

Научная статья

УДК 676.164

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-181-192

Образование минеральных отложений в варочных установках «Камюр»

В.В. Медведев[✉], *мл. науч. сотр.*; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Ю.В. Севастьянова, *канд. техн. наук, проф.*; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

А.В. Гурьев, *канд. техн. наук, проф.*; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

А.В. Поташев, *канд. техн. наук, науч. сотр.*; ResearcherID: [H-1601-2019](https://orcid.org/0000-0002-7184-8338),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-8338>

А.С. Лыжина, *инженер*; ResearcherID: [PGT-6856-2026](https://orcid.org/0009-0003-9144-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9144-0078>

А.В. Скорнякова, *инженер*; ResearcherID: [LSI-9727-2024](https://orcid.org/0009-0003-8947-1617),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8947-1617>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; v.medvedev@narfu.ru[✉], j.sevastyanova@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru, a.potashhev@narfu.ru, lyzhina.a@edu.narfu.ru, a.skornyakova@narfu.ru

Поступила в редакцию 27.01.26 / Одобрена после рецензирования 25.03.26 / Принята к печати 26.03.26

Аннотация. Образование минеральных отложений является одной из основных причин вынужденных остановов варочных установок типа «Камюр». В настоящее время применение ингибиторов является одним из наиболее эффективных и дорогостоящих методов борьбы с солеотложениями. Именно поэтому правильный подбор ингибитора и его дозировки необходимы для достижения бесперебойной и экономически целесообразной работы оборудования. При этом требуется установление природы минеральных отложений и уровня содержания вызывающих их веществ. Результаты анализа образцов минеральных отложений варочных установок непрерывного действия типа «Камюр», отобранных на двух различных производствах действующего целлюлозно-бумажного предприятия Российской Федерации во время вынужденных остановов, подтвердили, что углекислый кальций является их основным компонентом. Преобладающим процессом, приводящим к образованию карбонатных кальциевых отложений в условиях варки целлюлозы, является взаимодействие ионов кальция и карбонат-ионов. Неустрашимый источник карбонат-иона – белый щелок. Катион кальция в большем количестве поступает с древесиной (до 1,6 кг/т а.с.в), в меньшем – с белым щелоком (вследствие длительности реакции каустизации), и наименее значительно – со слабым черным щелоком, направляемым для поддержания гидромодуля варочного котла. Представлены уровни варьирования содержания карбоната натрия и катионов кальция в используемом сырье, их часовое поступление с учетом реальной производительности варочных установок и укрупненный баланс по кальцию для обследованных варочных установок непрерывного действия типа «Камюр» на производстве лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы.

Ключевые слова: минеральные отложения, варочные установки, варочные установки типа «Камюр», сульфатная целлюлоза, жесткость воды, белый щелок, карбонат кальция

© Медведев В.В., Севастьянова Ю.В., Гурьев А.В., Поташев А.В., Лыжина А.С., Скорнякова А.В., 2026



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2026-0003.

Благодарности: Использовано оборудование ИТЦ СТПБС и ЦКП НО «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Медведев В.В., Севастьянова Ю.В., Гурьев А.В., Поташев А.В., Лыжина А.С., Скорнякова А.В. Образование минеральных отложений в варочных установках «Камюр» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 181–192. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-181-192>

Original article

Formation of Mineral Deposits in Kamur Digesters

Vasilii V. Medvedev[✉], Junior Research Scientist; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Yulia V. Sevastyanova, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

Alexander V. Guriev, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

Alexander V. Potashev, Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [H-1601-2019](https://orcid.org/0000-0002-7184-8338), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-8338>

Anna S. Lyzhina, Engineer; ResearcherID: [PGT-6856-2026](https://orcid.org/0009-0003-9144-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9144-0078>

Anastasiya V. Skornyakova, Engineer; ResearcherID: [LSI-9727-2024](https://orcid.org/0009-0003-8947-1617),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8947-1617>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; v.medvedev@narfu.ru[✉], j.sevastyanova@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru, a.potashev@narfu.ru, lyzhina.a@edu.narfu.ru, a.skornyakova@narfu.ru

