

УДК 676.164.3.023.1:546.13

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

## МИНИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРА В БЕЛЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЕ ДЛЯ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

*Е.Д. Софронова, аспирант; ResearcherID: [Q-6626-2017](https://orcid.org/0000-0003-1293-6597),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-6597>*

*В.А. Липин, д-р техн. наук, зав. каф.; ResearcherID: [ABH-8385-2020](https://orcid.org/0000-0002-8805-8113),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-8113>*

*В.К. Дубовый, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [W-1235-2017](https://orcid.org/0000-0002-2903-3872),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>*

*Т.А. Суставова, ассистент; ResearcherID: [ABI-1089-2020](https://orcid.org/0000-0003-2059-2675),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2059-2675>*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

e-mail: alekc.ru94@mail.ru, vadim.lipin@km.ru, dubovy2004@mail.ru, sustebrother@mail.ru

**Аннотация.** Рост объемов химической переработки целлюлозы для производства санитарно-гигиенических и медицинских изделий, упаковки, а также наполнителей для пищевых продуктов обуславливает появление новых требований к качеству сырья. Особенно остро задача улучшения характеристик целлюлозы встала в связи с эпидемией COVID-19: спрос на одноразовые нетканые материалы, непосредственно контактирующие с кожным покровом человека, увеличился в разы. Технология отбеливания сульфатной целлюлозы ЕСF, использующая диоксид хлора как отбеливающий реагент, доминирует в процессе производства беленой целлюлозы во всем мире. Образующиеся в результате отбеливания хлорсодержащие соединения загрязняют не только сточные воды, но и сам продукт. В ближайшее время следует ожидать, что целлюлозу, изготовленную с использованием отбеливателей на основе соединений хлора, могут запретить в производстве санитарно-гигиенических изделий и упаковки для пищевых продуктов. Если продукция предприятий целлюлозно-бумажной промышленности не будет соответствовать международным требованиям, то на рынке целлюлозы возникнет дефицит сырья для указанных видов товаров. Наиболее перспективным направлением модернизации существующих схем отбеливания как с точки зрения расходных показателей процесса, так и с точки зрения качества получаемой целлюлозы является использование на первой ступени кислородно-щелочной отбеливания. Определение содержания общего и органически связанного хлора в целлюлозных материалах в соответствии с ISO 11480:2017 на усовершенствованной установке показало, что внедрение схем отбеливания с использованием кислородно-щелочных средств позволит обеспечить рекомендуемый уровень содержания соединений хлора при сохранении необходимых характеристик целлюлозы для изготовления медицинских и санитарно-гигиенических изделий, упаковки под пищевые продукты. Однако высокое качество готовой продукции, удовлетворяющее требованиям потребителей, возможно только при условии контроля содержания хлора на всех этапах производства целлюлозы, поскольку количественные показатели концентрации данного вещества остаются близкими к верхнему допустимому пределу.

**Для цитирования:** Софронова Е.Д., Липин В.А., Дубовый В.К., Суставова Т.А. Минимизация содержания хлора в беленой сульфатной целлюлозе для санитарно-гигиенических изделий и упаковки пищевых продуктов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 186–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

*Ключевые слова:* целлюлоза, санитарно-гигиенические изделия, пищевая упаковка, отбелка, хлорорганические соединения, нетканые материалы, делигнификация.

### *Введение*

В современных условиях созданию материалов для санитарно-гигиенических и медицинских изделий на основе целлюлозы уделяется одно из первостепенных значений. Развитие и совершенствование данного направления стали особенно актуальны в связи с вирусными эпидемиями, в том числе пандемией COVID-19. К целлюлозному сырью для производства одноразовых нетканых материалов санитарно-гигиенического и медицинского назначения, упаковки пищевых продуктов и других подобных материалов предъявляется ряд специфических требований.

Целлюлоза, используемая в качестве сырья для санитарно-гигиенических и других медицинских изделий, должна характеризоваться высокой чистотой и молекулярной однородностью [1, 3]. Для получения белой целлюлозы применяют гидроксид натрия, кислород, пероксид водорода, которые размягчают структуру целлюлозной клетки, способствуя выделению оставшихся нецеллюлозных компонентов.

