

На правах рукописи



Буренков Сергей Владимирович

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ИЛОВЫХ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ
ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Грачев Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: **Богданович Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств;
Тимофеева Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, Институт энергетики и перспективных технологий федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник лаборатории «Энергетические системы и технологии».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «16» мая 2023 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г.Казань, К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=455120>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиятдинова
Диляра Фарилловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Целлюлозно-бумажная промышленность относится к наиболее проблемной отрасли народного хозяйства в плане экологии. Одной из её наиболее значимых экологических проблем является образование большого количества сточных вод. Вода применяется на большинстве стадий технологического процесса целлюлозно-бумажного производства. На производство одной тонны продукции расходуется до 90 м³ воды. Например, с Братского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) ежегодно вывозятся для депонирования на иловых полях до 100 тыс. тонн иловых осадков. Они занимают площадь около 140 гектар. Утилизация осадков сточных вод, в частности осадка ЦБК, вызывает серьезную обеспокоенность по нескольким причинам. Во-первых, происходит постоянное увеличение объёмов данных отходов. Во-вторых, большинство загрязняющих веществ (тяжелых металлов и др.), удаляемых в процессе дезактивации, вновь появляется в осадке сточных вод и, следовательно, становятся более концентрированными. Работать с данным отходом очень сложно, и любое его применение в том или ином виде приводит к побочному загрязнению. Соответственно, традиционные методы утилизации, такие, как захоронение, применение в сельском хозяйстве в качестве удобрения и сжигание не полностью устраняют риск загрязнения. Несмотря на законодательные ограничения, интенсивное использование осадков сточных вод в сельском хозяйстве приводит к увеличению концентрации тяжелых металлов в почвах. Утилизация путем захоронения на иловых картах требует много места, и почва должна быть изолирована, чтобы предотвратить вымывание вредных соединений. Наконец, попытки сжигания иловых осадков на корьевых котлах показали его неэффективность из-за невысокой степени возможного добавления осадка к коро-древесным отходам.

В связи с проблемами применения традиционных методов используются альтернативные технологии, базирующиеся на термохимических методах переработки (жидкофазное окисление, газификация, пиролиз). При аналитическом обзоре было определено, что у данных методов существуют свои недостатки. Недостатком технологии жидкофазного окисления является применение высокого давления и невозможность достижения полного окисления осадка. Использование метода газификации позволяет получить из иловых осадков тепловую и электрическую энергию, однако при этом осуществляется эмиссия в атмосферу оксидов серы и оксидов азота.

Процесс пиролиза осадка сточных вод был определен как один из наиболее перспективных термохимических методов. В процессе пиролиза существенно уменьшается объём твердого остатка. Тяжелые металлы, содержащиеся в нём, за счёт углеродистой матрицы устойчивы к естественному выщелачиванию. Также в результате образуются продукты

(жидкость и газ) с высокой энергетической ценностью, которые могут быть использованы в качестве потенциального топлива. Также существенным плюсом технологии пиролиза является то, что данный процесс – низкотемпературный, а это снижает количество загрязняющих веществ, выделяемых в атмосферу.

Однако существует ряд проблем, связанных с применением методов термохимической конверсии иловых осадков. Методы недостаточно развиты как на исследовательском, так и на промышленном уровне. Соответственно, исследование и разработка аппаратного оформления процесса термохимической конверсии илового осадка сточных вод ЦБК является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

Вопросом термохимической переработки иловых осадков сточных вод занимаются учёные Института катализа им. Г.К. Борескова во главе с профессором В.А. Яковлевым, также в данном направлении ведётся работа учёными Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова во главе с профессором Н.И. Богдановичем, однако все эти исследования не позволяют в полной мере оценить эффективность низкотемпературного пиролиза иловых осадков сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов.