Received on January 27, 2026 / Approved after reviewing on March 25, 2026 / Accepted on March 26, 2026

Abstract. Mineral deposits are one of the main causes of unplanned shutdowns of Kamur digesters. Currently, the use of inhibitors is one of the most effective and expensive methods for dealing with salt deposits. Therefore, the correct selection of an inhibitor and its dosage is essential for ensuring the smooth and cost-effective operation of the equipment. This requires determining the nature of mineral deposits and the concentration of the substances that cause their formation. We analyzed the mineral deposit samples from the continuously working Kamur digesters selected at two different production lines of an operating pulp and paper mill in the Russian Federation during forced shutdowns. The analysis results confirmed that calcium carbonate is the main component of the deposits. The predominant process leading to the formation of calcium carbonate deposits during the pulp cooking process is the interaction of calcium ions and carbonate ions. White liquor is an unavoidable source of carbonate ions. Calcium cations are introduced in large quantities with wood (up to 1.6 kg/t of dry matter), in smaller quantities with white liquor (due to the prolonged causticization), and in even smaller quantities with weak black liquor, which is used to maintain the digester's water level. The paper presents the variation in sodium carbonate and calcium cation content in the raw materials used, their hourly intake considering the actual performance of digesters,

and a consolidated calcium balance for the examined continuously working Kamur digesters at the production of hardwood and softwood sulfate pulp.

Keywords: mineral deposits, digesters, Kamur digesters, sulphate pulp, water hardness, white liquor, calcium carbonate

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSRU-2026-0003.

Acknowledgments: The Core Facility Center “Arktika” and the Innovation and Technology Centre “Modern Technologies for Processing Northern Bioresources” at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov provided the scientific equipment for the research.

For citation: Medvedev V.V., Sevastyanova Yu.V., Guryev A.V., Potashev A.V., Lyzhina A.S., Skornyakova A.V. Formation of Mineral Deposits in Kamur Digesters. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 181–192. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-181-192>

Введение

В настоящее время около 65 % производимой в мире сульфатной целлюлозы получают на установках непрерывного действия типа «Камюр», производительность которых может превышать 1000 т/сут. [3, 7]. Простои снижают выработку, что ведет к экономическим потерям. В связи с этим необходимо обеспечивать стабильную работу всей системы варочной установки между плановыми остановами.

Образование минеральных отложений является одной из основных причин вынужденной остановки оборудования. Соли различных металлов оседают плотным слоем на внутренних поверхностях, контактирующих с варочными реагентами, снижая эффективность процесса вплоть до полного выведения устройства из строя. Отложения на греющих поверхностях уменьшают коэффициент теплопередачи, вызывают локальную коррозию и приводят к местным перегревам. При накоплении балластных осадков в трубопроводах и на поверхности сит происходит местное сужение их диаметра, которое приводит к резкому перепаду давления. В результате на транспортирование растворов требуется большее количество энергии, а работа перекачивающего оборудования в таком режиме сокращает срок его эксплуатации.

Вынужденное прекращение работы варочной установки вследствие образования минеральных отложений приводит к необходимости проведения регламентных процедур по опорожнению котла, очистки линий путем промывки растворами соляной кислоты.

Осаждение минеральных солей происходит в результате 3 взаимосвязанных процессов: перенасыщения раствора, нуклеации и роста кристаллов. Скорость данных процессов теоретически зависит от температуры, давления, pH среды, концентрации ионов и режимов движения жидкости [1, 19, 20].

При этом очевидно, что изменение температуры, давления и расходов щелочов в условиях поддержания постоянного технологического режима варочных установок на целлюлозно-бумажных предприятиях крайне незначительно. Вследствие этого, в производственных условиях практически выделяют лишь один основной параметр – концентрацию ионов, – стабилизация которого может снизить интенсивность образования минеральных отложений.

