

УДК 676.08

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПОЧВОГРУНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Шатрова Анастасия Сергеевна¹,
shatrova.irk@gmail.com

Богданов Андрей Викторович¹,
bogdanovav@istu.edu

Шкрабо Анна Ивановна¹,
bogdanov.lab@istu.edu

Алексеева Ольга Викторовна²,
aleksvalia@yandex.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² Муниципальное унитарное предприятие
«Канализационные очистные сооружения Байкальского муниципального образования»,
Россия, 665932, г. Байкальск, тер. Промплощадка, 16.

Актуальность. Отходы ОАО «Байкальский ЦБК» несут реальную угрозу возникновения социально-экологической катастрофы озера Байкал и всего Южного Прибайкалья, поэтому особенно остро стоит проблема разработки комплексных решений по ликвидации накопленных лигнинсодержащих отходов. Одним из перспективных направлений переработки такого типа отходов можно считать использование естественных природных процессов, например вымораживание в зимний период времени года вследствие отрицательных температур или самозаращение вследствие естественных процессов сукцессии.

Цель: разработать экологически безопасную технологию переработки коллоидных лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности.

Методы: опытно-промышленные испытания на Солзанской промплощадке ОАО «Байкальский ЦБК» по вымораживанию лигнинсодержащих отходов и получению из них почвогрунтов путем смешивания с добавками; выполнение количественного химического анализа с использованием методов атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии, высокоэффективной жидкостной хроматографии, токсикологического анализа.

Результаты. Опытно-промышленные испытания показали, что после вымораживания происходит разрушение коллоидной структуры лигнинсодержащих осадков с уменьшением объема до 40 %, влажности до 60 %, а также со снижением токсичности с третьего (умеренно опасные) в четвертый (малоопасные) и пятый класс (практически неопасные) опасности отходов в зависимости от его состава. После вымораживания полученный осадок при внесении различных добавок (золы ТЭЦ, осадок канализационных очистных сооружений) можно применять как почвогрунты и удобрения для рекультивации нарушенных земель и выращивания сельскохозяйственных культур. Таким образом, разработана экологически безопасная технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности с получением почвогрунтов, которая является малозатратной и не содержит дорогостоящего импортного оборудования.

Ключевые слова:

Почвогрунт, переработка отходов, вымораживание, целлюлозно-бумажная промышленность, ОАО «Байкальский ЦБК», шлам-лигнин.

Введение

Динамика образования отходов в Российской Федерации из года в год показывает стабильный рост их объемов. С 2010 по 2019 гг. совокупная масса отходов, образованных в РФ, удвоилась с 3,7 до 7,8 млрд т, а в 2020 г. в России был установлен рекорд по их образованию – порядка 8 млрд т, из которых всего 3,2 млрд т планируется переработать, при этом оставшаяся масса отходов должна быть захоронена на полигонах [1]. Для достижения целей Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. [2] должны быть решены такие проблемы, как осуществление рационального природопользования с высоким уровнем переработки образующихся отходов производства и потребления, а также ликвидация уже ранее накопленного ущерба окружающей природной и антропогенной среде.

Также о необходимости ликвидации уже нанесенного вреда с использованием мероприятий, связанных с переработкой накопленных отходов сказано в ФЗ-7 «Об охране окружающей среды» [3].

К настоящему времени в общую массу многотоннажных накопленных отходов, которые не удалось утилизировать, огромный вклад вносит целлюлозно-бумажная промышленность. Только на территории Иркутской области и Республики Бурятия располагается огромное количество (более 50 млн куб. м) накопленных лигнинсодержащих отходов таких предприятий, как ОАО «Байкальский ЦБК» (БЦБК), город Байкальск; группы «ИЛИМ», города Братск и Усть-Илимск Иркутской области и ОАО «Селенгинский ЦБК», город Селенгинск, Республика Бурятия. Накопленные отходы прошлых лет занимают огромные земельные площади, например, только на берегу

Байкала более 150 га занято промплощадкой БЦБК и более 120 га – ОАО «Селенгинский ЦКК» [4].

Наиболее опасными для социально-экологического благополучия региона являются накопленные отходы прошлых лет БЦБК, размещенные на южном берегу озера Байкал (расстояние до озера 200 м) и прилегающие к населенным пунктам, например, к поселку Солзан (расстояние до поселка 50 м) с численностью около 800 человек. Ситуация осложнена тем, что район расположения лигнинсодержащих отходов, хранящихся в картах-накопителях (рис. 1), относится к территории, на которой очень высокий риск возникновения селей и землетрясений, что периодически и происходит.



Рис. 1. Космический снимок Солзанской промплощадки БЦБК, на которой расположены карты-накопители № 1–10

Fig. 1. Satellite image of the Solzanskaya industrial site of the BPPM, on which storage cards No. 1–10 are assigned

Таким образом, в случае возникновения опасной ситуации антропогенного (неверный выбор технологии утилизации отходов) или природного (сели, землетрясения) характера может возникнуть угроза целостности дамб карт-накопителей, вследствие чего произойдет крупномасштабная социально-экологическая катастрофа, в результате которой в озеро Байкал необратимо поступит огромное количество токсичных веществ, которое поступило бы в озеро за 700 лет [4, 5], что крайне недопустимо.

Таким образом, проблема решения вопросов утилизации лигнинсодержащих отходов предприятий ЦБП и рекультивации нарушенных земель имеет острую социально-экологическую значимость.