Цели и задачи исследования

Цель работы состоит в исследовании совокупности процессов переработки иловых осадков сточных вод термохимическим методом. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать физико-химические свойства иловых осадков сточных вод ЦБК;
2. Идентифицировать физико-химическую картину совокупности процессов сушки и термического разложения иловых осадков сточных вод.
3. Разработать математическую модель процесса термического разложения иловых осадков сточных вод;
4. Провести исследования процесса термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК;
5. Определить области применения продуктов пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК;
6. Разработать схему аппаратного оформления процесса термохимической переработки иловых осадков сточных вод и их сушки;
7. Разработать требования и рекомендации для запуска промышленного оборудования по переработке иловых осадков сточных вод ЦБК.

Научная новизна

1. Идентифицированы термокинетические характеристики пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК; установлено, что энергия активации в уравнении формальной химической кинетики составляет 126,6 кДж/моль,

порядок реакции 6,3.

2. Разработана математическая модель процесса пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК.

3. Определен материальный баланс процесса пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК: выход угля 30 – 40 %, выход газа 15 – 20 %, выход жидкости 40 – 55 % в зависимости от скорости нагрева.

4. Охарактеризованы физико-химические свойства продуктов пиролиза иловых осадков сточных вод и установлен фракционный состав жидких продуктов пиролиза иловых осадков (бензиновая фракция – 21 %, дизельная фракция – 56 %).

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследования сушки и термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК и математическое описание данного процесса позволяют определить скорость термического разложения в зависимости от режимных параметров процесса.

Разработан экспериментальный стенд для сушки иловых осадков сточных вод ЦБК. Определены характеристики процесса их сушки. Разработана схема переработки иловых осадков сточных вод, включающая сушку и термическое разложение.

Методология и методы исследования

В работе использованы физико-химические методы анализа, в том числе: рентгенофлуоресцентная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, совмещенная термогравиметрия, дифференциальная термогравиметрия, дифференциально-сканирующая калориметрия, газовая хромато-масс-спектрометрия. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Mathcad.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчета материального и теплового баланса сушки и термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК.

2. Зависимость выхода продуктов термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК от скорости нагрева.

3. Математическая модель термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК.

4. Результаты математического и физического моделирования процесса термического разложения иловых осадков сточных вод.

5. Схема промышленной установки термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: VII международная конференция «Физикохимия растительных полимеров» (г. Архангельск, 2017); EUBCE 2019 – 27-я Европейская конференция и выставка по биомассе (Лиссабон,

2019); 5-я международная конференция «Катализ для возобновляемых ресурсов: топливо, энергия, химические продукты» CRS-5 (Крит, Греция, 2020).

Публикации

По материалам диссертации автором опубликовано 14 печатных работ, из них 2 статьи, входящие в перечень научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в рецензируемых журналах наукометрической базы данных Scopus и Web of Science, 7 работ – в других изданиях и материалах конференций, а также 3 патента на изобретение.

Личное участие автора заключается в разработке основных идей диссертации, в постановке и решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера. При непосредственном участии автора были проведены исследования термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК, разработан экспериментальный стенд сушки иловых осадков сточных вод, разработана промышленная установка термической переработки иловых осадков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Результаты исследований, выносимые на защиту, относятся к следующему пункту паспорта специальности 4.3.4 Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 4 Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах.

Достоверность результатов исследований подтверждается их воспроизводимостью и корреляцией экспериментальных данных, полученных с применением независимых взаимодополняющих методов, а также их согласованностью с известными ранее опубликованными данными.

Объём и структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 172 страницах машинописного текста и включает 75 рисунков, 22 таблицы и 10 приложений. Библиографический список включает 109 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

Благодарности

Автор выражает благодарность и признательность научному консультанту к.т.н., доценту Макарову А.А.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследований, представлены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён анализ современного состояния техники и технологии в области переработки иловых осадков. Определены основные проблемы переработки иловых осадков сточных вод. Рассмотрен и проанализирован мировой опыт переработки и утилизации иловых осадков сточных вод. В результате анализа сделан вывод о необходимости поиска путей переработки иловых осадков сточных вод методом пиролиза. Проведён анализ существующих технологий быстрого пиролиза, потенциально применимых для данной цепи. Проведённый анализ подтверждает вывод об актуальности и быстром развитии технологий термической переработки иловых осадков сточных вод методом пиролиза. Однако для промышленной реализации технологии термохимической переработки иловых осадков сточных вод необходимы более глубокие исследования совокупности процессов сушки и термической переработки иловых осадков.