Источниками минеральных солей в системе варочного котла являются технологическая щепка, свежая вода и варочные растворы [2, 13]. Несмотря на то, что наибольшее количество минеральных веществ поступает в котел с древесиной, управление химическим составом сырья на сегодняшний день является крайне сложной задачей. Вместе с тем возможным остается осуществление контроля качества технической воды и белого щелока в таких технологических процессах, как водоподготовка и регенерация химикатов [5].

Основным способом предотвращения образования минеральных отложений на предприятиях ЦБП является применение ингибиторов солеотложений. Обычно в качестве антискалантов используют полифосфаты, фосфонаты и поликарбоксилаты. Также для ингибирования образования отложений можно применять аминокарбоксилаты (хелатообразующие вещества), например, этилендиаминтетрауксусную или диэтиленetriаминтетрауксусную кислоты. Однако они главным образом действуют за счет образования комплексов с кальцием в растворе. Это непрактично, поскольку такой процесс требует стехиометрического содержания ионов кальция и, следовательно, неэкономичен при их высоком уровне. Полифосфаты, фосфонаты и поликарбоксилаты эффективны при гораздо меньших расходах.

Ингибиторы, действующие в дозировках ниже стехиометрического уровня, часто называют «пороговыми ингибиторами» [10, 15]. Рассматривают три основных механизма, обеспечивающих замедление и предотвращение образования отложений [18]:

пороговое ингибирование – антискалант замедляет стадии нуклеации и роста кристаллов;

диспергирование – антискалант минимизирует (снижает) силы притяжения между частицами и предотвращает их слипание;

модификация кристаллов – антискалант изменяет кристаллическую структуру таким образом, что площадь поверхности частиц отложений уменьшается, ограничивая их способность прикрепляться к поверхностям и другим частицам.

На практике один и тот же антискалант может влиять на процесс осаждения при помощи сразу нескольких обозначенных механизмов. Эффективность работы различных ингибиторов солеотложений, как и скорость осаждения минеральных солей, зависит от температуры, pH, степени перенасыщения и присутствия других ионов в растворе. При этом для выбора вида и дозировки антискаланта с целью обеспечения его эффективной работы необходимо определение состава минеральных отложений и уровня концентрации веществ, вызывающих их образование [20].

Целью работы стало изучение минеральных отложений, образующихся в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр» для производства сульфатной целлюлозы, анализ основных источников поступления минеральных веществ и их компонентного состава.

Объекты и методы исследования

Объектами данного исследования являлись образцы минеральных отложений варочных установок типа «Камюр», белый и черный щелока, производственная вода, технологическая щепка и сульфатная целлюлоза, отобранные на действующем ЦБП Российской Федерации.

Определение количественного содержания солей жесткости в пробах воды осуществляли комплексонометрическим методом, описанным в работе

[6]. Влагосодержание проб отложений, целлюлозы и щепы определяли согласно ГОСТ 16932–93.

Прокаливание образцов минеральных отложений для их озоления проводили в муфельной печи по ГОСТ Р 70267–2022. Для определения содержания золы в пробах целлюлозы и щепы использовали метод, приведенный в ГОСТ 18461–93.

Для подготовки проб щепы и целлюлозы к анализу методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES) исследуемую пробу озоляли в муфельной печи. Золу растворяли в нагретой концентрированной азотной кислоте. Кислотную смесь повторно нагревали и после охлаждения переносили в герметичную емкость. Пробы щелоков растворяли в азотной кислоте при нагревании с последующим отделением органической части. Анализ образцов осуществляли на приборе ICPE-9000.

ИК-спектры проб записывали с использованием ИК-Фурье спектрометра Vertex 70 (Bruker, Германия), оборудованного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения GladiATR (Pike Technologies, США). Обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения Opus (Bruker, Германия).