Использование естественных природных процессов для переработки коллоидных лигнинсодержащих осадков

Анализ мировой литературы, посвящённой решению данной проблемы, показал, что в настоящее время практически отсутствует опыт рекультивации площадей, занятых лигнинсодержащими отходами, подобными осадку шлам-лигнина БЦБК. Отсутствие реальных и эффективных предложений по решению проблем утилизации таких отходов связано с их

сложным физико-химическим составом и свойствами, которые затрудняют технологический процесс их переработки (высокая степень гидрофильности и влажности, низкая степень влагоотдачи, инертность по отношению к различным химическим, физическим и бактериологическим воздействиям).

Ранее предлагаемые методы переработки лигнинсодержащих коллоидных осадков, например омоноличивание с использованием известкового связующего [6], утилизация в плазменно-каталитическом реакторе [7], вермикомпостирование калифорнийскими червями [8], фильтрация через геотубы или их захоронение с использованием зол ТЭЦ [9], в настоящее время не были применены на практике [4, 10].

Поэтому в настоящее время для всего Байкальского региона очень остро стоит вопрос выбора такой технологии, которая была бы экологически безопасной, а также позволила в полной мере утилизировать накопленные лигнинсодержащие отходы с ликвидацией экологического ущерба, нанесенного БЦБК объектам окружающей среды в период своей прошлой деятельности. При этом необходимо учитывать принципы наилучших доступных технологий (НДТ) при утилизации отходов прошлых лет и ориентироваться на отечественные технологии.

Как было описано выше, наиболее сложной проблемой, которая служит препятствием для переработки таких многотоннажных лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности, как осадки шлам-лигнина, является их сложный химический состав и коллоидная структура, которая содержит в себе до 70 % коллоидно-связанной влаги. Для ее удаления требуются энергоёмкие и затратные методы, такие как механическая деструкция коллоидной структуры осадков с использованием химических реагентов или сжигания, сопровождающиеся вторичным загрязнением объектов окружающей среды.

Для решения этой проблемы необходимы альтернативные варианты, которые бы позволили переработать большие объёмы отходов с использованием экономически малозатратных технологий. На наш взгляд одним из направлений является использование естественных природных процессов, которые происходят вне зависимости от антропогенного воздействия, например вымораживание в зимний период времени года вследствие отрицательных температур или самозаращение вследствие естественных процессов сукцессии.

Стоит отметить, что одним из наиболее перспективных методов снижения объёмов, влажности и токсичности такого рода отходов, как коллоидные осадки шлам-лигнина карт-накопителей БЦБК, является их вымораживание, которое имеет ряд преимуществ:

- низкие затраты на эксплуатацию и потребление энергии, которые идут на обслуживание оборудования и закупку реагентов по сравнению с другими физико-химическими методами переработки коллоидных осадков;
- возможность переработки осадков шлам-лигнина непосредственно в картах-накопителях;

- отсутствие применения различных веществ, необходимых для обезвоживания (коагулянты, флокулянты), и больших объемов воды, которая необходима для их разведения;
- отсутствие вторичного загрязнения объектов окружающей среды веществами, входящими в состав реагентов;
- полный технологический цикл предполагаемой технологии – 2–3 года.

Сама технология естественного вымораживания основана на кристаллизации воды из гидрофильного коллоидного осадка и золя при их замораживании с коагуляцией лигнинных веществ, образующих крупные устойчивые мицеллы [11]. При этом немаловажным фактом является то, что процесс необратим, так как при замораживании разрушается гидратная оболочка лигнинных веществ с переходом влаги из химически связанного в свободное состояние, в результате чего образуются крупные частицы льда и гидрофобный твердый осадок [12]. При таянии свободная влага легко отделяется от осадка, а сам осадок становится фильтрующим слоем, благодаря чему мелкодисперсные частицы удерживаются внутри его слоя [13]. Важно до полного оттаивания и естественного подсыхания не подвергать осадок механическому воздействию и своевременно отводить образующуюся воду, в противном случае в нее будут переходить мелкодисперсные частицы, которые придется дополнительно отделять от воды [14].

Опытно-промышленные испытания предлагаемой технологии

В 2019–2020 гг. проведены успешные промышленные испытания технологии на Солзанской промплощадке ОАО «Байкальский ЦБК», организованные ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» совместно с МУП «КОС БМО» (г. Байкальск), на осадке карты № 2, который представляет из себя органическую составляющую – шлам-лигнин. В холодный период времени года (февраль 2019 г.) при помощи экскаватора НМК140W-3 был извлечен лигнинсодержащий осадок (объемом более 60 м³) и размещен на площади около 100 м² вблизи карты № 2. Далее проводилось вымораживание извлеченного осадка в естественных условиях [15], при этом средняя температура окружающего воздуха в феврале 2019 г. составила –17 °С. В 2021 г. проведены успешные опытно-промышленные испытания, организованные ФГУП «ФЭО» (Росатом), на осадке карты № 4, который представляет из себя органично-минеральную составляющую – смесь шлам-лигнина и зол ТЭЦ в соотношении 1:1. Отобранные пробы объемом 0,6 куб м были выморожены в морозильном ларе DEXP CF-D150MA/W при температуре –18 °С, что соответствует природным условиям Южного Прибайкалья в зимнем периоде времени года.