Во второй главе представлены результаты исследований физико-химических свойств объекта исследования и продуктов его термической переработки, описаны экспериментальные стенды для исследования процесса пиролиза иловых осадков с кондуктивным и кондуктивным подводом тепла, приведены методики проведения и анализа результатов исследований, также описан экспериментальный стенд сушки иловых осадков.

В табл. 1 представлены физико-химические свойства твёрдых продуктов пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК.

Таблица 1 – Физические свойства твердых продуктов пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК

Параметр	Углистый остаток пиролиза иловых осадков ЦБК
Зольность, %	50,9
Содержание летучих, %	15,2
Нелетучий углерод, %	33,9
Высшая теплота сгорания, кДж/кг	21405

На рис. 1 представлены схемы экспериментальных стендов для изучения процесса пиролиза с кондуктивным и кондуктивным подводом тепла.

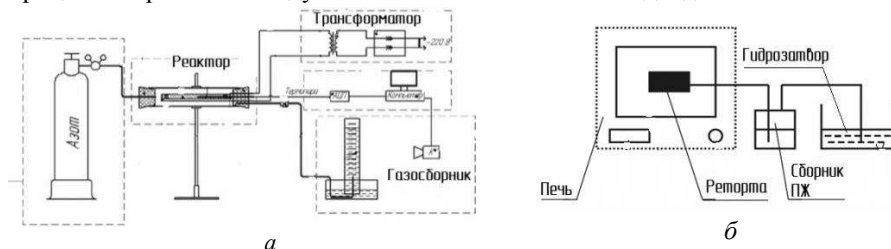


Рисунок 1 – Стенды для исследования процесса пиролиза с кондуктивным (а) и с кондуктивным (б) подводом тепла

В результате исследования пиролиза иловых осадков были получены данные о материальном балансе процесса: выход угля 32 – 40 %, выход жидкости 42 – 48 %, выход газа 16 – 24 % в зависимости от скорости нагрева. Определены эмпирические зависимости выхода конечных продуктов при различных условиях ведения процесса.

Был разработан экспериментальный стенд (рис. 2) для исследования процесса сушки иловых осадков. В результате исследований на стенде были получены температурные кривые сушки. Установлено, что продолжительность сушки илового осадка превышает в 1,5 раза продолжительность сушки целлюлозного волокна.

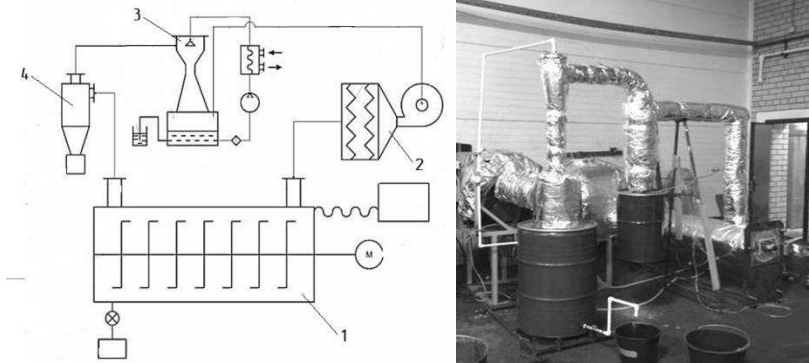


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования процесса сушки иловых осадков сточных вод: 1 – корпус сушилки; 2 – теплообменник; 3 – скруббер Вентури; 4 – циклон

Для оценки кинетических характеристик процесса пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК было проведено исследование методом синхронного термического анализа (рис. 3, 4).