Для установления химического состава окалина применяли метод фундаментальных параметров с использованием прибора EDX-8000. Количественное содержание углерода и водорода определяли методом сжигания и газохроматографического анализа продуктов горения с использованием прибора EA3000.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании многолетнего опыта работы Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ им. М.В. Ломоносова с целлюлозно-бумажными предприятиями и литературных данных [4, 5, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 21, 22] возможно выделить два основных участка образования минеральных отложений в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр»: перфорированное сито загрузочного устройства варочного котла и внутренние поверхности теплообменников для подогрева щелока варочных зон.

Для определения состава минеральных отложений был выполнен их анализ по общепринятым методикам. Образцы отложений (рис. 1) были отобраны на ЦБП во время вынужденных остановок.



a



б

Рис. 1. Внешний вид отложений в системе варочного котла: *a* – на перфорированном сите загрузочного устройства; *б* – в трубчатом теплообменнике

Fig. 1. Deposits in the digester system: *a* – on a perforated sieve of the feeding device; *б* – in the tubular heat exchanger

Типовые ИК-спектры для испытуемых образцов в сравнении с библиотечными ИК-спектрами представлены на рис. 2.

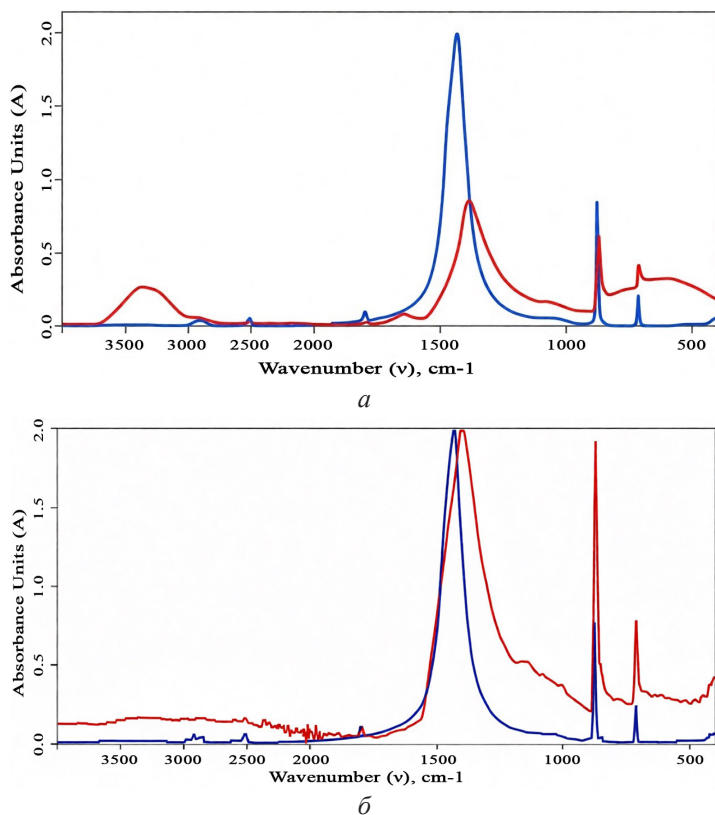


Рис. 2. ИК-спектры образцов отложений (красный) и карбоната кальция (синий):

a – на перфорированном сите загрузочного устройства;

б – в трубчатом теплообменнике. Absorbance Units (A) – оптическая плотность;

Wavenumber (ν) – волновое число

Fig. 2. IR spectra of deposit samples (red) and calcium carbonate (blue): *a* – on a perforated sieve of the feeding device; *б* – in the tubular heat exchanger

Для ИК-спектров исследуемых образцов характерно максимальное совпадение положения полос поглощения с библиотечным ИК-спектром карбоната кальция.

Результаты элементного анализа двух образцов отложений, отобранных во время двух плановых работ в варочном цехе, и потери при их прокаливании при различных температурах представлены в табл. 1.