Существует две современные технологии отбеливания сульфатной целлюлозы: ECF и TCF. В технологической схеме ECF применяется диоксид хлора, который образует токсичные хлорорганические соединения. В ее модифицированном варианте – ECF-light – в качестве частичной альтернативы хлорсодержащим отбельным реагентам используются озон, пероксид водорода, кислород и др. Данная технология экономически и энергетически выгодна, позволяет достичь высокого качества отбеливания, сохранить требуемые характеристики волокна и не нанести значительного урона окружающей среде за счет небольшого количества хлорорганических соединений в стоках. TCF является полностью бесхлорной технологией отбеливания, исключающей использование диоксида хлора: отбеливание проводится исключительно с применением озона, кислорода, пероксида водорода и других экологически безопасных реагентов. Вред окружающей среде минимизирован за счет отсутствия выбросов хлорсодержащих соединений. Однако данный вид отбеливания достаточно энергоемкий. Чтобы обеспечить высокое качество целлюлозы на выходе, затрачивается большее количество воды, электричества и пара, что неэффективно и дорого [26].

Если в исходной целлюлозе содержатся органические соединения хлора, то в конечных санитарно-гигиенических и близких к ним по назначению изделиях будут присутствовать остаточные соединения хлора, которые в свою очередь могут растворяться в жидкостях организма, например в таких как пот, и проникать через кожу, нарушая работу эпидермиса и оказывая негативное влияние на здоровье человека. Похожие явления имеют место при использовании хлорсодержащей целлюлозы для упаковки пищевых продуктов. Предельная концентрация хлора в целлюлозе в регламентирующих документах четко не определена, тем не менее указывается, что по бесхлорной технологии отбеливания TCF она менее 30 мг Cl/кг, по технологии без применения молекулярного хлора ECF – 120...200 мг Cl/кг. Современный потребитель отдает предпочтение белой целлюлозе с низким содержанием соединений хлора [8, 22, 23].

Нормативные требования к сырью для производства санитарно-гигиенических и медицинских изделий в зависимости от страны различны. Так, в США качество беленой целлюлозы регулируется медицинской инструкцией FDA (Food and Drug Administration). Нормативные разработки FDA не имеют юридической силы и рассматриваются как руководство для контроля производства. По рекомендациям FDA беленую целлюлозу для санитарно-гигиенических изделий (СГИ) перед отправкой на рынок необходимо добровольно тестировать для предоставления клинических данных о рисках для здоровья в соответствии с [15]. Согласно FDA, требования для СГИ регламентируются кодами федеральной регистрации номер 21 (CFR 884.5425 и CFR 884.5435).

В Европейском союзе на СГИ распространяются менее строгие правила в отношении потребительских товаров. Однако EDANA (Европейская ассоциация производителей нетканых материалов) и глобальная организация IDNA (Ассоциация производителей нетканых материалов) уделяют значительное внимание требованиям к материалам для СГИ.

В самое ближайшее время следует ожидать, что бумажные изделия, изготовленные с применением отбеливателей на основе соединений хлора, могут запретить для упаковки пищевых продуктов и непосредственно в этих продуктах. Если сырье для производства данных видов товаров не будет соответствовать международным требованиям, то рынок целлюлозы, используемой для указанных целей, может столкнуться с трудностями. Все это ориентирует предприятия целлюлозно-бумажной промышленности к переходу на экологически безопасные технологии производства [5–7, 9, 10, 16–20, 21, 24, 27–29], минимизацию применения соединений хлора [25].

В России жесткие ограничительные нормативы по количеству хлора в целлюлозе отсутствуют, однако с учетом того, что значительная часть целлюлозы экспортируется, есть необходимость снижения и контроля содержания хлора. Существующие схемы отбели в основном не позволяют обеспечить требуемый уровень содержания органически связанного хлора при достижении высокого качества продукта. Чтобы целлюлоза, используемая для санитарно-гигиенических, медицинских и других изделий, контактирующих с кожей человека, а также для упаковки пищевых продуктов, соответствовала стандартам, требуется переход с действующих сейчас схем отбели на схемы ECF-light. Причем предпочтение следует отдавать вариантам модернизации с использованием ступени кислородно-щелочной отбели (КЩО) на первом этапе. Это позволяет снизить содержание лигнина и количество применяемого диоксида хлора [2, 4].

#### *Объекты и методы исследования*

Показатели работы различных схем отбели сульфатной хвойной целлюлозы с числом каппа 30...35 были получены в результате промышленных испытаний на действующем производстве. Белизну определяли по [11], жесткость (число каппа) – по [13], вязкость – по [12].

Концентрации общего (АОХ) и органически связанного (ОХ) хлора в целлюлозных материалах устанавливали в соответствии с [14] на усовершенствованной установке (рис. 1).

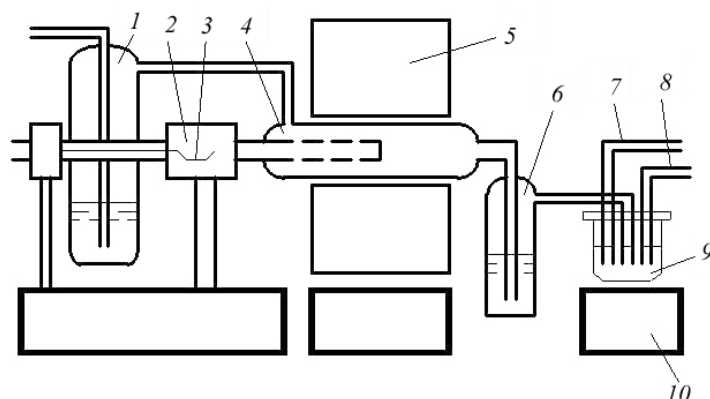


Рис. 1. Анализатор хлорорганических соединений: 1 – сосуд для отдувки (отгонки); 2 – приемник образца; 3 – образец; 4 – трубка для сжигания; 5 – печь для сжигания; 6 – абсорбер (осушитель) с серной кислотой; 7 – рабочие электроды; 8 – измерительные электроды; 9 – ячейка для титрования; 10 – перемешивающее устройство

Fig. 1. Analyzer of organochlorine compounds: 1 – vessel for stripping; 2 – sample receiver; 3 – sample; 4 – combustion tube; 5 – combustion furnace; 6 – absorber (desiccant) with sulfuric acid; 7 – working electrodes; 8 – measuring electrodes; 9 – titration cell; 10 – agitator

#### Результаты исследования и их обсуждение

Последовательность отбелки целлюлозы по методу ECF, отбелка с использованием трех стадий диоксида хлора и двух стадий щелочной экстракции, сокращенно записывается как Д–Щ–Д–Щ–Д. За каждой стадией следует промывка водой. Альтернативой, которая может быть реализована в результате модернизации, становится схема, предусматривающая стадию щелочно-кислородной делигнификации перед проведением химической отбелки целлюлозы. Данный процесс представляет собой взаимодействие целлюлозы с кислородом и щелочью при высоких температурах. Щелочно-кислородная делигнификация снижает количество лигнина в целлюлозе на 35–50 %.

В табл. 1 представлены сравнительные результаты работы этих двух схем, реализованных на одном оборудовании на действующем предприятии при внедрении КЩО перед отбелкой. Условия проведения КЩО: давление 0,4 МПа, температура 85 °С; расход кислорода 15 кг/т.

Таблица 1

#### Сравнительные результаты работы схем отбелки

Схема отбелки	Суммарный расход, кг/т			Расход O <sub>2</sub> , кг/т	Белизна, %
	ClO <sub>2</sub>	NaOH	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		
Д <sub>0</sub> –ЩОП/Щ <sub>1</sub> П–Д <sub>1</sub> –Щ <sub>2</sub> П–Д <sub>2</sub>	20,5	20	9	8	87,6
КЩО–Д <sub>0</sub> –ЩП–Д <sub>1</sub> –Д <sub>2</sub>	18,0	24	4	15	87,4

Примечание: Д – обработка диоксидом хлора; ЩОП – окислительное щелочение в присутствии пероксида водорода; ЩП – щелочение в присутствии пероксида водорода.