Процесс термического разложения можно представить в виде трех основных стадий: сушка (до 200 °С), термическое разложение (200 – 600 °С), прокалка углистого остатка (> 600 °С). Для оценки кинетических характеристик процесса термического разложения иловых осадков была проведена обработка данных, полученных при термическом анализе с применением метода наименьших квадратов и подбора вида уравнения формальной химической кинетики. Экспериментальные кривые термического разложения илового осадка при разной скорости нагрева (5, 10 и 15 К/мин) были обработаны с вычленением интересующего диапазона термического разложения и исключением участков сушки и высокотемпературной прокалки в диапазоне температур 200 – 650 °С. После приведения данных к безразмерной концентрации определялся тип уравнения, обеспечивающий наилучшее приближение экспериментальных

данных с целью идентификации кинетических характеристик термического разложения (см. уравн. 1): энергии активации, предэкспоненциального множителя, порядка реакции.

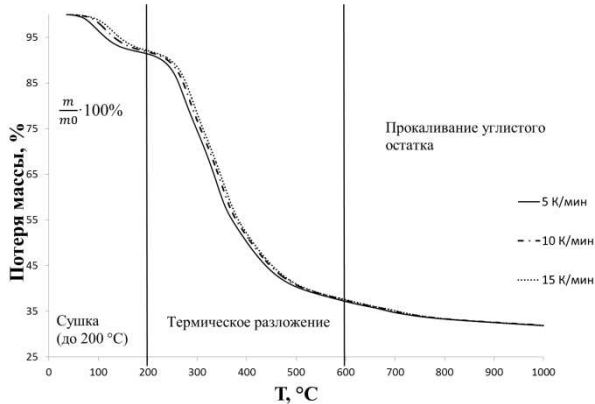


Рисунок 3 – Зависимость потери массы при термическом разложении иловых осадков сточных вод ЦБК: 5 – 5 К/мин, 10 – 10 К/мин, 15 – 15 К/мин

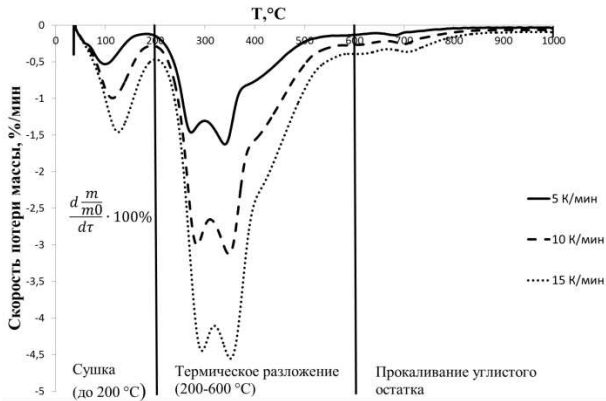


Рисунок 4 – Скорость изменения массы при термическом разложении иловых осадков сточных вод ЦБК: 5 – 5 К/мин, 10 – 10 К/мин, 15 – 15 К/мин

Получены результаты физико-химического анализа продуктов пиролиза иловых осадков сточных вод ЦБК. Получены данные о минеральном составе углистого остатка, качественные и количественные свойства жидких и газообразных продуктов пиролиза.

В третьей главе проведён анализ процессов, протекающих при термическом разложении иловых осадков сточных вод ЦБК. Представлена математическая модель процесса термического разложения иловых осадков сточных вод, её описание, приведены результаты математического

моделирования процесса.