Высокий уровень зольности от 95,7 до 98,1 % при температуре 575 °С свидетельствует о преимущественно минеральной природе отложений. Повышение в пробах потерь после прокаливания при 900 °С над потерями после прокаливания при 575 °С указывает на присутствие в исследованных отложениях карбонатов, что подтверждается активной реакцией выделения углекислого газа при взаимодействии проб с соляной кислотой. При этом по данным элементного анализа минеральная часть отложений содержит в основном кальций, доля которого достигает в разных пробах 35,3...37,1 %. Сопоставление долевого содержания кислорода, углерода и кальция в проанализированных пробах соотносится с химической формулой карбоната кальция, который является основным компонентом обсуждаемых минеральных отложений.

Таблица 1

Результаты анализа проб отложений
Results of the deposit samples' analysis

Показатель/Элемент	В трубчатом теплообменнике		На перфорированном сите загрузочного устройства	
	1-й отбор	2-й отбор	1-й отбор	2-й отбор
Потери при прокаливании, %, при 575 °С	1,9	2,0	4,3	3,6
Потери при прокаливании, %, при 900 °С	43,3	43,1	45,0	44,5
Содержание элемента, %				
O	42,80	43,92	45,08	46,90
Ca	36,40	37,08	35,31	36,50
C	15,46	14,30	16,10	13,10
Na	3,84	3,19	1,68	1,19
S	0,50	0,49	0,19	0,08
Fe	0,04	0,11	0,03	0,11
Ni	0,03	0,02	H/o	0,02
Zn	0,10	0,10	0,02	0,01
Mg	0,12	0,20	0,22	0,43
Al	0,08	0,08	0,09	0,09
Si	0,10	0,07	0,23	0,57
K	0,10	0,03	0,05	0,01
Ti	0,07	0,05	H/o	0,11
Cr	0,01	0,01	H/o	0,01
Mn	0,06	0,04	0,02	0,36
Cu	0,01	0,02	0,01	0,02
Sr	0,11	0,10	0,11	0,10
Rb	H/o	H/o	H/o	H/o
Ba	0,19	0,21	0,17	0,31
Br	H/o	H/o	H/o	H/o
N	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
H	<0,10	<0,10	0,66	<0,10

H/o – ниже определяемого диапазона.

Образование накипи на данных участках варочных установок обусловлено следующими процессами:

изменением концентрации ионов кальция и карбонат-ионов в линии загрузки варочного котла за счет смешения циркуляционного щелока, белого щелока, слабого черного щелока и водорастворимых веществ, образующихся при пропарке щепы;

переходом минеральной части древесины в варочный раствор в процессе варки;

усилением скорости агломерации частиц и их осаждения при повышении температуры варочного щелока в теплообменниках варочных зон.

Основным источником поступления карбонат-ионов в варочный котел является белый щелок. Содержание карбоната натрия в нем напрямую зависит от степени каустизации и отражает качество работы цеха каустизации и регенерации извести. На рис. 3 приведены зависимости содержания кар-

боната натрия от степени каустизации белого щелока, отобранного на двух производствах сульфатной небеленой целлюлозы отечественного предприятия ЦБП – лиственной и хвойной. Выборка сформирована в течение 1 года и содержит результаты анализов 22 независимых отборов производственного белого щелока.

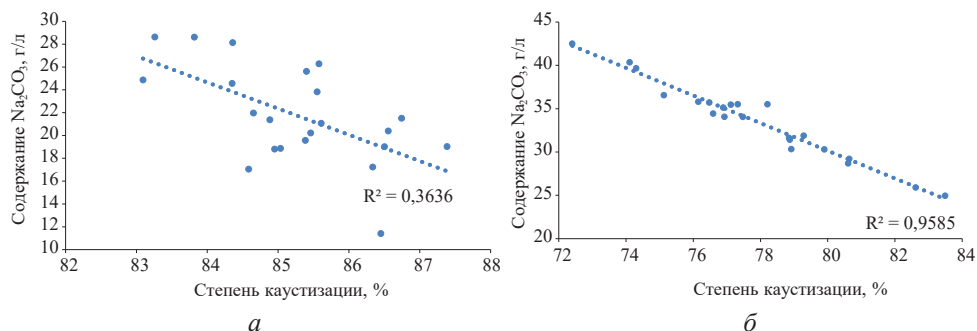


Рис. 3. Зависимость концентрации карбоната натрия в белом щелоке от степени его каустизации для производства сульфатной целлюлозы: а – лиственной; б – хвойной