Отбор образцов лигнинсодержащих отходов БПБК был выполнен в соответствии с ПНД Ф 12.1:2.2:2.3:3.2-03 «Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления». Для проведения коли-

чественного химического, агрохимического и токсикологического анализа отобранных проб их транспортировали в аккредитованную лабораторию экологического мониторинга природных и техногенных сред ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» РОСС RU.0001.518897. Для определения концентраций металлов в образцах использовали метод атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре AA-7000 (SHIMADZU, Япония) и метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICP-9000 (SHIMADZU, Япония) по аттестованным методикам ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.36-02 «Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля и марганца в почвах, донных отложениях и осадках сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии» и ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой». Для определения концентраций бенз(а)пирена использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе Флюорат-02-Панорама и жидкостном хроматографе Люмахром (Люмэкс, Россия) по методике ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовых долей полициклических ароматических углеводородов в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах производства и потребления методом высокоэффективной жидкостной хроматографии». Класс опасности образцов определялся в аккредитованной лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» согласно [16]. В качестве критерия отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду была выбрана кратность разведения водной вытяжки из отхода, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует. В качестве тест-объектов были выбраны дафнии (*Daphnia magna Straus*) и водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*). Тестирования проводились по методикам ПНД Ф Т 14.1:2:4.12-06 «Токсикологические методы анализа. Методика определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по смертности дафний (*daphnia magna straus*)» и ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-2004 «Токсикологические методы анализа. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*chlorella vulgaris beijer*)». В ходе испытаний анализировалась смертность рачков *Daphnia magna Straus* методом прямого счета их количества в водной вытяжке и фиксировалось снижение численности клеток водорослей *Chlorella vulgaris beijer*, которое зависит от оптической плотности. За окончательный результат принимался класс опасности, выявленный на тест-объекте, проявившем более высокую чувствительность к исследуемому образцу.

Влажность образцов определялась гравиметрическим методом по методике ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.58-08 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли влаги в твердых и жидких отходах производства и потребления, почвах, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом».

В ходе опытно-промышленных испытаний было установлено, что вымораживание коллоидных лигнинсодержащих осадков сопровождается деструкцией их коллоидной структуры, вследствие чего фиксируется разделение осадка на три составляющие: пресная деминерализованная вода – до 25 %; минерализованная вода, содержащая растворенные органические и

неорганические вещества, – до 15 % и вымороженный осадок – до 60 %, который из-за разрушения своей коллоидной структуры переходит из пластичной массы в гранулированное состояние. При этом вымораживание с последующим оттаиванием осадка сопровождается уменьшением его объема на 30–40 %, влажности на 20–60 %, снижением токсичности с третьего (умеренно опасные) в четвертый (малоопасные) и пятый класс (практически неопасные) опасности отходов в зависимости от его состава. Несмотря на то, что вымораживание осадка, состоящего из одного шлам-лигнина, протекает значительно эффективней, предлагаемая технология подходит и для осадка, в состав которого входят золы ТЭЦ.

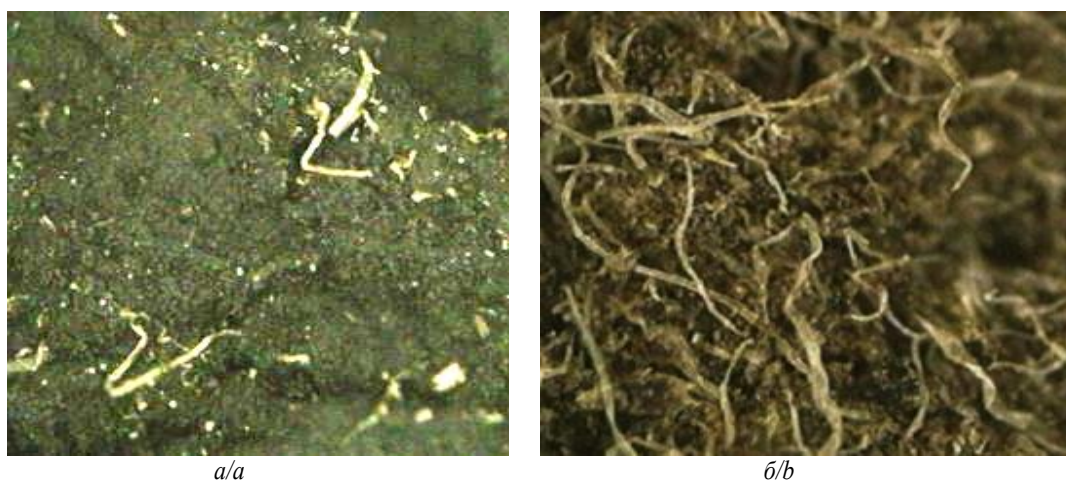


Рис. 2. Лигнинсодержащий осадок до вымораживания (а), после вымораживания и оттаивания (б)
Fig. 2. Sludge-lignin sediment before freezing (a), after freezing and thawing (b)

Как видно из рис. 2, поверхность осадка после вымораживания в значительной степени представлена целлюлозным волокном.

Руководствуясь ГОСТ 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель» и ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия» лигнинсодержащие осадки после вымораживания можно использовать для рекультивации нарушенных земель или выращивания сельскохозяйственной продукции в качестве почвогрунтов или удобрений. Для улучшения агрохимических свойств вымороженных осадков в качестве добавок были выбраны осадки канализационных очистных сооружений (КОС) и золы ТЭЦ г. Байкальска.