Согласно разработанной математической модели изменение температуры локального объема в ходе процесса можно описать с помощью уравнения нелинейной теплопроводности:

$$\sum \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{X^{\Gamma}} \frac{\partial}{\partial x} \left(X^{\Gamma} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_p. \quad (1)$$

При этом изменение безразмерной концентрации для локального объема запишется в виде полученного выражения формальной химической кинетики:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -1,652 * 10^9 * \exp \left(\frac{-126600}{RT} \right) * C^{6.316}. \quad (2)$$

Суммарный поток парогазовой смеси с поверхности пиролизуемой частицы определялся интегральным соотношением:

$$J = \frac{\partial m_{\text{ч}}}{\partial \tau * F_{\text{ч}}} = \frac{2}{f_{\text{ч}} l} * \int_0^l \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \partial x. \quad (3)$$

Теплофизические характеристики в выражении (1), предполагая линейную интерполяцию, можно определить соответствующими выражениями в зависимости от безразмерной концентрации (2) для локального объема. Источниковый член в уравнении (1) определялся экспериментальной функцией по результатам дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК).

Начальные условия системы при $\tau = 0$ записывались в виде выражений:

$$\rho(0, x) = \rho_{\text{ил}}^0; \quad (4)$$

$$T(0, x) = T_0; \quad (5)$$

$$C(0, x) = 0; \quad (6)$$

$$\rho_{\text{уг}}(0, x) = \rho_{\text{г}}(0, x) = \rho_{\text{пгс}}(0, x) = 0. \quad (7)$$

Граничные условия симметрии для центра частицы при $x = l$, исходя из принятых допущений, запишутся в виде:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_l = 0. \quad (8)$$

Граничные условия на поверхности частицы были сформулированы исходя из конструктивных особенностей аппаратного оформления реактора пиролиза для кондуктивного нагрева:

$$T|_0 = T_{\text{ср}}. \quad (9)$$

На стадии математического моделирования процесса термического разложения илового осадка сточных вод ЦБК была поставлена задача проверки адекватности математической модели реальному процессу и выявления закономерностей влияния физических факторов на ход процесса.

Моделирование полученного уравнения формальной химической кинетики осуществлялось численным методом с использованием метода Рунге-Кутты в идентичных экспериментальных условиях.

На рис. 5 представлена графическая зависимость изменения безразмерной концентрации в процессе нагрева с различными линейными скоростями нагрева. Точками представлены экспериментальные данные, полученными в ходе синхронного термического анализа (STA), линиями приведены расчетные значения. Максимальное количественное расхождение расчетных и экспериментальных данных по концентрации в области термического разложения 200 – 600 °С составляет не более 14 %.

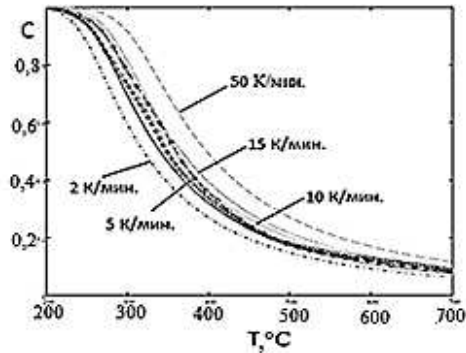
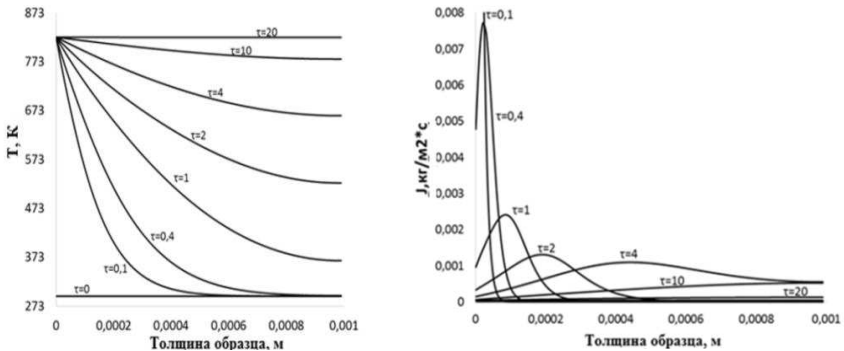


Рисунок 5 – Результаты моделирования кинетики термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК

На рис. 6 (а,б) представлены данные моделирования термического разложения частицы илового осадка с характерным размером 2 мм при температуре на границе 823 К в виде графических распределений температуры T и потока J в различные моменты времени.