Fig. 3. Dependence of the sodium carbonate concentration in white liquor on its degree of causticization for the production of hardwood (а) and softwood (б) sulfate pulp

Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными работы [5], в которой показано, что более высокая степень каустизации щелока способствует снижению образования накипи за счет уменьшения содержания карбоната натрия в белом щелоке и, как следствие, понижению его количества, подаваемого на варку.

Содержание карбоната натрия в проанализированных пробах белого щелока изменяется в диапазоне от 11,4 до 39,7 г/л. При этом с учетом реального расхода белого щелока, используемого для варки целлюлозы на обсуждаемых производствах, часовое поступления карбоната натрия составляет от 1938 до 4862 кг/ч для лиственного потока и от 2450 до 3891 кг/ч для хвойного потока. Таким образом, значительное изменение данного показателя делает его стабилизацию крайне важной технологической задачей с целью минимизации образования минеральных отложений в варочных установках типа «Камюр».

Для определения уровней прихода и расхода кальция в варочный котел был выполнен анализ основных источников поступления минеральных веществ: технологической щепы лиственных и хвойных пород древесины, целлюлозы после промывки, белого щелока, черного щелока и слабого черного щелока, отобранных на двух различных производствах. Усредненные результаты по году представлены в табл. 2 с учетом реальной производительности варочных установок.

Согласно полученным результатам для выбранных варочных установок до 96 % кальция поступает в варочный котел с технологической щепой. После варки и промывки в зависимости от степени провара полуфабриката с целлюлозной массой уходит от 66 до 81 % данного компонента по отношению к его исходному количеству. Оставшаяся часть кальция отделяется при промывке и переходит в слабый черный щелок, повторно направляемый для поддержания гидромодуля варочного котла, а также для подачи в зону диффузионной промывки/вытеснения и на выпарку.

Таблица 2

Содержание кальция в основных источниках поступления минеральных веществ в варочную установку типа «Камюр»
Calcium content in the main sources of mineral substances' input to a Kamur digester

Наименование	Содержание				Баланс кальция, кг/ч	
	золы, %		ионов кальция, мг/л (жидкость), мг/кг (твердое вещество)			
	ЛВ	ХВ	ЛВ	ХВ	ЛВ	ХВ
Приход						
Технологическая щепа	0,5	0,3	1140	863	120	48
Белый щелок	—	—	19	19	3	2
Слабый черный щелок на поддержание гидромодуля	—	—	21	—	1	—
Общее количество:					124	50
Расход						
Целлюлоза после промывки	2	1	1760	1015	100	33
Черный щелок на выпарку	—	—	22	24	7	2
Общее количество:					107	35

Примечание: ЛВ – лиственное волокно; ХВ – хвойное волокно.

Для промывки целлюлозы после варки преимущественно используются оборотные щелочные фильтраты и заданное количество свежей технологической воды, качество и глубина подготовки которой зависят от вида производимой целлюлозы. Химический состав потребляемой предприятием воды существенно различается в зависимости от характеристик водного источника и времени года. Наибольший интерес для контроля кальциевых отложений варочного котла представляют растворенные в воде соли временной жесткости, обусловленные содержанием карбонатов магния и кальция.

Традиционно на предприятиях ЦБП для промывки целлюлозы используется противоточная схема промывки, когда на последние ступени подается свежая вода, а фильтраты с последующей ступени направляются на предыдущую. В связи со сложностью закрутки фильтратов и непостоянством их химического состава ввиду накопления в расходных баках для производства лиственной целлюлозы была выполнена оценка влияния жесткости воды на содержание кальция в черном щелоке, косвенно характеризующая изменение количества поступающего кальция со слабым черным щелоком, подающимся для поддержания гидромодуля при варке.