Как видно из таблицы, переход от схемы  $D_0$ -ЩОП/Щ<sub>1</sub>П- $D_1$ -Щ<sub>2</sub>П- $D_2$  к схеме КЩО- $D_0$ -ЩП- $D_1$ - $D_2$  позволяет сократить расход диоксида хлора на 2,5 кг/т (причем основная доля снижения приходится на стадию  $D_0$ ) и пероксида водорода на 5 кг/т при сохранении белизны практически на прежнем уровне. При этом увеличивается расход NaOH на 4 кг/т и O<sub>2</sub> на 7 кг/т. Однако в суммарном стоимостном выражении и с точки зрения уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения безопасности жизнедеятельности человека вариант с КЩО на первой стадии предпочтителен.

В промышленных условиях были также проведены сравнительные испытания одноступенчатого и двухступенчатого процесса КЩО (табл. 2).

Таблица 2

## Сравнительные показатели работы одно- и двухступенчатой КЩО

Количество ступеней	Параметры работы ступеней КЩО					Показатели качества целлюлозы			
	Давление кислорода, МПа	Расход O <sub>2</sub> на ступенях, кг/т	Расход NaOH, кг/т	Температура на ступенях, °С	Продолжительность, мин	Жесткость (число каппа)	Белизна, %	Вязкость, мПа · с	Степень делигнификации, %
1	0,8 (1) – (2)	22	15	105	60	13,8	44,0	59,5	39,0
2	0,8 (1) 0,5 (2)	7 (1) 15 (2)	15	85 (1) 105 (2)	15 (1) 60 (2)	8,1	57,4	60,0	61,8

Примечание: (1) – значение для первой ступени; (2) – для второй.

Как видно из табл. 2, двухступенчатая КЩО позволяет достигнуть более высокой степени делигнификации – 61,8 % по сравнению с 39 % для одноступенчатой КЩО. Это показывает целесообразность реализации двухступенчатой схемы.

Кроме того, выполнен анализ содержания хлора в беленой целлюлозе при различных схемах отбеливания с КЩО на начальном этапе. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Среднее содержание АОХ и ОХ в сульфатной беленой целлюлозе для различных схем отбеливания

Схема отбеливания	Содержание, мг/кг	
	АОХ	ОХ
КЩО- $D_0$ -ЩОП- $D_1$ -Щ <sub>2</sub> - $D_2$ -К	205	162
КЩО- $D_0$ -ЩП <sub>1</sub> - $D_1$ -ЩП <sub>2</sub> - $D_2$ -К	149	115
КЩО- $D_0$ -ЩО- $D_1$ - $D_2$ -К	155	120
КЩО- $D_0$ -ЩП- $D_1$ - $D_2$ -К	165	130
КЩО-ЩОП- $D_1$ -ЩП- $D_2$ -К	224	138
КЩО- $D_0$ -ЩП <sub>1</sub> - $D_1$ -ЩП <sub>2</sub> - $D_2$ -К	125	110
КЩО <sub>1</sub> -КЩО <sub>2</sub> - $D_0$ -ЩП <sub>1</sub> - $D_1$ -К	166	153
КЩО <sub>1</sub> -КЩО <sub>2</sub> - $D_0$ -ЩП <sub>1</sub> - $D_1$ -Щ <sub>2</sub> - $D_2$ -К	159	147

Примечание: Щ – щелочение; К – кислотка.

Из табл. 3 следует, что при наличии ступени КЩО перед отбелкой на выходе может быть получена продукция, сопоставимая по качеству с требованиями потенциальных потребителей.

На рис. 2 представлена динамика изменения содержания хлора в целлюлозе для одной из применяемых на российских предприятиях технологий отбелки (ECF). Делигнификация проводится в два этапа: КЩО (в одну или две стадии) и отбелка диоксидом хлора. Этап КЩО отличается высокой эффективностью делигнификации, что позволяет использовать небольшое количество диоксида хлора. После ступени  $D_0$  концентрация хлорорганических соединений в целлюлозной массе несколько возрастает, но в дальнейшем уровень ОХ и АОХ на протяжении всего отбеливания не превышает 250 мг/кг и в конце процесса достигает минимальных значений. Следует отметить, что увеличение числа ступеней КЩО не оказывает решающего влияния на содержание хлора в конечном продукте.

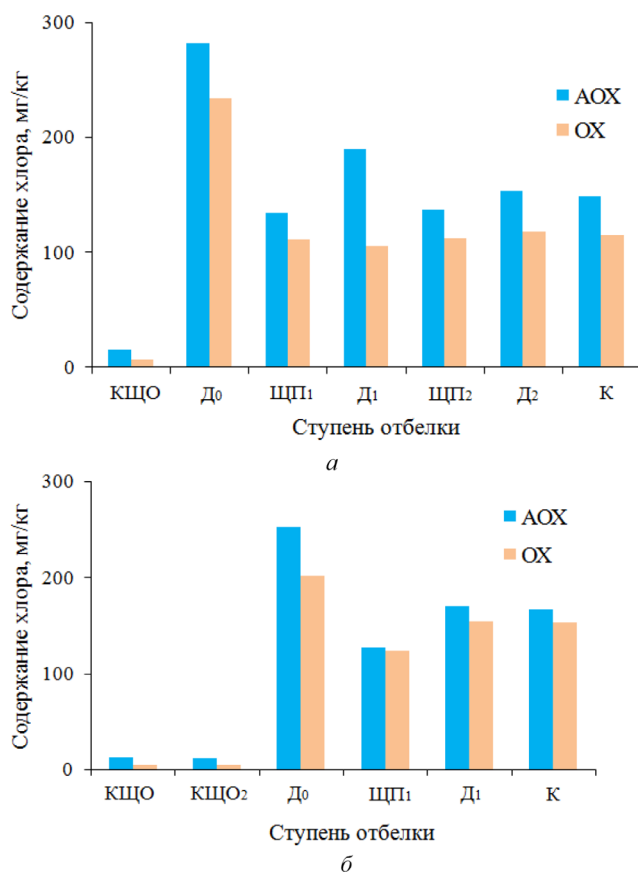


Рис. 2. Динамика изменения содержания хлора в целлюлозе для технологии ECF с одной (а) и двумя (б) предварительными ступенями кислородно-щелочной делигнификации

Fig. 2. Dynamics of changes in chlorine content in pulp for the ECF technology with one (a) and two pre-stages of oxygen-alkaline delignification (b)

Данные табл. 1–3 показывают, что по совокупности предъявляемых к целлюлозе требований КЩО является предпочтительной для российских предприятий. Высокое качество готовой продукции, удовлетворяющее требованиям потребителей, возможно только при условии постоянного контроля содержания хлора в целлюлозе, поскольку его количественные показатели остаются близкими к верхнему допустимому пределу.

#### Выводы

1. Переход к отбелке целлюлозы с щелочно-кислородной делигнификацией перед началом основной стадии процесса позволяет сократить расход диоксида хлора на 2,5 кг/т и пероксида водорода на 5 кг/т при сохранении белизны практически на прежнем уровне. За счет снижения количества выбросов хлорсодержащих отходов негативное воздействие на окружающую среду и безопасность жизнедеятельности человека уменьшается. Причем двухступенчатая кислородно-щелочная отбелка позволяет достигнуть более высокой степени делигнификации – 61,8 % по сравнению с 39 % для одноступенчатой кислородно-щелочной отбелки.

2. Для соответствия целлюлозы по уровню содержания органически связанного и общего хлора (низкий уровень или отсутствие данного вещества) требованиям отдельных категорий заказчиков необходимо провести модернизацию действующих технологических последовательностей путем увеличения доли кислородосодержащих белящих реагентов. Наличие между варочным и отбельным цехом ступени кислородно-щелочной отбелки является путем совершенствования существующих методов отбелки как с точки зрения основных расходных показателей, так и с точки зрения содержания хлора в целлюлозе.

3. При наличии этапа кислородно-щелочной обработки на первой ступени отбелки может быть достигнуто содержание в беленой целлюлозе общего хлора – 125 мг/кг и органически связанного – 110 мг/кг.

4. Целлюлозно-бумажным предприятиям, которые изготавливают беленую целлюлозу для санитарно-гигиенических изделий, упаковки пищевых продуктов и для дальнейшей химической переработки, необходимо систематически оценивать содержание органически связанного и общего хлора в произведенном продукте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеева Е.Д. Производство растворимой целлюлозы в СССР // *Pulp and Paper Industry*. 2016. № 1. С. 67–75.

Alekseeva E.D. Production of Soluble Pulp in the USSR. *Pulp and Paper Industry*, 2016, no. 1, pp. 67–75.

2. Королева Т.А., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Дряхлицын А.А., Медведев В.В., Мосеев В.Г. Применение окислительного щелочения в процессе отбелки лиственной сульфатной целлюлозы // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2020. № 4. С. 168–177.

Koroleva T.A., Milovidova L.A., Komarova G.V., Dryakhlytsyn A.A., Medvedev V.V., Moseev V.G. The Use of Oxidative Alkali Treatment for Sulphate Hardwood Pulp Bleaching. *Lesnoy Journal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-168-177>

3. Липин В.А., Софронова Е.Д., Михайловская А.П., Гребенников С.Ф., Лейман О.Ю. Технологические особенности производства растворимой целлюлозы из листовых пород древесины // ИВУЗ. Технология легкой промышленности. 2018. № 1. С. 110–112.

Lipin V.A., Sofronova E.D., Mikhailovskaya A.P., Grebennikov S.F., Leiman O.Yu. Technological Peculiarities of Manufacture of Soluble Cellulose from Firey Rocks of Wood. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry], 2018, no. 1, pp. 110–112.

4. Орлова А.В., Софронова Е.Д., Липин В.А. Отбелка целлюлозы для химической переработки по технологии ECF LIGHT // XXIII Междунар. Биос-форум и молодеж. Биос-олимпиада 2018. СПб.: Типография Любавич, 2019. С. 118–122.

Orlova A.V., Sofronova E.D., Lipin V.A. Bleaching of Pulp for Chemical Processing by ECF Light Technology. *XXIV International and Interregional Youth BIOS-Olympiad and BIOS-Forum 2018*. Saint Petersburg, Tipografiya Lyubavich, 2019, pp. 118–122.

5. Софронова Е.Д., Липин В.А., Орлова А.В., Добош А.Ю. Анализ содержания органического хлора в белой целлюлозе иностранных и российских предприятий // Изв. СПбЛТА. 2020. Вып. 230. С. 215–225.

Sofronova E.D., Lipin V.A., Orlova A.V., Dobosh A.Yu. The Influence of Bleaching Scheme Technology on the Content of Total and Bound Chlorine in Cellulose. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2020, iss. 230, pp. 215–225. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.230.215-225>

6. Brogdon B.N., Lucia L.A. New Insights into Lignin Modification during Chlorine Dioxide Bleaching Sequences (IV): The Impact of Modifications in the (EP) and (EOP) Stages on the D<sub>1</sub> Stage. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2005, vol. 25, iss. 3, pp. 149–170. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773810500191716>

7. Chong Y.H., Daud W.R.W., Leh C.P. Effect of Hydroxyl Peroxide and Anthraquinone on the Selectivity and Hexenuronic Acid Content of Mixed Tropical Hardwood Kraft Pulp during Oxygen Delignification. *BioResources*, 2003, vol. 8, no. 2, pp. 2547–2557. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2547-2557>

8. Colodette J.L., Honor Mounteer A., Gomes C.M., Rabelo M.S., Eiras K.M. *Eucalyptus Kraft Pulp Bleaching: State-of-the-Art and New Developments, 2005 Engineering, Pulping and Environmental Conference*. Atlanta, Georgia, TAPPI PRESS, 2006.

9. Fillat U., Roncero M.B., Bassa A., Sacon V.M. An Approach to Industrial Application: Influence of Black Liquor and pH on Xylanase Efficiency in Bleaching of Eucalyptus Kraft Pulp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, vol. 49, iss. 22, pp. 11200–11205. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie1014469>

10. Ibarra D., Camarero S., Romero J., Martínez M.J., Martínez A.T. Integrating Laccase-Mediator Treatment into an Industrial-Type Sequence for Totally Chlorine-Free Bleaching of Eucalypt Kraft Pulp. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2006, vol. 81, iss. 7, pp. 1159–1165. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.1485>

11. ISO 3688:1999. *Pulps – Preparation of Laboratory Sheets for the Measurement of Diffuse Blue Reflectance Factor (ISO Brightness)*. Geneva, ISO/TC 6, 1999. 5 p.

12. ISO 5351-2:2010. *Cellulose in Dilute Solutions – Determination of Limiting Viscosity Number – Part 2: Method in Iron(III) Sodium Tartrate Complex (EWNN mod NaCl) Solution*. Geneva, ISO/TC 6, 2010. 19 p.

13. ISO 302:2015. *Pulps – Determination of Kappa Number*. Geneva, ISO/TC 6, 2015. 12 p.

14. ISO 11480:2017. *Pulp, Paper and Board – Determination of Total Chlorine and Organically Bound Chlorine*. Geneva, ISO/TC 6, 2017. 16 p.



15. ISO 10993-23:2021. *Biological Evaluation of Medical Devices – Part 23: Tests for Irritation*. Geneva, ISO/TC 194, 2021. 60 p.
16. Jablonský M., Vrška M., Katuščák S. Cellulose Protectors for Improving Ozone Bleaching – Review. *Wood Research*, 2004, vol. 49, no. 4, pp. 71–86.
17. Kaur D., Bhardwaj N.K., Lohchab K.R. Effect of Incorporation of Ozone Prior to ECF Bleaching on Pulp, Paper and Effluent Quality. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 236, pp. 134–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.089>
18. Llano T., Arce C., Ruiz G., Chenna N., Coz A. Modelling and Optimization of the Last Two Stages of an Environmentally-Compatible TCF Bleaching Sequence. *BioResources*, 2018, vol. 13, iss. 3, pp. 6642–6662. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.6642-6662>
19. Maltha C.R.A., Barbosa L.C.A., Azevedo M.A.B., Colodette J.L. Behavior of Eucalyptus Kraft Pulp Extractives Components across ECF Bleaching and Their Impact on Brightness Reversion. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2011, vol. 31, iss. 2, pp. 103–120. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2010.502283>
20. Nie S., Yao S., Wang S., Qin C. Absorbable Organic Halide (AOX) Reduction in Elemental Chlorine-Free (ECF) Bleaching of Bagasse Pulp from the Addition of Sodium Sulphide. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 713–723. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.713-723>
21. Pouyet F., Chirat C., Potthast A., Lachenal D. Formation of Carbonyl Groups on Cellulose During Ozone Treatment of Pulp: Consequences for Pulp Bleaching. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 109, pp. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.082>
22. Ragnar M., Ekstrom U. *Reduction of Organically Bound Chlorine Formed in Chlorine Dioxide Bleaching*. Patent US, no. US 20030056295 A1, 2003.
23. Ragnar M., Törnngren A. Ways to Reduce the Amount of Organically Bound Chlorine in Bleached Pulp and the AOX Discharges from ECF Bleaching. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 234–239. DOI: <https://doi.org/10.3183/npprj-2002-17-03-p234-239>
24. Ribeiro R.A., Gomes F.G.B., Floriani J.N., Damásio R.A.P., Demuner I.F., Colodette J.L. Final Chlorine Dioxide Stage at Near-Neutral pH for Bleaching Eucalyptus Pulp. *Química Nova*, 2014, vol. 37, no. 10, pp. 1646–1649. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140251>
25. Sharma N., Bhardwaj N.K., Singh R.B.P. Environmental Issues of Pulp Bleaching and Prospects of Peracetic Acid Pulp Bleaching: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 256, art. 120338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120338>
26. Suess H.U. *Pulp Bleaching Today*. Berlin, Walter de Gruyter, 2010. 310 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110218244>
27. Valls C., Cadena E.M., Roncero M.B. Obtaining Biobleached Eucalyptus Cellulose Fibres by Using Various Enzyme Combinations. *Carbohydrate Polymers*, 2013, vol. 92, iss. 1, pp. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.083>
28. Yao S., Liu B., Nie S., Wang S., Qin C., Wang S. Pretreatment of Chlorine Dioxide Solution for Pulp Bleaching. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 523–531. DOI: <https://doi.org/10.1166/jbmb.2019.1886>
29. Zhang H., Nie S., Qin C., Zhang K., Wang S. Effect of Hot Chlorine Dioxide Delignification on AOX in Bagasse Pulp Wastewater. *Cellulose*, 2018, vol. 25, iss. 3, pp. 2037–2049. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1670-1>

**MINIMIZING THE CHLORINE CONTENT IN BLEACHED SULFATE PULP FOR SANITARY TISSUE PRODUCTS AND FOOD PACKAGING**

*Ekaterina D. Sofronova*, Postgraduate Student; ResearcherID: [Q-6626-2017](https://orcid.org/0000-0003-1293-6597).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-6597>

*Vadim A. Lipin*, Doctor of Engineering, Head of the Department;

ResearcherID: [ABH-8385-2020](https://orcid.org/0000-0002-8805-8113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-8113>

*Vladimir K. Dubovy*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [W-1235-2017](https://orcid.org/0000-0002-2903-3872).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

*Tatyana A. Sustavova*, Assistant; ResearcherID: [ABI-1089-2020](https://orcid.org/0000-0003-2059-2675).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2059-2675>

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: [alekc.ru94@mail.ru](mailto:alekc.ru94@mail.ru), [vadim.lipin@km.ru](mailto:vadim.lipin@km.ru), [dubovy2004@mail.ru](mailto:dubovy2004@mail.ru), [sustebrother@mail.ru](mailto:sustebrother@mail.ru)

**Abstract.** The increasing consumption of pulp for chemical processing, including production of sanitary tissue products and other medical products, food packaging, as well as fillers for food products leads to new requirements for the quality of raw materials. The task of improving the characteristics of pulp has become particularly acute in connection with the COVID-19 epidemic: the demand for disposable nonwoven materials in direct contact with the human skin has increased several times over. The elemental chlorine free (ECF) sulfate pulp bleaching process, which uses chlorine dioxide as a bleaching agent, dominates bleached pulp production worldwide. The chlorine-containing compounds formed as a result of bleaching pollute not only waste water, but also the product itself. In the near future, it is expected that paper products made with chlorine-based bleaches may be banned for the production of sanitary tissue products and food packaging. If the products of the pulp and paper industry do not meet international consumer requirements, the pulp market for these purposes may face undesirable results. The most promising direction of modernization the existing bleaching schemes, both in terms of the process consumption parameters and the quality of the produced pulp, is the use of oxygen-alkaline bleaching in the first stage. Determination of total and organically bound chlorine content in pulp materials in accordance with ISO 11480:2017 on the advanced plant has shown, that the introduction of bleaching schemes using oxygen-alkaline agents will ensure the recommended content of chlorine compounds while maintaining the necessary characteristics of pulp for the manufacture of medical and sanitary tissue products, food packaging. However, high quality of finished products that meet consumers' requirements is possible only if the chlorine content is controlled at all stages of pulp production, since the quantitative indicators of this substance content remain close to the upper allowable limit.

**For citation:** Sofronova E.D., Lipin V.A., Dubovy V.K., Sustavova T.A. Minimizing the Chlorine Content in Bleached Sulfate Pulp for Sanitary Tissue Products and Food Packaging. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 186–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

**Keywords:** pulp, sanitary tissue products, food packaging, bleaching, organochlorine compounds, nonwoven materials, delignification.