а

б

Рисунок 6 – Распределение температуры T (а) и потока J (б) в различные моменты времени

Также существенное влияние на процесс термического разложения илового осадка оказывает размер частицы (рис. 7 а,б). С целью оценки данного влияния аналогичным образом были получены зависимости средней температуры и потока для частиц размером 2, 5, 10 мм. Моделирование осуществлялось при характерной температуре 823 К.

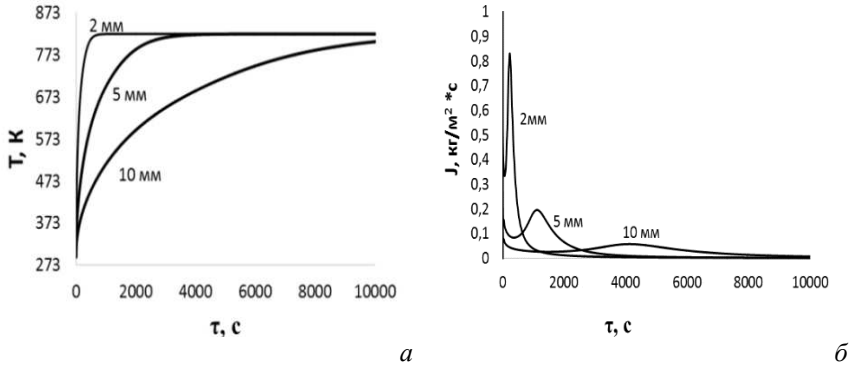


Рисунок 7 – Распределение температуры T (а) и потока J (б) в зависимости от размера частицы

В результате моделирования были получены расчётные данные о зависимости баланса термической переработки иловых осадков сточных вод от влажности при зольности 30 % для различных вариантов реализации процесса (см. рис. 8). Как видно из зависимостей, тепловой баланс остается положительным при сжигании всех продуктов до влажности 80 %, при использовании угля как товарного продукта – до влажности 72 %, при использовании в качестве продукта пиролизной жидкости – до влажности 65 %. Вариант, когда в качестве продукта выводятся уголь и жидкие продукты, не устойчив во всем рассматриваемом диапазоне.

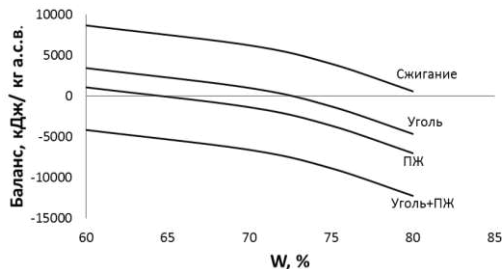


Рисунок 8 – Зависимость результирующего баланса в зависимости от влажности при зольности 30 % для различных вариантов реализации процесса

В четвертой главе представлены результаты промышленной реализации технологии переработки иловых осадков сточных вод ЦБК, приведены результаты промышленных испытаний, произведена оценка газовых выбросов и областей применения продуктов термической переработки, а также проведен технико-экономический анализ термической переработки илового осадка сточных вод ЦБК разработанным методом.

На рис. 9 представлена схема комплекса FPP02, а на рис. 10 представлен общий вид пиролизного блока комплекса (FPP02).

В результате промышленных запусков была получена опытная партия жидких и твердых продуктов пиролиза и определены основные области их возможного применения.