На рис. 4 представлен график изменения концентрации ионов кальция в технологической воде и черном щелоке в зависимости от времени года.

Рис. 4. Изменение концентрации кальция в производственной воде и черном щелоке в зависимости от времени года
Fig. 4. Changes in calcium concentration in process water and black liquor depending on the season



Представленные данные демонстрируют сопоставимые зависимости изменения во времени жесткости воды и концентрации кальция в черном щелоке. Таким образом, количество кальция, вносимого в систему со свежей водой, непосредственно влияет на уровень поступления и содержания кальция в слабом черном щелоке, подающемся для поддержания гидромодуля при варке.

Заключение

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что основным компонентом исследованных образцов минеральных отложений в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр» производства сульфатной целлюлозы является карбонат кальция, доля которого достигает до 94 %. При этом органическая часть состава отложений составляет не более 4 %.

Основным процессом, приводящим к образованию карбонатных кальциевых отложений, является взаимодействие ионов кальция и карбонат-ионов непосредственно при делигнификации древесины, обусловленное изменением их концентраций и условиями технологического процесса. В связи с этим определены основные источники и уровни поступления ионов кальция и карбонат-ионов в установки непрерывного действия типа «Камюр», применяемые для варки различных видов целлюлозы.

Установлено, что уровень часового поступления карбоната натрия в варочный котел с белым щелоком для выбранных производственных условий варьируется в широком диапазоне значений от 1900 до 4900 кг/ч и прямо пропорционально снижается в зависимости от степени каустизации белого щелока, которая, в свою очередь, обусловлена применяемой на предприятии технологией его получения.

Основным источником поступления ионов кальция являются технологическая щепка, однако свой вклад вносят также крепкий белый щелок и слабый черный щелок, подающийся для поддержания гидромодуля. На основе экспериментальных данных представлен укрупненный баланс по кальцию применительно к анализу работы выбранных варочных установок непрерывного действия типа «Камюр».

В связи с тем, что регулирование минеральной части древесины не представляется возможным, основным инструментом минимизации образования минеральных отложений в варочных установках типа «Камюр» следует рассматривать контроль и регулирование качества белого щелока в процессе регенерации химикатов, а также технической воды в процессах водоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брикков А.В. Нефтепромысловая химия: Практическое руководство по борьбе с образованием солей. М.: Де`Либри, 2018. 335 с.

Brikov A.V. *Oilfield Chemistry: A Practical Guide to Combating Salt Formation*. Moscow, De`Libri Publ., 2018. 335 p. (In Russ.).

2. Демаков Ю.П., Швецов С.М., Швецов А.М. Зольный состав древесины различных пород деревьев в пойменном биотопе // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2012. № 31. С. 125–129.

Demakov Yu.P., Shvetsov S.M., Shvetsov A.M. Ash Composition of Timber Different Species of Trees in the Floodplain Biotope. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2012, no. 31, pp. 125–129. (In Russ.).

3. Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В. Сульфатная варка целлюлозы. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 175 с.

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V. *Sulfate Pulping*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019. 175 p. (In Russ.).

4. Непенин Н.Н. Технология целлюлозы. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956–1963. 2 т. 936 с. Nepenin N.N. *Pulp Technology*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1956–1963, vol. 2. 936 p. (In Russ.).

5. Постникова М.В., Фоминых О.В., Ермашева В.М. Изучение причин образования накипи на оборудовании варочных установок «Камюр» // Вестн. ПНИПУ. Химич. технология и биотехнология. 2009. № 9. С. 272–278.

Postnikova M.V., Fominykh O.V., Ermasheva V.M. A Study of the Causes of Deposit Formation on Equipment of Kamur Digesters. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2009, no. 9, pp. 272–278. (In Russ.).