Возможность использования отработанного активного ила КОС в качестве добавки определяется его химическим составом, так как он богат питательными для растений веществами – азот, фосфор, калий и различными микроэлементами, такими как медь, цинк, молибден, бор, кальций, железо, магний и марганец [17]. Содержание большого количества органического вещества в отработанном активном иле можно использовать для увеличения емкости катионного обмена. Внесение осадка сточных вод в почву также улучшает ее водоудерживающую способность, пористость и объемную плотность почвы [18].

В состав зол ТЭЦ также входит большое количество полезных для растений микро- и макрокомпонентов, что делает возможным их применение для улучшения агрохимических свойств почв и почвогрунтов в сельском и лесном хозяйстве, а также для рекультивации земель [19, 20]. Характеристики зольного остатка могут регулировать pH в почве для улучшения качества почвы [21].

В таблице приведено сравнение исходных и вымороженных лигнинсодержащих осадков карты-накопителя № 2, 4 и основных предполагаемых добавок (ил КОС, золы ТЭЦ г. Байкальск) с ГОСТ 54534-2011 и ГОСТ Р 54651-2011.

Как видно из таблицы, после вымораживания лигнинсодержащего осадка карт № 2 и 4 снижается и достигает нормативных значений концентрация бенз(а)пирена (в 40 и 13 раз соответственно) – одного из наиболее токсичных его компонентов, а также наблюдается снижение массовой доли влаги на 60 и 23 % соответственно. Все концентрации валовых форм тяжелых металлов в исследуемых образцах, представленных в таблице, соответствуют гигиеническим нормативам, кроме содержаний меди в золе ТЭЦ – превышение по ОДК для суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} более 5,5 в 2,3 раза. По отношению к фоновым значениям средних содержаний тяжелых металлов в Прибайкалье (Байкальский гео-

экологический полигон) [22] в вымороженных лигнинсодержащих осадках наблюдается превышение меди, цинка и ртути в 1,7, 1,8 и 5,2 раз соответственно. При этом вымороженный осадок карт № 2 и 4 соответствует требованиям ГОСТ 54534-2011

«Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель» и ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия».

Таблица. Сравнение исходного и вымороженного осадка карты-накопителя № 4 (смесь золы и шлам-лигнина), № 2 (шлам-лигнин) и добавок с ГОСТ 54534-2011 и ГОСТ Р 54651-2011 по основным токсичным веществам

Table. Comparison of the initial and frozen sediment of storage card no. 4 (ash and lignin sludge mixture), no. 2 (lignin sludge) and additives with SS 54534-2011 and SS R 54651-2011 for the main toxic substances

Показатель, мг/кг Indicator, mg/kg	Осадок/Sediment				Осадок КОС Sludge from sewage treatment plants	Золы ТЭЦ Ash from СНП	Требования/Requirements	
	Исходный Initial		Вымороженный Frozen				ГОСТ 54534-2011 SS 54534-2011	ГОСТ Р 54651-2011 SS R 54651-2011
	Карта/Storage card							
	№ 2	№ 4	№ 2	№ 4				
Бенз(а)пирен Benz(a)pyrene	0,08	0,107	0,002	0,008	0,003	0,07	не нормируется not standardized	0,02
Кадмий Cadmium	0,1	0,3	менее 0,05 less than 0,05	0,4	менее 0,05 less than 0,05	0,12	30	2,0
Медь Copper	62,3	85	54,1	82	72	307	750	132
Никель Nickel	57,1	21,6	35,2	37,0	28	72	400	80
Свинец Lead	8,4	10,4	5,2	8,3	4	28	500	130
Хром Chromium	44,3	53,0	24,4	50,0	16	178	1000	90
Цинк Zinc	66,9	133	61,0	150	112	124	3500	220
Ртуть Mercury	2,4	0,22	1,7	0,59	0,45	0,17	15	2,1
Массовая доля влаги, % Moisture content, %	93,2	81,9	32,6	59,4	72	42	не нормируется not standardized	не более 70 no more than 70
Класс опасности Hazard class	III	IV	V	IV	IV	IV	IV, V	IV

Также были выполнены исследования на физико-механические, ветеринарно-санитарные и гигиенические показатели вымороженных лигнинсодержащих осадков карт № 2 и 4 в лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» с привлечением ФГБУ «Иркутская межобластная ветеринарная лаборатория» № РОСС RU.0001.21ПО9. Все показатели соответствовали ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия» кроме наличия единичной личинки синантропной мухи третьей стадии развития в вымороженном осадке карты № 2. Это может быть связано с естественным внесением личинки в осадок, который не был изолирован от объектов окружающей среды в течение нескольких лет (анализировался лигнинсодержащий осадок карты № 2, вымороженный в 2019 г. и сгуртованный возле карт). В лигнинсодержащем осадке карты № 4 личинки синантропной мухи не были обнаружены, так как проводился его анализ непосредственно после вымораживания и оттаивания.

В случае, если полученный почвогрунт не будет востребован как товарная продукция, возможно его использование при рекультивации промплощадки БЦБК в качестве инертного материала для заполнения карт-накопителей с их дальнейшим самозаращением. Проведенные ранее опытно-промышленные испытания по изучению эффективности применения полученного почвогрунта для интенсификации про-

цессов рекультивационной сукцессии показали, что вымороженный шлам-лигнин подвержен самозаращению в естественных условиях, а при добавлении в состав ила КОС происходит увеличение роста и биомассы растений с увеличением их способности к размножению [23].

Технология получения почвогрунтов из лигнинсодержащих отходов с использованием естественных природных процессов

Можно с уверенностью говорить, что технология интенсификации протекания природных процессов: осушение–вымораживание–самозаращение, является эффективным и рациональным способом для утилизации накопленных коллоидных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» различного состава.

На рис. 3 приведена укрупненная блок-схема предлагаемого технологического процесса интенсификации естественных природных процессов для получения ценной товарной продукции – почвогрунта.

Для начала проведения работ по вымораживанию необходимо удалить с поверхности карт надшламовую (дождевую и талую) воду. В случае наличия льда более 10 см необходимо проведение работ по его удалению с поверхности карт. Технология вымораживания не применима к осадку, находящемуся в карте № 1, занимающему примерно 1/3 объема различными твердыми промышленными отходами, и карты № 12 с ТКО.



Рис. 3. Укрупненная блок-схема предлагаемого технологического процесса
 Fig. 3. Enlarged block diagram of the proposed technological process

Таким образом, процесс вымораживания проводится в зимний период времени при наступлении устойчивых отрицательных температур, ориентировочно в середине ноября. При наличии льда над осадком более 10 см его необходимо удалять ледорубной машиной типа ЛУ-900 и дожидаться промерзания осадка на глубину 10–20 см. После этого проводится механическая уборка снега с поверхности карт вездеходом-амфибией типа Пелец. При промерзании поверхности осадка на глубину 20–30 см для уборки снега может быть использован вездеход типа АРГО. За зимний период времени в районе Южного Прибайкалья в среднем происходит 7–8 сильных снегопадов, с образованием снежного покрова 50 см и более, который необходимо также циклично удалять с поверхности карт.

После наступления положительных температур экскаватор-погрузчик начинает выкапывать траншеи: ширина траншеи 1,5 м, глубина до 2 м, расстояние между траншеями 3 м. В случае низких температур в апреле для ускорения прокладки траншей используется ледорубная машина типа ЛУ-900. Траншеи прокладываются по всей длине карты, с западной стороны прокладывается одна замыкающая траншея с небольшим приямок посередине для откачивания выделившейся воды. На этом первый технологический этап заканчивается.

На втором технологическом этапе в течение всего летнего периода времени образующаяся талая вода и атмосферные осадки отводятся на локальные очистные сооружения, имеющиеся на объекте.

На рис. 4 приведена принципиальная блок-схема выборки и размещения осадка на площадках между траншеями.

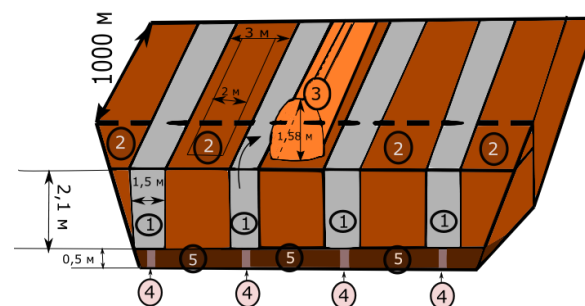


Рис. 4. Принципиальная блок-схема выборки и размещения осадка на площадках между траншеями: ① – траншеи; ② – сектора для складирования осадка, извлеченного из траншей влажностью 95–80 %, ③ – складированный извлеченный из траншеи осадок; ④ – перфорация уплотненного слоя осадка влажностью ~80 %; ⑤ – уплотненный осадок, влажностью ~80 %

Fig. 4. Principal block diagram of the sampling and placement of sediment on the sites between trenches: ① – trenches; ② – sectors for storing sludge extracted from trenches with a moisture content of 95–80 %, ③ – stored sludge removed from trenches; ④ – perforation of compacted sludge layer with ~80 % humidity; ⑤ – compacted sediment, moisture content ~80 %

Стоит отметить, что все компоненты для получения почвогрунтов находятся в непосредственной близости от места расположения Солзанской промплощадки ОАО «Байкальский ЦБК» (0,5–3 км), что делает возможным их транспортировку на место получения почвогрунтов без высоких материальных затрат. При этом возможно использование рекультивированной территории промплощадки БЦБК в хозяйственной деятельности, разрешенной в центральной экологической зоне Байкальской природной территории.

Для защиты грунтовых вод от загрязнения компонентами почвогрунтов их хранят на площадках, имеющих монолитные бетонные покрытия либо имеющих в основании глиняную подушку толщиной не менее 20–25 см. Возможно хранение почвогрунтов в мягких резервуарах временного хранения (5–10 м куб). Транспортирование почвогрунтов будет осуществляться всеми видами транспорта в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта, обеспечивающими сохранность продукции и тары.

Стоит отметить, что для получения дополнительной прибыли от предлагаемой технологии ликвидации накопленных лигнинсодержащих отходов БЦБК можно использовать рекультивированную и освобожденную от отходов территорию для создания спортивно-рекреационных объектов или тепличного хозяйства с реализацией сельскохозяйственной продукции, выращенной на полученном почвогрунте.

При этом предполагается, что стоимость почвогрунтов, получаемых по предлагаемой технологии, будет значительно ниже – 2,5 тыс. р./т, тогда как стоимость удобрения из гидролизного лигнина (Центр по сапропелю) – 4 тыс. р./т, органических удобрений на основе осадков сточных вод (ООО «РУСЛЕС») – 10 тыс. р./т. Технология не содержит дорогостоящего

импортного оборудования, не является энергозатратной, проста в эксплуатации и безотходна.