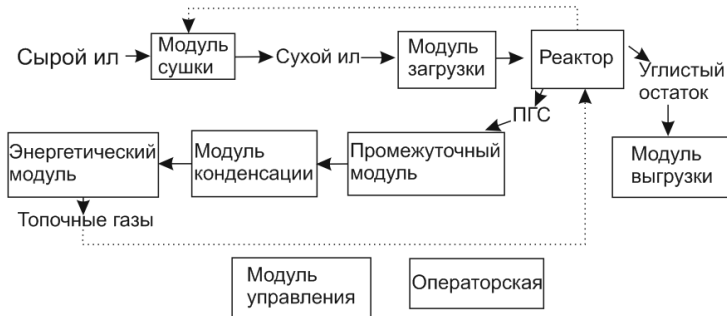


Рисунок 9 – Принципиальная схема комплекса FPP02



Рисунок 10 – Внешний вид блока пиролиза FPP02

Жидкие продукты пиролиза совместимы с нефтепродуктами. Соответственно, основными направлениями их возможного применения являются: топливо для сжигания в жидкотопливных котлах; топливо для генерации электрической энергии на тихоходных дизельных установках; сырьё для нефтеперерабатывающих производств.

На основании проведённых исследований было определено, что углистый остаток относится к 5-му классу опасности. Свойства поверхности углистого

остатка позволяют использовать его в качестве технического сорбента, наполнителя в стройматериалы, а также как грунт-рекультивант для свалок твёрдых бытовых отходов и детоксикации почв.

В приложении представлены результаты анализов элементного состава минеральной части иловых осадков сточных вод ЦБК, результаты анализа иловых осадков сточных вод методом ИК-спектроскопии, результаты термического анализа исходного ила и продуктов термического разложения иловых осадков сточных вод, результаты анализа химического состава жидких и газообразных продуктов термического разложения иловых осадков сточных вод, протокол газовых выбросов промышленного оборудования при переработке иловых осадков методом пиролиза, протокол определения класса опасности углистого остатка, акт о принятии к внедрению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам литературного обзора идентифицирована физико-химическая картина совокупности процессов сушки и термического разложения иловых осадков сточных вод.

2. Исследованы физико-химические свойства иловых осадков сточных вод ЦБК, идентифицированы термокинетические характеристики процесса термического разложения иловых осадков.

3. Разработана математическая модель процесса термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК. Решение математической модели позволило выявить влияние температуры, размера частиц и свойств сырья на протекание процесса термического разложения.

4. Проведены эксперименты по термическому разложению иловых осадков, получены данные по материальному балансу процесса.

5. Получены образцы продуктов термического разложения иловых осадков сточных вод ЦБК, определены их свойства и пути применения в промышленности.

6. Проведены расчеты и проектирование промышленного оборудования для сушки и пиролиза иловых осадков.

7. Изготовлена и апробирована промышленная установка производительностью 350 кг/час (при влажности 75 %).

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

По результатам исследования термохимическая переработка методом пиролиза показала себя как перспективный метод утилизации иловых осадков ЦБК с соблюдением экологических норм наилучших доступных технологий и экономических параметров. Перспективы применения результатов исследования на практике состоят в дальнейшем масштабировании технологии и более глубоком изучении свойств иловых осадков и продуктов их переработки, а также моделировании совокупных процессов сушки и пиролиза.

Сокращения: ЦБК – целлюлозно-бумажный комбинат, ГХ-МС – газовая хромато-масс-спектрометрия, ТБО – твердые бытовые отходы, ДСК – дифференциально сканирующая калориметрия.

Основные обозначения: ρ – текущая концентрация, $\text{м}^3/\text{кг}$; λ – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; c – коэффициент теплоёмкости, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; m – масса, кг ; C – безразмерная концентрация; J – удельный массовый поток, $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$; τ – время, с ; T – температура, К ; X – выход продукта, $\text{кг}/\text{кг}$ (%); Q – количество теплоты, кДж ; F – площадь, м^2 ; f – удельная площадь, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Индексы: г – газ; ч – частица; уг – уголь; пгс – паро-газовая смесь.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Караева, Ю.В. Экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости свиного навоза / Ю.В. Караева, И.А. Трахунова, А.З. Миндубаев, Д.Е. Белостоцкий, С.Т. Минзанова, С.А. Пушкин, **С.В. Буренков** // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №16. – С. 169-171.

