energy policies // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 280. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124616.
6. Владимирова Т.М., Соколов О.М., Третьяков С.И. Повышение выхода экстрактивных веществ дерева в процессе щелочной делигнификации // Физикохимия лигнина: материалы Международной конференции. Архангельск, 2005. С. 157–160.
7. Фейгус Э.И., Змачинская Н.Е. Выделение и сбор сульфатного мыла // Целлюлоза. Бумага. Картон (обзор информации). М., 1990. №9. 48 с.
8. Филиппов Б.С. О выделении сульфатного мыла из черных щелоков // Известия вузов. Лесной журнал. 1964. №1. С. 154–158.
9. Цветков А.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б. Извлечение сульфатного мыла, как способ увеличения эффективности работы предприятия ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2014. №7. С. 58–61.
10. Царев Г.И., Некрасова В.Б. Побочные продукты производства сульфатной целлюлозы и их использование при получении древесных плит // Лесохимия и подсоска (обзор. информ.) М., 1985. №3. 40 с.
11. Личутина Т.Ф., Сажинов А.А. Совершенствование технологии выделения сульфатного мыла с применением ПАВ // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1985. №4. С. 20.
12. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины. Архангельск, 2002. 347 с.
13. Kovasin K., Tikka P., Laxén T. Solving Soap and Turpentine Related Process Problems in Softwood Kraft Mills // Pulp and Paper. 2002. Vol. 103, issue 6. Pp. 30–35.
14. Rouskova M., Heyberger A., Triska J., Krticka M. Extraction of phytosterols from tall oil soap using selected organic solvents // Chemical papers. 2011. Vol. 65, no. 6. Pp. 805–811. DOI: 10.2478/s11696-011-0077-3.
15. Ela R.C.A., Spahn L., Safaie N. Understanding the effect of precipitation process variables on hardwood lignin characteristics and recovery from black liquor // ACS Sustainable Chem. Eng. 2020. Vol. 8 Pp. 13997–14005. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c03692.
16. Aro T., Fatehi P. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities // Separation and Purification Technology. 2016. Vol. 175. Pp. 469–480. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.10.027.
17. Акимова Г.С., Курзин А.В., Павлова О.С., Евдокимов А.Н. Химия и технология компонентов сульфатного мыла. СПб., 2008. 104 с.
18. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. СПб., 2003. 633 с.
19. Русанов А.И., Щёкин А.К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ: моногр. СПб., 2016. 612 с.
20. Lara M., Rodriguez-Malaver J., Rojas O.J. Black liquor lignin biodegradation by trameteselegans // International Biodeterioration & Biodegradation. 2003. Vol. 52. Pp. 167–173. DOI: 10.1016/S0964-8305(03)00055-6.
21. Nassar M.M., Hassan K.M., Farrag T.E., Abd Elrahman S.A. Physical properties viscosity control for strong bagasse black liquor by salt addition // International Water Technology Journal. 2016. Vol. 6, no. 3. Pp. 214–220.
22. Дёмин В.А. Химия и технология сульфатных щелоков. Сыктывкар, 2013. 127 с.
23. Andreuccetti M.T., Leite B.S., d'Angelo J.V.H. Eucalyptus black liquor-density, viscosity, solids and sodium sulfate contents revisited // O Papel. 2011. Vol. 72, no. 12. Pp. 52–57.
24. Sokolov O.M., Tret'yakov S.I. Increasing the Yield of Wood Extractives in Alkaline Delignification // Proceedings of the International Conference "Physical Chemistry of Lignin". Arkhangelsk, 2005. Pp. 157–160.
25. Cardoso M., Oliveria E.D., Passos M.L. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills // Fuel. 2009. Vol. 88, no. 4. Pp. 756–763.
26. Adams T. Sodium Salt Scaling in Black Liquor Evaporators and Concentrators // Tappi Journal. 2001. Vol. 84, no. 6. Pp. 1–18.
27. Polaa L., Colladoa S., Oulegoa P., Calvob P., Díaza M. Characterisation of the wet oxidation of black liquor for its integration in Kraft paper mills // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 405. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126610.

Поступила в редакцию 13 мая 2021 г.

После переработки 13 августа 2021 г.

Принята к публикации 19 августа 2021 г.

Для цитирования: Якубова О.С., Демьянцева Е.Ю., Смит Р.А. Физико-химические характеристики черного щелока до и после извлечения сульфатного мыла в присутствии поверхностно-активных веществ // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 337–343. DOI: 10.14258/jcrpm.2021049521.

*Yakubova O.S.\**, *Demyantseva E.Yu.*, *Smith R.A.* PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SULPHATE WASTE LIQUOR BEFORE AND AFTER SOAP EXTRACTION IN THE PRESENCE OF SURFACTANTS

*St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design the Higher School of Technologies and Power Engineering, st. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095 (Russia), e-mail: ilonichka3377@mail.ru*

During the wood delignification a multicomponent spent liquor (black liquor) is formed. Depending on the type of wood, black liquor is enriched with valuable extractives. The isolation of extractives from processing liquors and their conversion into biologically active substances, tall products is according to development trend of pulp and paper industry. It includes the introduction of scientific based technologies in manufacturing processes with reference to modern environmental protection requirements. Now the extraction efficiency of sulphate soap does not exceed 75–80% whereby the quality of obtained soap is low. Sulphate soap, especially extracted after hardwood cooking, contains a large amount of impurities. This complicates the process of soap treatment into valuable biologically active substances (beta-sitosterol, etc.).

In the present work the addition of demulsifying and coagulating substances into the black liquor is proposed to intensify the hardwood sulphate soap extraction. The chemical colloidal characteristics of the obtained sulphate soap were investigated. Two critical micelle concentration (CMC) were found on the surface tension isotherms. The second critical micelle concentration (CMC<sub>2</sub>) in the concentration range of 0.9–1.0% CMC<sub>2</sub> indicates the restructuring of micelles into a spherocylindrical shape. A comparative qualitative and quantitative analysis of the composition of sulfate soap obtained in industrial conditions and in the presence of selected additives in laboratory was carried out. Surfactants promote the extraction of phytosterol from black liquor obtained from hardwood species cooking. The influence of surfactant addition on the main physical and colloidal chemical characteristics of black liquor before and after isolation of sulphate soap is investigated. A decrease in viscosity and a de foaming of a black liquor solution is observed as a result of the addition of surfactant additives.

*Keywords:* black liquor, sulphate soap, biologically active substances, phytosterol, surfactants.

### References

1. Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M. *Pererabotka sul'fatnogo i sul'fitnogo shchelokov*. [Processing of sulphate and sulphite liquors]. Moscow, 1989, 360 p. (in Russ.).
2. Nepenin YU.N. *Proizvodstvo sul'fatnoy tsellyulozy*. [Sulphate pulp production]. Moscow, 1990, 601 p. (in Russ.).
3. Lysogorskaya N.P., Dem'yantseva Ye.YU., Klyubin V.V. *Kolloidnyy zhurnal*, 2002, vol. 64, no. 3, pp. 427–429. DOI: 10.1023/A:1015989330575. (in Russ.).
4. Wang Z., Shen T., Yang Y., Gao B., Wan Y., Li Y.C., Yao Y., Liu L., Tang Y., Xie J., Ding F., Chen J. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 243, 118585. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118585.
5. Aryan V., Kraft A. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 280, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124616.
6. Vladimirova T.M., Sokolov O.M., Tret'yakov S.I. *Fizikokhimiya lignina: materialy mezhdunarodnoy konferentsii*. [Physicochemistry of lignin: materials of the international conference]. Arkhangel'sk, 2005, pp. 157–160. (in Russ.).
7. Feygus E.I., Zmachinskaya N.Ye. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton (obzor informatsii)*. [Cellulose. Paper. Cardboard (information overview)]. Moscow, 1990, no. 9, 48 p. (in Russ.).
8. Filippov B.S. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*, 1964, no. 1, pp. 154–158. (in Russ.).
9. Tsvetkov A.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2014, no. 7, pp. 58–61. (in Russ.).
10. Tsarev G.I., Nekrasova V.B. *Lesokhimiya i podsochka (obzor informatsii)* [Timber chemistry and tapping (information review)]. Moscow, 1985, no. 3, 40 p. (in Russ.).
11. Lichutina T.F., Sazhinov A.A. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost*. 1985, no. 4, pp. 20. (in Russ.).
12. Koverninskiy I.N., Komarov V.I., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny*. [Complex chemical processing of wood]. Arkhangel'sk. 2002. 347 p. (in Russ.).
13. Kovasin K., Tikka P., Laxén T. *Pulp and Paper*, 2002, vol. 103, issue 6, pp. 30–35.
14. Rouskova M., Heyberger A., Triska J., Krticka M. *Chemical papers*, 2011, vol. 65, no. 6, pp. 805–811. DOI: 10.2478/s11696-011-0077-3.
15. Ela R.C.A., Spahn L., Safaie N. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2020, vol. 8, pp. 13997–14005. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c03692.
16. Aro T., Fatehi P. *Separation and Purification Technology*, 2016, vol. 175, pp. 469–480. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.10.027.
17. Akimova G.S., Kurzin A.V., Pavlova O.S., Yevdokimov A.N. *Khimiya i tekhnologiya komponentov sul'fatnogo myla*. [Chemistry and technology of sulfate soap components]. St. Petersburg., 2008, 104 p. (in Russ.).
18. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 t. T. 1. Syr'ye i proizvodstvo polufabrikatov*. [Technology of pulp and paper production. In 3 vol. Vol. I. Raw materials and production of semi-finished products]. St. Petersburg, 2003, 633 p. (in Russ.).
19. Rusanov A.I., Shchokin A.K. *Mitselloobrazovaniye v rastvorakh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv*. [Micelle formation in surfactant solutions]. St. Petersburg, 2016, 612 p. (in Russ.).
20. Lara M., Rodriguez-Malaver J., Rojas O.J. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, vol. 52, pp. 167–173. DOI: 10.1016/S0964-8305(03)00055-6.
21. Nassar M.M., Hassan K.M., Farrag T.E., Abd Elrahman S.A. *International Water Technology Journal*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 214–220.
22. Demin V.A. *Khimiya i tekhnologiya sul'fatnykh shchelokov*. [Chemistry and technology of sulfate liquors]. Syktyvkar, 2013, 127 p. (in Russ.).

\* Corresponding author.

23. Andreuccetti M.T., Leite B.S., d'Angelo J.V.H. *O Papel*, 2011, vol. 72, no. 12, pp. 52–57.
24. Sokolov O.M., Tret'yakov S.I. *Proceedings of the International Conference "Physical Chemistry of Lignin"*, Arkhangel'sk, 2005, pp. 157–160.
25. Cardoso M., Oliveria E.D., Passos M.L. *Fuel*, 2009, vol. 88, no. 4, pp. 756–763.
26. Adams T. *Tappi Journal*, 2001, vol. 84, no. 6, pp. 1–18.
27. Polaa L., Colladoa S., Oulegoa P., Calvob P., Díaza M. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 405, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126610.

*Received May 13, 2021*

*Revised August 13, 2021*

*Accepted August 19, 2021*

**For citing:** Yakubova O.S., Demyantseva E.Yu., Smith R.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 337–343. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021049521.