Заключение

Масштабные опытно-промышленные испытания, проведенные в период с 2019 по 2021 гг., позволили доказать эффективность использования естественных природных процессов для переработки лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности в ценный товарный продукт – почвогрунт. Вымораживание в холодное время года и последующее оттаивание коллоидных лигнинсодержащих осадков в теплое время года приводит к деструкции их коллоидной структуры, что сопровождается уменьшением их объема на 30–40 %, влажности на 20–60 %, а также снижением токсичности с третьего (умеренно опасные) до пятого класса (практически неопасные) опасности отходов в зависимости от их состава. При этом вымороженный осадок соответствует ГОСТ 54534-2011 и ГОСТ Р 54651-2011 и может быть использован в качестве почвогрунта. Таким образом, разработана и прошла опытно-промышленные испытания экологически-безопасная технология утилизации коллоидных лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности, которая основана на использовании таких естественных природных процессов, как осушение, вымораживание и самозаращение, и позволяет не только утилизировать накопленные отходы прошлых лет, но и получить востребованный товарный продукт – почвогрунт, использующийся для рекультивации нарушенных земель или выращивания сельскохозяйственной продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2667.2021.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». – М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. – 1846 с.
2. Российская Федерация. Указы. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года [указ утвержден президентом РФ 19 апр. 2017 г. № 176]. – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 2017. – № 17. – ст. 2546.
3. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: [федер. закон принят Гос. Думой 10 янв. 2002 г.: по состоянию на 31 дек. 2017 г. № 7]. – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 2002. – № 2. – ст. 133.
4. Шатрова А.С. Разработка экологически безопасной технологии переработки накопленных коллоидных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК»: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2018. – 150 с.
5. Шламовые отходы БЦБК могут попасть в Байкал из-за схода селевых потоков с Хамар-Дабана 2012 // Информационное агентство Байкал Инфо. URL: <http://baikal-info.ru/shlamovye-othody-bcbk-mogut-popast-v-baykal-iz-za-shoda-selevyhpotokov-s-hamar-dabana> (дата обращения: 07.08.2019).
6. Технология обезвреживания и рекультивации шлам-лигнина ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» / Б.И. Зельберг, Г.Т. Хорошилов, Л.В. Шеметов, А.Б. Зельберг, А.Л. Астанин, А.В. Верхошин, О.Н. Русак // Вестник МАНЭБ. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 82–85.
7. Пиунова К.Г., Каренин А.Г. Плазменное получение тепловой энергии из сульфатного лигнина // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XII Между-

- народной конференции студентов и молодых ученых. – Томск, 21–24 апреля 2015. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 212–214.
8. Тимофеева С.С. Вермикомпостирование технических отходов и их биологическая активность // Экологическая безопасность Восточно-Сибирского региона: материалы доклада всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск, 2003. – С. 17–21.
9. Способ рекультивации карт-шламонакопителей предприятий по производству беленой сульфатной целлюлозы: пат. Рос. Федерация, № 2012148449/05, заявл. 14.11.2012, опубл. 27.08.2014.
10. Bekker Y.L., Orlova I.I. RAS expertise for assurance of consistency of solutions to applied problems and results of fundamental researches // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Irkutsk, 8–10 September 2020. – P. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012051.
11. Tanaka K., Kimura Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2019. – V. 21. – P. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
12. Parandi E., Pero M., Kiani H. Phase change and crystallization behavior of water in biological systems and innovative freezing processes and methods for evaluating crystallization // Discover Food. – 2022. – № 2. – 6 art. URL: <https://doi.org/10.1007/s44187-021-00004-2> (дата обращения 15.05.2022).
13. Dirksen J., Ring T. Fundamentals of crystallization: kinetic effects on particle size distributions and morphology // Chemical Engineering Science. – 1991. – V. 46 (10). – P. 2389–2427.
14. Zachariassen K.E., Kristiansen E. Ice nucleation and antinucleation in nature // Cryobiology. – 2000. – V. 41 (4). – P. 257–279.

15. Богданов А.В., Федотов К.В., Шатрова А.С. Разработка научно-технических основ для экологически безопасной утилизации накопленных отходов целлюлозно-бумажной промышленности Байкальского региона: монография. – Иркутск: Изд-во: ООО «Глазковская типография», 2020. – 187 с.
16. Российская Федерация. Приказы. Об утверждении порядка подтверждения отнесения отходов I–V классов опасности к конкретному классу опасности [приказ утвержден Министерством природных ресурсов и экологии РФ 08 дек. 2020 г. № 1027]. Официальный интернет-портал правовой информации. 28.12.2020, N 0001202012280022/ URL: www.pravo.gov.ru (дата обращения 15.05.2022).
17. Taylor R., Jones C., Laubscher R. Agricultural fertiliser from brewery effluent – the recovery of nutrients from the biomass of activated sludge and high rate algal pond treatment systems // Water Supply. – 2021. – V. 21 (5). – P. 1939–1952.
18. Review paper on beverage agro-industrial wastewater treatment plant bio-sludge for fertilizer potential in Ethiopia / T. Engida, A. Mekonnen, J. Wu, D. Xu, Z. Wu // Applied Ecology and Environmental Research. – 2020. – V. 18. – P. 33–57.
19. Potential fly-ash utilization in agriculture: a global review / M. Basu, M. Pande, P.B.S. Bhadoria, S.C. Mahapatra // Progress in Natural Science. – 2009. – V. 19. – P. 1173–1186. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.
20. Feasibility analysis of coal combustion residues as fertilizer for agricultural use / R. Kumar, K. Ajit, S. Muniyan, S. Sharma, C. Arora // Research journal of chemistry and environment. – 2021. – V. 24 (4). – P. 35–41.
21. Utilization of bottom ash for degraded soil improvement for sustainable technology / T.P. Nghia, S. Thidphavanh, T. Pimsiri, M. Kreangkrai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 268. – 012043.
22. Геохимия окружающей среды Прибайкалья, Байкальский гео-экологический полигон / В.И. Гребенщикова, Э.Е. Лустенберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2008. – 234 с.
23. Применение почвогрунта из отходов целлюлозно-бумажной промышленности для интенсификации рекультивационной сукцессии нарушенных земель / А.В. Богданов, А.С. Шатрова, Л.Б. Цырендилькова, А.И. Шкрабо // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 12. – С. 24–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-24-29.

Поступила 13.07.2022 г.

Информация об авторах

Шатрова А.С., кандидат технических наук, докторант кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета.

Богданов А.В., доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии Иркутского национального исследовательского технического университета.

Шкрабо А.И., научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета.

Алексеева О.В., инженер муниципального унитарного предприятия «Канализационные очистные сооружения Байкальского муниципального образования».

UDC 676.08

TECHNOLOGY FOR PROCESSING WASTE OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY INTO SOIL GROUND USING NATURAL PROCESSES

Anastasia S. Shatrova¹,
shatrova.irk@gmail.com

Andrey V. Bogdanov¹,
bogdanovav@istu.edu

Anna I. Shkrabo¹,
bogdanov.lab@istu.edu

Olga V. Alekseeva²,
aleksvalia@yandex.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² Sewer treatment facilities of the Baikal municipality,
16, ter. Industrial site, Baikalsk, 665932, Russia.

The relevance. The waste of Baikal Pulp and Paper Mill causes a real danger of a social and environmental disaster for Lake Baikal and the entire Southern Baikal region, therefore, the problem of developing integrated solutions for dumping the accumulation of lignin-containing waste is especially acute. One of the promising areas for processing this type of waste is the use of natural processes, for example, freezing in winter, temperature detection or self-overgrowth of the occurrence of natural succession.

The main aim of the research is to develop an environmentally friendly technology for processing colloidal lignin-containing waste from the pulp and paper industry.

Methods: pilot tests at the Solzan industrial site of Baikal Pulp and Paper Mill for freezing lignin-containing wastes and obtaining soils from them by mixing with additives; performing quantitative chemical analysis using the methods of atomic absorption and atomic emission spectrometry, high performance liquid chromatography, toxicological analysis.

Results. Pilot tests have shown that after freezing, the colloidal structure of lignin-containing sediments is destroyed with a decrease in volume up to 40 %, humidity up to 60 %, and also with a decrease in toxicity – from the third (moderately hazardous) to the fourth (low hazardous) and fifth class (practically non-hazardous) of hazard of the waste depending on its composition. After freezing, the resulting sludge with the introduction of various additives (CHP ash, sewage treatment plant sludge) can be used as soil ground and fertilizers for reclamation of disturbed lands and crops. Thus, an environmentally friendly technology was developed for processing waste from the pulp and paper industry to obtain soil ground, which is low-energy and does not contain expensive imported equipment.

Key words:

Soil ground, waste processing, freezing, pulp and paper industry, Baikal Pulp and Paper Mill, lignin sludge.

This work was supported by the President of the Russian Federation grant No. MK-2667.2021.1.5.

REFERENCES

- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu» [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2019]. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2020. 1846 p.
- Rossiyskaya Federatsiya. Ukazy. O Strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda [Russian Federation. Decrees. On the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation for the period up to 2025. Decree approved by the President of the Russian Federation on April 19. 2017 N 176]. Moscow, Collection of legislation of the Russian Federation, 2017. No. 17, 2546 art.
- Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Ob okhrane okruzhayushchey sredy [Russian Federation. Laws. On environmental protection. Federal law: adopted by the State. Duma 10 Jan. 2002: as of 31 Dec. 2017 N 7]. Moscow, Collection of legislation of the Russian Federation, 2002. No. 2, 133 art.
- Shatrova A.S. *Razrabotka ekologicheskoi bezopasnoy tekhnologii pererabotki nakoplyemykh kolloidnykh osadkov shlam-lignina OAO «Baykalskiy CBK»*. Dis. Kand. nauk [Development of an environmentally safe technology for the processing of accumulated colloidal sediments of sludge-lignin «Baikal Pulp and Paper Mill». Cand. Diss.] Krasnoyarsk, 2018. 150 p.
- Shlamovye otkhody BCBK mogut popast v Baykal iz-za skhoda selevykh potokov s Khamar-Dabana [Sludge waste from BPPM may enter Baikal due to mudflows from Khamar-Daban]. 2012. *Baikal Info News Agency*. Available at: <http://baikal-info.ru/shlamovye-othody-bcbk-mogut-popast-v-baykal-iz-zashoda-selevykh-potokov-s-hamar-dabana> (accessed 8 July 2019).
- Zelberg B.I., Khoroshilov G.T., Shemetov L.V., Zelberg A.B., Astanin A.L., Verhozin A.V., Rusak O.N. Tekhnologiya obezvrezhivaniya i rekultivatsii shlam-lignina OAO «Baykalskiy tsellyulozno-bumazhny kombinat» [Technology of neutralization and reclamation of sludge-lignin JSC «Baikal Pulp and Paper Mill»]. *Vestnik MANE*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 82–85.
- Piunova K.G., Karengin A.G. Plazmennoe poluchenie teplovooy energii iz sulfatnogo lignina [Plasma production of thermal energy from sulfate lignin]. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk. Sbornik nauchnykh trudov XII Mezhduнародnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Prospects for the development of fundamental sciences. Collection of scientific papers of the XII International Conference of Students and Young Scientists]. Tomsk, April 21–24, 2015. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. pp. 212–214.

8. Timofeeva S.S. Vermikompostirovanie tekhnicheskikh otkhodov i ikh biologicheskaya aktivnost [Vermicomposting of technical waste and their biological activity]. *Ekologicheskaya bezopasnost Vostochno-Sibirskogo regiona. Materialy doklada vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological safety of the East Siberian region. Materials of reports all-Russian scientific-practical conference]. Irkutsk, 2003. pp. 17–21.
9. Sutorin A.N., Goncharov A.I., Minaev V.V., Kulikova N.N., Dambinov Y.A. *Sposob rekultivatsii kart-shlamonakopiteley predpriyatiy po proizvodstvu belenoy sulfatnoy tsellyulozy* [Method for reclamation of sludge accumulators of enterprises for the production of bleached sulphate pulp]. Patent RF, no. 2012148449/05, 2014.
10. Bekker Y.L., Orlova I.I. RAS expertise for assurance of consistency of solutions to applied problems and results of fundamental researches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Irkutsk, 8–10 September 2020. Irkutsk, 2021. pp. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012051.
11. Tanaka K., Kimura Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, vol. 21, pp. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
12. Parandi E., Pero M., Kiani H. Phase change and crystallization behavior of water in biological systems and innovative freezing processes and methods for evaluating crystallization. *Discover Food*, 2022, no. 2, 6 art. Available at: <https://doi.org/10.1007/s44187-021-00004-2> (accessed 15 May 2022).
13. Dirksen J., Ring T. Fundamentals of crystallization: kinetic effects on particle size distributions and morphology. *Chemical Engineering Science*, 1991, vol. 46 (10), pp. 2389–2427.
14. Zachariassen K.E., Kristiansen E. Ice nucleation and antinucleation in nature. *Cryobiology*, 2000, vol. 41 (4), pp. 257–279.
15. Bogdanov A.V., Fedotov K.V., Shatrova A.S. *Razrabotka nauchno-tekhnicheskikh osnov dlya ekologicheskoi bezopasnoy utilizatsii nakoplenykh otkhodov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti Baykalskogo regiona*. Monografiya [Development of scientific and technical foundations for environmentally safe disposal of accumulated waste from the pulp and paper industry of the Baikal region. Monograph]. Irkutsk, Glazkov Printing House LLC, 2020. 187 p.
16. Rossiyskaya Federatsiya. Prikazy. Ob utverzhdenii poryadka podtverzheniya otneseniya otkhodov I–V klassov opasnosti k konkretnomu klassu opasnosti [Russian Federation. Orders. On approval of the procedure for confirming the classification of wastes of hazard classes I–V to a specific hazard class. Order approved by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation on 08 Dec. 2020 N 1027]. 12.28.2020, N 0001202012280022. *Official Internet portal of legal information*. Available at: www.pravo.gov.ru (accessed 15 May 2022).
17. Taylor R., Jones S., Laubscher R. Agricultural fertiliser from brewery effluent – the recovery of nutrients from the biomass of activated sludge and high rate algal pond treatment systems. *Water Supply*, 2021, vol. 21 (5), pp. 1939–1952.
18. Engida T., Mekonnen A., Wu J., Xu D., Wu Z. Review paper on beverage agro-industrial wastewater treatment plant bio-sludge for fertilizer potential in Ethiopia. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, vol. 18, pp. 33–57.
19. Basu M., Pande M., Bhadoria P.B.S., Mahapatra S.C. Potential fly-ash utilization in agriculture: a global review. *Progress in Natural Science*, 2009, vol. 19, pp. 1173–1186. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.
20. Kumar R., Ajit K., Muniyan S., Sharma S., Arora C. Feasibility analysis of coal combustion residues as fertilizer for agricultural use. *Research journal of chemistry and environment*, 2021, vol. 24 (4), pp. 35–41.
21. Nghia T.P., Thidphavanh S., Pimsiri T., Kreangkrai M. Utilization of bottom ash for degraded soil improvement for sustainable technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 268, 012043.
22. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy Pribaykalya, Baykalskiy geokologicheskii poligon* [Geochemistry of the environment of the Baikal region, Baikal geoeological polygon]. Novosibirsk, GEO Academic Publ. house, 2008. 234 p.
23. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Tsyrendylykova L.B., Shkrabo A.I. Use of soil from the waste of the pulp and paper industry for the intensification of reclamation succession of disturbed lands. *Ecology and Industry of Russia*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 24–29. In Rus. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-24-29.

Received: 13 July 2022.

Information about the authors

Anastasia S. Shatrova, Cand. Sc., research assistant, Irkutsk National Research Technical University.

Andrey V. Bogdanov, Dr. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Anna I. Shkrabo, research assistant, Irkutsk National Research Technical University.

Olga V. Alekseeva, engineer, Sewer treatment facilities of the Baikal municipality.