2. Грачев, А.Н. Исследование кислотных свойств пиролизной жидкости / А.Н. Грачев, С.А. Забелкин, **С.В. Буренков**, В.Н. Башкиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №2. – С. 169-171.

Труды в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

3. Grachev, A. Pyrolysis of Fresh and Deposited Sewage Sludge and Investigation of the Products / A. Grachev, S. Zabelkin, **S. Burenkov**, G. Bikbulatova, A. Makarov, S. Pushkin, I. Zemskov // Waste and Biomass Valorization. – 2019. – Vol.10. – №4. – P. 967-973.

4. Zabelkin, S. Modification of bitumen binder by the liquid products of wood fast pyrolysis / S. Zabelkin, G. Bikbulatova, A. Grachev, V. Bashkirov, **S. Burenkov**, A. Makarov // Road materials and pavement design. – 2019. – Vol. 20. – № 5. – P. 1182-1200.

Патенты:

5. Патент WO/2017/209638, PCT/RU2016/00032 Способ и установка термомеханической конверсии органосодержащего сырья / Грачев А.Н., Башкиров В.Н., Забелкин С.А., Макаров А.А., Пушкин С.А., Бикбулатова Г.М., Земсков И.Г., **Буренков С.В.** – 2017.

6. Патент WO/2019/078751, PCT/RU2017/000763 Самоочищаемый динамический шнек / Грачев А.Н., Башкиров В.Н., Забелкин С.А., Макаров А.А., Бикбулатова Г.М., Земсков И.Г., **Буренков С.В.**, Яковлева А.Е., Самирханова А.Р. – 2019.

7. Патент № 212016000279 Anlage der thermochemischen Umwandlung von

organhaltigen Rohstoffen / Грачев А.Н., Забелкин С.А., Макаров А.А., **Буренков С.В.**, Бикбулатова Г.М., Башкиров В.Н., Пушкин С.А., Земсков И.Г. – 2019.

Труды в прочих изданиях:

8. Буренков, С.В. Этерификация жидких продуктов быстрого пиролиза древесины с этанолом на ионообменной смоле ку-2-8 / С.В. Буренков, А.Н. Грачёв, С.А. Забелкин // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №21. – С. 49-52.

9. Буренков, С.В. Термическая утилизация иловых осадков сточных вод методом быстрого пиролиза в сеточном реакторе / С.В. Буренков, А.Н. Грачев, С.А. Забелкин // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №22. – С. 40-43.

10. Буренков, С.В. Улучшение свойств жидкого топлива, полученного из отходов древесины / С.В. Буренков, А.Н. Грачёв, С.А. Забелкин // Материалы IX международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии». – Нижнекамск. – 2016. – С.216.

11. Буренков, С.В. Переработка иловых осадков сточных вод методом термического разложения / С.В. Буренков // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Новые материалы, химические технологии и реагенты для промышленности, медицины и сельского хозяйства на основе нефтехимического и возобновляемого сырья». – 2017. – С. 34-41.

12. Буренков, С.В. Исследование процесса пиролиза иловых осадков сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов / С.В. Буренков // Сборник статей «Жить в 21 веке». – 2019. – С. 358-359.

13. Буренков, С.В. Исследование свойств иловых осадков целлюлозно-бумажного комбината / С.В. Буренков, А.Н. Грачёв, В.Н. Башкиров, С.А. Пушкин, А.Р. Валеева, Г.М. Бикбулатова, С.А. Забелкин // Материалы 83-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов «Технология органических веществ». – 2019. – С. 84.

14. Grachev, A.N. A fast ablative pyrolysis plant for biomass processing into biochar and biooil / A.N. Grachev, V.N. Bashkirov, S.A. Zabelkin, A.A. Makarov, S.A. Pushkin, **S.V. Burenkov**, I.G. Zemskov, A.Ye. Yakovleva, G.M. Bikbulatova // Conference Catalysis for renewable sources: fuel, energy, chemicals CRS-5 Agios Nikolaos, Crete, Greece. – 2019. – P. 63-64.