6. Правилова Т.А. Химический контроль производства сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 256 с.

Pravilova T.A. *Chemical Control of Sulfate Pulp Production*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1984. 256 p. (In Russ.).

7. Севастьянова Ю.В., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Дубовый В.К. Регенерация химикатов в производстве сульфатной целлюлозы (каустизация и регенерация извести). Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 143 с.

Sevastyanova Yu.V., Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Dubovy V.K. *Regeneration of Chemicals in Sulfate Pulp Production (Causticization and Regeneration of Lime)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019. 143 p. (In Russ.).

8. Duggirala P.Y. Formation of Calcium Carbonate Scale and Control Strategies in Continuous Digesters. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*. 2005. 34 p. Available at: https://www.eucalyptus.com.br/icep02/prassad_duggirala.pdf (accessed 04.01.26).

9. Gemzická E., Šima J., Vrška M., Holeš M. Effect of pH and Washing on Calcium and Magnesium Distribution Between Pulp and Filtrate. *Chemical Papers*, 2010, vol. 64, iss. 1, pp. 741–748. <https://doi.org/10.2478/s11696-010-0061-3>

10. Guo J., Severtson S.J. Inhibition of Calcium Carbonate Nucleation with Aminophosphonates at High Temperature, pH and Ionic Strength. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, vol. 43(17), pp. 5411–5417. <https://doi.org/10.1021/ie049787i>

11. Holmbom B. Analysis of Papermaking Process Waters and Effluents. *Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking*. Berlin, Springer, 2017, pp. 269–285. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03898-7_9

12. Huber P., Burnet A., Petit-Conil M. Scale Deposits in Kraft Pulp Bleach Plants with Reduced Water Consumption: A Review. *Journal of Environmental Management*, 2014, no. 141, pp. 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.053>

13. Kemmer I. The NALCO Water Handbook. New York, McGraw-Hill, Inc., 1979. 1071 p.

14. Kent K., Mathur F., Bharati R. Proven Solutions to Minimise Inorganic Process Scaling in Pulp and Recovery. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 2013, vol. 66, pp. 197–203.

15. Ketrane R., Saidani B., Gil O., Leleyter L., Baraud F. Efficiency of Five Scale Inhibitors on Calcium Carbonate Precipitation from Hard Water: Effect of Temperature and Concentration. *Desalination*, 2009, vol. 249, iss. 3, pp. 1397–1404.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.013>

16. MacAdam J., Parsons S.A. Calcium Carbonate Scale Formation and Control. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2004, vol. 3, pp. 159–169. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-3849-1>

17. Severtson S., Duggirala P., Carter P., Reed P. Mechanism and Chemical Control of CaCO₃ Scaling in the Kraft Process. *TAPPI Journal*, 1999, vol. 82, no. 6, pp. 167–174.

18. Sitholé B. Scale Deposit Problems in Pulp and Paper Mills. *African Pulp and Paper Week, Durban, South Africa, October 8–11, 2002*. Durban, South Africa, 2002. Available at: http://www.tappsa.co.za/archive/APPW2002/Title/Scale_deposit_problems/scale_deposit_problems.html (accessed 22.06.26).

19. Sithole B., Doucette M., Fiolet R. Controlling Barium Sulphate Scale Deposition Problems in an Unbleached Kraft Paper Mill. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2015, vol. 74(4), pp. 236–244.

20. Väisänen H. *CaCO₃ Scale Inhibition in Paper Making Processes – Evaluation of Testing Methods and Inhibitor Performance*. M.Sc. Thesis. Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 2011. 95 p.

21. Wikander K., Kjellin P., Holmberg K. The Effect of Lignin on Calcium Carbonate Scaling. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 286–289. <https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-03-p286-289>

22. Zakir T., Tran H., Papangelakis V.G. Characterization of Hard Scale Formed in the Kraft Mill Green Liquor Processing Equipment. *TAPPI Journal*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 55–61. <https://doi.org/10.32964/TJ12.1.53>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest