



ВЫСШАЯ
ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ



ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В РАЗВИТИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ОТРАСЛИ И ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

**МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ ОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПРИУРОЧЕННОЙ К 95-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ
КОНДОПОЖСКОГО ЦБК**

Научное издание



**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики

МАТЕРИАЛЫ
Всероссийской отраслевой
научно-практической конференции
«Инновационные решения в развитии
целлюлозно-бумажной отрасли
и лесопромышленного комплекса»,
приуроченной к 95-летию юбилею
Кондопожского ЦБК

Научное издание
2024

*Под общей редакцией заведующего кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
кандидата технических наук, доцента
Д. А. Ковалёва*

Санкт-Петербург
2024

УДК 676
ББК 35.77
М 341

Редакционная коллегия:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств

Д. А. Ковалёв (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики);

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных
систем и технологий

М. Р. Вагизов (Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С. М. Кирова);

кандидат технических наук, доцент, директор учебно-научного центра
«Научно-исследовательская лаборатория биоразлагаемых материалов»

А. В. Бахтин (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики)

М 341 Материалы Всероссийской отраслевой научно-практической конференции
«Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и
лесопромышленного комплекса» / Минобрнауки РФ; ФГБОУ ВО
СПбГУПТД; под общ. ред. Д. А. Ковалёва. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД,
2024. — 232 с.

ISBN 978-5-91646-423-8

В настоящем сборнике представлены материалы Всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса», состоявшейся 15-16 октября 2024 года в г. Кондопога.

Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными исследованиями и разработками, специалистов целлюлозно-бумажной отрасли, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов учебных заведений, а также всех, проявляющих интерес к рассматриваемой проблематике, с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Материалы представлены в авторской редакции. Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Организаторы конференции не несут ответственности перед авторами и/или третьими лицами за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи.

Материалы конференции размещены в научной электронной библиотеке elibrary.ru и зарегистрированы в наукометрической базе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования).

УДК 676
ББК 35.77

ISBN 978-5-91646-423-8

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024
© Коллектив авторов, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ЭКОЛОГИЯ

- Графов К. А., Пархомчук А. А., науч. рук. Графова Е. О.**
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ЦБК 6
- Епифанов А. В., Епифанова М. А., Прохорова А. А.**
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КРАТНОСТИ РАЗБАВЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД.. 13
- Мозгушин М. А., Анурин Е. К., науч. рук. Епифанов А. В.**
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ESG-РЕЙТИНГА
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ КОМБИНАТОВ..... 21
- Черкасова А. В., науч. рук. Смирнова А. И., Дягилева А. Б.**
ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПОСЛЕ
СЖИГАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ 30

Раздел 2. ТЕХНОЛОГИЯ

- Анищенко Л. С., Ковалёв Д. А.**
МАГНИЙ-РЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ КОТЕЛ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА..... 36
- Бердник О. Г., Зеленцов М. Д.**
О ВОЗМОЖНОСТИ ИННОВАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СУЛЬФИТНОЙ
ВАРКИ НА КРУПНОТОННАЖНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ
ПРОИЗВОДСТВАХ 42
- Иванчина Е. А., Чудинов А. С., Кучеров В. В.**
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНО-СУЛЬФИТНОГО СПОСОБА
ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА НА НАТРИЕВОМ
ОСНОВАНИИ..... 49
- Иванов С. С., Иванов М. С., науч. рук. Ковалёв Д. А.**
АКТУАЛЬНОСТЬ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ 57
- Кокушин Н. Н., Кауров П. В., Ключкин И. В.**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ В ЗОНАХ
ФОРМОВАНИЯ СЕТОЧНЫХ СТОЛОВ ДЛЯ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И МОДЕРНИЗАЦИИ 66

**Обухова И. А., Пименов С. Д., Лобок И. Д., Сиклицкий В. И.,
Трапезникова И. Н., Атаманов И. В.**
ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СВЯЗЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ
ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ И ЭВКАЛИПТА 75

Толстов А. В., Зеленцов М. Д.
АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА И ПРОМЫВКА ДЛЯ ВЫСОКОГО
ВЫХОДА СУЛЬФИТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА КРУПНОТОННАЖНОМ
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 81

Шахаев П. Н.
ПРОИЗВОДСТВО ДВУХСЛОЙНОГО КАРТОНА
НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ № 7 90

Раздел 3. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА

Заяц А. М.
СМАРТ-КОНТРАКТЫ В ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ 98

Карасев Ю. А., Дьяченко В. М., Марков В. А.
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ
ТЕХНИКИ В ЛЕСАХ КРИОЛИТОЗОНЫ..... 103

**Кузьмин Р. С., Туманян М. М., Лева Д. С., Семенов Р. А., Кемпи Е. А.,
Алексеев И. В., науч. рук. Рего Г. Э.**
МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИИ МЕСТ РУБОК 108

Раздел 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Андреев А. В., науч. рук. Душин С. Е.
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
СТОЧНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИИ «ИДАВАНГ АГРО» 122

Анисимова М. Д., науч. рук. Суриков В. Н.
О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕСОМ БУМАЖНОГО
ПОЛОТНА В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ 135

**Благодарный Н. С., Борко В. В., Иванов О. О., Кривов М. В., Колмогоров
А. Г., Кобозев В. Ю.**
КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ МАШИНИСТОВ ПАРОВЫХ
КОТЛОВ 144

Иванов М. С., Иванов С. С., Ковалёв Д. А. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМ АСУТП ПРИ СЖИГАНИИ ОБЕЗВОЖЕННОГО ОСАДКА С БИОЛОГИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО- БУМАЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	160
Ковалёв Д. А., Прылипко Е. С., Русинов Л. А. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА	167
Кузина Е. И., науч. рук. Кузин П. И. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ.....	181
Марковчин К. В., Гугин М. В., Ковалёв Е. Н. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОМОЩНОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И УСТРОЙСТВОМ СНЭ	188
Мерзлая Д. М., науч. рук. Кундюков О. А. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	200
Оробинский А. М. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ	209
Протченко О. В., науч. рук. Иванов В. Л. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ.....	215
Хабаров С. П. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛОБАЛЬНОГО ОБНОВЛЕНИЯ ФЕРОМОНОВ В АЛГОРИТМАХ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ	220

Раздел 1. ЭКОЛОГИЯ

УДК 620.98

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ЦБК

магистрант **Графов Константин Александрович**,
ст. преподаватель **Пархомчук Алексей Александрович**,
науч. руководитель: доктор техн. наук, профессор **Графова Елена Олеговна**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,
Петрозаводский государственный университет,
г. Петрозаводск, Российская Федерация

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования органических осадков процесса биологической обработки сточных вод городских стоков и стоков целлюлозно-бумажного предприятия. Описывается теплотворная способность органических отходов нескольких объектов.

Ключевые слова: сжигание отходов, отходы ЦБК, осадок сточных вод, сжигание осадков.

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR USING PPM WASTE

Master Student **Grafov Konstantin Aleksandrovich**,
Senior Teacher **Parkhomchuk Alexey Alexandrovich**,
Academic Advisor: Dr. Tech. Sciences, Professor **Grafova Elena Olegovna**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation,
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a study of organic sediments from the process of biological treatment of wastewater from urban wastewater and wastewater from a pulp and paper mill. The calorific value of organic waste from several sites is described.

Keywords: waste incineration, pulp and paper mill waste, sewage sludge, sludge incineration.

Одним из наиболее развитых промышленных направлений России является производство бумажной продукции. Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) сконцентрированы в основном на Севере, в местах интенсивной лесозаготовки, таких как Карелия, Архангельская область. В Карелии расположены три ЦБК.

Текущей экологической проблемой является необходимость утилизации, накопление кородревесных отходов и обработка осадков очистки технологических сточных вод. В течение многих лет отходы складировались на территории, на иловых площадках. Особое внимание требуется к многолетним накопленным, складированным на площадках ЦБК отходам, претерпевающим изменение с течением времени, которые необходимо сокращать [4, 1]. Со временем накопленные и высушенные отходы становятся источниками повышенной опасности [1, 2].

В соответствии с концепцией применения наилучших доступных технологий необходимо внедрять технологические решения, позволяющие снижать объемы захораниваемых отходов с применением энергоэффективного оборудования и технологий. Обычно на предприятиях осадок сточных вод (ОСВ) и кородревесные отходы подвергаются сжиганию в котлах-утилизаторах.

Органические осадки богаты азотом и фосфором и является высококалорийным источником тепла при сжигании. Во многих источниках описывается процесс комбинированного сжигание угля и щепы, древесных отходов и КДО [3, 4]. При этом наблюдаются следующие эффекты: снижается стоимость получаемой энергии, снижается выброс газов – CH_4 и CO_2 .

Тем не менее существуют и негативные моменты, усложняющие эксплуатацию котлов – это шлакующие и коррозионные свойства. В реальных условиях целлюлозно-бумажного предприятия рекомендуется использовать смесь из кородревесных отходов 70–80 %, отходов ЦБК 20–30 %, древесной щепы (25–50 мм) – 4 % [5, 4].

Альтернативным методом обработки органических осадков является их компостирование: он значительно дешевле, но процесс занимает не менее одного года, что требует значительный территорий и не всегда возможно [2, 6].

Для определения температурных характеристик и описания материального баланса проведено исследование процесса пиролиза, обезвоженного до 75 % ОСВ.

С образцом проведены исследования по определению основных необходимых характеристик, включая определение постоянного веса, плотности, теплоты сгорания, содержание летучих веществ.

Получены следующие результаты: абсолютная влажность – 295 %, плотность образца – 1,1 г/л, содержание золы – 15 %, теплота сгорания – 22 МДж/кг.

Исследования проведены в анализаторе с высокотемпературной печью при температуре до 1500°C. Предварительно образцы высушивались при температуре 30°C.

На рисунке 1 продемонстрировано графическое изображение полученного термического процесса сжигания осадка, который проходил в 3 стадии:

- с выделением летучих веществ и потери массы 5 %;
- с основной потерей массы до 60 % и началом разрушения органики;
- с наивысшей температурой разложения и завершением процесса деструкции при температуре 600°C и образованием коксоподобного остатка.

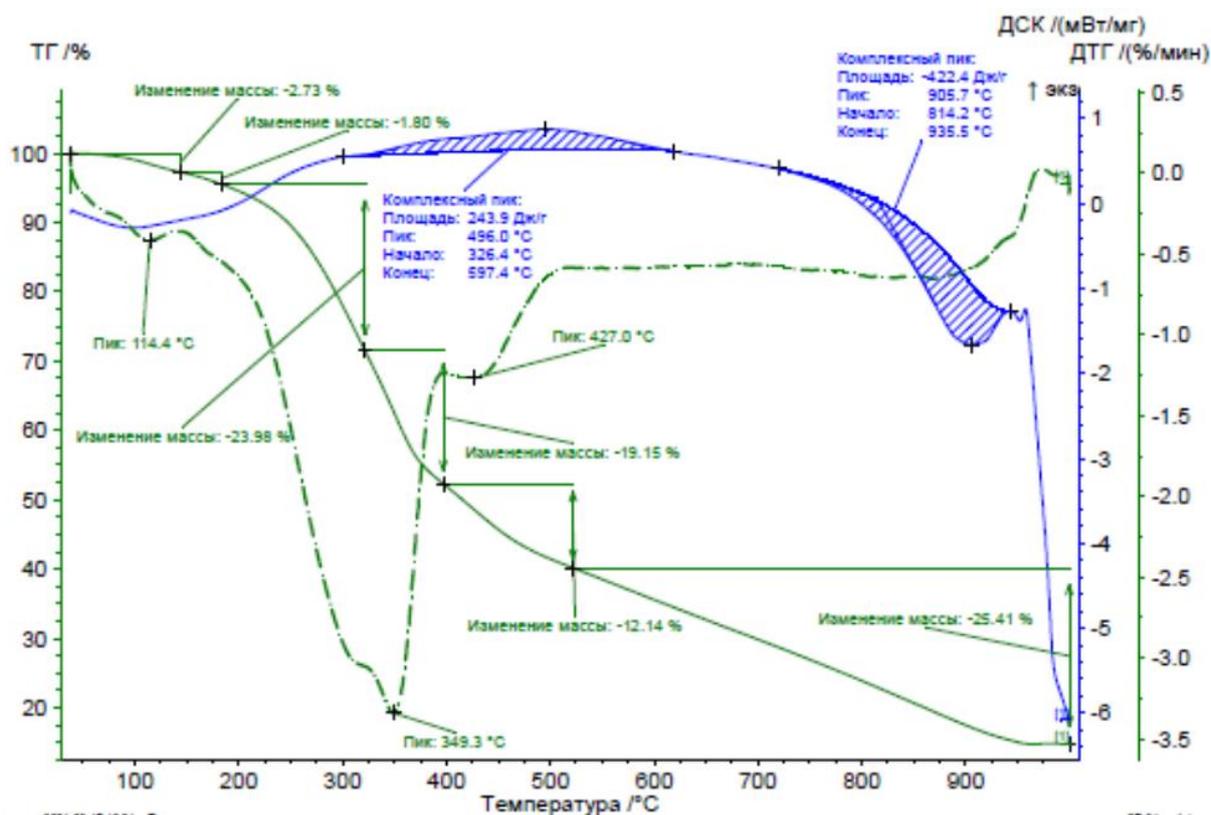


Рисунок 1 – Термический анализ процесса горения осадков сточных вод

Результаты калориметрии показывают, что экзотермические реакции наблюдаются в интервале 326–597 °С, а эндотермические – 814–935 °С.

Следующим этапом проведено исследование по сжиганию осадков сточных вод и илового осадка ЦБК на установке термогравитационного анализа (ТГА) HITACHI ST7300 и сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N. Определены такие показатели, как масса образца, масса сухого остатка, температура воспламенения горючих элементов, тепловыделение и теплопоглощение. При помощи микроскопа удалось рассмотреть морфологию зольного остатка и размеры фракций золы, получить процентное содержание образцов (по массе и по атомам) различных химических элементов.

Процесс нагрева можно проводить как с использованием воздуха, так и с использованием какого-либо газа (азота и диоксида кислорода). Эксперимент проводился с использованием воздуха, который подавался в ячейку по трубке, где происходил нагрев образец, одновременно с этим выделившиеся в процессе газы удалялись по другой трубке в окно. Скорость нагрева составляла 50°С/мин, с прямолинейным увеличением температуры в первом случае, во втором же случае проводилось ступенчатое увеличение температуры с остановками по 5 мин, при повышении температуры образца на каждые 50°С. Оба эксперимента проводились с начальной температуры, равной 30°С, до достижения ОСВ температуры в 900°С.

В таблицах 2–4 приведены результаты эксперимента по сжиганию образцов в установке ТГА, визуализированные на рисунках 2–5.

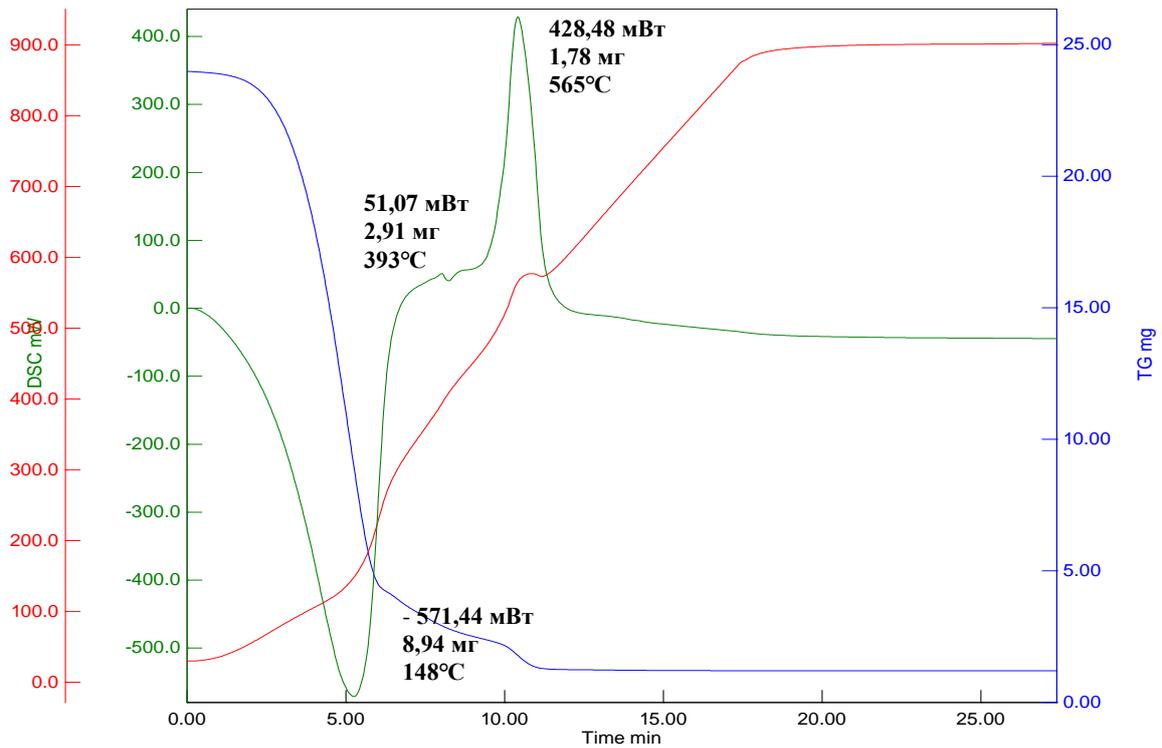


Рисунок 2 – Графическое изображение сжигания ОСВ, линейный нагрев

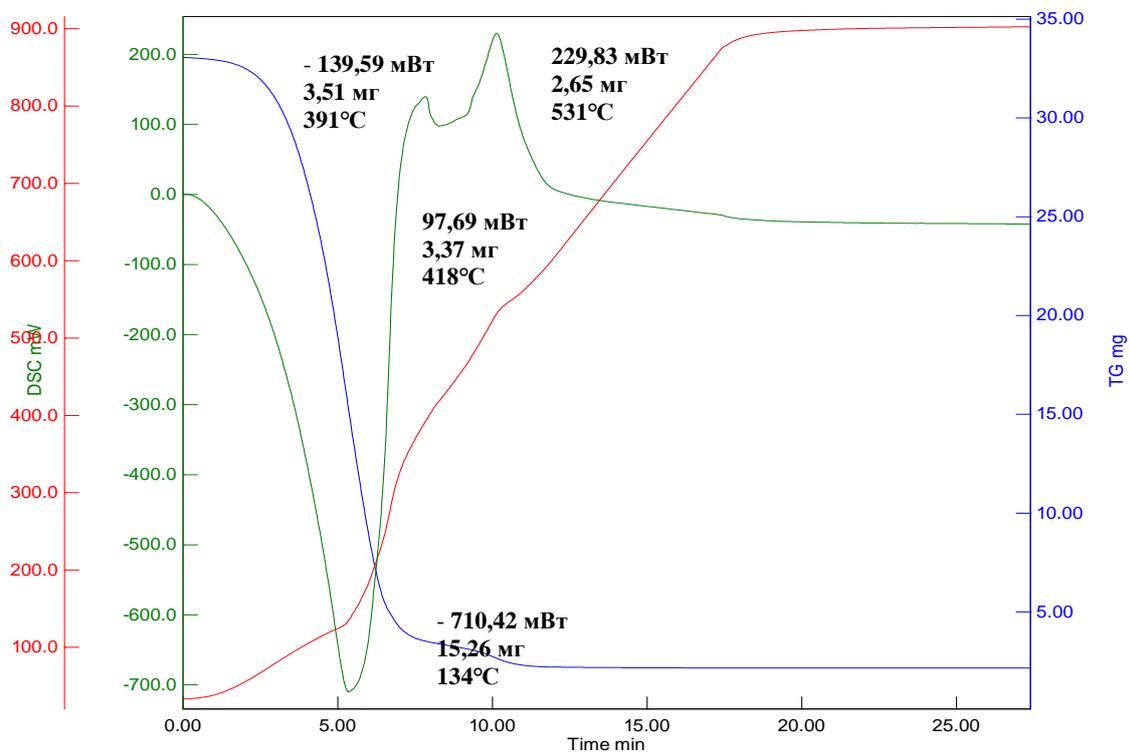


Рисунок 3 – Графическое изображение сжигания ЦБК, линейный нагрев

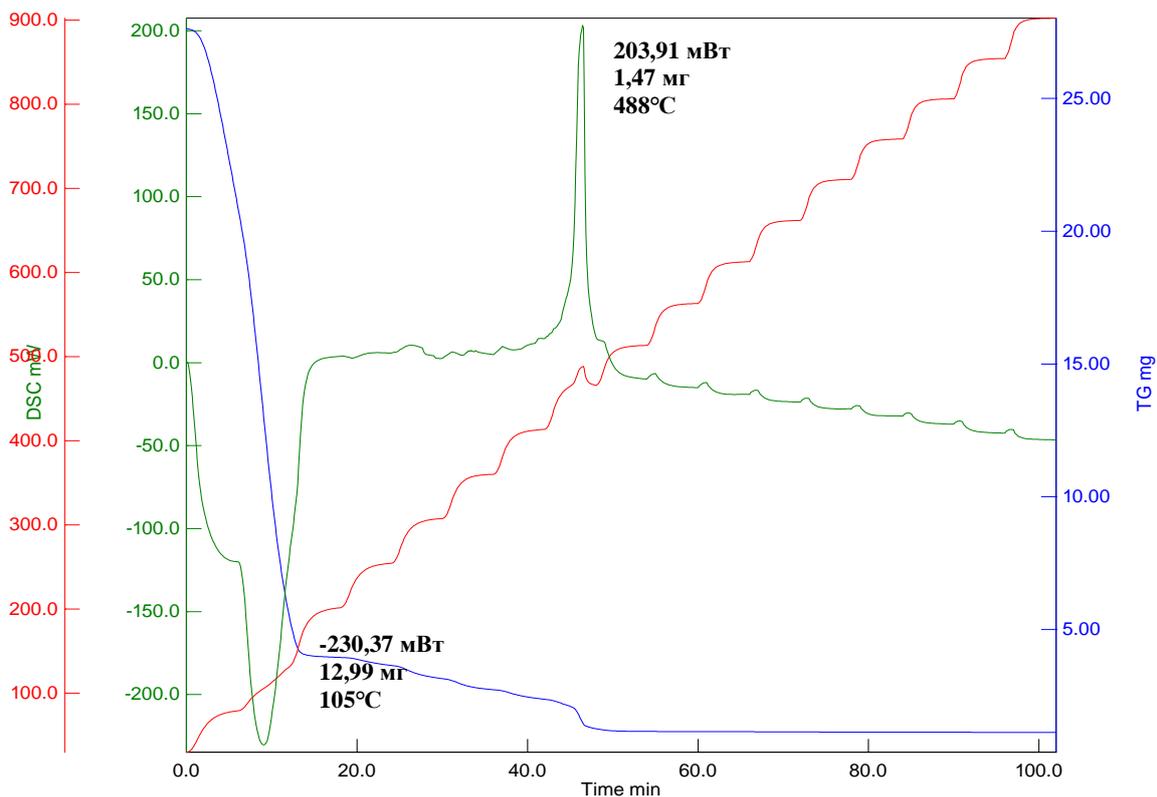


Рисунок 4 – Графическое изображение сжигания ОСВ, ступенчатый нагрев

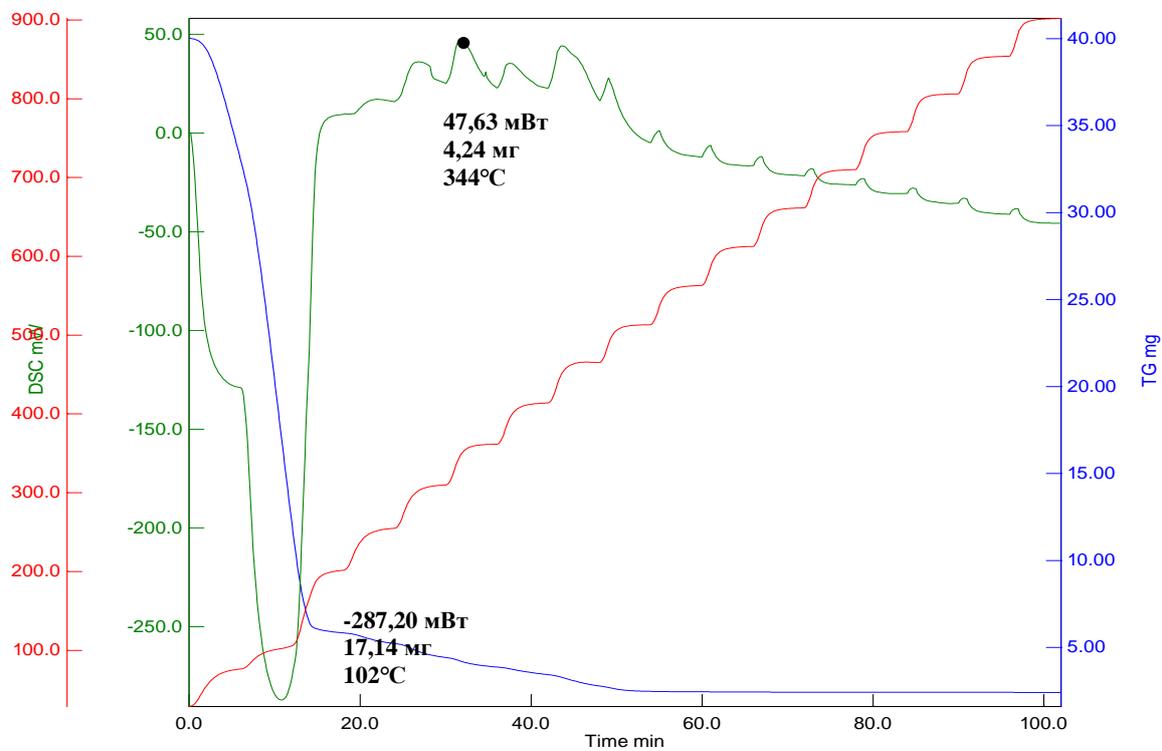


Рисунок 5 – Графическое изображение сжигания ЦБК, ступенчатый нагрев

Так, полученные данные характеризуют реальную влажность образцов 90–95 %, что является значительным фактором, свидетельствующим о необходимости предварительной сушки материала на производстве перед сжиганием.

Полученные данные позволили рассчитать энергетические балансы для каждого образца (таблица 1).

Таблица 1 – Энергетический баланс исследуемых образцов

Источник и способ обработки	Затраченная энергия на сушку, (Дж)	Выделившаяся при горении энергия, (Дж)	Энергобаланс, кВт (Дж)
ОСВ, линейный	613	184	–430
Ил ЦБК, линейный	849	191	–658
ОСВ, ступенчатый	1 604	1 159	–445
Ил ЦБК, ступенчатый	2 312	2 026	–286

Таким образом, природа осадков сточных вод и органических илов ЦБК идентична и близка по свойствам. Анализ балансов свидетельствует о значительном испарении жидкости, на который затрачивается большее количество энергии (в 2 – 3 раза), чем на получение экзотермической реакции. При этом, перед сжиганием рассматриваемых органических осадков обязательно необходимо уделять большое внимание осушению ила перед подачей в котел.

Энергетический баланс процесса высокотемпературного сжигания (имитация пиролиза) показал, что общий расход процесса можно покрыть за счет сжигания парогазовой смеси с выделением древесного угля в виде товарного продукта. При этом 347 кВт тепловой энергии, получаемой при сгорании парогазовой смеси, можно использовать для других целей. В результате высокотемпературного пиролизного сжигания образовались жидкие продукты, уголь и газ. Тем не менее, стоимость оборудования и поддержания термического процесса будет определяющим, поскольку влажность осадков перед реактором пиролиза является постоянной и должна составлять не более 10–12%. Повышение влажности исходного сырья приводит к увеличению расхода тепла на сушку. При высокой начальной влажности (85 %) нужно будет подводить дополнительное топливо.

Список литературы:

1. Анализ технологических аспектов образования отходов на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности / О. Н. Курило, Ю. В. Куликова, Е. С. Ширинкина, Я. И. Вайсман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 4 (12). – С. 97–108.
2. Графова, Е. О. Исследование методов обработки осадков сточных вод петрозаводских очистных сооружений / Е. О. Графова, Н. В. Паршин //

Resources and Technology. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 94–118. – DOI 10.15393/j2.art.2019.5042.

3. Жуланова, А. Е. Использование лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности для получения лигноэпоксидных композиционных материалов / А. Е. Жуланова // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 18-23. – DOI 10.18412/1816-0395-2023-3-18-23.
4. Шатрова, А. С. Исследование физико-химических свойств осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК» при вымораживании / А. С. Шатрова, А. В. Богданов, О. Л. Качор // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 8 (103). – С. 99–107. – EDN UHHAGT.
5. Ширинкина, Е. С. Использование энергетического потенциала органических отходов при их сжигании на утилизационных установках / Е. С. Ширинкина, Я. И. Вайсман, О. Н. Курило // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 7. – С. 54-58. – DOI 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58.

References:

1. Analysis of technological aspects of waste generation at the enterprises of pulp and paper industry / O.N. Kurilo, Y.V. Kulikova, E.S. Shirinkina, Y.I. Weissman // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics. - 2013. - № 4 (12). - С. 97-108.
2. Grafova, E. O. Research of the methods of sewage sludge treatment of Petrozavodsk sewage treatment plants / E. O. Grafova, N. V. Parshin // Resources and Technology. - 2019. - Т. 16, № 4. - С. 94-118. - DOI 10.15393/j2.art.2019.5042.
3. Zhulanova, A. E. Use of lignin-containing wastes of pulp and paper industry for obtaining lignoepoxy composite materials / A. E. Zhulanova // Ecology and Industry of Russia. - 2023. - Т. 27, № 3. - С. 18-23. - DOI 10.18412/1816-0395-2023-3-18-23.
4. Shatrova, A. S. Study of physical and chemical properties of sludge-lignin sludge sediments of JSC “Baikalsk Pulp and Paper Mill” at freezing / A. S. Shatrova, A. V. Bogdanov, O. L. Kachor // Bulletin of Irkutsk State Technical University. - 2015. - № 8(103). - С. 99-107. - EDN UHHAGT.
5. Shirinkina, E. S. Utilization of the energy potential of organic waste during its combustion at utilization plants / E. S. Shirinkina, Y. I. Vaisman, O. N. Kurilo // Ecology and Industry of Russia. - 2018. - Т. 22, № 7. - С. 54-58. - DOI 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58.

© Графов К. А., Пархомчук А. А., 2024

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КРАТНОСТИ РАЗБАВЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД

канд. техн. наук, доцент **Епифанов Андрей Валерьевич**,
канд. техн. наук, старший преподаватель
Епифанова Марина Анатольевна,
магистрант **Прохорова Анастасия Александровна**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены методы конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ в водотоках и водоемах. Исследованы упрощенные методы расчета кратности разбавления сточных вод, приведенные в действующей методике расчета нормативов допустимых сбросов. Определены преимущества и недостатки упрощенных методов расчета кратности разбавления сточных вод.

Ключевые слова: водные объекты, массоперенос, кратность разбавления, нормативы допустимых сбросов.

FEATURES OF MASS TRANSFER OF MATTER IN WATER BODIES

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Epifanov Andrey Valer'evich,
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer
Epifanova Marina Anatolyevna,
Master Student **Prokhorova Anastasia Alexandrovna**
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Methods of convective diffusion transport of pollutants in watercourses and reservoirs are considered. Simplified methods for calculating the multiplicity of dilution of wastewater, given in the current methodology for calculating the standards of permissible discharges, are investigated. The advantages and disadvantages of simplified methods for calculating the multiplicity of dilution of wastewater are determined.

Keywords: water bodies, mass transfer, multiplicity of dilution, standards of permissible discharges.

Расчет нормативов допустимых сбросов (НДС) в водные объекты должны

проводить водопользователи 1, 2 и 3 категорий негативного воздействия на окружающую среду (НВОС). На основе расчета НДС определяют допустимые массы сбросов загрязняющих веществ для каждого из водопользователей, которые не приведут к деградации водных экосистем.

Процессы разбавления загрязняющих веществ в водных объектах описываются уравнениями конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ. Комбинация конвекции и диффузии определяет скорость и направление массопереноса загрязняющих веществ в водном объекте. Решение данных дифференциальных уравнений требует значительных вычислительных ресурсов. В общем случае процесс формирования качества воды описывается как:

$$\frac{dC}{dt} + V_x \frac{dC}{dx} + V_y \frac{dC}{dy} + V_z \frac{dC}{dz} = D_x \frac{d^2C}{dx^2} + D_y \frac{d^2C}{dy^2} + D_z \frac{d^2C}{dz^2} - KC, \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества, мг/л;

t – время;

x, y, z – координаты;

V_i – проекции скорости течения воды;

D_i – коэффициенты диффузного переноса загрязняющих веществ, м²/с;

K – коэффициент неконсервативности вещества, с⁻¹.

$\frac{dC}{dt}$ – характеризует нестационарность процесса. Для стационарного процесса $\frac{dC}{dt}=0$;

$V_x \frac{dC}{dx}; V_y \frac{dC}{dy}; V_z \frac{dC}{dz}$ – конвективная составляющая процесса;

$D_x \frac{d^2C}{dx^2} + D_y \frac{d^2C}{dy^2} + D_z \frac{d^2C}{dz^2}$ – диффузионная составляющая процесса переноса веществ.

Решение данного уравнения требует значительного объема исходных данных, поэтому в инженерных задачах применяют упрощенные модели. Основными схемами типизации водных объектов являются [1, 1]:

- 1) типизация по мерности модели: одномерные, двумерные, трехмерные;
- 2) по типу режима переноса: стационарные, нестационарные;
- 3) в зависимости от направления: изотропные, анизотропные, смешанные;
- 4) в зависимости от характера процесса: однородные, неоднородные;
- 5) в зависимости от типа загрязняющего вещества: консервативные, неконсервативные.

В зависимости от ширины водного объекта выделяются три группы: большие, средние, малые; для водотоков выделяется четвертая группа – ручьи. По глубине водные объекты подразделяются на неглубокие – мелкие и средние, и глубокие. Кроме того, для водотоков типы и группы подразделяются в зависимости от скорости течения, шероховатости дна, степени извилистости и т.д. Теория типизации математических моделей для морей приведена в работе Васильева В. С. «Моделирование трехмерной гидродинамики мелкого моря в гидростатическом приближении» [4].

Для водоемов в двумерной постановке модель (1) принимает следующий

вид:

$$\frac{dc}{dt} + V_x \frac{dc}{dx} + V_y \frac{dc}{dy} = D_x \frac{d^2c}{dx^2} + D_y \frac{d^2c}{dy^2} - Kc. \quad (2)$$

Для решения данного уравнения на первом этапе необходимо рассчитать направления течения по осям x и y . В данном случае целесообразно использовать модель однородного моря для расчета ветровых течений [4]:

$$\begin{aligned} -fv &= g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_l \cdot \Delta u + A_z \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \\ -fu &= g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_l \cdot \Delta v + A_z \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где u, v, w – проекции скорости течений на ось X , направленную на восток, ось Y , направленную на север и ось Z , направленную вертикально вниз;

ζ – возмущение свободной поверхности, м;

g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ;

f – параметр Кориолиса;

A_l и A_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости, m^2/c .

Одной из широко применимых моделей КДП и ПВ для водотоков является двумерная стационарная модель КДП и ПВ вида:

$$V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k \cdot C, \quad (4)$$

При решении методом конечных разностей модель сводится к виду [1]:

$$C_{x+1,y} = \frac{D_y \cdot h_x}{V_p \cdot h_y^2} (C_{x,y+1} - 2C_{x,y} + C_{x,y-1}) + C_{x,y} - \frac{K \cdot h_x \cdot C_{x,y}}{V_p}, \quad (5)$$

где V_p – средняя скорость течения по направлению основного потока, м/с;

C_i – концентрация загрязняющего вещества в конкретной точке пространства, мг/л;

x, y – координаты;

D_y – коэффициент диффузного переноса вещества (const), m^2/c ;

K – коэффициент неконсервативности вещества(const), $c-1$;

h_x, h_y – шаг расчета по оси x и по оси y соответственно, м.

$\frac{D_y \cdot h_x}{V_p \cdot h_y^2} \leq 0,25$ – уравнение устойчивости, выполнение которого необходимо

для обеспечения правильности расчетов с использованием уравнения [2].

Решение даже приведенного выше дифференциального уравнения методом конечных разностей требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому на заре зарождения экологического нормирования советскими учеными для расчета кратности разбавления сточных вод были разработаны упрощенные методы, отраженные сначала в «Методических рекомендациях по установлению предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ, поступающих со сточными

водами» (Минводхоз СССР, 1982), и затем перешедшие в действующую методику НДС [5].

Для расчета кратностей разбавления в водотоках согласно действующему водоохранному законодательству используются следующие методы [5]: детальный метод Караушева; Фролова-Родзиллера (ВОДГЕО); экспресс-метод ГГИ; Таллинского политехнического института; Лапшева для расчета начального разбавления.

Метод Фролова-Родзиллера является основным методом расчета кратности основного разбавления. Популярность метода Фролова-Родзиллера объясняется «удачностью» выбора минимального количества определяющих параметров модели, что весьма удобно при решении прикладных задач в условиях их недостаточной изученности. Согласно методике [5], данный метод применим при выполнении следующего условия:

$0,0025 \leq q/Q \leq 0,1$, где q , Q – расход сточных и природных вод соответственно.

Если условия применимости метода Фролова-Родзиллера не выполняются, то можно производить расчет кратности разбавления одним из трех дополнительных методов, включая упрощенный метод ГГИ, Метод Таллинского политехнического института, детальный метод А. В. Караушева.

По мнению Н. Н. Лапшева, метод В. А. Фролова – И. Д. Родзиллера целесообразно применять для больших и средних рек при оценочных расчетах, когда не рассматривается конструкция водовыпуска, а решается вопрос о возможности сброса сточных вод в реку [7], т. к. данный метод не учитывает конструкцию выпуска сточных вод. Из общей теории гидродинамики известно, что рассеивающие выпуски повышают кратность разбавления сточных вод. Таким образом, при расчете кратности разбавления сточных вод, сбрасываемых через рассеивающий выпуск, методом Фролова-Родзиллера могут быть получены заниженные значения кратности разбавления сточных вод.

А. П. Лепихин выразил противоположное мнение о высокой точности метода Фролова-Родзиллера при расчете кратности разбавления сточных вод, не для крупных, а для малых водотоках с шириной до 5–10 м и расходом до 5 м³/с. В этом случае точность расчетов кратности разбавления сточных вод методом Фролова-Родзиллера превышает точность результатов, полученных на основе детального метода А. В. Караушева [8].

Долгие годы наиболее точным считался детальный метод А. В. Караушева, основанный на решении уравнения конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ по явной конечно-разностной схеме. В настоящее время многими авторами поднимаются вопросы о корректности применения для описания процессов смешения в русле моделей классической диффузии. По мнению А. П. Лепихина, более корректным представляется использование моделей обобщенной диффузии, построенной на основе фрактальных представлений. Однако в этом случае становится весьма проблематичным решение как чисто вычислительных вопросов, так и оценок параметров модели [8].

Основной недостаток метода А. В. Караушева состоит в построении расчетной области в виде прямолинейного участка прямоугольного сечения с

постоянными значениями глубины, ширины потока. Модель предполагает априорное задание всех гидрометрических характеристик потока, включая скорость, ширину, глубину потока, значения коэффициента диффузии. Данное допущение возможно только, если расход сброса сточных вод существенно меньше расхода воды в водном объекте.

Для крупных водных объектов могут быть использованы детальные модели, учитывающие изменения основных морфометрических и гидрологических параметров. Детальные модели могут быть реализованы на основе современных геоинформационных систем.

Отдельного внимания заслуживает метод ГГИ, разработанный М. А. Бесценной [9]. Согласно действующему законодательству, при расчете нормативов допустимых сбросов он может быть применен не только для определения кратности разбавления сточных вод, но и для расчета расстояния от выпуска до контрольного створа по формуле:

$$x = \frac{0.14q \sqrt{\frac{N}{H}}}{X(q + Q)\varphi} B \quad (6)$$

Значение показателя разбавления X априори задается равным 0,9. При этом в методике НДС говорится, что данная формула применяется для расчета расстояния от места выпуска сточных вод до створа наиболее полного (90 %) перемешивания речной и сточной воды (контрольный створ).

Однако показатель разбавления X , равный 0,9, не характеризует местоположение контрольного створа наиболее полного (90 %) перемешивания речной и сточной воды. Местоположение створа наиболее полного (90 %) перемешивания речной и сточной воды характеризует коэффициент смешения, равный 0,9, показывающий, какая часть речного расхода смешивается со сточными водами в максимально загрязненной струе расчетного створа. Общепринятым подходом к определению расстояния до контрольного створа является расчет необходимого смешения сточных и природных вод или определение этого расстояния на основе натуральных наблюдений. В методике НДС определение расстояния до контрольного створа на основе показателя разбавления, равного 0,9, никак не обосновано, а авторы метода ГГИ в своих работах не упоминали о возможности определения расстояния до контрольного створа при показателе разбавления, равном 0,9.

Метод Таллиннского Политехнического института (ТПИ) может быть применен только для расчета общего разбавления для небольших водотоков с коэффициентом извилистости меньше 1,5.

В водотоках расчет кратности начального и основного разбавлений может быть проведен методом Руффеля. Метод Руффеля применим если глубина зоны смешения не превышает 10 м, расстояние от выпуска до контрольного створа вдоль берега в первом случае не превышает 20 км, расстояние от выхода сточных вод до берега против выпускного оголовка во втором случае не превышает 0,5 км.

Стоит отметить, что применение модели КДП и ПВ по сравнению с методом Руффеля позволяет учитывать скорости течения по осям x и y ,

возникающие от ветровой нагрузки на водный объект. А в методе Руффеля задается априорное направление течений, что снижает корректность расчетов разбавления сточных вод.

Выводы:

Рассмотрены основные методы расчета конвективно-диффузионного переноса загрязняющих веществ в водотоках и водоемах. Показано, что их реализация возможна только при наличии полных исходных данных, что представляется труднореализуемым на практике.

Изучены, приведенные в методике расчета нормативов допустимых сбросов, методы расчета кратности разбавления сточных вод в водотоках и водоемах. Показано, что данные методы несмотря на их простоту и не требовательность к исходным данным обладают существенными недостатками, способным привести к значительным искажениям допустимых масс сбросов от водопользователей.

В действующей методике расчета НДС учтены не все ограничения на использование упрощенных методов расчета кратности разбавления сточных вод.

Представляется необходимым научное обоснование расчета расстояния до контрольного створа в водотоках по формуле 23.4 методики НДС с учетом степени разбавления 0,9, т. к. общепринятым в гидрологии методом определения расстояния до контрольного створа является расчет необходимого коэффициента смешения.

Использование метода Руффеля для расчета кратности разбавления в водоемах не учитывает реальные направления течений.

Список литературы:

1. Дружинин, Н. И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши / Дружинин Н. И., Шишкин А. И. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 329 с. – Текст: непосредственный.
2. Шишкин, А. И. Математическое моделирование переноса примесей и прогнозирование состава окружающей среды / Шишкин А. И. – ЛТА, Л., 1981. – 232 с. – Текст: непосредственный.
3. Жменя, Е. С. Математические модели массопереноса для управления концентрациями неконсервативных примесей в водных экосистемах на основе решения обратных задач: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Жменя, Е. С. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жменя Евгения Сергеевна, 2017. – 154 с. – Текст: непосредственный.
4. Васильев В. С. Моделирование трехмерной гидродинамики мелкого моря в гидростатическом приближении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-trehmernoj-gidrodinamiki-melkogo-morya-v-gidrostaticheskom-priblizhenii> (дата обращения: 02.05.2024).
5. Фельзенбаум, А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся

морских течений / А. И. Фельзенбаум// Изд-во АН СССР. – 1960. – 128 с. – Текст: непосредственный.

6. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. Утверждена приказом МПР России от 29.12.2020 №1118 (с изменениями на 18 мая 2024 года) – 2020. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596?ysclid=m0p5jjgc6b788881662> (дата обращения: 05.09.2024). – Текст: электронный.
7. Лапшев Н. Н. Расчеты выпусков сточных вод / Н. Н. Лапшев. – Москва: Стройиздат, 1977. – 87 с. – Текст: непосредственный.
8. Лепихин, А. П. К шестидесятилетию наиболее известного метода расчета процессов разбавления / А. П. Лепихин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2010. – № 5. – С. 81-95. – EDN MWGOWN – Текст: непосредственный.
9. Бесценная, М. А. Экспресс-метод расчета разбавления сточных вод в реках // Гигиена и санитария. – 1970. – №8. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspress-metod-rascheta-razbavleniya-stochnyh-vod-v-rekah> (дата обращения: 07.07.2024) – Текст: электронный.

References:

1. Druzhinin N. I. Mathematical modeling and forecasting of land surface water. Hydrometeoizdat, 1989.- 329 p. (in Russian).
2. Shishkin A. I. Mathematical modeling of impurity transfer and prediction of environmental composition / Shishkin A. I. - LT., L., 1981.- 232 p.1118 (in Russian)
3. Zhmenya, E. S. Mathematical models of mass transfer for controlling concentrations of nonconservative impurities in aquatic ecosystems based on solving inverse problems: specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages" - dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Zhmenya Evgeniya Sergeevna, 2017. – 154 p. (in Russian)
4. Vasiliev V. S. Modeling of three-dimensional hydrodynamics of a shallow sea in a hydrostatic approximation // Izvestiya SFU. Technical sciences. 2005. No.3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-trehmerno-gidrodinamiki-melkogo-morya-v-gidrosticheskom-priblizhenii> (date accessed: 05.02.2024).
5. Felsenbaum, A.I. Theoretical foundations and methods of calculating steady-state sea currents / A.I. Felsenbaum// Publishing House of the USSR Academy of Sciences. – 1960. – 128 p (in Russian).
6. Methodology for the development of standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users. Approved by Order of the MPR of Russia dated 12/29/2020 No. 1118 (as amended on May 18, 2024) – 2020. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596?ysclid=m0p5jjgc6b788881662> (date accessed: 05.09.2024). (in Russian).
7. Lapshev N.N. Calculations of wastewater releases - Moscow: Sroyizdat, 1977. - 87 p. (in Russian).
8. Lepikhin, A. P. To the sixtieth anniversary of the most famous method for calculating dilution processes / Water management of Russia: problems,

technologies, management. - 2010. – No. 5. – pp. 81-95. – EDN MWGOWN. (in Russian).

9. M.A. Priceless EXPRESS METHOD FOR CALCULATING DILUTION OF WASTEWATER IN RIVERS // Hygiene and sanitation. 1970. No.8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspress-metod-rascheta-razbavleniya-stochnyh-vod-v-rekah> (date accessed: 07.07.2024) (in Russian).

© Епифанов А. В., Епифанова М. А., Прохорова А. А., 2024

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ESG-РЕЙТИНГА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ КОМБИНАТОВ

аспирант **Мозгушин Максим Александрович**
магистрант **Анурин Егор Константинович**
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Епифанов Андрей Валерьевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Усовершенствована методика присвоения ESG-рейтинга для целлюлозно-бумажного производства. Предложено при расчете ESG-рейтингов ЦБК учитывать ретроспективу изменения экологических факторов и мероприятия по повышению экологической эффективности на различных стадиях реализации. Представлены развернутый алгоритм внедрения ESG в целлюлозно-бумажное производство и перечень ключевых вопросов для проведения оценки ESG-рейтинга. Для оценки балльных факторов ESG целлюлозно-бумажного производства разработана программа в Microsoft Excel, позволяющая автоматизировать эти расчеты.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство, ESG-рейтинг, экологические аспекты, оценка ESG-рейтинга; динамика изменения нагрузки на окружающую среду; автоматизация расчетов.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ESG RATING OF PULP AND PAPER MILLS

Postgraduate Student **Mozgushin Maksim Aleksandrovich**
Master's Student **Anurin Egor Konstantinovich**
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Epifanov Andrey Valerievich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies
and Design, Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The methodology for assigning an ESG rating for pulp and paper production has been improved. It is proposed to take into account the retrospective of changes in environmental factors and measures to improve environmental efficiency at various stages of implementation when calculating ESG ratings for pulp and paper mills. A detailed algorithm for implementing ESG in pulp and paper production and a list of key questions for assessing the ESG rating are presented. A program in Microsoft Excel has been developed to assess the ESG scoring factors of pulp and paper production, allowing these calculations to be automated.

Keywords: pulp and paper production, ESG rating, environmental aspects, ESG strategy, ESG rating assessment; dynamics of changes in the environmental load; automation of calculations.

Введение. На сегодняшний день в мире потребляется около 400 млн т бумаги. При развитии электронного документооборота и снижении спроса на бумажную прессу показатель спроса вырос в 4 раза за последние 40 лет. Последние десятилетия в России и во многих странах мира наблюдается тренд на отказ от пластика в пользу бумажной тары и упаковки. Однако целлюлозно-бумажная промышленность оказывает существенное влияние на окружающую среду. Одним из инструментов стратегического снижения негативного воздействия на окружающую среду является разработка ESG стратегий для целлюлозно-бумажного комбината (далее – ЦБК) [1].

ESG – это набор основных принципов, которые ориентированы на учет экологических (Environmental), социальных (Social) и управленческих (Governance) аспектов в деятельности компаний и оценку их устойчивости и воздействия на окружающую среду, общество и внутреннюю структуру управления.

Аспекты ESG определены как ключевые движущие силы процесса устойчивого развития, поскольку позволяют предприятиям и инвесторам интегрировать экологические, социальные и управленческие практики в свои процессы принятия решений. Эта интеграция позволяет организациям создавать долгосрочную ценность, управлять рисками и укреплять доверие инвесторов [2].

ESG оценка предприятий стала общемировым трендом, для улучшения репутации, привлечения новых клиентов и инвесторов, повышения социального одобрения своей деятельности и выхода на азиатские, североамериканские и европейские рынки.

В РФ для оценки ESG рейтингов используют различные методики [3-5].

В настоящее время ESG стратегии внедрены на многих крупных ЦБК, включая: НΠΑО «Светогорский ЦБК»; АО «Архангельский ЦБК»; АО «Сегежский ЦБК».

Стандартные методики оценки ESG-рейтинга подразумевают учет следующих экологических факторов: наличие принятой экологической политики; учет водопотребления; наличие целей по сокращению водопотребления на ближайшие 2-3 года; учет энергопотребления; наличие целей по сокращению потребления энергии на ближайшие 2-3 года; учет образования и передачи отходов на утилизацию и захоронение; наличие целей по сокращению объема образования отходов на ближайшие 2-3 года; учет пригодности упаковки к дальнейшей переработке (% от общего объема упаковки); учет прямых и косвенных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, оценка углеродного следа; наличие целей по сокращению выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу на ближайшие 2-3 года; расчет удельных показателей (единица воздействия на единицу продукции) по итогам отчетного года [4].

Таким образом, действующие методики оценки ESG-рейтинга учитывают только текущие экологические параметры предприятия и сжатые плановые параметры.

В действительности, техническое оснащение и перевооружение ЦБК является трудоёмким и дорогостоящим процессом, значительно растянутым во времени. Поэтому представляется целесообразным при оценке ESG рейтингов учитывать динамику изменения нагрузки на окружающую среду по ретроспективным данным и планам реализации природоохранных мероприятий. Анализ ретроспективных данных предполагается проводить за 5-7-летний период.

Анализ ретроспективных данных позволит учесть динамику изменения нагрузки на окружающую среду и позволит оценить эффективность ранее реализованных природоохранных мероприятий.

Дополнительно предлагается проводить анализ планов повышения экологической эффективности ЦБК, разрабатываемых для большинства ЦБК на семилетний период. Программы повышения экологической эффективности учитывают мероприятия на различных стадиях реализации: ввод в эксплуатацию, строительство, прошедшая экспертизу проектная документация, разработка проектной документации, работы по выбору оптимальных природоохранных решений и т. д.

Предлагается проводить оценку плановых ESG рейтингов с повышающими коэффициентами ($K_{\text{план}}$) для мероприятий, находящихся на высокой стадии реализации.

Целевыми ретроспективными показателями являются удельные показатели сбросов и выбросов маркерных загрязняющих веществ, удельное водопотребление и удельные затраты энергии и ресурсов на выпуск тонны продукции.

На основе структурированного анализа ЦБК в части охраны окружающей среды в оценку экологических аспектов ЦБК целесообразно включить приведенные в таблице 1 экологические аспекты, которые соответствуют приоритетам ESG в данной отрасли [5-8].

В Microsoft Excel реализована программа для проведения балльной оценки экологических аспектов. Формулы составлены с различными условиями, реализован логический оператор ЕСЛИ, применяемый для записи определенных условий. Когда ключевые вопросы отвечают заданным параметрам, то появляется одна запись. Не отвечают – другая.

Ключевые вопросы ESG в области ЦБК оценивались по 4 параметрам: ESG наилучшие доступные технологии ($ESG_{\text{НДТ}}$); ESG перспективные технологии ($ESG_{\text{ПТ}}$); ESG общие экологические вопросы ($ESG_{\text{Общ}}$); ESG технологические показатели загрязняющих веществ ($ESG_{\text{ТПЗВ}}$). Оценка производилась в статическом состоянии ЦБК, т. е. в фактических условиях функционирования. Также для оценки применялся прогноз, определяющий направление развития ЦБК в ближайшие 5 лет. Расчет экологического аспекта ЦБК проводился по формуле:

$$ESG = \frac{ESG_{\text{НДТ}} + ESG_{\text{ПТ}} + ESG_{\text{общ}} + ESG_{\text{ТПЗВ}}}{4} \quad (1)$$

Таблица 1 – Перечень ключевых факторов и балльных вопросов ESG в отрасли целлюлозно-бумажного производства

Экологические аспекты					
Использование новых технологий и нового оборудования	Применение замкнутого цикла производства	Проведение компенсационных мероприятий (лесовосстановление, рекультивация, выпуск ВБР)	Применение системы экологического менеджмента	Потребление энергии из возобновляемых источников	Экономия теплоэнергетических ресурсов в результате применения энергосберегающих программ
Перечень балльных вопросов					
снижение удельных масс сбросов и выбросов маркерных веществ на тонну продукции					
снижение удельных значений водопотребления и водоотведения на тонну продукции					
внедрение наилучших доступных и перспективных технологий в соответствии с ИТС по НДТ					
внедрение перспективных технологий в соответствии с ИТС по НДТ					
снижение количества нарушений природоохранного законодательства					
выполнение компенсационных мероприятий по воспроизводству водных биологических ресурсов					
выполнение лесовосстановления					
выполнение рекультивации					
внедрение и функционирование системы экологического менеджмента					

На рисунках 1-2 представлены примеры балльной оценки наилучших доступных технологий и общих экологических вопросов.

	1	2	3	4	5	6
1	Наилучшие доступные технологии					
2	Перечень	Применим, да/нет	Внедрен	Балл	Повышающий коэффициент	Балл с повышающим коэффициентом
3	Сухая окорка древесины	нет	нет	ЛОЖЬ	1	0
4	Модифицированная варка целлюлозы	нет	нет	ЛОЖЬ	1	0
5	Замкнутая система сортирования и эффективная промывка небеленой целлюлозы	да	возможно	0.5	1.5	0.75
6	Повторное использование конденсатов целлюлозных производств или их отдельная очистка	да	возможно	0.5	1.3	0.65
7	Сбор газов с высокой концентрацией сернистого ангидрида и их дальнейшее использование в технологии для приготовления варочных растворов	да	да	1	1	1
8	Рекуперация тепла при производстве целлюлозы	да	да	1	1	1
9	Буферные емкости для сбора избыточных щелоков и оборотной воды	да	да	1	1	1
10	Котлы для сжигания древесно-корьевых отходов, осадков очистных сооружений и топливopодготовка для них	да	возможно	ЛОЖЬ	1.5	0
11	Электрофильтры котлов для сжигания древесно корьевых отходов, осадков очистных сооружений	да	да	1	1	1
12	Биологическая очистка сточных вод	да	да	1	1	1
13	Обезвоживание осадков очистных сооружений	да	да	1	1	1
14	Улучшенные системы переработки брака (БДМ и КДМ)	да	да	1	1	1
15	Системы улавливания волокна из оборотных и (или) сточных вод БДМ/КДМ	да	да	1	1	1
16	Внедрение автоматизированной системы управления производством (АСОДУ)	да	да	1	1	1
17	ИТОГО					0.87
18						
19						
20						
21	Или - планируется внедрение в текущем году					
22	Нет - отсутствуют и не планируются на производстве					
23	Да - внедрено на производстве					
24	Возможно - планируется внедрение в течении 7 лет	Стадии реализации				
25		работы по выбору оптимальных природоохранных решений	разработка проектной документации	проектная документация прошедшая экспертизу проектная документация	строительство	ввод в эксплуатацию
26	Повышающий коэффициент					
27		1	1.3	1.5	1.8	2

Рисунок 1 – Пример балльной оценки наилучших доступных технологий

	1	2	3	4	5
1	Общие экологические вопросы				
2	Вопросы	Единица измерения	Применим, да/нет	Наличие	Балл
3	Наличие нарушений природоохранного законодательства	-	нет	1	ЛОЖЬ
4	Выполнение компенсационных мероприятий по лесовосстановлению, рекультивации и воспроизводству ВБР	Га/т	да	нет	0
5	Выполнение компенсационных мероприятий по рекультивации земельных участков	Га/т	да	да	1
6	Выполнение компенсационных мероприятий воспроизводству ВБР	Шт/т	да	да	1
7	Функционирование системы экологического менеджмента	-	да	да	1
8				Итого	0.75
9					
10	Нет - отсутствуют и не планируются на производстве				
11	Да - внедрено на производстве				

Рисунок 2 – Пример балльной оценки общих экологических вопросов

В основе балльной оценки заложены технологические показатели НДТ, отвечающие применению наилучших доступных технологий в соответствии с информационно-техническим справочником по наилучшим доступным технологиям 1-2023 целлюлозно-бумажное производство [1].

Учитывая, что одним из определяющих направлений развития ЦБК в ближайшие 15 лет станет декарбонизация производства, вводится понятие коэффициента CO₂ (K_{CO₂}). В среднем снижение удельных выбросов парниковых газов по химико-лесному комплексу составляет 3 % в год.

На рисунке 3 представлены пример расчета K_{CO₂}.

	1	2	3
1	ГОД	Углеродный след, тCO ₂ /т продукции	Δ, %
2	2018	10	
3	2019	11	10,00
4	2020	12	9,09
5	2021	11	-8,33
6	2022	10	-9,09
7	2023	12	20,00
8	2024	11	-8,33
9	Изменение		2,22
10	Коэффициенты	K _{CO₂}	1,1500

Рисунок 3 – Расчет K_{CO₂}

Также для учета динамической составляющей ЦБК производится оценка ESG аспекта за 7 лет, т. е. производится оценка 4 вышеуказанных параметров за последние 7 лет и оценивается динамика их изменения. Положительная динамика ESG аспекта за 7 лет увеличивает рейтинг ЦБК за счет Коэффициента динамики (K_{динам}). Оценка K_{динам} производится по таблице 2.

Таблица 2 – Оценка K_{динам}

Динамика	Параметр ESG
<10 %	1
≥10 %	1,15
≥50 %	1,25
≥75 %	1,5

Учитывая вышеизложенное, расчетная формула для оценки экологического аспекта ЦБК принимает вид:

$$\begin{aligned}
 & (ESG_{\text{ндт}} + ESG_{\text{ндт}} * K_{\text{план}}) * K_{\text{динам ндт}} + \\
 & + (ESG_{\text{пт}} + ESG_{\text{ндт}} * K_{\text{план}}) * K_{\text{динам пт}} * + \\
 & + ESG_{\text{общ}} * K_{\text{динам общ}} + ESG_{\text{тпзв}} * K_{\text{динам тпзв}}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$ESG = \frac{\quad}{4} * K_{CO_2}.$$

После проведения оценки каждого ключевого вопроса производится оценка экологического аспекта ESG-рейтинга и рассчитывается среднеарифметический рейтинговый балл экологического аспекта ESG.

По результатам расчета рейтингового балла ESG определяется категории ESG ЦБК в соответствии с рисунком 4 [9].

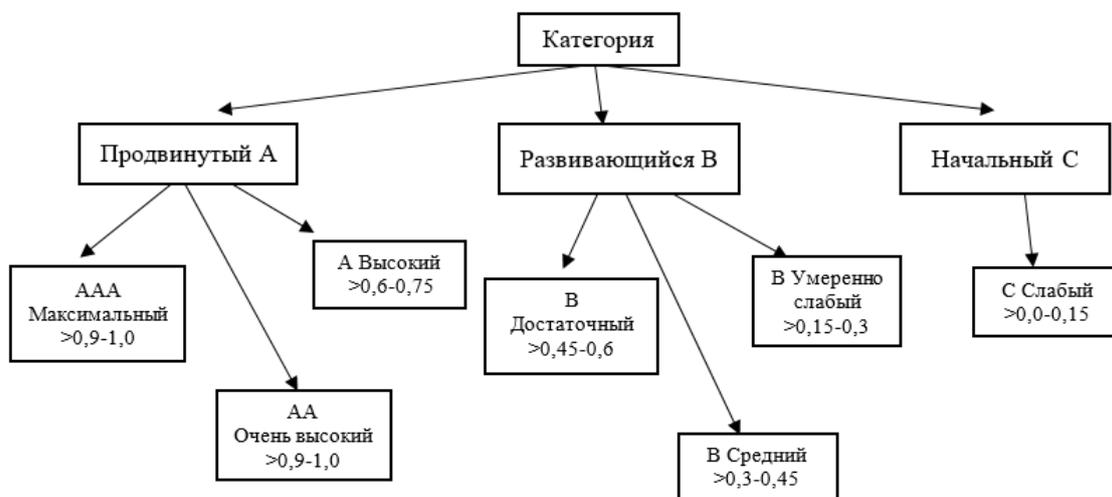


Рисунок 4 – Соответствие итогового балла уровню ESG-рейтинга

Заключение. Действующие методики оценки ESG-рейтинга учитывают только текущие экологические параметры предприятия и сжатые плановые параметры.

При оценке рейтинга ESG ЦБК предложено учитывать динамику изменения нагрузки на окружающую среду по ретроспективным данным и планам реализации природоохранных мероприятий. Анализ ретроспективных данных предполагается проводить за 5–7 летний период.

Предлагается проводить оценку плановых ESG рейтингов с повышающими коэффициентами для мероприятий, находящихся на высокой стадии реализации.

Предложено расширить экологический блок оценки ESG рейтингов ЦБК дополнительными экологическими параметрами (наилучшие доступные технологии; перспективные технологии; общие экологические вопросы; технологические показатели загрязняющих веществ).

Для оценки балльных факторов ESG ЦБК разработаны перечень оценочных вопросов и программа в Microsoft Excel, позволяющая автоматизировать эти расчеты.

Список литературы:

1. Наилучшие доступные технологии (НДТ). ИТС 1-2023 Целлюлозно-бумажное производство. – Москва, 2023. – С. 459;
2. ESG-контроль: как оценивают устойчивость городов и компаний – URL: <https://rbc-mem.linestest.com/article-80.html?ysclid=m1iymr6qnc298026535> (дата обращения 15.02.2024) – текст электронный.

3. Методология присвоения ESG-рейтингов. – 2023. – Версия 5.0 – URL: https://www.ra-national.ru/wp-content/uploads/2023/12/metodologija-prisvoenija-esg-rejtingov-versija-5.0_vernaja-1.pdf. (дата обращения: 07.04.2024) – текст электронный.
4. Методология присвоения ESG-рейтингов. – 2023 – URL: https://ratings.ru/files/methodologies/2023/ESG_methodology_270623.pdf. (дата обращения: 09.04.2024) – текст электронный.
5. Методика присвоения ESG-рейтингов компаниям и финансовым институтам. – 2024. – Версия 3.1.1 – URL: https://raex-rr.com/files/methods/RAEX_ESG_method_project.pdf. (дата обращения: 12.04.2024) – текст электронный.
6. What is an ESG-Rating? – URL: <https://www.fool.com/terms/e/esg-rating/> (дата обращения 15.02.2024) – текст электронный.
7. Company ESG Risk Ratings – URL: <https://www.sustainalytics.com/esg-ratings> (дата обращения 15.02.2024) – текст электронный.
8. ГОСТ Р 53636-2009. «Целлюлоза, бумага, картон, Термины и определения» от 01.01.2011.
9. Белодубровский, Р. Б. Щелочные способы производства / Р. Б. Белодубровский // Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. матер.: в 3 т. Т. 1, ч. 2: Производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2003. – С. 7.
10. Личутина, Т. Ф. Оптимизация нормирования сброса стоков предприятий ЦБП в водотоки / Т. Ф. Личутина, И. В. Мискевич, О. С. Бровко, М. А. Гусакова. – Екатеринбург, 2005.
11. Об охране окружающей среды: Федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 28.11.2015 г.) // СПС КонсультантПлюс».
12. Метрология присвоения ESG-рейтингов. – Москва.: ООО «НКР» 2023. – С. 89.

References:

1. Best Available Technologies (BAT). ITS 1-2023 Pulp and Paper Production. - Moscow.: 2023. - P. 459;
2. ESG control: how the sustainability of cities and companies is assessed - URL: <https://rbc-mem.linestest.com/article-80.html?ysclid=m1iymr6qnc298026535> (accessed on 15.02.2024) - electronic text;
3. Methodology for assigning ESG ratings. 2023. Version 5.0 - URL: https://www.ra-national.ru/wp-content/uploads/2023/12/metodologija-prisvoenija-esg-rejtingov-versija-5.0_vernaja-1.pdf. (date of access: 07.04.2024) – electronic text;
4. Methodology for assigning ESG ratings. 2023 – URL: https://ratings.ru/files/methodologies/2023/ESG_methodology_270623.pdf. (date of access: 09.04.2024) – electronic text;
5. Methodology for assigning ESG ratings to companies and financial institutions. 2024. Version 3.1.1 – URL: https://raex-rr.com/files/methods/RAEX_ESG_method_project.pdf. (date of access: 12.04.2024) – electronic text;

6. What is an ESG-Rating? – URL: <https://www.fool.com/terms/e/esg-rating/> (date of access 15.02.2024) – electronic text;
7. Company ESG Risk Ratings – URL: <https://www.sustainalytics.com/esg-ratings> (date of access 15.02.2024) – electronic text;
8. GOST R 53636-2009. "Pulp, paper, cardboard, Terms and definitions" dated 01.01.2011;
9. Belodubrovsky, R. B. Alkaline production methods / R. B. Belodubrovsky // Technology of pulp and paper production: reference materials: in 3 volumes. Vol. 1, part 2: Production of semi-finished products. - St. Petersburg: Politekhnik, 2003. - P. 7;
10. Lichutina, T. F. Optimization of Standardization of Wastewater Discharge from Pulp and Paper Industry Enterprises into Watercourses / T. F. Lichutina, I. V. Miskevich, O. S. Brovko, M. A. Gusakova. - Yekaterinburg, 2005;
11. On Environmental Protection: Federal Law of the Russian Federation of January 10, 2002 No. 7-FZ (as amended on November 28, 2015) // SPS ConsultantPlus;
12. Metrology of Assigning ESG Ratings. - Moscow.: OOO NKR 2023. - P. 89.

© Мозгушин М. А., Анурин Е. К., 2024

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПОСЛЕ СЖИГАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

студент **Черкасова Анастасия Витальевна**,
науч. руководитель: канд. хим. наук, доцент

Смирнова Анастасия Игоревна,

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

науч. руководитель: доктор хим. наук, доцент

Дягилева Алла Борисовна,

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе приводятся варианты перспективных направлений использования зольных отходов, образовавшихся в результате сжигания коры и осадков сточных вод целлюлозно-бумажных производств. Наличие соединений алюминия и кремния в составе зольных отходов могут обеспечивать эффективное применение в качестве композиционного коагулянта-флокулянта в технологии очистки производственных стоков. Ещё одним вариантом применения зольных отходов целлюлозно-бумажной промышленности предлагается рассмотреть возможность их использования в качестве минеральной добавки при производстве цемента.

Ключевые слова: зола, осадки сточных вод, вторичные материалы, отходы, целлюлозно-бумажная промышленность.

PRACTICAL USE OF ASH WASTE AFTER INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

Student **Cherkasova Anastasia Vitalievna**

Academic Advisor: PhD in Chemistry, Associate Professor

Smirnova Anastasia Igorevna, Saint Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Academic Advisor: Grand PhD in Chemistry, Associate Professor

Dyagileva Alla Borisovna, Saint Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper presents options for promising areas of use of ash waste generated as a result of burning bark and sewage sludge from pulp and paper industries.

The presence of aluminum and silicon compounds in the composition of ash waste can ensure effective use as a composite coagulant-flocculant in industrial wastewater treatment technology. Another option for the use of ash waste from the pulp and paper industry is to consider the possibility of using it as a mineral additive in the production of cement.

Keywords: ash, sewage sludge, secondary materials, waste, pulp and paper industry.

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) относятся к первой категории воздействия на окружающую среду и являются значительными источниками генерации отходов в виде коры и осадков сточных вод (ОСВ). Предполагаемое технологическое решение по утилизации этих отходов связано с совместным сжиганием отходов данного типа при условии, если это увеличивает энергетическую эффективность предприятия. Если отходы недостаточно калорийны и не подлежат сжиганию, то они транспортируются на полигоны. В любом из этих случаев происходит увеличение нагрузки на территории, которые отведены под хранения отходов.

Осадки сточных вод ЦБП представляют собой обводненную композицию органических и минеральных примесей, что заставляет их относить к классу труднообезвоживаемых полидисперсных суспензий. Основные макрокомпоненты ОСВ ЦБП – инертные соединения, которые включают в свой состав различные соединения, в том числе соединения кремния – от 40 %; алюминия – до 10 %; кальция – 5 % и более; железа – до 7 %. Органическая составляющая осадков (15 % абс. сух. массы) является производными лигногуминовых веществ, а также микроэлементами (азот, фосфор, калий), которые ранее добавлялись в виде биогенной добавки при осуществлении процесса очистки.

Целью данной работы является обоснование возможных вариантов практического использования золы после сжигания осадков сточных вод ЦБП, которые должны способствовать развитию комплексных технологий ресурсосбережения, обработки, утилизации и обезвреживания такого типа отходов. Поиск этого решения продиктован необходимостью развития ряда технологий с использованием вторичных материалов в соответствии с критериями развития национальных проектов (национальный проект «Экология», «Жилье», Энергостратегия-2035).

Подготовка золошлаковых отходов (ЗШО) специальным образом для альтернативного применения в качестве композиционного коагулянта-флокулянта (ККФ) для очистки сточных вод отрасли в период импортозамещения и расширения рынка реагентов является перспективной. Технология подготовки золы может быть выполнена по технологии патента [1, с. 1]. Применение специально подготовленной золы в качестве реагента обусловлено содержанием соединений алюминия (694 мг/дм³), кремния (909 мг/дм³), железа (80 мг/дм³) и других элементов, обладающих коагулирующими свойствами.

В системе водоподготовки природных вод Северо-Западного региона было проведено исследование данного реагента в сравнении с традиционным товарным коагулянтом (сульфатом алюминия). По результатам исследования установлено, что коагулирующая способность зольного коагулянта зависит от условий процесса и дозы выбранного реагента (рис. 1).

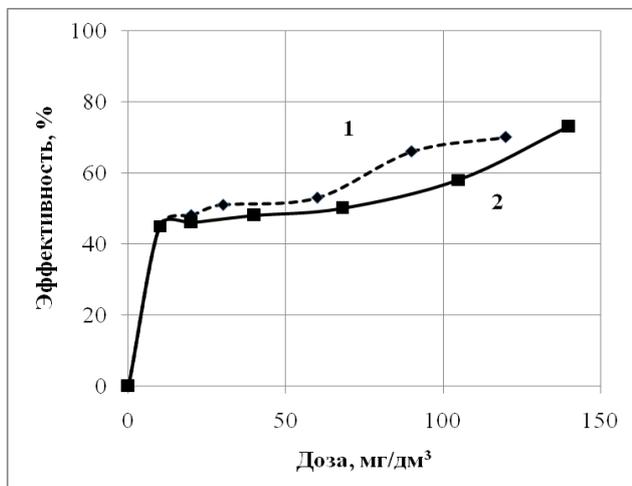


Рисунок 1. Зависимость эффективности снижения цветности природной воды (исходная цветность 100 °ПКШ) с помощью различных реагентов от дозы активного алюминия в их составе при $\text{pH}=6,2 \pm 0,2$. Используемые реагенты: 1 – ККФ; 2 – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

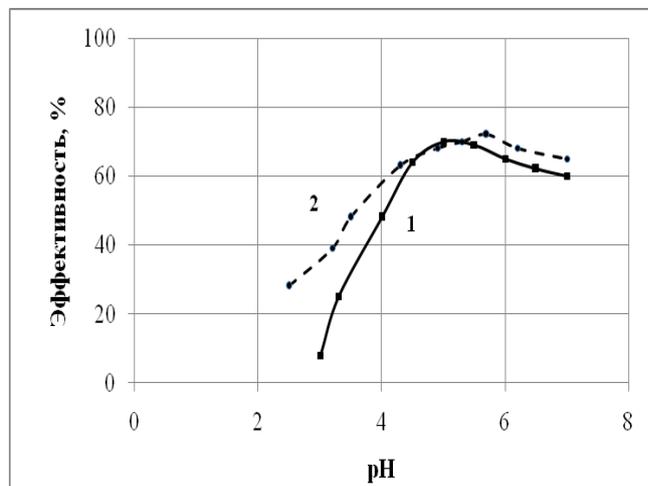


Рисунок 2. Зависимость эффективности осветления модельных биологически очищенных сточных вод сульфитного производства от pH среды (ХПК 500 мг $\text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$; 560 ° КПШ) при введении зольного ККФ с активной концентрацией по Al^{3+} 15 (1) и 35 (2) мг $\cdot \text{л}^{-1}$ в растворе

Как видно из рис. 1, эффективность очистки при использовании двух типов коагулянтов соизмерима. Преимущество зольного коагулянта-флокулянта состоит в том, что он является вторичным продуктом, и его наиболее целесообразно использовать непосредственно на предприятиях целлюлозно-бумажной отрасли, где он и образуется. Такой подход в технологии очистки воды способствует решению задачи замкнутого ресурсного цикла по использованию алюмосодержащих компонентов. Эта зольная композиция может быть использована не только на стадии водоподготовки, но и в процессе очистки сточных вод, где содержатся лигнинные компоненты различной природы.

На рис. 2 представлена часть исследований по осветлению модельных биологически очищенных сточных вод сульфитного производства. Эффективность осветления при использовании зольного ККФ значительно повышается, и на выходе вода после обработки может соответствовать требуемому диапазону pH. Причем эта цветность значительно меньше фоновой концентрации в водном объекте, вода которого используется для водоподготовки. Если предусмотреть систему реагентной подготовки до стадии биологической очистки (СБО), то в этом случае следует ожидать улучшение основных параметров СБО (снижение объема активного ила, снижение энергозатрат на окисление кислорода и ряда других параметров). Однако для более конкретных рекомендаций необходимо провести комплекс научно-

исследовательских работ для отработки технологического регламента по организации СБО.

Кроме того, потребителями этого зольного ККФ, как альтернатива традиционным реагентам, могут являться предприятия коммунального хозяйства, которые используют процессы физико-химической обработки воды различного происхождения.

Авторами проведен анализ научной литературы [2, с. 23; 3, с. 19; 4, с. 15-17], где еще одним перспективным направлением использования ЗШО является производство бетонов в соответствии с требованиями ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные» в качестве минеральной составляющей [5, с. 2].

Установлено, что зола в своем химическом составе, как правило, содержит такие соединения, как SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 и Fe_2O_3 в разных количествах в зависимости от природы сжигаемых материалов. Потенциальное содержание минеральных веществ в ЗШО после сжигания осадков может способствовать формированию пространственных структур, придающих прочность цементу. Однако необходимо учитывать, что в качестве минеральной составляющей может быть использована разная зола от сжигания различных видов отходов, что может требовать существенной корректировки для создания оригинальной композиции цементной смеси. На основе литературных данных и экспериментальных исследований в таблице представлены обобщенные сведения по составу минеральной части золы от сжигания отходов предприятий ЦБП.

Таблица – Усредненный сравнительный химический состав золы от сжигания отходов и осадков ЦБП [6, с. 58; 7, с. 9]

Содержание оксидов, % масс.									
№	Топливо	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
1	кора	26,0	7,1	3,5	22,8	1,5	-	-	-
2	кора + осадки сточных вод ЦБП	16,3	6,25	6,3	13,2	-	-	-	-
3	осадки сточных вод	41,8	22,4	14,04	4,99	1,24	0,2 1	0,88	1,4

Использование ЗШО в строительной индустрии решает сразу несколько проблем – утилизацию большого количества накопленной золы в золоотвалах по всей территории России и удешевление стоимости конечного продукта. Положительный технологический эффект достигается за счет сохранения прочности и усадки цементобетонной смеси при добавлении золошлаков, что позволяет их внедрять в современные технологии производства цемента.

Таким образом, потенциальное использование золы-уноса в качестве вторичного сырья в технологии очистки промышленных стоков и в производстве строительных материалов и цементных изделий является перспективным

направлением в решении задач по утилизации отходов, а также требует более детального изучения составов композиции для целевого использования.

Список литературы:

1. Патент № 2656305 С2 Российская Федерация, МПК С01F 7/26 (2006.01) С22В 3/08 (2006.01) С02F 1/52 (2006.01). Способ получения низкоконцентрированного композиционного коагулянта-флокулянта на основе нефелинсодержащего сырья и золы: 2016138522, заяв. 29.09.2016: опубл. 04.06.2018/ Дягилева А. Б., Смирнова А. И., Дягилева Д. В. – 8 с. – Текст: непосредственный.
2. Шумилова, Л. В. Применение наилучших доступных технологий для повышения экологической безопасности при утилизации золошлаковых отходов / Л. В. Шумилова, А. Н.Хатькова, К. К. Размахнин, Т. Г. Номоконова. – Текст: непосредственный / Вестник Забайкальского государственного университета. – 2022. – Т. 28. – № 8. – С. 23–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-23-34.
3. Tang, V. L. Use of ash and slag waste as a supplementary cementing material / V. L. Tang, H. Ngo Xuan, N. Suan. Текст непосредственный / Bulletin of Belgorod State Technological University named after V G Shukhov. – 2018. – №3 (8). – Pp. 19-27. DOI: 10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511.
4. Yakubu, Y. Potential application of pre-treated municipal solid waste incineration fly ash as cement supplement / Y. Yakubu, J. Zhou, Z. Shu, Y. Zhang, W. Wang, and Y. Mbululo. – Текст непосредственный / Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – vol. 25. – №. 16. – Pp. 16167–16176. DOI:10.1007/s11356-018-1851-3.
5. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 августа 2020 г. № 453-ст: дата введения 01.09.2021 г. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 28 с. – Текст: непосредственный.
6. Дягилева, А. Б. Алюмосодержащие компоненты в очистке сточных вод ЦБП / А. Б. Дягилева, А. И. Смирнова. – Текст: непосредственный / Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2012. – №1. – С. 58-61.
7. Программа ООН. Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе. – Минск, 2007. – 28 с. – Текст: непосредственный.

References:

1. Patent № 2656305 S2 Rossijskaya Federaciya, MPK C01F 7/26 (2006.01) C22B 3/08 (2006.01) C02F 1/52 (2006.01). Sposob polucheniya nizkokoncentrirovannogo kompozicionnogo koagulyanta-flokulyanta na osnove nefelinsoderzhashchego syr'ya i zoly [Patent No. 2656305 C2 Russian Federation, MPK C01F 7/26 (2006.01) C22B 3/08 (2006.01) C02F 1/52 (2006.01). Method of obtaining low-concentration composite coagulant-flocculant on the basis of nepheline-containing raw materials and ash]: Dyagileva A.B., Smirnova A.I.,

- Dyagileva D.V. Application filed on 29.09.2016: publ. 04.06.2018, 8 p. (in Russian).
2. Shumilova, L. V. Primenenie nailuchshih dostupnyh tekhnologij dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti pri utilizacii zoloshlakovyh othodov [Application of the best available technologies to improve environmental safety in ash and slag waste utilization] Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Transbaikal State University]. 2022, T. 28, № 8, pp. 23–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-23-34 (in Russian).
 3. Tang V. L., Ngo Xuan H., Suan N. Use of ash and slag waste as a supplementary cementing material // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2018, №3 (8), pp. 19-27. DOI: 10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511.
 4. Yakubu Y., Zhou J., Shu Z., Zhang Y., Wang W., Mbululo Y. Potential application of pre-treated municipal solid waste incineration fly ash as cement supplement // Environmental Science and Pollution Research. 2018, vol. 25, №. 16, Pp. 16167–16176. DOI:10.1007/s11356-018-1851-3.
 5. GOST 31108-2020. Cementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya [GOST 31108-2020. Cements for general construction. Technical conditions], 2020. 28 p. (in Russian).
 6. Dyagileva A.B., Smirnova A.I. Alyumosoderzhashchie komponenty v ochistke stochnyh vod CBP [Alum-containing components in pulp and paper mill wastewater treatment]/ Cellyuloza. Bumaga. Karton [Pulp. Paper. Cardboard]. 2012, №1, pp. 58-61. (in Russian).
 7. Programma OON. Utilizaciya zoly kotel'nyh, rabotayushchih na drevesnom toplive. Minsk [UN Programme. Utilisation of ashes from wood-fueled boiler-houses. Minsk]. 2007, 28 p. (in Russian).

© Черкасова А. В., 2024

Раздел 2. ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 676.026

МАГНИЙ-РЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ КОТЕЛ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

студент **Анищенко Лидия Сергеевна**,
канд. техн. наук, доцент **Ковалёв Дмитрий Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются экологические и технологические преимущества магний-регенерационного котла (МРК) в целлюлозно-бумажной промышленности. Описываются процессы регенерации химикатов, снижение выбросов вредных веществ, а также энергоэффективность системы. Особое внимание уделяется экологическим аспектам снижения загрязнения воздуха и воды, процессу регенерации, а также возможности использования низкокачественной древесины.

Ключевые слова: магний-регенерационный котел, регенерация химикатов, экология, целлюлозно-бумажная промышленность, выбросы, энергоэффективность.

MAGNESIUM REGENERATION BOILER: ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL ADVANTAGES

Student **Anischenko Lidia Sergeevna**
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kovalev Dmitrii Alexandrovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the ecological and technological advantages of the magnesium regeneration boiler (MRB) in the pulp and paper industry. It describes the processes of chemical regeneration, the reduction of harmful emissions, and the energy efficiency of the system. Special attention is paid to the ecological aspects of reducing air and water pollution, the regeneration process, and the potential use of low-grade wood.

Keywords: magnesium regeneration boiler, chemical regeneration, ecology, pulp and paper industry, emissions, energy efficiency.

Магний-регенерационный котел (МРК) – это технологическое оборудование, используемое для регенерации химикатов в целлюлозно-

бумажной промышленности. Основным принципом работы МРК заключается в замкнутом цикле регенерации отработанных щелоков, содержащих магний, что позволяет сократить затраты на химикаты и снизить объемы выбросов загрязняющих веществ. Благодаря этому, предприятия могут повысить эффективность использования ресурсов и снизить негативное воздействие на окружающую среду [1].

1. Экологические преимущества и воздействие на окружающую среду

Снижение выбросов в атмосферу

МРК является экологически более чистой технологией по сравнению с традиционными, так как сокращаются выбросы в атмосферу. Это подтверждают исследования на Камском ЦБК. Они показали, что внедрение МРК позволило сократить выбросы сернистого ангидрида в два раза, что эквивалентно снижению на 833 тонны в год [2]. Важно отметить, что специальные системы очистки дымовых газов в котле значительно снижают содержание оксидов азота и твердых частиц, что дополнительно уменьшает загрязнение воздуха [3].

Процесс регенерации магния в котле производит серосодержащие газы с пониженной концентрацией, что снижает вредное воздействие на окружающую среду. В Европе магний используется в качестве основного химического компонента, что позволяет уменьшить потребление других химикатов и, как следствие, снизить выбросы вредных веществ, улучшая экологическую составляющую процесса [4].

Интеграция производства этанола на сульфитных варочных заводах с использованием процессов на основе магния также способствует снижению выбросов парниковых газов, особенно когда для выработки энергии используются биоотходы, замещающие потребление угля, что напрямую связано с экологическими преимуществами использования МРК [3]. Кроме того, сжигание упаренных щелоков на магниевой основе в котлах-утилизаторах позволяет минимизировать вредные выбросы в атмосферу, как это показано на примере работы котла МРК-210 [1].

Уменьшение загрязнения водных объектов

Использование МРК на предприятиях способствует значительному снижению загрязнения водных объектов. Например, переход на бисульфитную варку с применением магниевой основы на Камском ЦБК позволил сократить выбросы загрязняющих веществ на 17%, включая взвешенные вещества, фенолы и аммонийный азот [2]. Магниево- и натриево-сульфитные заводы могут быть столь же экологически безопасны, как современные сульфатные заводы, а их сточные воды легче поддаются обработке [5].

Применение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в процессах отбеливания способствует снижению химического потребления кислорода (ХПК) на 30 %, что означает уменьшение содержания органических загрязнителей в стоках. Это важно для защиты водных экосистем, так как снижает риск эвтрофикации и кислородного голодания в водоемах.

Кроме того, использование $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$, в отличие от NaOH , снижает токсичность сточных вод. Эти вещества действуют мягче, улучшая

экологическую совместимость процессов и облегчая очистку сточных вод. Такой подход снижает нагрузку на водные экосистемы, улучшая качество сбрасываемой воды и снижая воздействие на окружающую среду [4].

Экологическая эффективность использования низкокачественной древесины и биотоплива

Применение МРК расширяет возможности для использования низкокачественной древесины, что способствует снижению выбросов парниковых газов, связанных с гниением древесных остатков на лесосеках. В условиях, когда приоритетом становится использование экологически чистого сырья, это имеет особую значимость для лесопромышленного комплекса [2].

Интеграция производства биоэтанола в процессы сульфитной варки на основе оксида магния (MgO) дополнительно повышает экологическую эффективность. Использование древесных остатков с концентрацией сухих веществ до 30 % в качестве сырья позволяет сократить использование угля, заменяя его биоразлагаемыми остатками. Этот подход не только экономически эффективен, но и способствует значительному сокращению выбросов парниковых газов.

Кроме того, энергоэффективная интеграция МРК с производством биотоплива позволяет совместно производить биоэнергию, улучшая экологические показатели предприятия и снижая зависимость от ископаемых видов топлива [3].

Таблица 1 – Соответствие экологическим стандартам

Показатель	Значение показателя	Нормы показателя	Соответствие нормам
Серосодержащие газы (H ₂ S, метилмеркаптан, ДМС), кг/т	0,25–1,0	Сероводород (H ₂ S): до 0,3 кг/т; Метилмеркаптан: до 0,15 кг/т; Диметилсульфид (ДМС): до 0,1 кг/т	Соответствует
Диоксид серы (SO ₂), кг/т	2,0–3,0	1,5–2,5	Превышает
Оксиды азота (NO _x), кг/т	1,5–2,0	1,0–1,5	Превышает
Отходы регенерации химикатов, кг/т	15,0–20,0	15–30	Соответствует
Концентрация золы, г/нм ³	12,9	0,15–0,2	Превышает
Экологическая эффективность, часы кислотной работы в год	240	–	–

Магний-регенерационный котел (МРК) демонстрирует соответствие нормативам по серосодержащим газам и отходам регенерации химикатов, что является положительным аспектом. Однако высокие выбросы диоксида серы (SO_2), оксидов азота (NO_x) и концентрация золы указывают на необходимость модернизации систем очистки и фильтрации для снижения экологической нагрузки. Внедрение более эффективных технологий может улучшить экологические показатели МРК и сократить его воздействие на окружающую среду.

Рекомендации по улучшению:

1. Скрубберы – использование более эффективных мокрых скрубберов поможет значительно снизить выбросы SO_2 . Скрубберы работают за счет промывки газов водой или химическими растворами, что позволяет улавливать диоксид серы и предотвращать его выброс в атмосферу (ИТС).

2. Каталитическое восстановление (SCR) – для сокращения выбросов оксидов азота (NO_x) рекомендуется внедрение технологий селективного каталитического восстановления. SCR позволяет эффективно преобразовывать NO_x в безопасные азот и воду при помощи катализаторов, что помогает значительно уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу.

Внедрение этих технологий может существенно повысить экологическую безопасность МРК, снижая его воздействие на окружающую среду и соответствия нормативам по выбросам.

2. Процесс регенерации и технологические аспекты

Процесс регенерации химикатов в магниевом регенерационном котле (МРК) играет ключевую роль в сокращении потребности в новых химических веществах и снижении отходов. В системе сульфитной варки на магниевом основании до 85 % химикатов восстанавливаются и используются повторно, что значительно снижает расход сырья и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду [2].

При сульфитной варке на основе магния, сжигание концентрированного варочного раствора дает окись магния (MgO) и диоксид серы (SO_2), которые легко извлекаются и преобразуются в новые химические соединения. Окись магния (MgO) собирается из дымового газа и гасится водой для получения гидроксида магния ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), который затем соединяется с диоксидом серы (SO_2) в абсорбционной башне для восстановления варочного раствора. Этот цикл позволяет восстанавливать от 80 до 95 % химикатов, что способствует как экономической эффективности, так и снижению отходов. При этом, некоторые документы указывают, что степень регенерации химикатов (серы и магния) колеблется по разным данным в пределах до 90 % – 95 % (с учетом степени отбора щелоков 98 % – 99,5 %).

Кроме того, МРК интегрирует систему повторного использования промывной воды от отбелки небеленой массы и выпарки, что уменьшает загрязнение и делает процесс более экологически чистым. Замкнутая система водооборота при отбелке позволяет очищать сточные воды сульфитных заводов

через ультрафильтрацию, флотацию и отделение смоляных и жирных кислот. Эти фильтраты используются повторно на первой стадии промывки после варки и возвращаются в систему регенерации химикатов, что позволяет снизить объемы сточных вод и повысить экологическую устойчивость [4].

3. Энергоэффективность и использование тепла

Энергоэффективность и использование тепла являются важными преимуществами магний-регенерационных котлов. В процессе термической обработки щелоков выделяется значительное количество тепла, которое предприятие может использовать для собственных нужд, сокращая зависимость от внешних энергоресурсов. Этот процесс сопровождается сжиганием упаренного щелока, что позволяет не только вернуть химикаты в производство, но и вырабатывать пар и электроэнергию, снижая выбросы загрязняющих веществ и уменьшая потребление угля [4].

Особое внимание заслуживает использование парогазовых смесей, образующихся при отборе щелока после окончания варки. Эти смеси содержат большое количество тепла, которое передается в теплообменники. Конденсация водяного пара в теплообменниках позволяет нагревать воду, используемую для промывки целлюлозы, что значительно сокращает затраты на тепловую энергию. Не сконденсировавшиеся газы направляются на утилизацию, что дополнительно снижает выбросы сернистого ангидрида.

Сжигание концентрированных щелоков в регенерационном котле выступает как важный источник пара и, в некоторых случаях, электроэнергии. Получаемый пар подается в турбины с противодавлением, где происходит генерация электроэнергии, что позволяет предприятию частично обеспечивать себя энергией. Этот процесс особенно эффективен в сценариях с высокой концентрацией твердых веществ, где удается снизить потребление пара на 16,93 % и электроэнергии на 9,40 % [3].

В совокупности, использование МРК позволяет предприятиям эффективно использовать выделяемое тепло, уменьшать потребление внешних источников энергии и снижать выбросы вредных веществ, что делает процесс производства более устойчивым и экономичным.

Список литературы:

1. Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические: каталог продукции / ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ». – Белгород: ЗАО «Энергомаш», 2010. – 20-21 с. – Текст: непосредственный.
2. Применение новых технологий в целлюлозно-бумажном производстве: [сайт]. – URL: <http://www.ecolosorse.ru/ecologs-588-2.html>. – Текст: электронный.
3. Techno-economics of integrating bioethanol production from spent sulfite liquor for reduction of greenhouse gas emissions from sulfite pulping mills / A. M. Petersen, K. Haigh, J. F. Görgens // *Biotechnology for Biofuels*. – 2014. – Т. 7. – №169. – с. 1-14. – Текст: электронный. – URL: <http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/7/1/169>.

4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона» / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва: Бюро НДТ, 2015. – Текст: непосредственный.
5. Pulp & Paper Industry: журнал о целлюлозно-бумажной промышленности. – № 1 (11), сентябрь-ноябрь 2021. – Санкт-Петербург: ООО «АНДРИТЦ», 2021. – с. 31-34. – Текст: непосредственный.
6. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: Постановление от 28 января 2021 г. № 2. – Москва, 2021. – Текст: непосредственный.
7. Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 г. «Об отходах производства и потребления». – Москва, 1998. – 56 с. – Текст: непосредственный.

References:

1. HRSGs and power technological boilers: product catalog / ZAO “Energomash (Belgorod) - BZEM”. - Belgorod: CJSC “Energomash”, 2010. - 20-21 с. - Text: direct.
2. Application of new technologies in pulp and paper production: [website]. - URL: <http://www.ecolosorse.ru/ecologs-588-2.html>. - Text: electronic.
3. Techno-economics of integrating bioethanol production from spent sulfite liquor for reduction of greenhouse gas emissions from sulfite pulping mills / A. M. A. M. Petersen, K. Haigh, J. F. Görgens // Biotechnology for Biofuels. - 2014. - Т. 7. - №169. - с. 1-14. - Text: electronic. - URL: <http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/7/1/169>.
4. Information and technical reference book on the best available technologies “Production of cellulose, wood pulp, paper, cardboard” / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. - Moscow: NDT Bureau, 2015. - Text: direct.
5. Pulp & Paper Industry: pulp and paper industry magazine. - No. 1 (11), September-November 2021. - St. Petersburg: LLC “ANDRITZ”, 2021. - с. 31-34. - Text: direct.
6. On approval of sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness for humans of habitat factors”: Resolution of January 28, 2021 No. 2. - Moscow, 2021. - Text: direct.
7. Federal Law No. 89-FZ of June 24, 1998 “On production and consumption wastes”. - Moscow, 1998. - 56 с. - Text: direct.

© Анищенко Л. С., Ковалёв Д. А., 2024

О ВОЗМОЖНОСТИ ИННОВАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СУЛЬФИТНОЙ ВАРКИ НА КРУПНОТОННАЖНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО- БУМАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

магистрант **Бердник Олег Георгиевич**,
аспирант **Зеленцов Матвей Дмитриевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Разработана технология повышения рентабельности и производительности сульфитной варки для крупнотоннажных целлюлозно-бумажных производств. Нами впервые предложена установка оборудования, которое может осуществлять сульфитную варку в качестве синхронизированной системы в виде нескольких параллельных варочных цехов и последовательностей котлов под автоматизированным управлением. В качестве модельного предприятия для будущего внедрения предлагаемой технологии выбран Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат.

Ключевые слова: сульфитная целлюлоза, периодическая варка, инновация, автоматизация, котёл.

Master Student **Berdnik Oleg Georgiyevich**,
Ph.D. Student **Zelentsov Matvey Dmitriyevich**,
Saint Petersburg State University
of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. There was developed a technology for increasing the profitability and productivity of sulfite cooking for large-scale pulp and paper industries. Our project is the first technique of installation of machines carrying out sulfite cooking and working qua synchronized system with the possibility of the configuration of several parallel cooking workshops and digester sequences under automated control. As the model of the future introduction of the offered method, the Kondopoga Pulp and Paper Making Plant has been selected.

Keywords: sulfite cellulose, batch pulping, innovation, automation, digester.

В настоящее время применение современного оборудования, по возможности точного и своевременного, с достаточной термостойкостью и износостойкостью позволяет гарантировать отсутствие непроваренной целлюлозы после сульфитной варки [1, 2]. Помимо технологов необходимость

использования современного, пригодного для автоматизации оборудования подтверждают и исследования экономистов [3].

Использование автоматизированного синхронизированного управления – актуальная проблема наряду с модернизацией оборудования, оно тем более важно, что позволяет сэкономить до 20 % энергии даже при отсутствии замены механизмов и машин [3–5].

Помимо замены оборудования и автоматизации процесса, мы поставили перед собой третью задачу – возможность одновременного функционирования нескольких последовательностей варочных котлов при сульфитной варке. Подобная технология комплексной автоматизации разработана для сульфитной варки впервые.

Проводя данное исследование в качестве прикладного, мы выбрали в качестве модельного предприятия Кондопожский ЦБК, выбрали удобные для него модели машин в соответствии с требованиями проекта, создали график гипотетической замены оборудования и произвели экономическую оценку внедрения технологии, а также предложили возможные альтернативы для тех крупнотоннажных целлюлозно-бумажных комбинатов сульфитной варки, которым данные модели не подойдут.

1. Этапы разработки технологии и требования к ней

Разработка включает проектирование последовательности варочных котлов и вспомогательного оборудования. Необходимые требования предполагали, что технологические характеристики котлов позволяют применять их как единую последовательность в цеху сульфитной варки и/или продублировать в нескольких таких цехах. Инновационность технологии заключается в том, что впервые в истории сульфитной варки данные последовательности варочных котлов в цехах способны управляться как единая система в компьютерной программе.

Поскольку исследование носит прикладной характер, для Кондопожского ЦБК (предприятия, выбранного в качестве модели) были предложены определенные модели варочных котлов и вспомогательного оборудования, а также произведены экономические расчеты доходов и расходов, сопряженных с предлагаемым введением одной новой последовательности варочных котлов. Однако для тех предприятий, которым данные машины и механизмы не подойдут, предложены другие поставщики и/или модели.

Предлагаемая технология предназначена исключительно для крупнотоннажных производств периодической сульфитной варки. Коллектив авторов не ставил задачи модернизации и/или инновации на малотоннажных производствах, а также на производствах сульфатной варки, так как для них подобные проекты уже разработаны и не имеют научной новизны [6].

2. Внедрение оборудования на примере модельного предприятия

На данный момент на модельном предприятии (Кондопожском ЦБК) функционирует один варочный цех, в котором последовательно установлены 10 варочных котлов модели «ВК-160». Эти котлы управляются вручную, что в

случае периодической варки не позволяет точно соблюсти технологические параметры и теоретически должно повышать процент брака в несколько раз [7].

В силу специфики периодической варки, периодичности поставок древесины на КЦБК режима работы его сотрудников целесообразно установить 4 или 5 котлов в каждом варочном цехе. На текущий момент линия сортирования целлюлозы обеспечивает лишь переработку существующего варочного цеха. Мы предлагаем установить 5 заказных варочных котлов емкостью по 320 кубических метров каждый, которые могут быть заказаны и установлены компаниями «Метсо» (г. Хельсинки), «Химсталькон-Инжиниринг» (г. Саратов), «Завком» (г. Тамбов, АО «Тамбовский завод «Комсомолец»). С учетом экономической и логистической целесообразности для модельного предприятия, расположенного в городе Кондопога, было бы предпочтительнее заказать котлы от «Метсо», но в силу временных обстоятельств они недоступны для модельного предприятия в августе 2024 года, следовательно, мы выбираем следующий вариант по дешевизне доставки и установки – котлы от «Химсталькон-Инжиниринг».

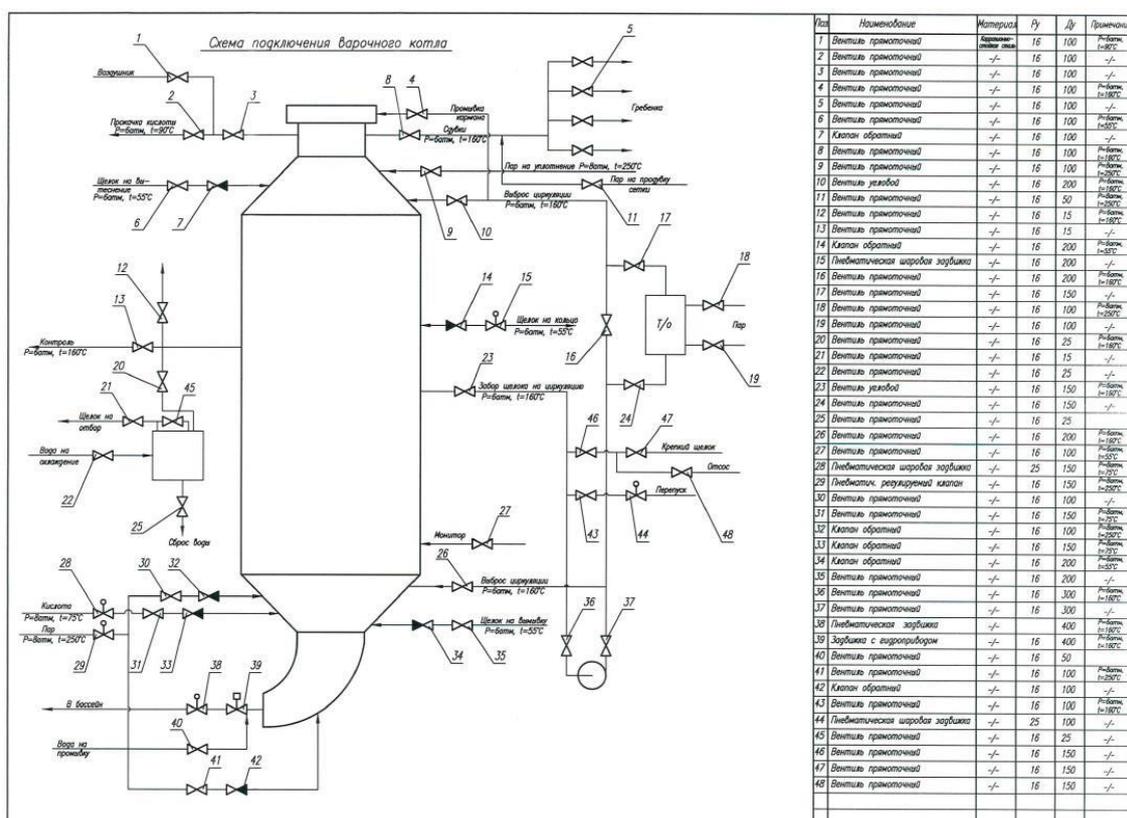


Рисунок 1 – Устройство заказного варочного котла

Для обеспечения бесперебойной работы новых котлов и постоянного обновления показателей необходимо вспомогательное оборудование – новая линия сортирования целлюлозы, новый насосный парк, новая система АСУ, новое оборудование КИПиА (арматура, датчики, контроллеры) и новое баковое хозяйство.

Помимо оборудования, необходимо программное обеспечение, которое могло бы обеспечивать синхронизированную работу котлов одного или

нескольких варочных цехов, оснащенных по данному проекту. На август 2024 года программы подобного типа способна поставить модельному предприятию японская корпорация «Ёкогава», также их поставляет компании «Валмит» и АО «Научно-производственная фирма «Система-Сервис».

3. Экономическая сторона проекта

Рассмотрим относительно пессимистичный, но довольно распространенный при ограниченных бюджетах предприятия экономический прогноз, связанный с введением лишь одного цеха по предлагаемой технологии.

Стоимость одного котла от выбранного поставщика на август 2024 года составляет 180 миллионов рублей, пяти котлов – 900 миллионов рублей.

Установка 5 котлов требует использования 7 насосных агрегатов. Для модельного предприятия наиболее экономичным вариантом является выбор поставщика «А-Текнолоджи» (10,6 миллионов рублей), для других предприятий могут быть целесообразны альтернативные поставщики «Бумхимтех», «Гидромонтаж».

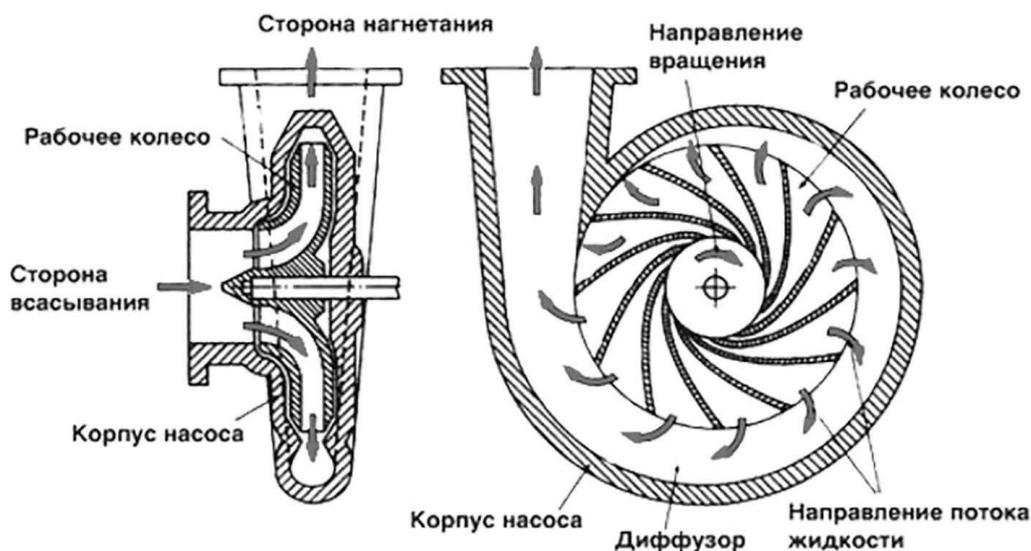


Рисунок 2 – Устройство насосного агрегата

Каждый котел требует 52 единицы арматуры. Наиболее дешево поставку 260 единиц арматуры с учетом оптовой скидки осуществляет также поставщик «А-Текнолоджи» – 53,15 миллионов рублей. Помимо него, арматуру способны поставить производители «Dortis» и «Dialkon».

Выбор производителей теплообменных аппаратов для варочных котлов очень широк, но цена поставки 5 аппаратов на август 2024 года составляет около 6 миллионов рублей.

Стоимость поставки труб от выбранного для модельного предприятия поставщика «Трубное решение» составляет около 70 миллионов рублей, другие поставщики труб с соответствующими характеристиками – «М2» и «ЧТК Сталь».

Строительные работы за 300 миллионов рублей способна выполнить компания «КСМ». Альтернативные ей фирмы – «Стройальянс» и

«Стройтехника». Монтажные работы за ту же сумму готова произвести фирма «СМК ОРИОН» (несущественно отличаются по стоимости в регионе модельного предприятия и могут подойти другим предприятиям расценки на монтажные работы «Инжиниринг Экспертс»). В стоимость монтажных работ входит поставка расходомеров «Proline Promag P» и преобразователей «Aplisens» и «Эмис»; данные приборы необходимы для синхронизированного автоматизированного управления варкой.

Стоимость программного обеспечения для АСУ от компании «Ёкогава» составляет 30 миллионов рублей.

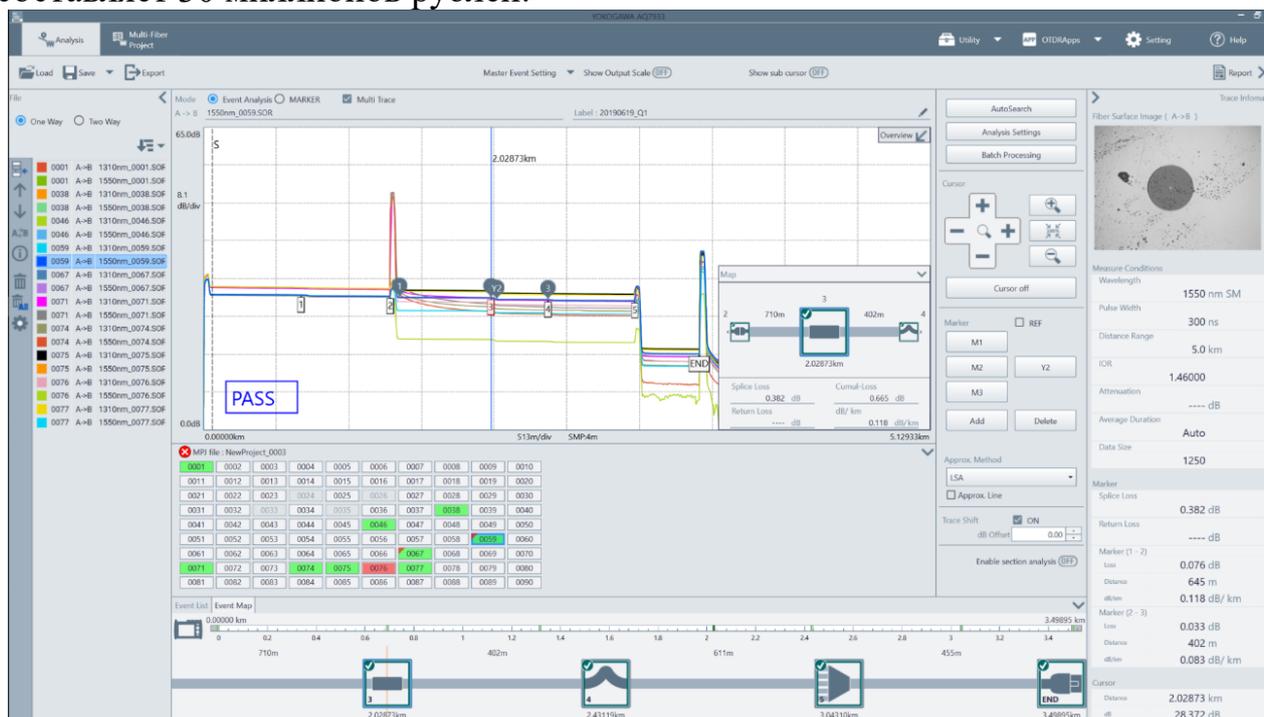


Рисунок 3 – Работа программного обеспечения «Ёкогава»

Таким образом, стоимость комплексной автоматизации одного цеха периодической сульфитной варки по предложенной технологии составляет около 1,643 миллиардов рублей.

Годовой дефицит собственной целлюлозы на модельном предприятии составляет 12692 тонны. Таким образом, потенциальная прибыль от внедрения данной технологии составляет 349 миллионов рублей в год. Срок окупаемости проекта равняется 4,71 годам.

В случае введения в строй не одного, а нескольких синхронизированно управляемых цехов рентабельность и окупаемость возрастут, так как введение в строй каждого нового цеха не требует дополнительного программного обеспечения.

4. Выводы и перспективы

Разработана технология модернизации и автоматизации сульфитной варки и замены оборудования с автоматизацией линий варки при помощи компьютерной программы, управляющей варочными котлами цеха или нескольких цехов как синхронизированной системой. Предложены определённые машины и производители как для предприятия, выбранного в

качестве модельного, так и для других, которым данные машины могут не подойти; приложены экономические расчеты, доказывающие высокую рентабельность проекта. Научная новизна исследования состоит во впервые разработанной технологии модернизации оборудования в неразрывной связи с комплексной автоматизацией и возможностью использования нескольких параллельных цехов в периодической сульфитной варке. После реализации проект позволит тому или иному предприятию увеличить выработку собственной целлюлозы, снизить количество брака, расход воды и электроэнергии, а также фонд оплаты труда. Технология предназначена для крупнотоннажных целлюлозно-бумажных комбинатов, применяющих периодическую сульфитную варку.

Список литературы:

1. Shen W., Chen X. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2009. – vol. 48. – P. 8983–8984.
2. Фатхуллин, К. А. Некоторые аспекты процесса перекачивания сульфитных щелоков и их концентратов / К. А. Фатхуллин, Р. Е. Агишев, Г. А. Тептерева // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. – 2024. – Том 1. – №2. – С. 99–102.
3. Бурдин, Н. А. Технический уровень лесного сектора Российской Федерации: состояние, проблемы // *Лесной вестник*. – 2012. – №5. – С. 50–55.
4. Wen Z., Xu C., Zhang X. Integrated Control of Emission Reduction, Energy-Saving and Cost-Benefit Using a Multi-Objective Optimization Technique in the Pulp and Paper Industry // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – vol. 49. – issue 6. – P. 3639–3642.
5. Mboowa D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2021. – vol. 14. – P. 1–2.
6. Choi H., Son S., Kwon J.S. Inferential Model Predictive Control of Continuous Pulping under Grade Transition // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – vol. 60. – issue 9. – P. 3699.
7. Ouyang X., Deng Y., Qian Y., Zhang P., Qiu X. Adsorption Characteristics of Lignosulfonates in Salt-Free and Salt-Added Aqueous Solutions // *Biomacromolecules*. – 2011. – vol. 12. – P. 3317–3318.

References:

1. Shen W., Chen X. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2009. – vol. 48. – P. 8983–8984.
2. Fatkhullin K.A., Agishev R.Y., Teptereva G.A. Nekotoryye aspekty protsessa perekachivaniya sulfitnykh schelokov i ikh kontsentratov [Some aspects of the

- process of pumping sulfite liquors and their concentrates] // *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya* [Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw]. – 2024. – vol. 1. – issue 2. – P. 99–102.
3. Burdin N.A. Tekhnicheskiy uroven lesnogo sektora Rossiyskoy Federatsii: sostoyaniye, problemy [The technical level of forestry in the Russian Federation: its condition and problems] // *Lesnoy vestnik* [The Timber Newspaper]. – 2012. – vol. 5. – P. 50–55.
 4. Wen Z., Xu C., Zhang X. Integrated Control of Emission Reduction, Energy-Saving and Cost-Benefit Using a Multi-Objective Optimization Technique in the Pulp and Paper Industry // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – vol. 49. – issue 6. – P. 3639–3642.
 5. Mboowa D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2021. – vol. 14. – P. 1–2.
 6. Choi H., Son S., Kwon J.S. Inferential Model Predictive Control of Continuous Pulping under Grade Transition // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – vol. 60. – issue 9. – P. 3699.
 7. Ouyang X., Deng Y., Qian Y., Zhang P., Qiu X. Adsorption Characteristics of Lignosulfonates in Salt-Free and Salt-Added Aqueous Solutions // *Biomacromolecules*. – 2011. – vol. 12. – P. 3317–3318.

© Бердник О. Г., Зеленцов М. Д., 2024

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНО-СУЛЬФИТНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА НА НАТРИЕВОМ ОСНОВАНИИ

инженер-технолог **Иванчина Екатерина Алексеевна**,
Пермская целлюлозно-бумажная компания,
г. Пермь, Российская Федерация
магистрант **Чудинов Андрей Сергеевич**,
Пермский государственный национальный исследовательский
университет,
Пермь, Российская Федерация
главный технолог **Кучеров Владимир Васильевич**,
Пермская целлюлозно-бумажная компания,
г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация. Проведены нейтрально-сульфитные варки лиственничного сырья на натриевом основании с разным расходом химикатов. Приведены сравнительные данные по показателям целлюлозы высокого выхода (ЦВВ) и нейтрально-сульфитного щелока. Показано, что расход химикатов определяется требуемым качеством ЦВВ и породой древесины. Установлено, что оптимальный расход сульфита натрия находится в диапазоне от 12 до 15 % (по SO_2), а буферной добавки – менее 1,0 % (по Na_2O).

Ключевые слова: волокнистые полуфабрикаты, целлюлоза высокого выхода, лиственничная древесина, варочный раствор, нейтрально-сульфитная варка, сульфит натрия, нейтрально-сульфитный щелок.

IMPROVEMENT OF THE NEUTRAL-SULFITE METHOD FOR PRODUCING HIGH-YIELD PULP ON A SODIUM BASE

Engineer-Technologist **Ivanchina Ekaterina Alekseevna**,
PCBK, Perm, Russian Federation
Master' Student **Chudinov Andrey Sergeevich**,
Perm State National Research University, Perm, Russian Federation
Chief Technologist **Kucherov Vladimir Vasilievich**,
PCBK, Perm, Russian Federation

Abstract. Neutral-sulphite pulping of hardwood raw materials on a sodium base with different chemical consumption were conducted. Comparative data on the parameters of high-yield pulp (HYP) and neutral-sulfite spent liquor are presented. It is shown that the chemical consumption is determined by the required quality of HYP and the wood species. It was found that the optimal consumption of sodium sulfite is in the range from 12 to 15% (by SO_2), and the buffering agent is less than 1.0% (by Na_2O).

Keywords: wood pulp, high-yield pulp, hardwood, cooking liquor, neutral-sulfite pulping, sodium sulphite, neutral-sulphite spent liquor.

Волокнистые полуфабрикаты высокого выхода отличаются от целлюлозы близким химическим составом к исходному древесному сырью и особенностями обработки различными химикатами с последующим механическим разделением на отдельные группы волокон. В некоторых источниках указывается разный выход полуфабрикатов высокого выхода из исходного растительного сырья – от 50 до 80 % [1, с. 7], от 65 до 85 % [2, с. 7], выше 55 % [3, с. 10].

Часто полуфабрикат с выходом 67-68 % в нейтрально-сульфитном производстве относят к целлюлозе высокого выхода (ЦВВ) [3, с. 10]. Нейтрально-сульфитный способ получения ЦВВ представляет собой сульфитную обработку древесины в забуференной среде с последовательным освобождением сернистой кислоты под воздействием органических кислот, выделяющихся из древесины [4, с. 10]. Основными химическими реагентами, применяемыми при производстве нейтрально-сульфитной ЦВВ, являются средние соли сернистой кислоты – сульфиты натрия (Na_2SO_3) и аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$), а в качестве щелочной добавки – бикарбонаты или карбонаты натрия (NaHCO_3 и Na_2CO_3), гидроксид натрия (NaOH) и др. [5, с. 83]. В основном, большинство заводов работают на натриевом основании, некоторые предприятия применяют аммониевое основание в связи с высокой стоимостью содопродуктов.

Важными условиями нейтрально-сульфитной варки являются общая непродолжительность процесса при высоких температурах (170-180°C) и давлении (7-9 кгс/см²) [5, с. 83]. Благодаря таким параметрам, рН варочного раствора остается достаточно высоким на протяжении всего варочного процесса, что положительно влияет на сульфирование присутствующего в древесине лигнина, которое в щелочной среде наиболее эффективно, а степень гидролиза углеводов сводится к минимуму [4, с. 10-11].

Исследование заключается в подборе оптимальных расходов химикатов на варку ЦВВ по нейтрально-сульфитному способу на натриевом основании при установленном технологическом режиме (время, температура, давление). Приготовление опытных варочных растворов осуществлялось переводом бисульфита натрия в сульфит натрия натром едким техническим, готовый сульфит доводили до нужной концентрации и поднимали уровень рН до щелочного, далее исследовали влияние разного расхода сернистого ангидрида (SO_2 , г/л) и активной щелочи (Na_2O , г/л) на варочный процесс. Лабораторные варки лиственной древесины (100 % берёза) с влажностью около 50,0 % проводились во вращающемся лабораторном автоклаве объемом 15 литров с гидромодулем 1:3. Этап пропитки длился на протяжении 30-35 минут, варки – 40 минут, сдувки – 10-15 минут. После каждой варки выполнен горячий размол массы в лабораторном дефибраторе до 8-9 °ШР с последующим холодным размолем на центробежно-размалывающем аппарате (ЦРА) до 27...30 °ШР. Отлив образцов бумаги для гофрирования (100 г/м² и 125 г/м²) выполнен на листоотливном аппарате ЛА-3 с целью дальнейших испытаний на такие механические показатели, как абсолютное сопротивление продавливанию (кПа)

(прибор КАИС 8035), разрывная длина (м) (разрывная машина РМБ-30-2М), сопротивление торцевому сжатию (кН/м) (пресс испытательный УСГ-1-2) и сопротивление плоскостному сжатию СМТ (Н) (УСГ-1-2).

Говоря о расходе сульфита натрия, отмечают, что расход определяется требуемым качеством ЦВВ и породой древесины. Использование лиственной древесины взамен хвойной и получение из нее полуфабрикатов высокого выхода (полуцеллюлозы (ПЦ) и ЦВВ) обусловлено ростом спроса на бумагу, картон, в частности, тарный картон, гофроупаковку. Небеленую ПЦ применяют для выработки книжных, газетных, оберточных, спичечных и других видов бумаги, нейтрально-сульфитные ПЦ и ЦВВ – преимущественно для среднего слоя гофрированного картона.

Лиственное сырье отличается большим содержанием гемицеллюлоз – от 24 до 35 % [6, с. 35], что приводит к увеличению выхода и улучшению качества получаемого полуфабриката, оказывает благоприятное влияние на скорость размола и повышение прочности вырабатываемой далее бумаги для гофрирования. Содержание гемицеллюлоз в хвойной древесине составляет от 22 до 30 % [6, с. 35], что меньше, и, поскольку во время варочного процесса значительная часть гемицеллюлоз уходит в раствор, выход технического полуфабриката понижается и достигает, в лучшем случае, 50 % от количества исходной расходуемой хвойной древесины, к тому же для нейтрально-сульфитной варки такой древесины требуется большой расход химикатов и довольно продолжительное время [3, с. 5].

При получении ЦВВ расход сульфита натрия обычно составляет 8-12 % по SO_2 [4, с. 153]. В данном исследовании рассматривались расходы от 12 до 18 % по SO_2 , что обусловлено достижением целевых механических показателей готового полуфабриката. Расход активной щелочи менялся в зависимости от содержания сернистого ангидрида – с 0,65 % до 0,80 % по Na_2O . Механические показатели готовой ЦВВ представлены на рис. 1.

В целом, из рис. 1 видно, что при повышении расхода сернистого ангидрида наблюдается увеличение всех механических показателей. Увеличение расхода сернистого ангидрида позволяет снизить степень непровара волокна примерно на 15 % в сравнении с волокном, полученным при варке с пониженным расходом. Для холодного размола такого полуфабриката требуется больше времени, что является недостатком и обусловлено высокой жесткостью получаемой ЦВВ. Важно отметить, что при такой варке увеличивается уровень pH остаточного щелока, а также его плотность, содержание остаточного SO_2 (г/л) и, в целом, содержание сухих веществ (%) (таблица 1). Высокое содержание остаточного сернистого ангидрида свидетельствует о перерасходе заданных количеств химикатов, поскольку из 18,0 % SO_2 на варочный процесс израсходовалось только 15,5 %. Повышенное содержание SO_2 в остаточном щелоке может отрицательно сказаться на качестве упариваемого из него лигносульфоната жидкого технического.

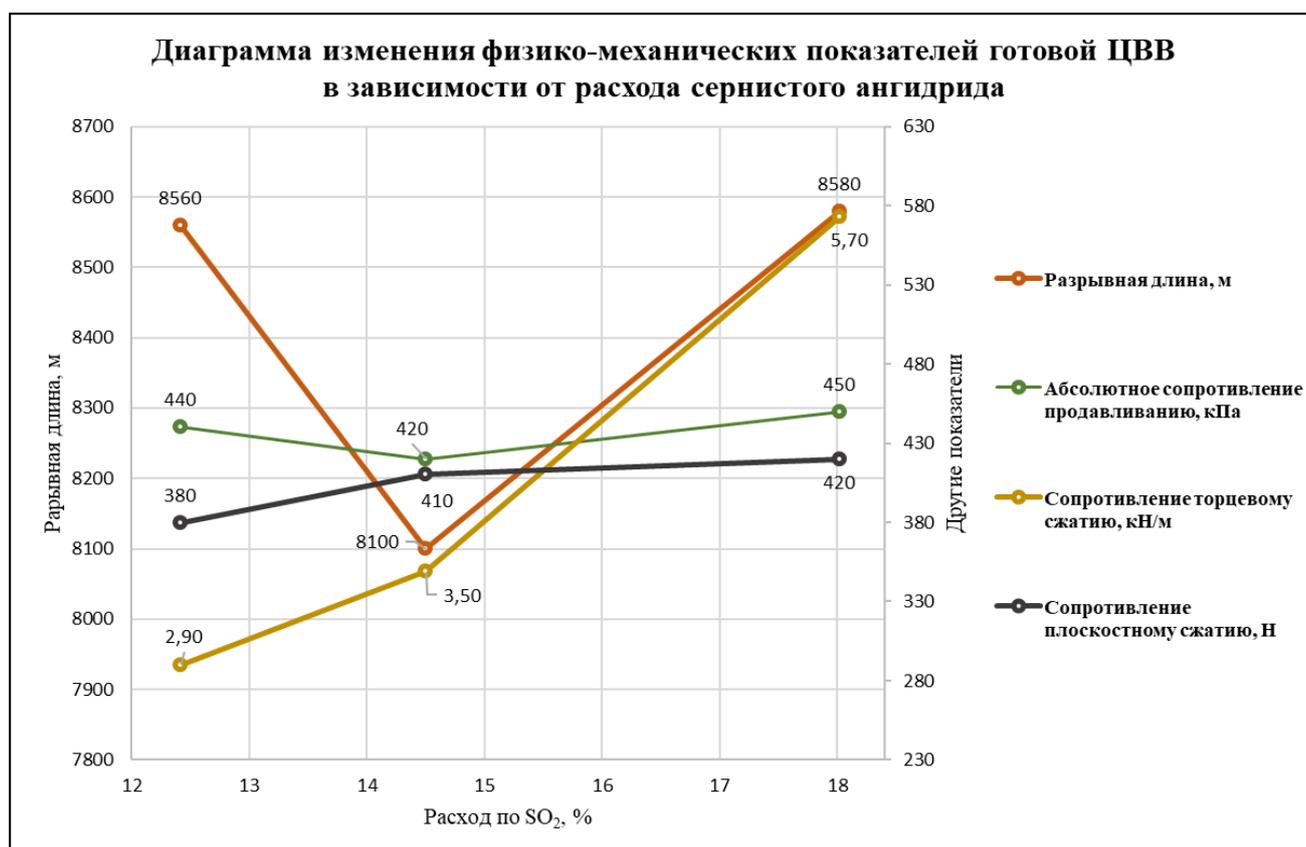


Рисунок 1 – Изменение физико-механических показателей готовой ЦВВ в зависимости от расхода сернистого ангидрида

Таблица 1 – Характеристики остаточного щелока после лабораторных варок при разных расходах сернистого ангидрида

Остаточный щелок			
Расход SO ₂ на варку, %	12,4	14,5	18,0
Плотность, г/см ³	1,111	1,130	1,144
Уровень pH	6,16	6,33	6,63
Содержание сухих веществ, %	13,70	15,98	18,58
Содержание остаточного SO ₂ , г/л	18,56	31,89	37,44

Варка при сниженном расходе сернистого ангидрида отрицательно сказывается на сопротивлениях торцевому и плоскостному сжатиям – в сравнении с варкой на повышенном расходе наблюдается снижение практически на 50 и 10 % соответственно. Последний из показателей – сопротивление плоскостному сжатию – является главным показателем, определяющим пригодность полуфабриката для переработки на бумагу для гофрирования.

В следующих работах [7, 8] изучалось влияние расхода буферной добавки на нейтрально-сульфитный варочный процесс. В работе [7, с. 8] варочный раствор состоял из смеси сульфита и натра едкого технического, а общий расход химикатов на варку лиственной щепы варьировался от 10 до 14 %. Было установлено, что соотношение химикатов 4:1 (Na₂SO₃: NaOH) и общий расход

12 % способствуют достижению наиболее высоких физико-механических показателей, при этом сопротивление плоскостному сжатию достигло 260 Н. В работе [8] авторы сравнивали варочные растворы на натриевом и натриево-аммониевом основаниях, при этом расход только сульфита оставался постоянным и составлял около 14 % (по SO₂). Установлено, что высокие физико-химические показатели волокнистого полуфабриката могут быть достигнуты в обоих случаях, однако на размот ЦВВ на ЦРА после варки на натриевом основании требуется в два раза больше времени.

На рис. 2 представлено изменение физико-механических показателей ЦВВ при увеличении расхода сульфита до 15 % (по SO₂) и повышении расхода активной щелочи с 0,8 до 5,0 %. Установлено, что сопротивление плоскостному сжатию и жесткость ЦВВ (ед. Каппа) находятся в обратной зависимости. Для достижения наиболее высоких значений по СМТ (более 400 Н) жесткость целлюлозы должна составлять ниже 90 ед. Каппа (рис. 3). Расход активной щелочи 5,0 % существенно повышает уровень рН остаточного щелока с 6,5 до 9,7, при этом повышаются плотность (г/см³) и содержание сухих веществ (%) щелока (таблица 2).

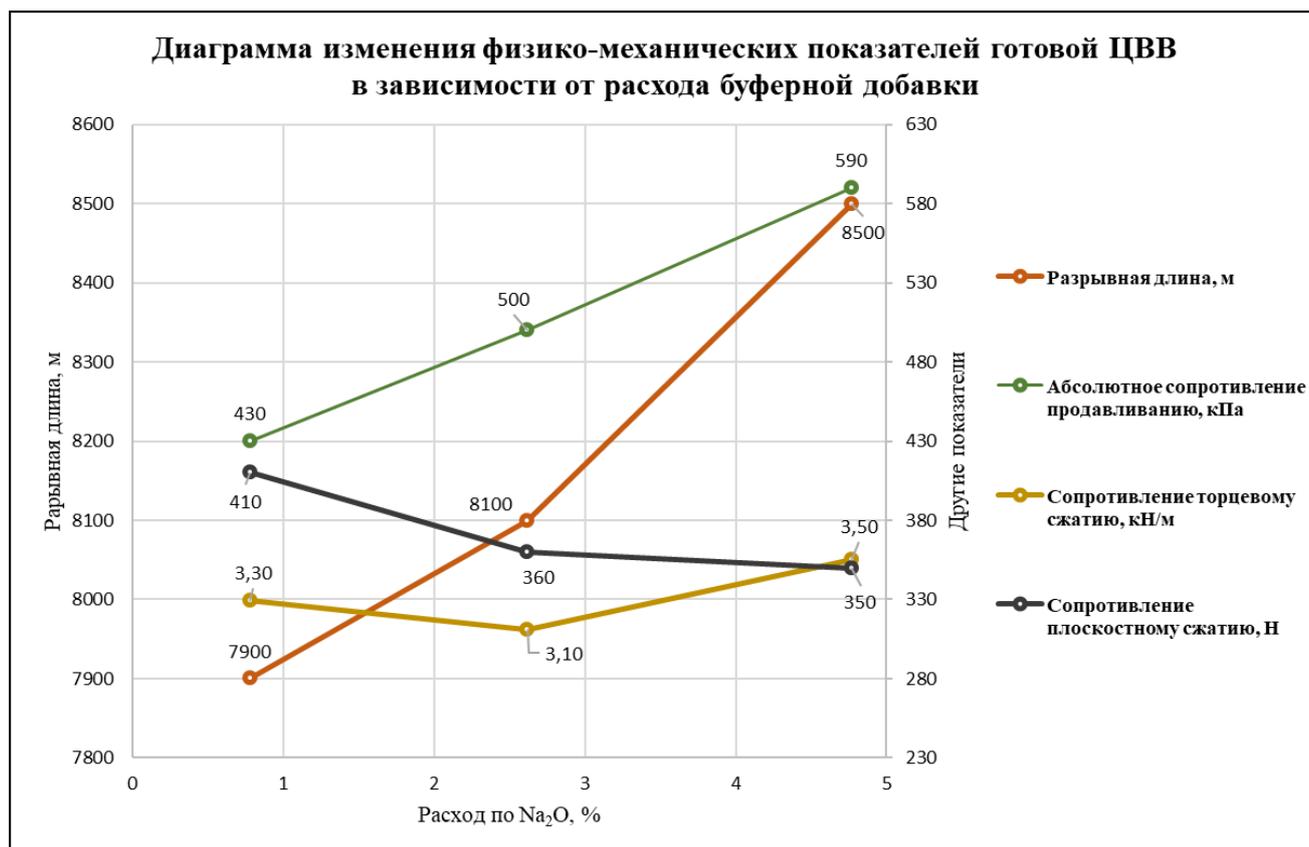


Рисунок 2 – Изменение физико-механических показателей готовой ЦВВ
в зависимости от расхода буферной добавки

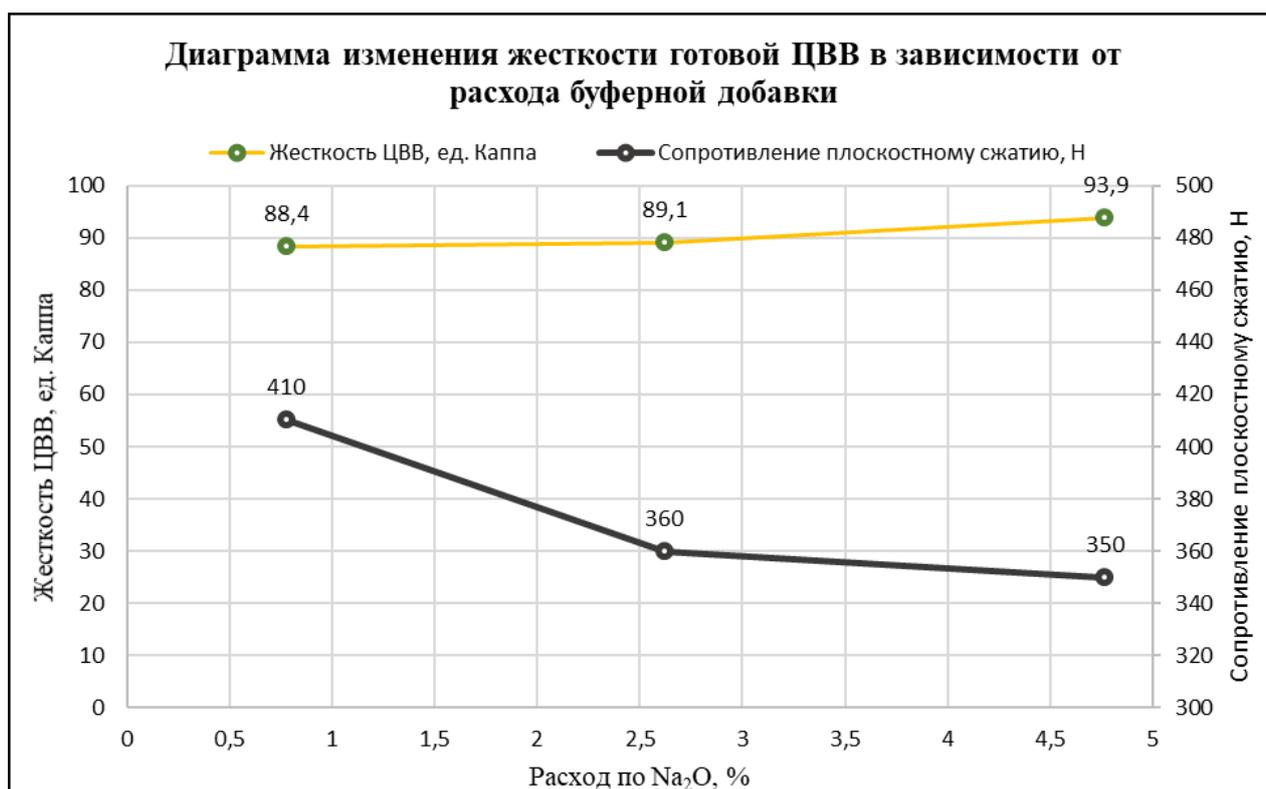


Рисунок 3 – Диаграмма изменения жесткости готовой ЦВВ в зависимости от расхода буферной добавки

Таблица 2 – Характеристики остаточного щелока после лабораторных варок при разных расходах буферной добавки

Остаточный щелок			
Расход SO ₂ на варку, %	15,40	15,62	15,55
Расход Na ₂ O на варку, %	0,78	2,62	4,77
Плотность, г/см ³	1,130	1,140	1,148
Уровень pH	6,56	6,98	9,73
Содержание сухих веществ, %	15,34	17,67	19,95
Содержание остаточного SO ₂ , г/л	37,12	37,12	35,20

Таким образом, расход сульфита натрия определяется требуемым качеством ЦВВ и породой древесины. Установлено, что для достижения высоких физико-химических показателей готовой ЦВВ при варке 100 % лиственного сырья требуемый расход сульфита натрия находится в диапазоне от 12 до 15 % (по SO₂), а активной щелочи – менее 1,0 % (по Na₂O). Такой состав варочного раствора обеспечивает высокие физико-химические показатели готовой ЦВВ и удовлетворительное качество нейтрально-сульфитного щелока.

Выявлено, что при изменении расхода щелочной добавки при постоянном расходе сернистого ангидрида показатели сопротивления плоскостному сжатию (СМТ, Н) и жесткость ЦВВ (ед. Каппа) находятся в обратной зависимости. Для

достижения наиболее высоких значений по СМТ (более 400 Н) жесткость целлюлозы должна составлять ниже 90 ед. Каппа.

Интересным остается вопрос качественного и количественного составов полученных нейтрально-сульфитных щелоков, что будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

Список литературы:

1. Непенин, Н. Н. Технология целлюлозы. В 3-х т. Т. 1. Производство сульфитной целлюлозы. Изд. 2-е, перераб. под ред. д-ра техн. наук Ю. Н. Непенина / Н. Н. Непенин. – Москва: Лесная промышленность, 1976. – 624 с. – Текст: непосредственный.
2. Шамко, В. Е. Полуфабрикаты высокого выхода / В. Е. Шамко. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 320 с. – Текст: непосредственный.
3. Перекальский, Н. П. Производство полуцеллюлозы / Н. П. Перекальский, Н. А. Галеева. – Москва: Гослесбумиздат, 1963. – 256 с. – Текст: непосредственный.
4. Бутко, Ю. Г. Современные методы приготовления сульфитных варочных растворов / Ю. Г. Бутко, Ю. А. Пелевин. – Москва: Лесная промышленность, 1970. – 304 с. – Текст: непосредственный.
5. Иванчина, Е. А. Нейтрально-сульфитный способ получения природных полимеров – целлюлозы и лигносульфонатов: Сборник статей и тезисов докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Возобновляемое природное сырье и продукты на основе его переработки» / Е. А. Иванчина, Р. Е. Агишев, Г. А. Тептерева. – Текст: непосредственный // Уфимский государственный нефтяной технический университет. — 2023. — С. 82-86.
6. Тептерева, Г. А. Становление и развитие производства и применения лигносульфонатов и их модифицированных производных: моногр. / Г. А. Тептерева; Уф. гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа: УНПЦ «Нефтегазовое дело», 2023. – 275 с. – ISBN 978-5-98755-341-1.
7. Дьякова, Е. В. Влияние различных модификаций нейтрально-сульфитной варки на физико-механические свойства полуцеллюлозы / Е. В. Дьякова, Л. А. Миловидова, В. И. Комаров [и др.]. – Текст: электронный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2002. - № 6. – С. 88-94. – URL: http://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=2195 (дата обращения: 31.08.2024).
8. Иванчина, Е. А. Изучение влияния параметров варочного раствора на качественные показатели полуцеллюлозы нейтрально-сульфитной варки: материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В. И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Е. А. Иванчина, Е. В. Белкина, В. В. Кучеров, А. А. Шипигусев. – Текст: непосредственный // Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. – 2023. – С. 111-115.

References:

1. Nepenin, N. N. Technology of cellulose. In 3 vol. 1. Production of sulfite pulp. Ed. by Dr. N. Nepenin / N. N. Nepenin. 2nd edition, revised. - Moscow: Lesnaya Promyshlennaya Izdatelstva, 1976. - 624 c. - Text: direct.
2. Shamko, V. E. Semifabricates of high yield / V. E. Shamko. - Moscow: Izdatelstvo "Lesnaya promyshlennost", 1989. - 320 c. - Text: direct.
3. Perekalsky, N. P., Galeyeva, N. A. Semicellulose production / N. P. Perekalsky, N. A. Galeyeva. - Moscow: Goslesbumizdat Publishing House, 1963. - 256 c. - Text: direct.
4. Butko, Yu. G., Pelevin, Yu. A. Modern methods of preparation of sulfite cooking solutions / Yu. G. Butko, Yu. A. Pelevin. - Moscow: Lesnaya Promyshlennaya Izdatelstva, 1970. - 304 c. - Text: direct.
5. Ivanchina, E. A., Agishev, R. E., Teptereva, G. A. Neutral-sulfite method of obtaining natural polymers - cellulose and lignosulfonates: Collection of articles and theses of reports of the II All-Russian scientific-practical conference "Renewable natural raw materials and products based on their processing" / E. A. Ivanchina, R. E. Agishev, G. A. Teptereva. - Text: direct // Ufa State Petroleum Technical University. - 2023. - C. 82-86.
6. Teptereva, G. A. Becoming and development of production and application of lignosulfonates and their modified derivatives : a monograph / G. A. Teptereva ; Ufa State Oil Technological University. - Ufa: UNPC "Oil and Gas Business", 2023. - 275 c. - ISBN 978-5-98755-341-1.
7. Dyakova, E. V., Milovidova, L. A., Komarov, V. I. [et al]. Effect of various modifications of neutral-sulfite pulping on the physical and mechanical properties of semi-cellulose / E. V. Dyakova, L. A. Milovidova, V. I. Komarov [et al]. - Text: electronic // Izvestia vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Lesnoy zhurnal. - 2002. - № 6. - C. 88-94. - URL: http://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=2195 (date of reference: 31.08.2024).
8. Ivanchina, E. A., Belkina, E. V., Kucherov, V. V., Shipigusev, A. A. Study of the influence of cooking solution parameters on the qualitative indicators of semi-cellulose of neutral-sulfite pulping: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V. I. Komarov, Arkhangelsk, September 14-16, 2023 / E. A. Ivanchina, E. V. Belkina, V. V. Kucherov, A. A. Shipigusev. - Text: direct // Lomonosov Northern (Arctic) Federal University. - 2023. - C. 111-115.

© Иванчина Е. А., Чудинов А. С., Кучеров В. В., 2024

АКТУАЛЬНОСТЬ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО- БУМАЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

инженер **Иванов Сергей Сергеевич**,
магистрант **Иванов Михаил Сергеевич**
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент
Ковалёв Дмитрий Александрович,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применения установок по сжиганию отходов для сооружений ЦБК. Описаны состав отходов и особенности их сжигания и приведены доводы к размещению в рамках ЦБК установок по сжиганию. Результаты исследований могут быть полезны для других предприятий отрасли, желающих рассмотреть альтернативные методы утилизации отходов.

Ключевые слова: сжигание, утилизация промышленных отходов, повышение эффективности производства, производство бумаги, сжигание отходов ЦБК.

RELEVANCE OF BURNING WASTE PULP AND PAPER ENTERPRISE

Engineer **Ivanov Sergey Sergeevich**,
Master Student **Ivanov Mikhail Sergeevich**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Kovalev Dmitry Alexandrovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the issue of using waste incineration plants for pulp and paper mill structures. The composition of the waste and the features of its combustion are described and argument are given for the placement of combustion plants within the pulp and paper mill. The results of the research may be useful for other industry companies wishing to consider alternative waste disposal methods.

Keywords: incineration, recycling of industrial waste, increasing production efficiency, paper production, incineration of pulp and paper mill waste.

Актуальность утилизации отходов промышленных предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) в современных реалиях обусловлена как экологическими, так и экономическими факторами. В связи с интенсивным развитием промышленности, объемы производства отходов растут, что приводит к серьезным экологическим проблемам и создает риски для здоровья человека. Текущее состояние множества полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) в России оставляет желать лучшего. Некоторые из таких полигонов и вовсе существуют с явными экологическими нарушениями. Одновременно с этим, утилизация отходов может стать источником дополнительной прибыли для предприятий и способствовать созданию новых рабочих мест и повышению эффективности предприятия [1], [2].

Отходы ЦБП представляют собой комплексную смесь органических и неорганических веществ, которые могут содержать токсичные соединения, такие как хлорированные органические соединения, фенолы, тяжелые металлы и другие вредные вещества. Эти вещества могут наносить ущерб окружающей среде и здоровью человека, если не будут надлежащим образом утилизированы. Кроме того, отходы ЦБП занимают значительную площадь на полигонах твердых бытовых отходов, что приводит к дефициту места для захоронения других видов отходов.

Состав и количество отходов напрямую зависит от принятых на производстве технологических процессов, применяемых химических реагентов и используемого сырья. В качестве сырья на производствах ЦБП полного цикла чаще всего принято понимать древесину хвойных пород: – сосна, ель, а также, отдельными производственными линиями, древесину лиственных пород – береза, осина. Лиственные породы из-за менее длинных волокон принято считать менее пригодными для производства целлюлозы [3]. Основными видами отходов ЦБК полного цикла можно назвать следующее:

- кородревесные отходы (КДО) – с древесно-подготовительного цеха;
- сухие вещества черного щелока – с этапа каустизации и варки целлюлозы;
- масса сучков и коры – с этапа сортирования сваренной целлюлозы;
- загрязненные сточные воды – жидкие и обезвоженные отходы с этапов варки, размола, сортировки и промывки целлюлозы [4].

При этом бóльшая часть озвученных выше отходов подлежит повторному использованию. Так, например, древесная масса, уловленная на этапе сортирования сваренной целлюлозы. Крупная фракция собирается и отправляется в начало нового цикла производства целлюлозы [5]. В то же время, часть описываемых отходов при детальном рассмотрении представляют собой скоп, кору, опил, шламы – фракции, состоящие из неорганических остатков и органических частиц в виде целлюлозных волокон. Такие массы, после смешения, сгущения и обезвоживания представляются в сухой форме и обладают относительно высокой горючестью [6].

Рассмотрим более подробно один из не менее важных отходов ЦБП, которым являются производственные сточные воды. Часть загрязненных сточных вод используется повторно в технологических процессах предприятия. Часть же подвергается очистке. Очистка, как правило, производится при помощи

современных методов – биологических очистных сооружений (БОС). Основными компонентами загрязнений на БОС ЦБП можно выделить:

- взвешенные вещества;
- растворенные неорганические вещества;
- растворенные органические вещества;
- нерастворенные крупнодисперсные фракции;
- иные примеси в незначительном количестве.

Один из так называемых маркерных загрязнителей – показатель химического потребления кислорода (ХПК). В составе сточных вод с ЦБП ХПК представляется следующими субкомпонентами:

- лигнинные вещества – 50-60 %;
- летучие органические вещества – 20-22 %;
- окисленные кислоты – 6-8 %;
- ноокисленные кислоты – 2-3 %;
- нелетучие фенолы – 5-6 %;
- нейтральные вещества – 10-11 %.

Сточные воды с таких масштабных производств, как древесно-подготовительные отделы Кондопожского ЦБК, имеют, как правило, следующие усредненные за год загрязнения:

- взвешенные вещества – 440 мг/л;
- сухой остаток – 941 мг/л;
- сухой прокаленный остаток – 111 мг/л;
- ХПК – 1713 мгО₂/л;
- БПК₅ – 328 мг О₂/л;
- pH – 5,06 ед.

Сточные воды с таким содержанием загрязнений, как показали исследования прошлых лет, могут быть применены в щелочных способах варки целлюлозы без негативных последствий для технологического процесса [7].

Стоит отметить, что состав загрязнений и их компоненты в сточных водах ЦБК напрямую зависят от технологических процессов, протекающих на производстве. Так, например, для сульфатного процесса получения целлюлозы компоненты отходов сточных вод могут быть представлены, в усредненном виде, следующим образом:

- неорганические компоненты – до 33 %;
- в их составе: различные соли натрия и иные щелочи;
- органические компоненты – до 67 %;
- в т.ч. оксикислоты и лактоны – 33 %;
- в т.ч. фенолы, смоляные и жирные кислоты – 24 %;
- в т.ч. лигнин – 36 %;
- в т.ч. муравьиная кислота – 1 %;
- в т.ч. уксусная кислота – 0,7 % [8].

На БОС производственных сточных вод ЦБК, в результате проведения комплекса различных ступеней очистки могут образовываться несколько видов осадков в различном количестве:

- отходы с решеток предварительной очистки;

- осадок первичных отстойников;
- избыточный активный ил (ИАИ);
- флотошлам с установок напорной флотации или флотофильтров.

Все их перечисленных видов осадков, за исключением отходов с решеток, подвергаются смешению, уплотнению и последующему обезвоживанию на специализированных установках – центрифугах, прессах, иловых полях и пр. Фильтрат по итогам процесса обезвоживания направляется на повторное использование, а обезвоженный осадок (т. н. кек) с влажностью 60–90 % – подлежит утилизации выбранным способом, исходя из предпочтений предприятия [9], [10].

Существует и альтернативное применение отходам ЦБП, таким как ИАИ с очистных сооружений, лигносульфанат натрия и скоп – волокна, собираемого из отходящих вод бумагоделательной машины и идущего в переработку. Внесение отходов ЦБП такого рода, в определенных пропорциях, в почву может способствовать повышению уровня урожайности некоторых сельскохозяйственных культур и обогащению почвы полезными микроэлементами в целом [11].

Однако при выборе методов утилизации требуется принимать во внимание непростую ситуацию, сложившуюся в последние годы в сфере производства бумаги. За последние более чем 50 лет в России не построено ни одного нового ЦБК полного цикла. Более того, многие существующие комбинаты переживают состояние финансового неблагополучия или даже находятся в состоянии банкротства. Уровень инвестиций в сферу производства бумаги последних лет находится не на высоте [12]. К тому же, начиная с 2022 года [13], у российских ЦБК появился еще одна не менее важная проблема – уменьшение рынка сбыта производимой продукции и ужесточение рабочих условий [14]. В виду этого следует, прежде всего, опираться на наиболее сбалансированные методы утилизации отходов. Такие методы, которые бы позволяли соблюдать баланс между экологической безопасностью и экономической выгодностью для производителей. Одним из таких методов и есть сжигание. Здесь и далее мы будем рассматривать в качестве установок по сжиганию установку многотопливного котла (МТК) с кипящим слоем (КС), смысл которой состоит в высокотемпературной термической обработке различных отходов, в том числе отходов ЦБК, таких как КДО, отходы с очистных сооружений ЦБК, ИАИ и прочее. Также стоит отметить, что современные МТК позволяют утилизировать отходы с входной влажностью до 75 % [15], [16], [17].

Процесс сжигания протекает с образованием трех побочных продуктов: золы, дымовых газов и перегретого пара. Для начала рассмотрим наименее перспективный из них, с экономической точки зрения – золу. Зольные фракции как результат сжигания поликомпонентных отходов с ЦБК, содержат в своем составе кальций, углекислый калий, фосфор и множество различных микроэлементов. Как известно, зола является эффективным удобрением для сельскохозяйственных и растительных культур [18]. Этот факт позволяет сделать вывод если не о позитивном экологическом влиянии, то, как минимум, об экологически безопасном влиянии части отходов процесса сжигания на

природу и окружающую среду. Полученные в результате сжигания зольные фракции подлежат утилизации посредством вывоза на специализированные полигоны ТБО либо внесению в почвы с целью обогащения, в определенных консистенциях с ИАИ с БОС.

Вторым побочным продуктом являются дымовые газы и некоторое количество летучей золы в их составе – естественно получаемый продукт горения отходов в печи установки по сжиганию. Характер дымовых газов сильно зависит от состава и объема сжигаемых отходов. Прежде всего, при термическом распаде в топочной камере происходит выделение оксида азота (NO_x), оксида серы (SO_2), диоксида углерода (CO_2) и иных примесей [15], [19], [20], [21].

В виду описанных выше явлений необходимо предусматривать масштабную и качественную систему очистки дымовых газов, пыли и летучей золы. Наиболее эффективными системами очистки таких газов могут быть выбраны системы на основе электрофильтров, электростатических осадителей, дымососов, циклонов и скрубберов [22] или иные системы абсорбционной очистки. Дымовые газы, прошедшие ступень очистки, выбрасываются в атмосферу по дымовой трубе без непоправимого вреда для природы и экологии.

Также, помимо прочего, необходимо учитывать относительно низкую температуру горения в топке – около 750–950 градусов Цельсия. При таких невысоких температурах не происходит плавления зольных фракций и высокого образования оксида азота (NO_x), что в свою очередь снижает нагрузку на систему очистки газов [23].

Третий и наиболее перспективный в нашем вопросе побочный продукт – перегретый пар. Такой пар является результатом проведения процессов нагрева и охлаждения, протекающих в процессе работы МТК. Температура перегретого пара в технологической схеме МТК составляет около 400–450 градусов Цельсия. Само по себе наличие субпродукта в виде пара открывает широкие возможности по генерации дополнительной электроэнергии. Что в свою очередь является важнейшим в нашем исследовании экономическим фактором при выборе способа утилизации отходов ЦБК.

Также нельзя не отметить, что установки по сжиганию отходов ЦБК уже имеют позитивный опыт применения на территории России. В 2019 году установкой МТК оснастили Сегежский ЦБК. Новейший финский многотопливный котел имеет несколько секций, максимальной высотой 37 метров. Производительность нового МТК составила 120 тонн пара в час, и утилизация – около 100 тонн топлива в час. Сегежский МТК оснащен современными системами очистки выбросов в атмосферу, с эффективностью очистки до 99,7 % [24].

По итогам проведенных исследований можно заключить, что выбор способа и методов утилизации отходов целлюлозно-бумажных предприятий очень сложный вопрос, требующий тщательной проработки различных аспектов. Необходимо принимать во внимание протекающие на производстве технологические процессы, используемое сырье и применяемые реагенты, а также учитывать принятую систему очистки сточных вод. Результатами наших исследований стал вывод о том, что применение для утилизации КДО и ИАИ с

очистных сооружений ЦБК, установок МТК является перспективным направлением, которое при должном внимании может стать еще и экономически выгодным для предприятия. Процесс сжигания отходов при детальном рассмотрении становится наиболее безопасным с точки зрения экологии способом утилизации промышленных отходов сферы производства бумаги и картона. Помимо прочего, метод сжигания позволит консолидировать существующие процессы утилизации отходов в одно направление, что в свою очередь, даст новые пути развития для всего предприятия. Существующие на текущий момент технологии по сжиганию отходов ЦБК могут позволить предприятиям в значительной степени сократить траты на устаревшие или альтернативные методы утилизации отходов, что, в свою очередь, может привести к повышению эффективности самого предприятия, снижению себестоимости производимой продукции и увеличению ее объемов. И в то же время, стоит отметить, что альтернативные методы утилизации КДО и ИАИ, такие, как внесение определенных консистенций в почву, могут иметь право на существование и должны применяться с целью улучшения экологической обстановки по мере возможностей предприятия.

Список литературы:

1. Уставич, Г. А. Элементы методики рационального землепользования территории полигонов твердых бытовых отходов / Г. А. Уставич, А. В. Дубровский, Я. Г. Пошивайло, А. О. Грекова, О. И. Малыгина // Вестник СГУГИТ. – 2019. – №3(24). – С. 203–221. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-203-221. – Текст: непосредственный.
2. Кузьмин, Р. М. Мониторинг состояния полигонов ТБО в РФ / Р. М. Кузьмин, М. А. Беседин, О. Г. Любская // Научный журнал «ИНТЕРНАУКА». – 2021. – №5-1(181). – С. 56-58. DOI: 10.32743/26870142.2021.5.181.248359. – – Текст: непосредственный.
3. Иванов, Ю. С. Технология целлюлозы. Подготовка древесины. Варка целлюлозы. Технологические расчёты: учебное пособие / Ю. С. Иванов, А. Г. Кузнецов, В. В. Новожилов. – СПб: ВШТЭ СПбГУПТД. – 2019. Ч.1 – 122 с. – Текст: непосредственный.
4. Энциклопедия технологий 2.0 / А. М. Кряжев, О. В. Голуб, А. Ю. Санжаровский. – М., СПб: Реноме, 2022. – 463 с. – Текст: непосредственный.
5. Кряжев, А. М. Наилучшие доступные технологии – основа развития целлюлозно-бумажной промышленности и лесопромышленного комплекса России в XXI веке / А. М. Кряжев. – СПб.: 2022. – 90 с. — Текст: непосредственный.
6. Касимов, А. М. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, Н. Г. Щербань, В. В. Мясоедов. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 510 с. — Текст: непосредственный.
7. Гелес, И. С. Отходы и сточные воды – неизбежное бремя или необходимость и возможность решения проблем? / И. С. Гелес, М. А. Коржова // Лесной вестник. – 2008. – № 6. – С. 134–138. – Текст: непосредственный.

8. Буркова, С. А. Современные методы очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий / С. А. Буркова, И. А. Шаньбязов // Международный научный журнал «Вестник науки». – 2021. – №6 (39). Т. 2. – С. 169–171. – Текст: непосредственный.
9. Загорская, Е. П. Исследование процесса обезвоживания илового осадка механическим способом с использованием центрифуги / Е. П. Загорская, Д. А. Бутаев // Химические науки. – 2020. – А – С. 102–104. — Текст: непосредственный.
10. Кичигин, В. И. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод: учебное пособие / В. И. Кичигин, Е. Д. Палагин. – Самара, 2008. – 204 с. – Текст: непосредственный.
11. Семинар «Комплексное развитие арктических территорий: экспертное мнение от 30.01.2024» / «КарНЦ РАН»: [сайт]. – URL: <http://www.krc.karelia.ru/news.php?id=5399&plang=r>. – Текст: электронный.
12. Миронов, А. В. Проблемы развития целлюлозно-бумажной промышленности в России / А. В. Миронов // Проблемы развития территории. – 2015. – Вып. №6 (80). – С. 63–71. – Текст: непосредственный.
13. Стыров, М. М. Промышленность северных регионов России в условиях СВО и санкций / М. М. Стыров, М. А. Шишелов // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. – 2024. – №2. – С.172-187. DOI: 10.15593/2224-9354/2024.2.13. – Текст: непосредственный.
14. Бурматова, О.П. Тенденции изменения экологических требований в России в условиях санкций / О. П. Бурматова // Вестник НГУЭУ. – 2023. - №1. – С. 10-29. DOI: 10.34020/2073-6495-2023-1-010-029. – Текст: непосредственный.
15. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 1-2022 «Целлюлозно-бумажное производство». – Москва: Бюро НДТ, 2022. – 406 с. – Текст: непосредственный.
16. Гайнуллина, Г. Р. Термический способ переработки углеродосодержащих отходов (пиролиз) / Г. Р. Гайнуллина, Г. Ю. Федоров // Вестник магистратуры. – 2014. – №11(38) Т.1. – С.70–72. – Текст: непосредственный.
17. Смородин, С. Н. Оборудование энерготехнологических ТЭС: учеб. пособие / С. Н. Смородин, В. Н. Белоусов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 123 с. – Текст: непосредственный.
18. Харина, А. В. Древесная зола как источник питательных веществ для растений / А. В. Харина. // Научный журнал молодых ученых. – 2019. – №4(17) – С.11–14. – Текст: непосредственный.
19. Тимербаев, Н. Ф. Комплексный метод очистки топочных газов образующихся при сжигании твердых бытовых отходов / Н. Ф. Тимербаев, Д. Ф. Зиятдинова, А. Р. Садртдинов // Известия высших учебных заведений «Химия и химические технологии». – 2008. – Т.51(12). – С. 96–99. – Текст: непосредственный.
20. Ковалева, О. П. Утилизация промышленных отходов: учеб. пособие / О. П. Ковалева, В. Г. Ермолинский. – СПб: СПбГЛТУ, 2021. – 68 с. – Текст: непосредственный.

21. Хорошавин, Л. Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов: учебное пособие / Л. Б. Хорошавин, В. А. Беляков, Е. А. Свалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2016 – 220 с. – Текст : непосредственный.
22. Фаризунова, А. С. Очистка дымовых газов / А. С. Фаризунова // Вестник магистратуры. – 2019. – №6–4(93). – С. 61–62. – Текст: непосредственный.
23. Сафин, Р. Г. Термическая переработки древесных отходов сжиганием / Р. Г. Сафин, Н. Ф. Тимербаев, Д. Ф. Зиятдинова, Д. А. Ахметова. // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18 № 23. – С. 56–59. – Текст: непосредственный.
24. Новый многотопливный котел Сегежского ЦБК начал производство пара: [сайт]. – URL: <https://lesprom.com/ru/news/87132>. – Текст: электронный.

References:

1. Ustavich G.A., Dubrovskiy A.V., Poshivaylo Y.G., Grekova A.O., Malygina O.I., Elements of the methodology of rational land use of the territory of solid domestic waste landfills / G.A. Ustavich, A.V. Dubrovskiy, Y.G. Poshivaylo, A.O. Grekova, O.I. Malygina. - Text : direct // Vestnik SGUGIT. - 2019. - №3(24). - С. 203-221. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-203-221.
2. Kuzmin R.M., Besedin M.A., Lyubskaya O.G., Monitoring of the state of landfills in the Russian Federation / R.M. Kuzmin, M.A. Besedin, O.G. Lyubskaya. - Text : direct // Scientific journal “INTERNAUKA”. - 2021. - №5-1(181). - С. 56-58. DOI: 10.32743/26870142.2021.5.181.248359.
3. Ivanov Y.S., Kuznetsov A.G., Novozhilov V.V.. Technology of cellulose. Preparation of wood. Pulp cooking. Technological calculations: textbook. / VSTE SPbGUPTD. - SPb., 2019.,Ch.1 -122 p.
4. Kryazhev A.M., Golub O.V., Sanzharovsky A.Yu. Encyclopedia of technologies 2.0. - Moscow, SPb: Renome, 2022. - 463 с.
5. Kryazhev A.M. Best available technologies - the basis for the development of pulp and paper industry and timber complex of Russia in the XXI century. - SPb.: 2022. - 90 с.
6. Kasimov A.M., Semyonov V.T., Scherban N.G., Myasoedov V.V.. Modern Problems and Solutions in the System of Hazardous Waste Management. - Kharkov: KHNAGH, 2008. - 510 с.
7. Geles, I.S., Korzhova, M.A., Waste and waste water - an inevitable burden or a necessity and an opportunity to solve problems? / I.S. Geles, M.A. Korzhova. - Text : direct // Leading scientific journal “Lesnoy vestnik”. - 2008. - №6. - С.134-138.
8. Burkova, S.A.; Shan'yazov, I.A.; Shanyazov, I.A., Svermen methods of wastewater treatment of pulp and paper enterprises / S.A. Burkova, I.A. Shan'yazov. - Text : direct // International scientific journal “VESNIK NAUKI”. - 2021. - NO. 6 (39) VOL. 2. - P. 169-171.
9. Zagorskaya, E.P.; Butaev, D.A., Investigation of the process of sludge dewatering by mechanical method using a centrifuge / E.P. Zagorskaya, D.A. Butaev. - Text : direct // Chemical Sciences. - 2020. - A - P.102-104.
10. Kichigin, V.I. Processing and utilization of the natural and waste water sludge: textbook / V.I. Kichigin, E.D. Palagin. - Samara, 2008. - 204 с.

11. Seminar “Integrated development of the Arctic territories: expert opinion from 30.01.2024” / “Karelian Research Center of RAS”: [website]. - URL: <http://www.krc.karelia.ru/news.php?id=5399&plang=r>. - Text : electronic.
12. Mironov, A.V., Problems of the pulp and paper industry development in Russia / A.V. Mironov. - Text : direct // Problems of territory development. - 2015. - Vyp. no. 6 (80). - C. 63-71.
13. Styrov M.M., Shishelov M.A., Industry of the northern regions of Russia in the conditions of the SWO and sanctions / M.M. Styrov, M.A. Shishelov. - Text : direct // Vestnik PNIPU. Socio-economic sciences. - 2024. - №2. - C.172-187. DOI: 10.15593/2224-9354/2024.2.13.
14. Burmatova, O.P., Trends of changes in environmental requirements in Russia under sanctions / O.P. Burmatova. - Text : direct // Vestnik NSUEU. - 2023. - №1. - C. 10-29. DOI: 10.34020/2073-6495-2023-1-010-029.
15. Information and technical reference book on the best available technologies 1-2022 “Pulp and paper production”. - Moscow : Bureau of BAT, 2022. - 406 c.
16. Gainullina, G.R.; Fedorov, G.Y. Thermal method of carbon-containing waste processing (pyrolysis) / G.R. Gainullina, G.Y. Fedorov. - Text : direct // Bulletin of the Master's degree program. - 2014. - NO.11(38) VOL.1. - P.70-72.
17. Smorodin, S.N., Belousov, V.N., Equipment of power engineering TPPs: textbook / S.N. Smorodin, V.N. Belousov. - SPb.: VShTE SPbGUPTD, 2021. - 123 c.
18. Kharina, A.V., Wood ash as a source of nutrients for plants / A.V. Kharina. - Text : direct // Scientific journal of young scientists. - 2019. - №4(17) - C.11-14.
19. Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Sadrtidinov A.R., Complex method of cleaning of flue gases generated by combustion of solid domestic waste / N.F. Timerbaev, D.F. Ziatdinova, A.R. Sadrtidinov. - Text : direct // Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya “Khimiya i khimicheskikh tekhnologii”. - 2008. - T.51(12). - C. 96-99.
20. Kovaleva O.P., Ermolinsky V.G., Utilization of industrial waste: a textbook for undergraduate students of training directions 18.03.01 “Chemical technology”, 18.03.02 “Energy- and resource-saving processes in chemical technology, petrochemistry and biotechnology” / O.P. Kovaleva, V.G. Ermolinsky. - St. Petersburg: SPbGLTU, 2021. - 68 c.
21. Khoroshavin, L.B.; Belyakov, V.A.; Svalov, E.A. Basic technologies of processing of industrial and solid municipal wastes: textbook / L.B. Khoroshavin, V.A. Belyakov, E.A. Svalov. - Ekaterinburg: UrFU, 2016 - 220 p.
22. Farizunova, A.S., Purification of flue gases / A.S. Farizunova. - Text : direct // Bulletin of the Master's degree program. - 2019. - №6-4(93). - C. 61-62.
23. Safin R.G., Timerbayev N.F., Ziatdinova D.F., Akhmetova D.A., Stepanova T.O., Thermal processing of wood waste by combustion / R.G. Safin, N.F. Timerbayev, D.F. Ziatdinova, D.A. Akhmetova. - Text : direct // Vestnik of Technological University. - 2015. - T.18 №23. - C. 56-59.
24. New multi-fuel boiler of Segezha Pulp and Paper Mill started steam production: [website]. - URL: <https://lesprom.com/ru/news/87132>. - Text : electronic

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ В ЗОНАХ ФОРМОВАНИЯ
СЕТОЧНЫХ СТОЛОВ ДЛЯ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И МОДЕРНИЗАЦИИ**

доктор техн. наук, профессор **Кокушин Николай Николаевич**,
канд. техн. наук, доцент **Кауров Павел Викторович**,
канд. техн. наук, преподаватель **Клюшкин Иван Владимирович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы использования математического моделирования обезвоживания бумажной массы в зонах формования на сеточных столах бумаго- и картоноделательных машин с гидропланками и мокрыми отсасывающими ящиками. Приведена разработанная математическая модель, позволяющая наиболее точно учитывать физику процессов обезвоживания бумажной массы. Расчеты по программе показали хорошее соответствие опытным данным по обезвоживанию бумажных масс в различных режимах работы сеточных столов.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, сеточный стол, гидропланки, участок формования, математическое моделирование.

**THE USE OF MATHEMATICAL MODELING OF PAPER PULP
DEHYDRATION IN THE FORMING AREAS OF GRID TABLES FOR
THEIR DESIGN AND MODERNIZATION**

Doctor of Technical Sciences, Professor **Kokushin Nikolay Nikolaevich**,
Cand. of Technical Sciences, Associate Professor **Kaurov Pavel Viktorovich**,
Cand. of Technical Sciences, Lecturer **Klyushkin Ivan Vladimirovich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Tehnology and Desing
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the use of mathematical modeling of paper pulp dewatering in forming zones on wet end of paper and cardboard making machines with hydrofoils and wet suction boxes. The developed mathematical model is presented, which allows the most accurate consideration of the physics of paper pulp dewatering processes. Calculations according to the program showed good compliance with experimental data on the dewatering of paper pulp in various forming sections.

Keywords: paper making machine, wet end, hydrofoils, forming zone, mathematical modeling.

В процессе эксплуатации бумаго- и картоноделательных машин обычно со временем возникает необходимость в их модернизации (для повышения производительности и др.), вызванная переходом на выпуск новой продукции и/или изменением параметров технологического процесса (таких, как повышение скорости машин, изменение концентрации бумажной массы, ее температуры и т. д.).

В настоящее время в России помимо бумаго- и картоноделательных машин с чисто двухсеточным формованием остаются в эксплуатации также бумаго- и картоноделательные машины с плоским участком сеточного стола, оснащенные гидропланками и мокрыми отсасывающими ящиками. Как известно [1-3], основная часть удаляемой воды на сеточном столе приходится на участок формования бумажной массы от напуска на грудную доску до границы зеркала залива на отсасывающих ящиках, между которыми (грудной доской и отсасывающими ящиками) располагаются пакеты гидропланок. Поэтому важно, чтобы модернизируемый сеточный стол на участке формования обладал достаточной обезвоживающей способностью.

Проверка этого может производиться как экспериментальным, так и расчетным путем с использованием метода математического моделирования обезвоживания бумажной массы.

В нашей стране математическим моделированием обезвоживания бумажной массы на сеточных столах бумаго- и картоноделательных машин с гидропланками занимаются много разных ученых [4-9] (за рубежом тоже, но меньше [10-12]), но в основном, это исследователи из ВШТЭ СПбГУПТД: профессор, д. т. н. Кокушин Н. Н. [3, 13], доцент, к. т. н. Кауров П. В. [14] и преподаватель, к. т. н. Ключкин И. В. [15].

Кокушин и Кауров разработали программу расчета обезвоживания бумажной массы на участке формования сеточных столов бумаго- и картоноделательных машин с гидропланками и вакуум-фойлами [14].

Разработанная математическая модель, в отличие от других [4-12], позволяет наиболее точно учитывать физику процессов обезвоживания бумажной массы на гидропланках. Это заключается, в частности, в том, что разработанная модель состоит из уравнений, в совокупности описывающих следующие имеющие место при отливе бумажной массы на гидропланках процессы:

- фильтрацию бумажной массы с учетом наличия или отсутствия размыва ранее осевшего на сетке слоя волокон;
- течение подсеточной воды (как бумажной массы низкой концентрации с учетом ее реологических особенностей) в клине гидропланки;
- прогиб сетки с учетом ее жесткости;
- инерционность от веса сетки и слоя бумажной массы на сетке;
- переменность натяжения сетки по длине сеточного стола.

$$v_{\phi}(x) = \frac{K_{\phi} \left[\frac{-p(x) + q(x)}{\gamma} + h_0 - h_2(x) \right]}{(1-f_p)\Delta + h_2(x) \frac{c'_o - c_m}{c_o - c'_o}},$$

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} = \frac{12\mu}{h^3(x)} \left[-v_{\phi}(x) + \frac{v_c}{2} \frac{dh(x)}{dx} - \frac{h^2(x)}{4\mu} \frac{dh(x)}{dx} \frac{dp(x)}{dx} \right],$$

$$h_2(x) = -F + \sqrt{F^2 + \frac{2K_{\phi}(c_o - c'_o)}{v_c(c'_o - c_m)} \left[\int_0^x \left(\frac{-p(x) + q(x)}{\gamma} \right) dx + h_0 x \right]},$$

$$h(x) = a + bx + z(x),$$

$$\begin{aligned} EJ \frac{d^4 z(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = \\ = -p(x) + \gamma[h_0 + h_c - h_2(x)] + q(x), \end{aligned}$$

$$q(x) = -\rho \cdot v_c^2 \cdot (h_0 + h_c) \frac{d^2 z(x)}{dx^2},$$

$$T = 2T_0 \frac{e^{\sum_k f_k \cdot \beta_k}}{e^{\sum_k f_k \cdot \beta_k} + 1} - \sum_k R_k f_k,$$

$$F = \frac{c'_o - c_m}{c_o - c'_o} (1-f_p)\Delta,$$

где $p(x)$ – вакуум в клине гидропланки, $v_{\phi}(x)$ – скорость фильтрации, $h(x)$ – зазор между сеткой и гидропланкой, $h_2(x)$ – толщина профильтровавшегося слоя, $z(x)$ – прогиб сетки, μ – вязкость подсеточной воды, $q(x)$ – нагрузка на сетку от центробежной силы инерции слоя массы, v_c – скорость сетки, γ – удельный вес бумажной массы, h_0 – толщина слоя бумажной массы на сетке в начале гидропланки, K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, c'_o – концентрация обезвоживаемой бумажной массы, c_o – концентрация осевшего слоя, c_m – концентрация подсеточной воды, h_c – толщина сетки, приведенная к толщине слоя бумажной массы, a – величина зазора между сеткой и гидропланкой в начале клина, α – угол наклона гидропланки, b – тангенс угла наклона гидропланки, T – натяжение сетки, T_0 – предварительное натяжение сетки, EJ – жесткость сетки, R – равнодействующая сил, прижимающих сетку к поверхности обезвоживающих элементов, f – коэффициент трения сетки по поверхности контактирующего с ней элемента, β – угол охвата сеткой приводного вала, ρ – плотность бумажной массы, Δ – толщина ранее осевшего

на сетке слоя волокон, f_r – функция размыва, x – координата, отсчитываемая по длине наклонного участка гидропланки.

Конечный продукт расчета по программе – это график возрастания сухости слоя бумажной массы по длине сеточного стола (от ее напуска до «сухой» линии).

Результаты расчета по программе проверялись по опытным данным по обезвоживанию различных бумажных масс на сеточных столах ряда действующих бумаго- и картоноделательных машин с гидропланками, вырабатывающих кондиционную продукцию, таких как [14]:

– бумагоделательная машина № 6 ООО «Окуловская бумажная фабрика», бумага – основа для гофрирования, при скорости 270 м / мин;

– бумагоделательная машина № 9 ОАО «Кондопога», газетная бумага, при скорости 754 м / мин;

– бумагоделательная машина № 4 ОАО «Светогорск», писче-печатная бумага, при скорости 1097 м / мин.

Расчеты по программе показали достаточно хорошее соответствие (рисунки 1-3), поэтому результаты расчета в различных режимах работы сеточных столов внедрены для анализа работы сеточных частей бумагоделательных машин на указанных предприятиях.

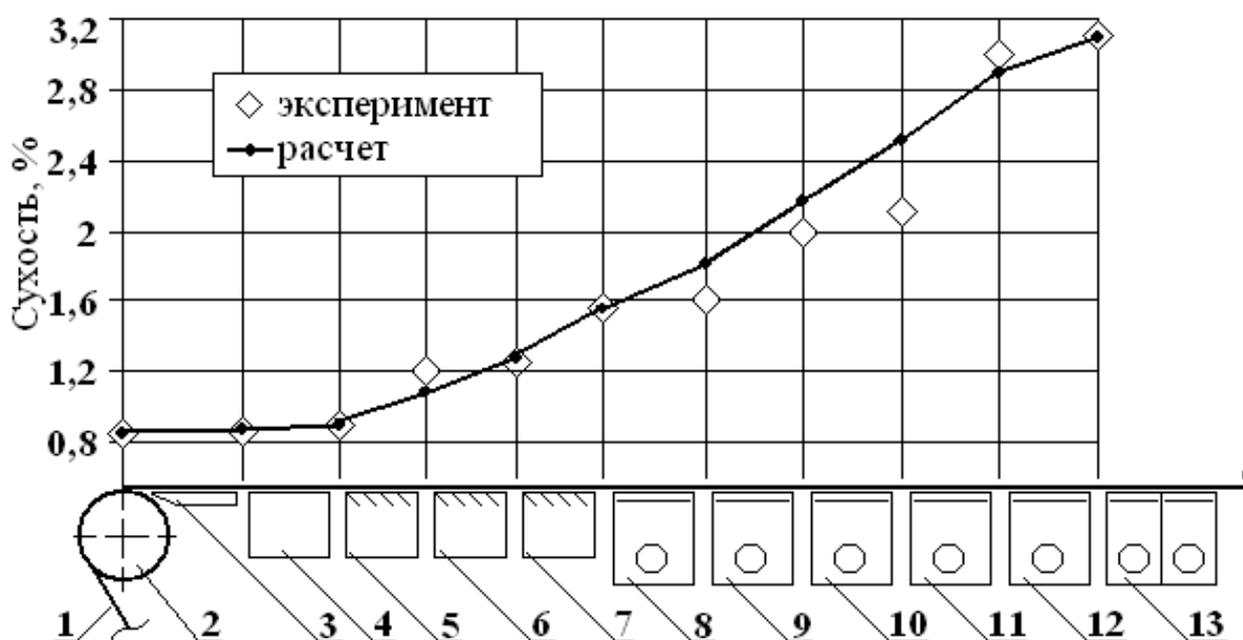


Рисунок 1 – Технологическая схема участка формирования сеточного стола бумагоделательной машины № 6 ООО «Окуловская бумажная фабрика»:

- 1 – формующая сетка; 2 – грудной вал; 3 – формующий ящик;
- 4-7 – пакеты гидропланок; 8-12 – мокрые отсасывающие ящики,
- 13 – отсасывающий ящик

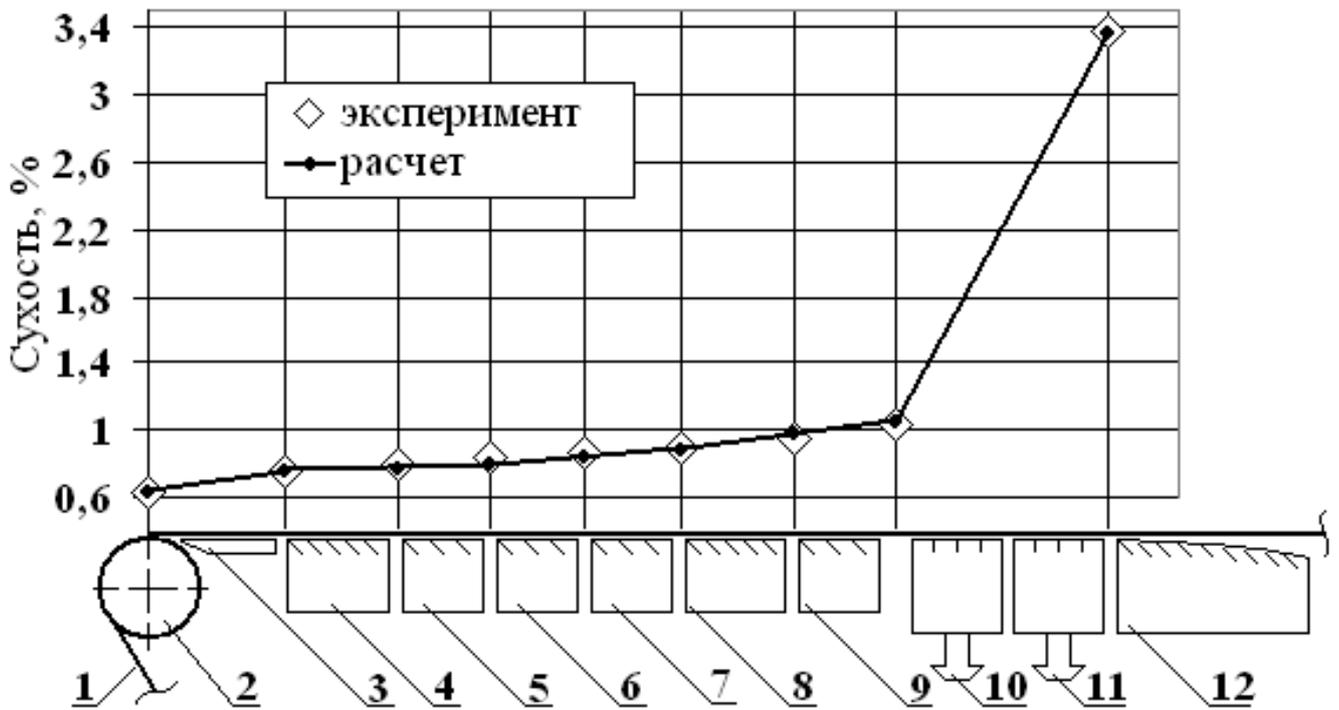


Рисунок 2 – Технологическая схема участка формирования сеточного стола бумагоделательной машины № 9 ОАО «Кондопога»: 1 – формирующая сетка; 2 – грудной вал; 3 – формирующий ящик; 4-9 – пакеты гидропланок; 10, 11 – пакеты вакуумфойлов; 12 – «формирующий башмак»

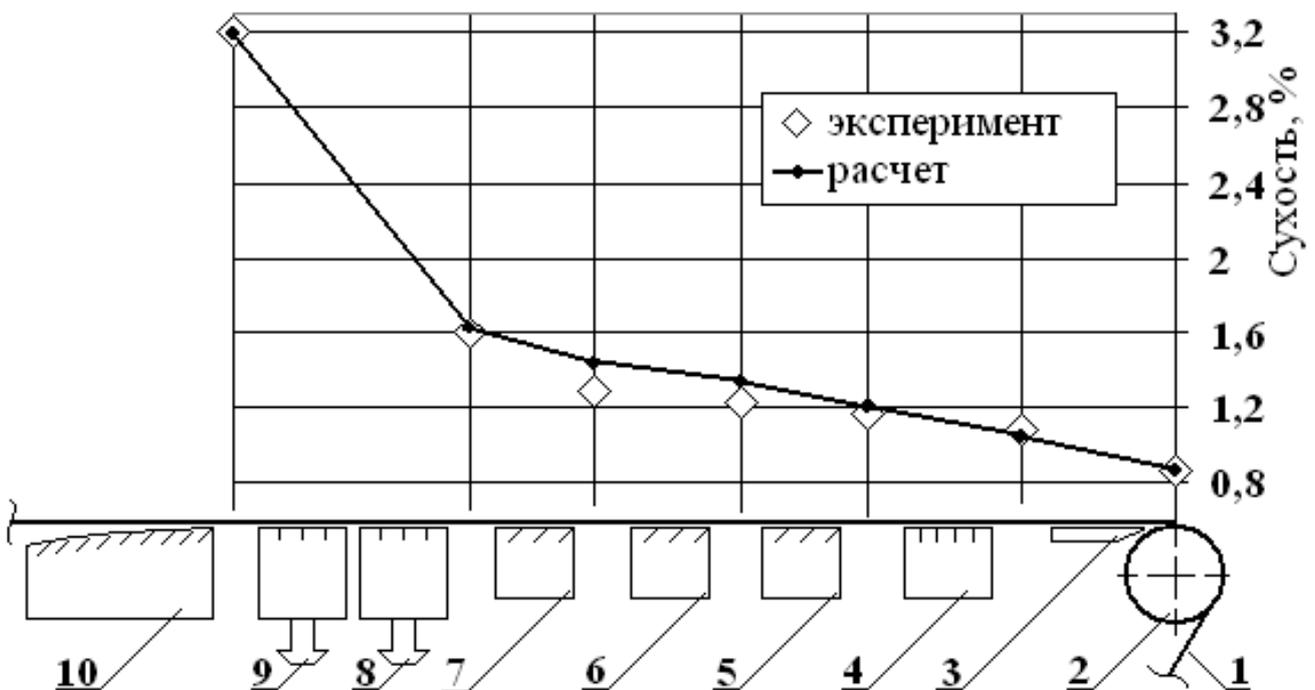


Рисунок 3 – Технологическая схема участка формирования сеточного стола бумагоделательной машины № 4 ОАО «Светогорск»: 1 – формирующая сетка; 2 – грудной вал; 3 – формирующий ящик; 4-7 – пакеты гидропланок; 8, 9 – пакеты вакуумфойлов; 10 – «формирующий башмак»

Таким образом, использование расчетных данных по определению роста сухости бумажной массы по длине участка формования способствует сокращению трудоемких экспериментальных исследований при проведении пуско-наладочных работ и модернизации сеточной части бумаго- и картоноделательных машин.

Список литературы:

1. Кугушев, И. Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы / И. Д. Кугушев. – Москва: Лесная промышленность, 1967. – 264 с. – Текст: непосредственный.
2. Машины для производства бумаги и картона / под ред. В. С. Курова, Н. Н. Кокушина. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического Института, 2017. – 646 с. – Текст: непосредственный.
3. Кокушин, Н. Н. Отлив бумажного полотна. Теория и расчет кинетики / Н. Н. Кокушин. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – 214 с. – Текст: непосредственный.
4. Слуцкий, А. Е. Теоретическое и экспериментальное исследование обезвоживания бумажной массы на регистровой части плоскосеточных бумагоделательных машин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аркадий Ефимович Слуцкий; Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград, 1973. – 160 с. – Текст: непосредственный.
5. Кугушев, И. Д. Исследование движения жидкости в зазоре между сеткой и регистровым валиком или гидропланкой / И. Д. Кугушев, Н. И. Дружинин, А. Е. Слуцкий // Машины и оборудование целлюлозно-бумажных производств: межвузовский сборник научных трудов. – Ленинград: Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, 1974. – Вып. II. – С. 3–12. – Текст: непосредственный.
6. Ильинский, А. М. Моделирование условий обезвоживания бумажной массы на сеточной части бумагоделательной машины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алексей Мирович Ильинский; Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград, 1981. – 240 с. – Текст: непосредственный.
7. Кугушев, И. Д. Расчет обезвоживания в регистровой части бумагоделательных машин: учебное пособие / И. Д. Кугушев, А. Ф. Каменев, А. Е. Слуцкий. – Ленинград: Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, 1982. 108 с. – Текст: непосредственный.
8. Шорохов, В. В. Теоретическое и экспериментальное исследование распределения вакуума в зазоре гидропланки / В. В. Шорохов // Состояние и перспективы развития технологии и оборудования целлюлозно-бумажной промышленности: материалы научно-технической конференции. – Ленинград: Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, 1982. – С. 139. – Текст: непосредственный.

9. Александров, А. В. Реология и гидродинамика процессов отлива и формования бумаги. Часть II. Гидродинамика процессов формования бумаги / А. В. Александров, Т. Н. Александрова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет растительных полимеров, 2015. – 133 с. – Текст: непосредственный.
10. Taylor G. I. Drainage at a table roll and a foil // Pulp and Paper Magazine of Canada, 1958, Vol. 59, pp. 172-176.
11. Zu J. W. A theoretical study of vacuum force on gravity foils and step foils // Tappi Journal, 1999, Vol. 82, No 11, pp. 93-98.
12. Gullichsen J. Papermaking science and technology. Book 8. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. – Helsinki: Fapet Oy, 2000. 573 p.
13. Кокушин, Н. Н. Теория и расчет процессов отлива бумажного полотна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Николай Николаевич Кокушин; Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград, 1987. – 390 с. – Текст: непосредственный.
14. Кауров, П. В. Моделирование обезвоживания бумажной массы на гидропланках для проектирования и совершенствования бумагоделательных машин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Павел Викторович Кауров; Санкт-Петербургский государственный университет растительных полимеров. – Санкт-Петербург, 2010. – 143 с. – Текст: непосредственный.
15. Ключкин, И. В. Моделирование обезвоживания в зоне формирования бумагоделательных машин с учетом вариабельности свойств бумажной массы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иван Владимирович Ключкин; Санкт-Петербургский государственный университет растительных полимеров. – Санкт-Петербург, 2022. – 121 с. – Текст: непосредственный.

References:

1. Kugushev I. D. Teoriya processov otлива i obezvozhvaniya bumazhnoj massy [Theory of processes of forming and dewatering of paper pulp]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1967. 264 p. (in Russian).
2. Mashiny dlia proizvodstva bumagi i kartona / pod red. V. S. Kurova, N. N. Kokushina. [Paper and cardboard production machines]. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo Instituta. 2017. 264 p. (in Russian).
3. Kokushin N. N. Otliv bumazhnogo polotna. Teoriia i raschet kinetiki [Paper forming. Theory and calculation of kinetics]. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta. 2010. 214 p. (in Russian).
4. Slutskiy A. E. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie obezvozhvaniia bumazhnoi massy na registrovoi chasti ploskosetochnykh bumagodelatel'nykh mashin: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Theoretical and experimental study of paper pulp dewatering on the register part

- of flat-mesh papermaking machines: dissertation for the degree of PhD in Technology]. L., 1973, 160 p. (in Russian).
5. Kugushev I. D., Druzhinin N. I., Slutskii A. E. Issledovanie dvizheniia zhidkosti v zazore mezhdru setkoi i registrovym valikom ili gidroplankoi [Investigation of fluid flow in the gap between the fabric and the register roller or hydrofoil // Mashiny i oborudovanie tselliulozno – bumazhnykh proizvodstv: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Pulp and paper production machinery and equipment]. 1974, vol. 2. – pp. 3-12. (in Russian).
 6. Il'inskii A. M. Modelirovanie uslovii obezvozhivaniia bumazhnoi massy na setochnoi chasti bumagodelatel'noi mashiny: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Modeling of paper pulp dewatering conditions on the wet end of a paper machine: dissertation for the degree of PhD in Technology]. L., 1981, 240 p. (in Russian).
 7. Kugushev I. D., Kamenev A. F., Slutskii A. E. Raschet obezvozhivaniia v registrovoi chasti bumagodelatel'nykh mashin: uchebnoe posobie [Calculation of dewatering in the register part of papermaking machines] L., 1982. 108 p. (in Russian).
 8. Shorokhov V. V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie raspredeleniia vakuuma v zazore gidroplanki: Sostoianie i perspektivy razvitiia tekhnologii i oborudovaniia tselliulozno-bumazhnoi promyshlennosti: materialy nauchno – tekhnicheskoi konferentsii [Theoretical and experimental study of vacuum distribution in the gap of a hydrofoil: The state and prospects of development of technology and equipment of the pulp and paper industry: proceedings of the scientific and technical conference]. Leningrad: Leningradskii tekhnologicheskii institut tselliulozno-bumazhnoi promyshlennosti [Leningrad Institute of Technology of the Pulp and Paper Industry. 1982. p. 139. (in Russian).
 9. Aleksandrov A. V., Aleksandrova T. N. Reologiya i gidrodinamika protsessov otliva i formovaniia bumagi. Chast' II. Gidrodinamika protsessov formovaniia bumagi [Rheology and hydrodynamics of paper casting and molding processes. Part II. Hydrodynamics of paper forming processes]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet rastitel'nykh polimerov, 2015. 133 p. (in Russian).
 10. Taylor, G. I. (1958) Drainage at a table roll and a foil. Pulp and Paper Magazine of Canada. 59, 172-176.
 11. Zu, J. W. (1999) A theoretical study of vacuum force on gravity foils and step foils. Tappi Journal. 82 (11), 93-98.
 12. Gullichsen. J. (2000) Papermaking science and technology. Book 8. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. 573 p.
 13. Kokushin N. N. Teoriia i raschet protsessov otliva bumazhnogo polotna: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Theory and calculation of paper web forming processes: dissertation for the degree of PhD in Technology]. L., 1987, 390 p. (in Russian).
 14. Kaurov P. V. Modelirovanie obezvozhivaniia bumazhnoi massy na gidroplankakh dlia proektirovaniia i sovershenstvovaniia bumagodelatel'nykh mashin: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Modeling the dewatering of paper pulp on hydrofoils for the design and improvement of

papermaking machines: dissertation for the degree of PhD in Technology]. SPb., 2010, 143 p. (in Russian).

15. Kliushkin I. V. Modelirovanie obezvozhivaniia v zone formirovaniia bumagodelatel'nykh mashin s uchetom variabel'nosti svoistv bumazhnoi massy: dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Modeling of dehydration in the formation zone of papermaking machines, taking into account the variability of the properties of paper pulp: dissertation for the degree of PhD in Technology]. SPb., 2022, 121 p. (in Russian).

© Кокушин Н. Н., Кауров П. В., Ключкин И. В., 2024

ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СВЯЗЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ И ЭВКАЛИПТА

канд. техн. наук, доцент **Обухова Ирина Анатольевна**,
канд. техн. наук, мл. научный сотрудник **Пименов Сергей Дмитриевич**,
бакалавр **Лобок Иван Дмитриевич**,
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С. М. Кирова,
Сиклицкий Вадим Игоревич,
Трапезникова Ирина Николаевна,
Атаманов Иван Валерьевич,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Волокнистый полуфабрикат, техническая целлюлоза – естественный полимерный материал, на 80 % состоящий из целлюлозы, является сырьем для строительной, электротехнической, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности. Актуальной задачей является установление характерных параметров, влияющих на ее качество.

Методами Фурье ИК (инфракрасной) спектроскопии исследовалась поглощательная способность киповой целлюлозы, полученной из природной древесины лиственных пород промышленным методом делигнификации.

Определены плотности водородных связей, энергии Н-связей, длины водородных связей для трех типов Н-связей [1], характерных для целлюлозосодержащего растительного древесного сырья на основе березы и эвкалипта.

Ключевые слова: Фурье ИК-спектроскопия, водородные связи, прочность, целлюлоза.

PARAMETERS OF MOLECULAR BONDS OF TECHNICAL CELLULOSE OF BIRCH AND EUCALYPTUS WOOD

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Obukhova Irina Anatolyevna**
Ph.D., Junior Researcher **Pimenov Sergey Dmitrievich**
Bachelor **Lobok Ivan Dmitrievich**
St. Petersburg State Forestry University named after. S. M. Kirov
Siklitsky Vadim Igorevich
Trapeznikova Irina Nikolaevna,
Atamanov Ivan Valerievich
Ioffe Institute, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Industrial cellulose is a natural polymer that is the basis for a wide range of materials produced and used today. An urgent task is to establish characteristic

parameters that affect the quality of cellulose.

The absorption capacity of cellulose obtained from natural deciduous wood was studied using Fourier transform infrared (infrared) spectroscopy.

The densities of hydrogen bonds, energies of H-bonds, and lengths of hydrogen bonds were determined for three types of H-bonds [1], characteristic of cellulose-containing plant wood raw materials based on birch and eucalyptus.

Keywords: Fourier transform infrared spectroscopy, hydrogen bonds, strength, cellulose.

Одним из наиболее эффективных методов исследования Н-связей в сложных молекулах, в частности полисахаридов и сахаров, является Фурье ИК (инфракрасная) спектроскопия. Колебательные частоты ОН-групп ИК-области спектра поглощения наиболее чувствительны к возникновению Н-связи, обеспечивающую сдвиг собственной частоты на величину и определяет энергию ее образования.

В работе измерялась поглощательная способность целлюлозы, полученной из природной древесины лиственных пород для установления количественных характеристик параметров, влияющих на качество целлюлозы. Определена плотность водородных связей, энергии Н-связей, длины водородных связей для трех типов Н-связей [1], характерных для целлюлозосодержащего растительного древесного сырья на основе березы и эвкалипта.

Измерения проводились на ИК-спектрометре FTIR-8400s Shimadzu ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на ИК фурье-спектрометре ФСМ 2201 Санкт-Петербургского Лесотехнического университета с изготовлением таблеток KBr. Образцы целлюлозы на основе березы и эвкалипта были предоставлены ЦБК (Карелия).

В 2018 г. в ФТИ им. А. Ф. Иоффе для изготовления образцов (срезов) древесного материала толщинами менее 100 мкм была разработана технология (рис. 2). Установка (рис. 1) для ее реализации представляет собой плоско-параллельные шлифованные державки, фиксирующие лезвие (спец. расходник OLFA) под экспериментально определенными углами (главный угол резания в плане и угол атаки), скользящие по шлифованным губкам промышленных станочных прецизионных тисков (ИСПТ), в которых зажимается заготовка. Главное движение выполнялось вручную, используя навыки мастера. Трудность операции обуславливает неравномерность исходного материала по плотности. Отдельную сложность представляла обязательность среза поперек волокнистой структуры («по торцам») в плоскости годовых колец. В итоге были получены образцы древесины требуемых толщин.

В 2023 г. было предложено изготовить образцы из листов киповой целлюлозы (образец береза сульфатная – целлюлоза (Швеция), с отбелкой по технологии ЕСФ, длина волокна 0,95 мм) с аморфизированной структурой (напоминает вспененную волокнистую мягкую бумагу). Заготовка в установке фиксировалась двухсторонней клейкой лентой на специально подготовленной подложке, которая в свою очередь зажималась в ИСПТ (рис. 1). Ввиду указанных особенностей материала срезание было намного сложнее образцов древесины, и полученные образцы имели большую и неравномерную толщину (100–250 мкм).



Рисунок 1 – Установка для нарезки образцов нужной толщины и техника резания целлюлозы на основе берёзы

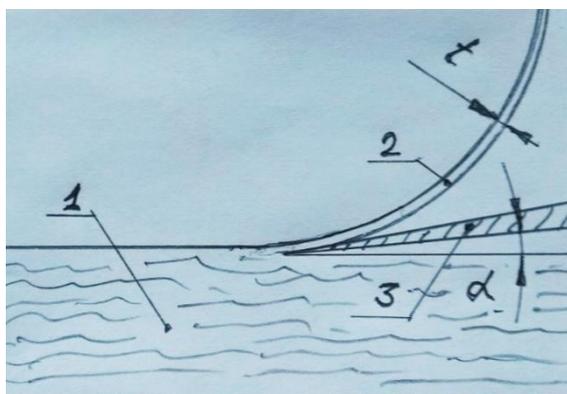


Рисунок 2 – Технология приготовления образца:
 1 – материал, 2 – образец, 3 – лезвие, t – толщина, α – угол атаки

Формально целлюлозу можно описать, как линейный полимер с регулярной структурой цепи, звенья которого объединены β -Д-глюкопиранозными связями (рис. 3). Он формируется из звеньев, соединенных в молекулярную цепь.

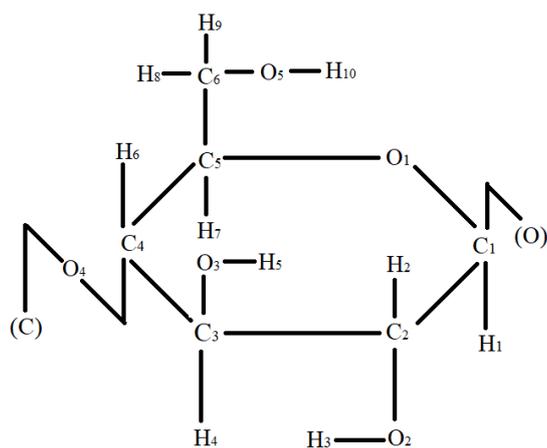


Рисунок 3 – Редуцирующий конец цепи целлюлозы, звено. $(C_6H_{10}O_5)_n$, где n – коэффициент полимеризации [2]

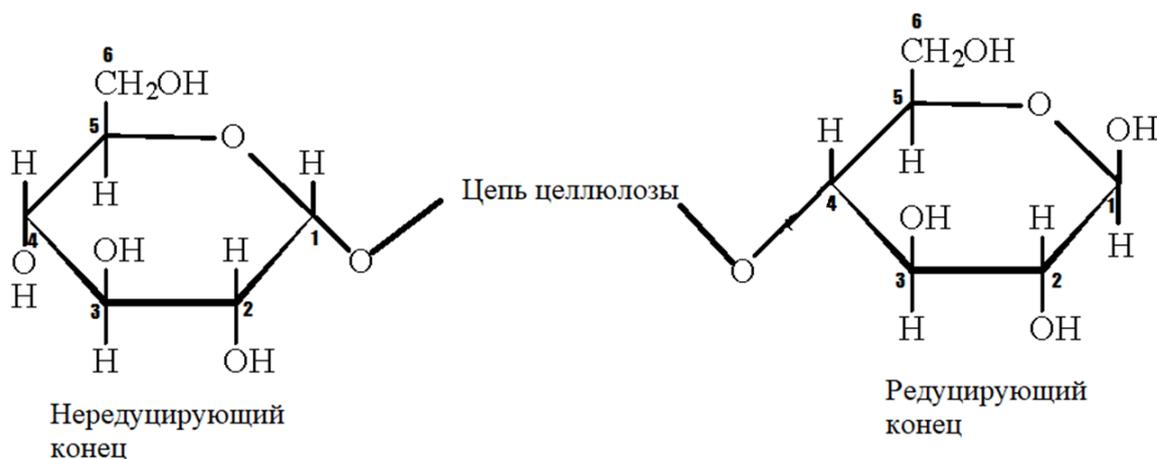


Рисунок 4а – Формула целлюлозы: центральная часть молекулярной цепи

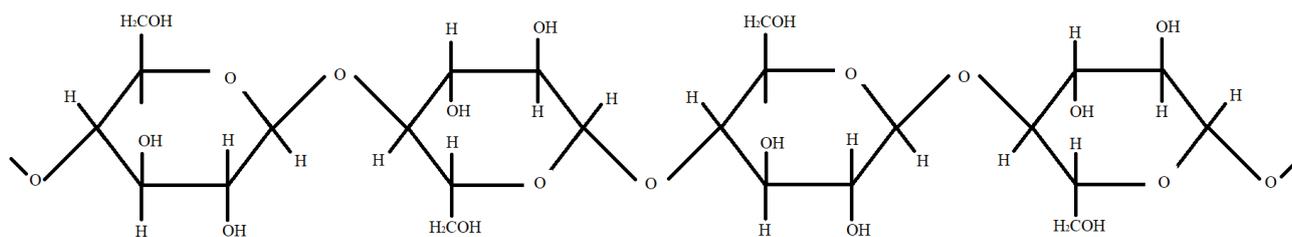


Рисунок 4б – Редуцирующий и нередуцирующий концевые звенья целлюлозы [Фенгел Д., 1988].

Существуют три типа водородной связи (Н-связь), (H-bond) в целлюлозе фибрилл:

1. Внутримолекулярная связь, $O(C_2)H-O(C_6)$, слабая:

максимум гаусс-контура 3491 см^{-1} , длина Н связи, $d=0,28\text{ нм}$
 $O(C_2)H-O(C_6)$, слабая.

2. Внутримолекулярная связь $O(C_3)H-O(C_5)$, сильная:

максимум гаусс-контура 3365 см^{-1} , длина Н связи, $d=0.28\text{ нм}$.

3. Межмолекулярная связь O(C₆)H-O(C₃), сильная:

максимум гаусс-контура 3236 см⁻¹, длина Н связи, d=0.27 нм.

Дает основной вклад в прочность (самая короткая Н-связь).

Таблица 1 – Результаты исследований технической блененой целлюлозы на основе технической березы и эвкалипта (Швеция).

Максимум, см ⁻¹	Относительная плотность Н-связи, %	Длина Н-связи d, нм	Энергия Н связи, кДж/моль	Тип Н-связи
3476 (береза)	27,4	0,27586	9,97792	Внутримолекулярная O(C ₂)H-O(C ₆)
3379 (береза)	32	0,27	16,22472	Внутримолекулярная O(C ₃)H-O(C ₅)
3259 (береза)	17,2	0,26516	21,86952	Межмолекулярная O(C ₆)H-O(C ₃)
3491 (эвкалипт)	22.2	0.282	8,878	Внутримолекулярная O(C ₂)H-O(C ₆)
3365 (эвкалипт)	27.6	0.275	17,002	Внутримолекулярная O(C ₃)H-O(C ₅)
3236 (эвкалипт)	23,5	0.269	22,688	Межмолекулярная O(C ₆)H-O(C ₃)

В таблице 1 приведены расчетные параметры меж- и внутримолекулярных связей по результатам математической обработки спектров поглощения [1] образцов целлюлозы на основе березы и эвкалипта. Анализ параметров спектров показывает, что плотность у внутримолекулярной связи O(C₃)H-O(C₅) выше, чем у связи O(C₂)H-O(C₆) для образцов как технической березы, так и для эвкалипта.

Таким образом, можно сделать вывод об относительном вкладе межмолекулярной связи в плотность Н-связи для образцов технической блененой целлюлозы, полученной из разной древесины. Что характерно, исследованные образцы целлюлозы эвкалипта и березы различаются.

У березы вклад межмолекулярной связи в плотность Н-связи ниже. Суммарная же роль внутримолекулярных связей O(C₂)H-O(C₆) и O(C₆)H-O(C₃) образцов березы выше, чем для образца целлюлозы эвкалипта.

Можно оценить качественно характеристики поставляемого сырья для целлюлозно-бумажных комбинатов и прогнозировать возможные сложности при переработке.

Список литературы:

1. Иванов-Омский, В. И. ИК-спектроскопия водородных связей в D-глюкозе / В. И. Иванов-Омский // Письма в ЖТФ. – 2014. –Т. 40(18). – С. 29-34. – Текст: непосредственный.
2. Фенгел, Д. Древесина, химия, ультраструктура реакции / Д. Фенгел, Г. Вегенер. Перевод с англ. А. В. Оболенской и З. П. Ельницкой. Под ред.

д. т. н., проф. А. А. Леоновича. – М.: Лесная промышленность, 1988. – Текст: непосредственный.

3. Ванин, С. И. Древесиноведение / С. И. Ванин. – М.: Гослесбумиздат, 1949 – Текст: непосредственный.
4. Обухова, И. А. Сезонная береза: результаты инфракрасной спектроскопии / И. А. Обухова, С. Д. Пименов, И. Д. Лобок. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024 (248). С. 304-316. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.304-316>. – Текст: электронный.
5. Иванов-Омский, Оценка прочности бересты путем количественного исследования водородных связей методом ИК-спектроскопии / В. И. Иванов-Омский и др. // Известия СПбЛТА, 2023. – Вып. 241. С. 256-265.

References:

1. Ivanov-Omskij V.I. ИК-спектроскопија водородних свјезеј в D-глиукозе//Пис'ма в ЗНТФ. 2014.Т.40(18).S.29-34.
2. Fengel D., Vegener G. Drevesina, himiya ul'trastruktura reakcii. Perevod s angl. A.V. Obolenskoj i Z.P. El'nickoj. Pod red. d.t.nauk, prof. A.A. Leonovicha. M.: Lesnaya prom., 1988.
3. Vanin S.I. Drevesinovedenie. M.: Goslesbumizdat, 1949.
4. Obuhova I.A., Pimenov S.D., Lobok I.D. Sezonnaya bereza: rezul'taty infrakrasnoj spektroskopii. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii. 2024;(248):304-316. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.304-316>
5. Ivanov-Omskij V.I. i dr. Ocenka prochnosti beresty putem kolichestvennogo issledovaniya vodородnih svyazej metodom ИК-спектроскопии// Известия СПбЛТА, 2023, вып. 241, с. 256-265.

© Обухова И. А., Пименов С. Д., Лобок И. Д., Сиклицкий В. И.
Трапезникова, И. Н., Атаманов И. В., 2024

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА И ПРОМЫВКА ДЛЯ ВЫСОКОГО ВЫХОДА СУЛЬФИТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА КРУПНОТОННАЖНОМ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

магистрант Толстов Алексей Викторович,
аспирант Зеленцов Матвей Дмитриевич,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье предлагается технология повышения выхода сульфитной целлюлозы за счет модернизации промывки и очистки целлюлозного волокна, включающем как автоматизацию, так и замену очистного оборудования с низкой производительностью на современное низкоэнергоемкое, производительное и эффективное по степени очистки и промывке. Предложенная технология с высокой вероятностью обеспечит высокую производительность и рентабельность крупнотоннажных целлюлозно-бумажных комбинатов России. В качестве примера для будущего внедрения предлагаемой технологии выбран Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат.

Ключевые слова: сульфитная целлюлоза, периодическая варка, сортирование, промывка, основание.

AUTOMATIC CLEANING AND FLUSHING FOR HIGH YIELD OF SULFITE PULP IN LARGE-SCALE PULP AND PAPER PRODUCTION

Master Student Tolstov Alexey Viktorovich,
Ph.D. Student Zelentsov Matvey Dmitriyevich,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article introduces engineering method to raise a yield of sulfite pulp via modernization of washing and cleaning cellulosic pulp including automation as well as replacement of the equipment of cleaning equipment of low efficiency to modern one consuming less energy and also being more productive and efficient in terms of cleaning and washing. With a high probability, the offered technology will provide high productivity and profitability of large-scale pulp and paper making plants of Russia. As the model of the future introduction of the offered method, the Kondopoga Pulp and Paper Making Plant has been chosen.

Keywords: sulfite cellulose, batch pulping, sorting, washing, base.

1. Введение

Как доказывает доктор экономических наук Н. А. Бурдин в 2012 году, промывка и сортировка целлюлозы на целлюлозно-бумажных производствах России не достигала теоретически достижимых показателей производительности. Среди причин этого он называет использование устаревшего оборудования и низкую автоматизацию труда, использование людей-операторов в 55-65 % случаев [1]. Как мы увидим далее, в этом направлении к 2024 году не было достигнуто существенных успехов. При этом ускоряющееся в России импортозамещение, а также внедрение на Западе и в Китае технологий автоматизации, которые около 30 лет назад были лишь лабораторными образцами, позволяют достигнуть максимальной производительности и даже превысить расчетные показатели на 12,5 %, делают важность модернизации еще сильнее [2–5]. Разработанный нами проект впервые в мире включает одновременно переход на автоматическое управление и модернизацию оборудования, основанные на новейших принципах в контексте сульфитной варки и сульфитной целлюлозной массы [4,5]. В качестве модели для будущего применения был выбран Кондопожский ЦБК. Предложенный проект позволяет увеличить производительность и рентабельность сульфитного процесса на этапе сортировки и промывки целлюлозного волокна за счет сокращения расходов на воду, электроэнергию, повышения эффективности сортирования и сокращения фонда оплаты труда.

2. Цели и задачи

Для модернизации и автоматизации нам было необходимо разработать технологию, включающую новое оборудование сортирования и промывки и обеспечение их совместного автоматического управления, а также расчет технологических параметров новой установки, прогнозирование рисков и разработку мер для противодействия им. Необходимые требования успешности выполнения проекта включают увеличение выработки собственной сульфитной целлюлозы Кондопожского ЦБК за счет снижения количества отходов при сортировании, снижение химического поглощения кислорода в сточных водах и, как следствие, экологических выплат, снижение расходов воды и электроэнергии и числа требуемых работников, непосредственно обслуживающих процесс в существующем штатном режиме на данном этапе, включая упразднение должностей.

3. Порядок и описание технологического процесса

Предлагаемая новая технологическая линия сортировки и промывки сульфитного целлюлозного волокна должна включать современные сепаратор отходов, сучколовители, сортировочные машины и промывные(ю) установки(у), которые могут управляться как единая система с отрицательной обратной связью в большинстве специализированных компьютерных программ.

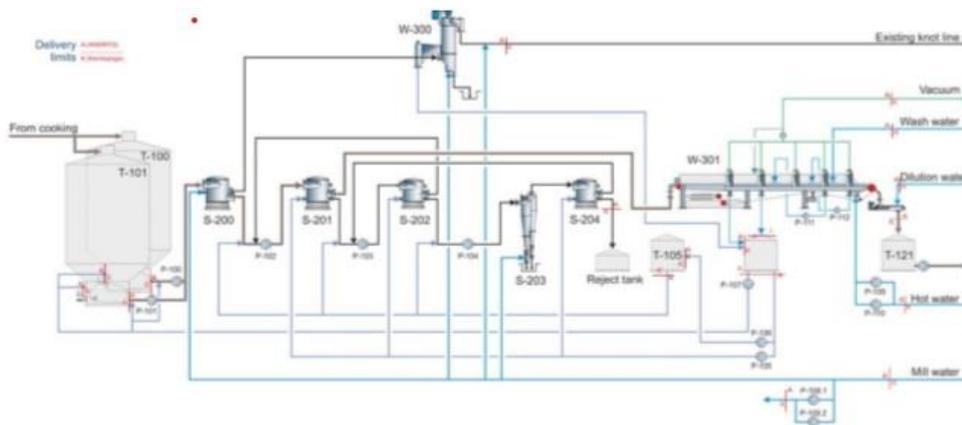


Рисунок 1 – Однолинейная схема проектируемой технологии

Мы рассмотрим выбор и установку такого оборудования и программного обеспечения на примере нужд Кондопожского ЦБК – крупнотоннажного производства, обрабатывающего в основном целлюлозное волокно, полученное из еловой древесины. Кондопожский ЦБК, таким образом, представляет собой типичное предприятие сульфитной варки в России, что служит веской причиной выбрать его в качестве модели. В зависимости от объемов конкретного производства, характера сырья и расположения предприятия, некоторые машины могут быть выбраны для покупки с соблюдением требований нашего проекта.

В настоящее время на КЦБК установлено 4 центробежных сучколовителя «СЦС-07» и 4 вибрационных сучколовителя «СД-60», эксплуатируемые с 1964 года, у которых систематически выходят из строя подшипниковый узел, ванны, сита. В течение года на ремонт вибрационных сучколовителей «СД-60» расходуется в среднем:

- подшипники 14 – 18 шт ($16 \cdot 1100 \text{ руб} = 17600 \text{ руб}$);
- сита 4 – 8 шт ($6 \cdot 80\,000 \text{ руб} = 480\,000 \text{ руб}$);
- ванна без сита 1 шт ($1 \cdot 39\,000 \text{ руб} = 39\,000 \text{ руб}$).

Еженедельно 1 слесарь и 1 сварщик КЦБК проверяют сучколовители в среднем 4 часа. Трудозатраты на обслуживание и ремонт сучколовителей составляют 4 человеко-дня в неделю, в месяц 16 человеко-дней. Общая сумма нецелевых затрат в год на данном оборудовании достигает 180 000 рублей. По данным лабораторий КЦБК, потери пригодной для последующей обработки целлюлозы в отходах от сучколовителей составляют до 700 тонн в год. Также вышеупомянутые сучколовители непригодны для автоматического управления.

В качестве оборудования для удаления сучков им предлагается оборудование фирм «GL&V» или «Andritz». На выбранном в качестве модели предприятия для данной цели предлагается оборудование фирмы «GL&V», сучколовитель «HI-Q» и сепаратор отходов «HI-Q». Сучколовители «HI-Q» обеспечивают высокую производительность, стабильную работу, низкие эксплуатационные затраты и энергопотребление. Кроме того, они распространены в мире и поэтому совместимы с большей частью специализированных компьютерных программ.

Сучколовитель «НІ-Q» полностью герметичен. Камера отходов, установленная на сучколовителе, позволяет эффективно удалять из массы тяжеловесные составляющие и металл. Камера отходов отделена от зоны сортирования перегородкой, через которую должна перетекать входящая масса. Это уменьшает износ и риск повреждения как сита, так и оборудования, установленного после сучколовителя. Внутренний поток рассчитан таким образом, чтобы защитить от повреждения вращающиеся части и лопасти, предотвратить разбивание ротором ломких сучков и образование загрязнений. Промывной жидкости, вымывающей сучки и сопровождающей хорошую массу, гораздо больше, чем отходов. В сучколовителе «НІ-Q» является нормальным, что концентрация отходов гораздо ниже, чем концентрация поступающей массы. Сучколовитель имеет вертикальный вал, приводимый в движение стандартным четырехполосным электродвигателем через клиноременную передачу. Перфорация сита выполнена спиралеобразно для равномерного распределения износа. Две лопасти обеспечивают высокую амплитуду пульсации для очистки сита. Такая конструкция гарантирует стабильность работы.

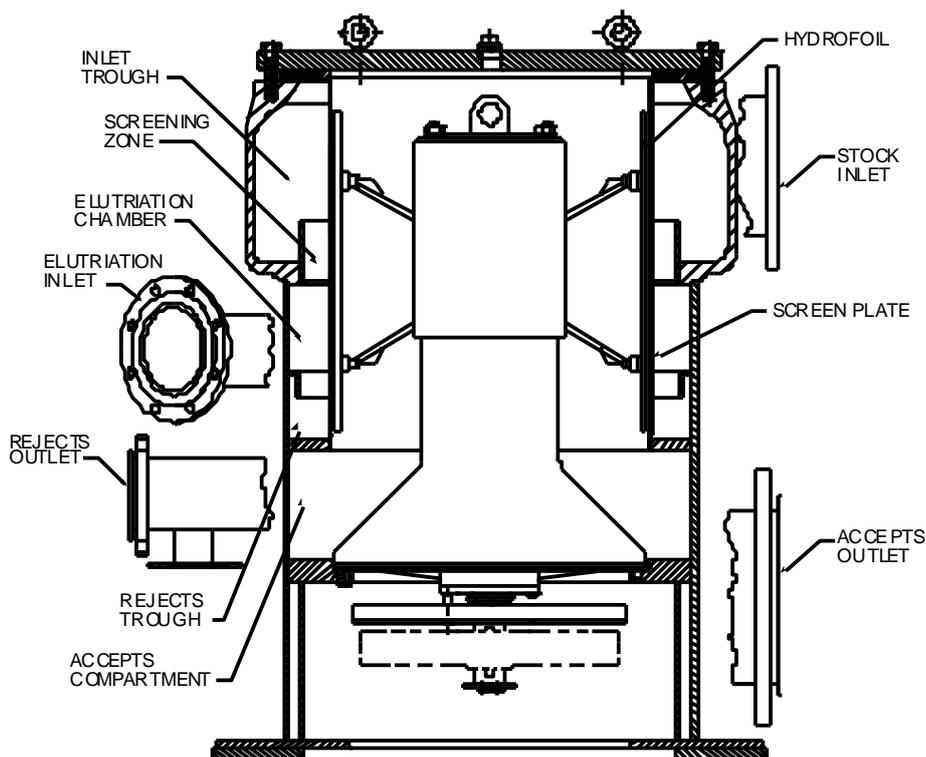


Рисунок 2 – Устройство сучколовителя «НІ-Q» в разрезе

За сучколовителем «НІ-Q» предлагается установить одноименный сепаратор отходов того же производителя. Сепаратор отходов «НІ-Q» работает с производительностью, удовлетворяющей требованиям большинства современных целлюлозных производств. Легкость в обслуживании обусловлена конструкцией самой установки, высота которой составляет всего 2030 мм. Ротор в сборе может быть демонтирован в верхней части установки. Для поднятия ротора необходимо лишь 660 мм над верхней частью.

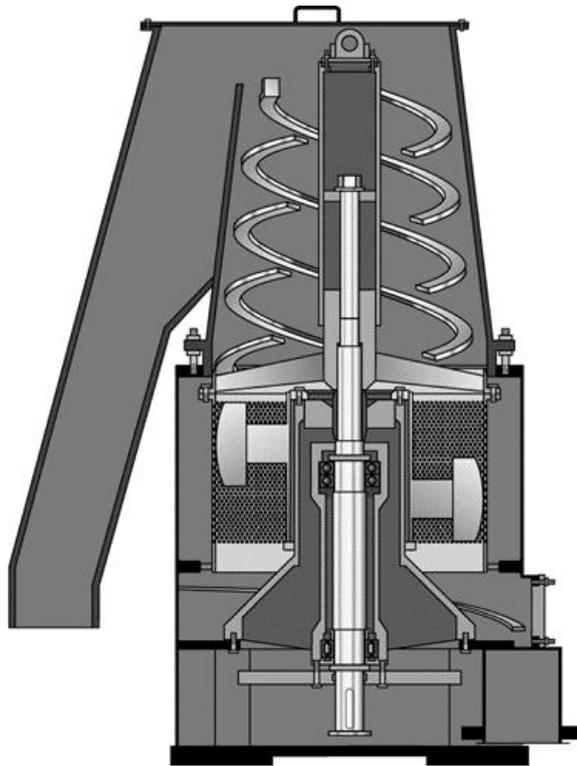


Рисунок 3 – Устройство сепаратора отходов «HI-Q» в разрезе

За установкой сепаратора отходов следует установка сортировочной машины. На исследуемом объекте КЦБК установлена центробежная сортировочная машина «СЦ-2,6-0,1». К ее недостаткам относятся низкая оптимальная для работы концентрация целлюлозы (около 0,9 % от массы), необходимость подачи воды, возрастание доли брака при отклонении от оптимальных условий в сторону увеличения концентрации, необходимость своевременной реакции человека на каждом этапе, несовместимость с современными компьютерными программами. Согласно требованиям проекта предлагается последовательно установить напорные сортировочные машины «FT-40», «FT-20» и «FT-10» производства фирмы «Andritz». К их достоинствам относятся стабильная работа с потоком целлюлозного волокна концентрации до 3,5 %, автоматическая работа и корректировка всех процессов, отсутствие необходимости подачи воды. Как следствие, применение данной последовательности сортировочных машин позволяет сохранить и даже увеличить производительность на данном этапе, сократив при этом энергозатраты более чем на 70 %. Близкое по эффективности оборудование способна поставить также компания «GL&V».



Рисунок 4 – Устройство современной сортировочной машины

В конце предлагаемого к модернизации и автоматизации участка должна быть установлена промывная установка. На КЦБК используются две промывных установки: «Уралхиммаш» и «Вяртсиля», которые способны достичь приемлемой производительности лишь при одновременном использовании, но не могут работать одновременно и при этом несовместимы с современными компьютерными программами для автоматического управления. Взамен них может быть успешно использована промывная установка «VT-Washer» производства компании «Andritz» или ее аналоги от фирм «GL&V» и «Kadant».

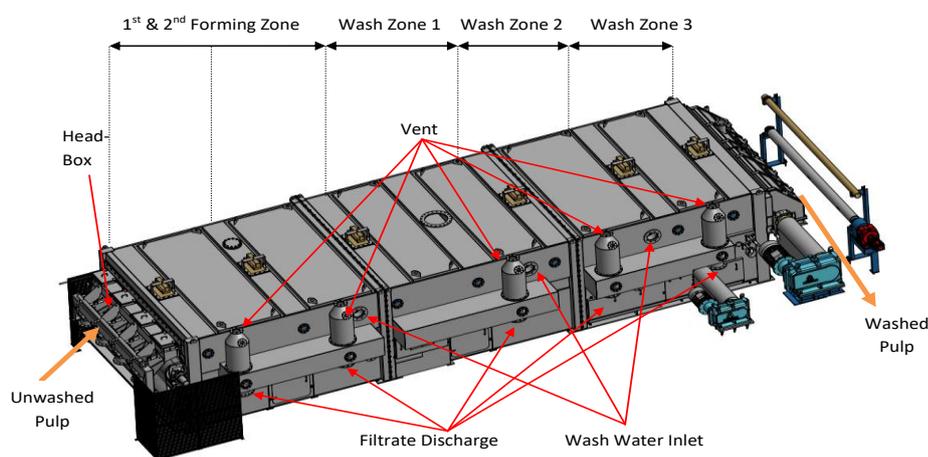


Рисунок 5 – Устройство промывной установки «VT-Washer»

Среди программного обеспечения, способного обеспечить автоматическое функционирование с отрицательной обратной связью предложенного оборудования для проекта сортировки и промывки сульфитного целлюлозного волокна, существует широкий ассортимент от таких разработчиков, как «Siemens», «Valmet», «Andritz».

4. Экономические показатели проекта

Рассмотрим предполагаемые доходы и расходы от проекта в случае модернизации, сопряженной с полной автоматизацией крупнотоннажного целлюлозно-бумажного производства на примере Кондопожского ЦБК (рис. 6). Некоторые промежуточные расчеты являются коммерческой тайной данного предприятия и поэтому не вынесены в таблицу.

№	Статья	Ед. Изм.	Показатели					Нормативы на тонну	Затраты на тонну	Экономический эффект
			Норматив	в месяц	Цена за ед. руб.	Сумма, тыс.руб./мес.	Сумма, тыс.руб./год			
1								Единиц/тонна	Руб./тонну	Руб./тонну
2	Сейчас									
3	Потребляемая мощность старого оборудования	кВт	4 584,0	2 475 360,0	2,4	5 971	71 646,8	275	663	
4	Расход свежей воды на очистной цех (разбавление)	м³/мес	360 000	360 000	0,808	291	3 490,6	40	32	
5	Расход тепловой воды на очистной цех (промывка)	м³/мес	190 000	190 000	0,808	154	1 842,2	21	17	
8	Потери бумаги от смолянистых отложений	тн/мес		14,0		392				
9	Затраты на обслуживание	руб				3 297	39 566		366	
10	ИТОГО Расходы					10 104	116 545		1 079	
11	Проект									
12	Потребляемая мощность нового оборудования	кВт	1 360,0	783 360,0	2,412	1 889	22 673,6	80,3	194	
13	Расход воды (на разбавление) с буммашин	м³/мес	384 000	384 000	0,81	310	3 723,3	39,4	32	
14	Расход тепловой воды (промывка)	м³/мес	87 200	87 200	0,808	70	845,5	8,9	7	
15	Потери бумаги от смолянистых отложений	тн/мес		4,0		112	1 344,0	0,0004	11	
17	Затраты на обслуживание					1 047	12 567	0,0000	107	
18	ИТОГО Расходы					3 429	41 153		352	727
19	Эффект от увеличения производительности (маржа от продажи дополнительных объемов)			750,0	32 231	24 173	290 079			

Рисунок 6 – Экономические показатели проекта на примере исследуемого объекта

Приведенных данных достаточно для расчета срока окупаемости (табл. 1). Курсы валют даны на весну 2024 года.

Таблица 1 – Расчет окупаемости проекта на примере исследуемого объекта

Капитальные затраты проекта	тыс. евро	8 063
	тыс. долларов США	9 675
	тыс. руб.	730 479
Годовая производительность	тонн	117 000
Проценты за пользование кредитными средствами на приобретение оборудования	тыс. руб.	31 379
Экономический эффект	тыс. руб.	334 092
Простой срок окупаемости проекта	лет	2,19

Таким образом, расчет на основе общепринятых экономических показателей доказывает, что модернизация и автоматизация полностью окупит себя на крупнотоннажном предприятии сульфитной варки за срок от двух до трех лет при сравнительно невысоких для таких производств затратах.

Если учесть косвенные выгоды, то рентабельность проекта возрастает еще существеннее в сравнении с расчетной. В частности, предлагаемый проект позволяет сократить число работников до двух операторов в сортировочной части и

полностью исключить труд людей в промывочной части, а также снизить химическое поглощение кислорода в сточных водах и, как следствие, экологические выплаты. Управление рассматриваемыми участками производства как единой системой с помощью специализированного программного обеспечения существенно сократит время остановов, исключит человеческий фактор в управлении оборудованием и позволит сэкономить энергию. В частности, в исследовании Вэня, Сю и Чжан 2015 года доказывается, что комплексная автоматизация при помощи компьютерных программ привела в среднем к экономии 15 % электроэнергии даже без какой-либо модернизации оборудования [6]. В данном проекте предлагается автоматизация в сочетании с модернизацией оборудования, и при таком сценарии рост эффективности часто даже превышал расчетные выгоды от обоих направлений усовершенствования [2, 4].

5. Результаты и их обсуждение

Нами была разработана технология модернизации и замены оборудования, сортирования и промывки с автоматизацией данного оборудования при помощи компьютерных программ, управляющих данным участком как единой системой. Предложены определенные машины и производители как для предприятия, выбранного в качестве модельного, так и для других, которым данные машины могут не подойти; приложены экономические расчеты, свидетельствующие о высокой рентабельности предложенного решения. Данная работа носит характер прикладного исследования, ее научная новизна состоит во впервые разработанной технологии модернизации оборудования в неразрывной связи с комплексной автоматизацией для сульфитного целлюлозного волокна на этапе его сортирования и промывки. После реализации проект позволит тому или иному предприятию увеличить выработку собственной целлюлозы, снизить количество отходов при сортировании, расход воды и электроэнергии, а также экологические выплаты и фонд оплаты труда. Технология предназначена для крупнотоннажных целлюлозно-бумажных производств, применяющих сульфитную варку, в первую очередь российских, но может применяться и на зарубежных.

Список литературы:

1. Бурдин Н.А. Технический уровень лесного сектора Российской Федерации: состояние, проблемы // Лесной вестник. – 2012. – № 5. – С. 50–55.
2. Han Y., Edward L. Optimization of filter washer operation and control // TAPPI Journal. – 1988. – vol. 71. – issue 6. – P. 101.
3. Rudd J.B., de Groot D.L. Control system for controlling a pulp washing system using Neural Network controller // U.S. Patent, 5282131, 1994.
4. Yang C.J. Progress of study on measurement and control technology of pulp washing process // China Pulp and Paper Journal. – 2002. – vol. 21. – issue 6. – P. 56.
5. Jing S., Wu L., Siciliano A.P., Chen C., Li T., Hu L. The Critical Roles of Water in the Processing, Structure, and Properties of Nanocellulose // ACS Nano. – 2023. – vol. 17. – issue 22. – P. 22197–22225.

6. Wen Z., Xu C., Zhang X. Integrated Control of Emission Reduction, Energy-Saving and Cost-Benefit Using a Multi-Objective Optimization Technique in the Pulp and Paper Industry // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – vol. 49. – issue 6. – P. 3639–3642.

References:

1. Burdin N.A. Tekhnicheskiy uroven lesnogo sektora Rossiyskoy Federatsii: sostoyaniye, problemy [The technical level of forestry in the Russian Federation: its condition and problems] // *Lesnoy vestnik [The Timber Newspaper]*. – 2012. – vol. 5. – P. 50–55.
2. Han Y., Edward L. Optimization of filter washer operation and control // *TAPPI Journal*. – 1988. – vol. 71. – issue 6. – P. 101.
3. Rudd J.B., de Groot D.L. Control system for controlling a pulp washing system using Neural Network controller // U.S. Patent, 5282131, 1994.
4. Yang C.J. Progress of study on measurement and control technology of pulp washing process // *China Pulp and Paper Journal*. – 2002. – vol. 21. – issue 6. – P. 56.
5. Jing S., Wu L., Siciliano A.P., Chen C., Li T., Hu L. The Critical Roles of Water in the Processing, Structure, and Properties of Nanocellulose // *ACS Nano*. – 2023. – vol. 17. – issue 22. – P. 22197–22225.
6. Wen Z., Xu C., Zhang X. Integrated Control of Emission Reduction, Energy-Saving and Cost-Benefit Using a Multi-Objective Optimization Technique in the Pulp and Paper Industry // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – vol. 49. – issue 6. – P. 3639–3642.

© Толстов А. В., Зеленцов М. Д., 2024

ПРОИЗВОДСТВО ДВУХСЛОЙНОГО КАРТОНА НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ № 7

студент **Шахаев Павел Николаевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается процесс производства тарной упаковки из двухслойного картона на одном из предприятий целлюлозно-бумажной промышленности Республики Карелия. В результате проведенного исследования делается вывод о том, что производство картона white top liner на бумагоделательной машине – это высокотехнологичный процесс, который требует опытных специалистов и модернизации оборудования.

Ключевые слова: производство, тара, упаковка, картон, целлюлоза, white top liner.

PRODUCTION OF DOUBLE-LAYER CARDBOARD ON PAPER MAKING MACHINE № 7

Student **Shakhaev Pavel Nikolaevich**,
St. Petersburg State University of Industrial
Technologies and Design, Higher School of Technology
and Energy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper considers the production process of double-layer cardboard packaging at one of the enterprises of the pulp and paper industry of the Republic of Karelia. As a result of the conducted research, it is concluded that the production of white top liner cardboard on a paper machine is a high-tech process that requires experienced specialists and equipment modernization.

Keywords: production of container packaging, production of cardboard with a white top layer, white top liner.

Из всего многообразия различных видов упаковки, одним из самых распространенных в мире является бумажная тара, изготавливаемая из бумаги или картона.

Сегодня на российском рынке существуют 54 компании, которые производят тарный картон. Примерно 33 % производимой ими продукции идет на собственное потребление (выпуск гофропродукции производителями упаковки, входящими в холдинги) и около 53 % рынка тарных картонов –

товарная продукция, реализующаяся на внутреннем рынке третьим лицам [1, с. 237].

Спектр производителей тарных картонов включает предприятия полного цикла, имеющие все стадии производства: от лесозаготовки или сбора макулатуры до производства тарных картонов и гофроупаковки (интегрированные компании) и предприятия, специализирующиеся на отдельных этапах. Доля интегрированных компаний в производстве тарных картонов в России составляет около 80 %.

Конкуренция между всеми российскими производителями тарных картонов становится все более ожесточенной.

В сложившихся условиях последних лет производителям бумаги и бумажной упаковки необходима качественная стратегия в части продуктовой линейки и новых рынков сбыта. Условия на рынке сегодня диктует покупатель, важным качеством является способность быстро и гибко реагировать на потребности новых покупателей.

Важно отметить, что гофропроизводство сегодня практически исчерпало свои возможности роста, и требуется появление новых технологических решений, которые позволят выпускать индивидуальную упаковку с минимальным уровнем отходов. А для реализации этого необходимы новые технологии и финансирование.

АО «Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат» – одно из крупнейших предприятий России и Европы, специализирующееся на производстве газетной бумаги.

Также на комбинате производится бумага для гофрирования в соответствии с требованиями СТО 33039595-008-2019 «Бумага для внутренних слоев гофрированного картона». Бумага для гофрирования изготавливается в рулонах марки Б-2 массой 80 и 100 г/м².

С 2020 года предприятие заняло нишу в производстве легкограммжных видов бумаги для внутренних слоев гофрокартона массой 42-45 г/м². Мощности производства на отдельных БДМ позволяют производить бумагу весом 70-80 г/м².

На БДМ № 7 выработан опыт производства однослойной бумаги повышенного граммажа массой 60-80 г/м². Двухслойный картон по сравнению с однослойным имеет ряд преимуществ, среди которых особо выделяются более высокие прочностные свойства за счет отдельного формования основного и покровного слоев, идеальные печатные свойства на покровном слое, а также в зависимости от пожелания потребителя и назначения картона выбор композиционного состава, вариативность себестоимости производства продукции и др. Использование вторичного волокна в основном слое картона делает производство эффективным как в сфере экономики, так и в экологии.

При минимальных затратах на монтаж и модернизацию оборудования БДМ №7 может вырабатывать высококачественный двухслойный картон для наружного слоя гофрокартона.

Для примера рассмотрим возможность производства двухслойного лайнера с белым покровным слоем из целлюлозного блененого волокна white top liner на бумагоделательной машине № 7.

Это вид картона, основа которого изготавливается из вторичных волокон и имеет верхний чисто целлюлозный слой. Отличается характерным коричневатым цветом оборотной стороны и прочностными, жесткостными и барьерными свойствами. В настоящее время он является одним из востребованных материалов на рынке.

White top liner выделяется среди других аналогичных материалов уникальными свойствами лицевой стороны, которая обладает прекрасными показателями непрозрачности, белизны (80 % по ГОСТ 30113) и глянца (> 50) и очень гладкой поверхностью (30-50 сек. по ГОСТ 12895), что делает ее идеальной для печати тонких узоров и сложных деталей. Кроме того, она также обладает хорошей прочностью и жесткостью, обеспечивая защиту упакованных предметов от сдавливания и повреждения при столкновении. Такая упаковка гарантирует высокую привлекательность и прекрасное качество заключенного в нее продукта.

Производство картона с белым покровным слоем привлекает не только расширением ассортиментной линейки продукции, но и возможностью занять определенный сегмент рынка, который на сегодняшний день представлен лишь несколькими производителями, которые являются своего рода монополистами. Важным преимуществом двухслойного white top liner на БДМ № 7 является то, что вес лайнера будет 75-80 г/м², в отличие от традиционных производителей, которые производят двухслойный картон весом от 90 г/м².

Производство данного сорта продукции требует качественного аппаратного обеспечения технологической цепочки оборудования.

Предлагаемый на рынке топ-лайннер из первичного волокна обладает высокой конечной стоимостью и способствует значительному удорожанию готового гофроящика. Изготовление данного вида продукции с применением вторичного волокна способствует снижению себестоимости короба без снижения потребительских свойств, что в современных экономических условиях является конкурентным преимуществом.

Кроме того, продукция, которая упаковывается в ящик с белым слоем, не всегда требует высоких показателей белизны и печатных свойств, и, следовательно, производитель упаковки может варьировать себестоимость в желаемом направлении для соблюдения соответствия требований конечного потребителя и собственного маржинального дохода при применении топ-лайннера с различными характеристиками и, соответственно, стоимостью.

Для выпуска двухслойного картона типа топ-лайннер массой 75-80 г/м² с покровным слоем из 100 % сульфатной блененой целлюлозы и основного слоя из 100 % макулатурного сырья на БДМ № 7 необходимо выполнение следующих условий.

Для производства покровного слоя используется сульфатная блененая целлюлоза производства Светлогорского ЦКК или Mondi, согласно спецификации, белизной не менее 80 %. Целлюлоза покупается в кипах, проходит

стадию роспуска (гидрофобная подготовка) на существующем узле роспуска. В подготовительном отделе БДМ она сгущается до необходимой концентрации, доводится до определенной степени помола на мельнице, поступает в машинный бассейн, откуда насосом с регулируемым числом оборотов (взамен БПУ) подается в смесительный насос и с необходимой концентрацией подается на вихревую очистку УВК, где удаляются минеральные включения. Затем идет удаление волокнистых загрязнений (флокул) на центробежных сортировках вертикального типа. После сортировок-узлователей масса с концентрацией 0,6-0,65 % поступает в напорный ящик № 2.

Для повышения оптических свойств (белизна, непрозрачность) и гладкости покровного слоя в условиях непрерывного производства целесообразно использовать наполнитель (химосаженный мел РСС или GСС, каолин или их заменители), а также проклеивающие и химические вспомогательные вещества для повышения степени удержания.

Наполнитель подается в массу в виде суспензии. Сухой наполнитель приготавливается на специальной станции, где разбавляется водой до необходимой концентрации, очищается, дозируется в трубопровод массы непосредственно перед напорным ящиком № 2 инъекционным способом. Схема подготовки целлюлозы представлена на рисунке 1.

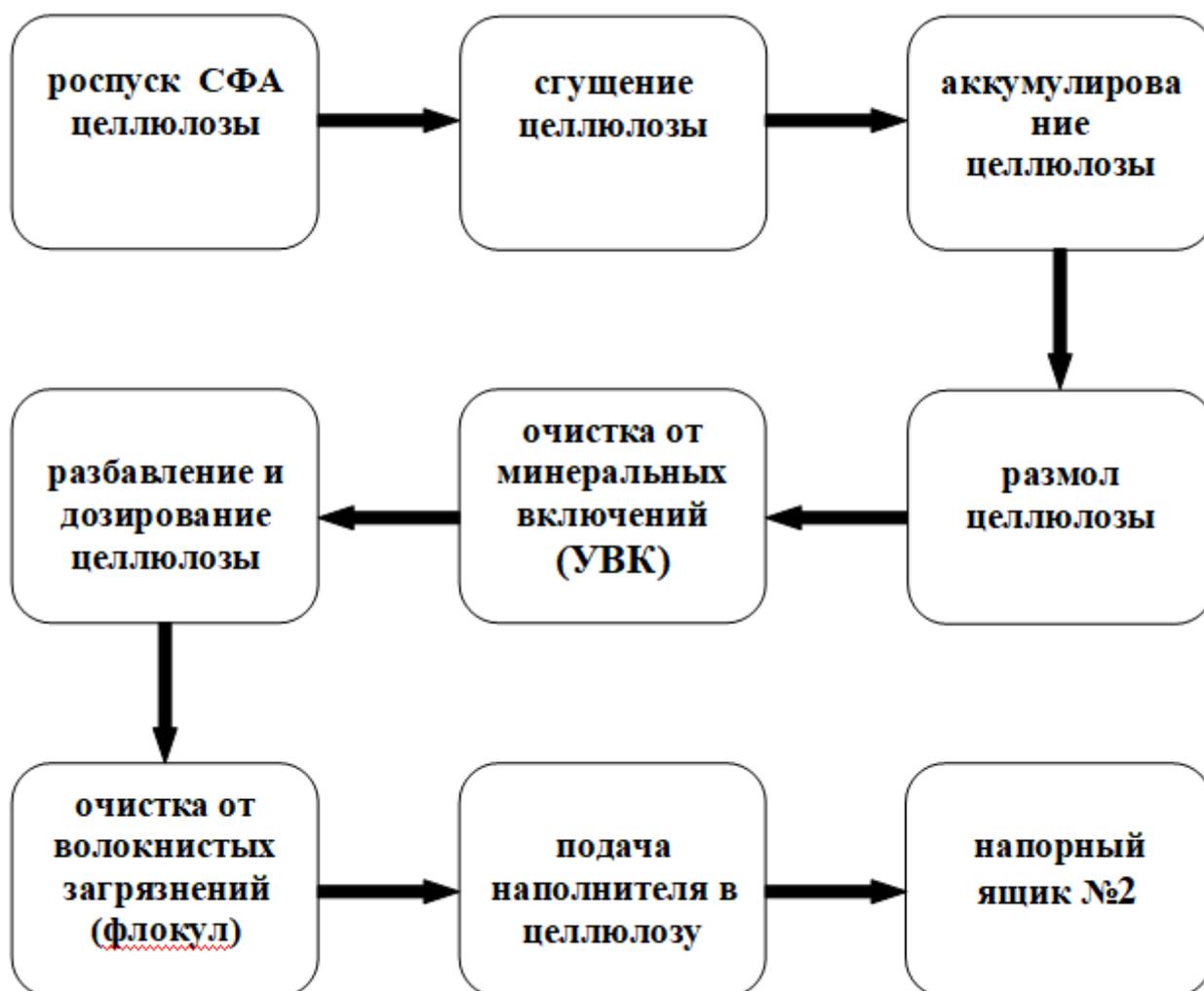


Рисунок 1 – Схема подготовки целлюлозы

Для производства основного слоя используется 100 % макулатурное сырье, которое получается на существующем макулатурном производстве из макулатуры марки МС5Б1. На сегодняшний день проводится завершающая стадия по запуску макулатурного цеха производительностью 200 т/сутки. Привозная макулатура МС5Б1 распускается в гидроразбивателе Voith, который оснащен «жгутом» для удаления пленок и проволоки, затем проходят стадии очистки от твердых включений, сортировки в три ступени и сгущения. Далее перекачивается и аккумулируется в БВК при концентрации 4,0 %. С аккумулятора (БВК) макулатурная масса подается в приемный бассейн БДМ № 7, откуда насосом через бак постоянного напора, смесительный насос разбавленная масса подается на очистку от минеральных включения (УВК) и волокнистых загрязнений (флокул) на центробежных сортировках и далее в напорный ящик № 1. Схема подготовки макулатуры представлена на рисунке 2.

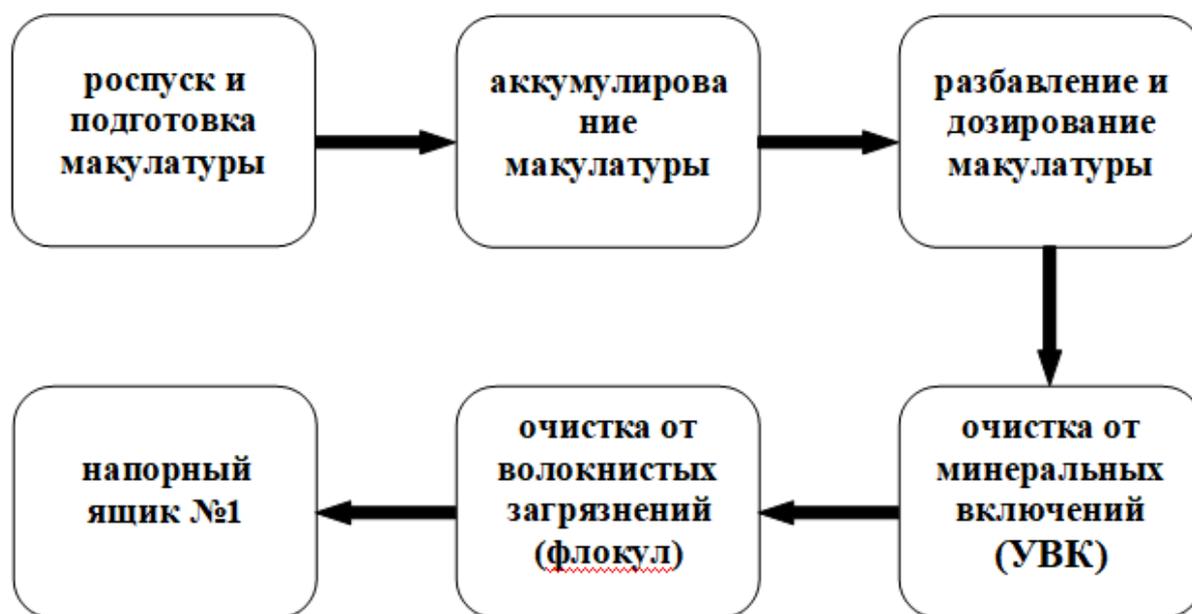


Рисунок 2 – Схема подготовки макулатуры

Существующая БДМ № 7 оснащена плоским сеточным столом консольного типа с верхним формером, типа «наездник». Для обеспечения выпуска покровного слоя необходимо смонтировать дополнительный гидродинамический напорный ящик № 2 на формере, дооснастить формер обезвоживающими элементами для формования и обезвоживания верхнего слоя.

Для достижения необходимых формующих свойств напорный ящик № 2 предлагается установить на формере – над верхней сеткой.

Таким образом, основной слой из 100 % макулатурного сырья будет составлять 60-62 % (48-50 г/м²), покровный слой из 100 % целлюлозного беленого волокна будет составлять 38-40 % (30-32 г/м²) от композиции готового продукта. Весь оборотный брак (5-7 %) будет поступать по существующей схеме в основной слой лайнера.

Макулатурная масса подается в напорный ящик № 1 и далее на нижнюю сетку сеточного стола, где происходит формирование основы полотна. Целлюлозная масса с наполнителем подается в напорный ящик № 2 верхнего формера.

Для оптимального распределения наполнителя и волокна в покровном слое соединение слоев происходит в месте контакта нижней и верхней сетки. Сформированное двухслойное полотно обезвоживается далее на сеточном столе (существующие ящики среднего и высокого вакуума), двухкамерном гауч-вале и с сухостью 19-20 % поступает в прессовую часть. Схема модернизированной сеточной части БДМ № 7 представлена на рисунке 3.

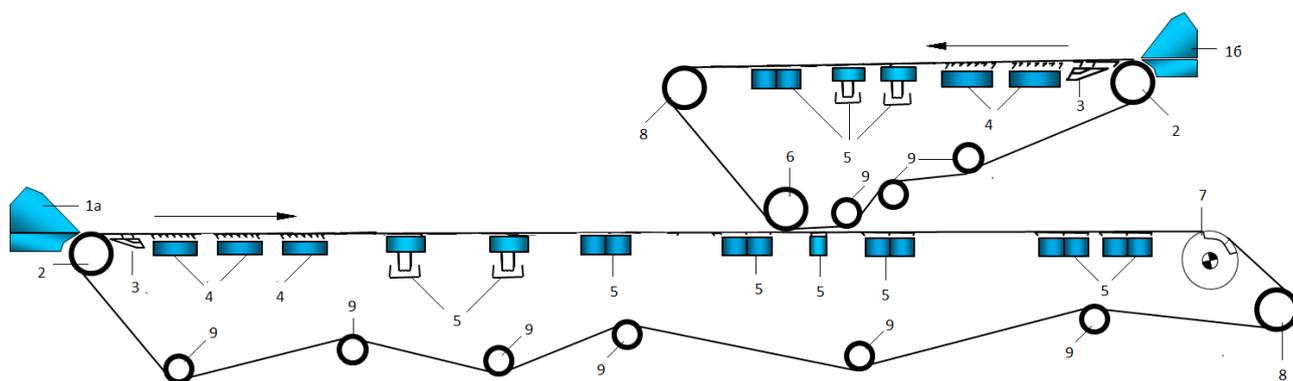


Рисунок 3 – Схема модернизированной сеточной части БДМ № 7:
 1а – напорный ящик № 1; 1б – напорный ящик № 2; 2 – грудной вал;
 3 – грудная доска; 4 – пакет гидропланок; 5 – отсасывающие ящики
 среднего и высокого вакуума; 6 – формирующий вал; 7 – гауч-вал;
 8 – сетководущий вал; 9 – сетконатяжные и сеткоправильные валики

Существующая прессовая часть представляет собой три последовательно расположенных двухвальных пресса. Далее полотно с сухостью 41-42 %, передается в существующую сушильную часть, где высушивается до 8,5-9,0 %. Далее каландрируется на двухвальном каландре для придания верхнему слою машинного лоска и улучшенной печати и наматывается на тамбурный вал на накате.

С наката картон нарезается на продольно-резательном станке согласно пожеланиям заказчика на необходимые форматы и диаметры, упаковывается и доставляется потребителю.

Таким образом, при реализации данного проекта основными вопросами, требующими детальной технической проработки на уровне ТЭО и РД (рабочая документация), будут:

1. Размещение нового оборудования планируется в стесненных условиях существующего цеха. Для этих целей на отметке 0,00 м с приводной стороны будет проведена реконструкция существующей вакуумной системы, существующие насосы NASH 9000 полностью или частично будут заменены на малогабаритные турбовоздуходувки. Для обезвоживающих элементов верхнего слоя тоже будет установлена новая воздуходувка, а также будут задействованы

площади на отметке 0,00 м бывшей БДМ № 6, под участком гильзоклейки ЦУМПП (он располагается в непосредственной близости, за стеной БДМ № 7 – это единый блок зданий).

2. Дооснащение, а возможно, и замена автоматической системы управления машины (DCS).

3. Модернизация пароконденсатной системы (ПКС) с возможностью работы сушильных цилиндров на давлении до 3,5 бар и системы теплорекуперации.

4. Замена гидроразбивателя под накатом и самого наката.

5. Модернизация электропривода и МСС.

Таким образом, производство двухслойного картона типа white top liner на бумагоделательной машине – это высокотехнологичный процесс, который предполагает дооснащение существующего оборудования БДМ № 7 еще одним потоком массоподготовки с центриклинерным очистным оборудованием, сортировками-узлователями, станцией-кухней (Кукер) для приготовления и подачи наполнителя и химикатов для удержания, дополнительным напорным ящиком на формере с дополнительными обезвоживающими ящиками, сборником регистровой воды.

Основная задача – максимально задействовать и перераспределить имеющееся в наличии оборудование для подготовки полуфабрикатов, подобрать и разработать технологический режим для производства данной марки картона в условиях БДМ № 7. Благодаря применению данных технологий и контролю качества получается картон с отличными характеристиками, который находит широкое применение в различных отраслях для потребительской тары, от используемой для упаковки в Интернет-торговле до пищевой, фармацевтической и табачной промышленности.

Список литературы:

1. Жирнов, Д. Н. Разработка технологии экономически эффективного картона с белым покровным слоем / Д. Н. Жирнов, Е. В. Дернова, О. И. Блинусова // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 18–20 мая 2016 года. – Бийск: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ), 2016. – С. 237-239. – Текст: непосредственный.
2. Кейзер, П. М. Технология бумаги и картона: учебное пособие / П. М. Кейзер, Е. И. Симонова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 92 с. – Текст: непосредственный.
3. Мидуков, Н. П. Импортозамещающая технология производства картона вайт-лайнера из 100 % макулатуры / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. С. Смолин [и др.] // Химическая технология. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 29-34. – Текст: непосредственный.
4. Мидуков, Н. П. Теоретические основы производства многослойного картона из макулатуры / Н. П. Мидуков, В. С. Куров. – Санкт-Петербург: Издательско-

полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. – 358 с. – Текст: непосредственный.

5. Мидуков, Н. П. Технология многослойного композиционного картона тест-лайнера с использованием сухих волокон / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. С. Смолин [и др.] // Химическая технология. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 445-452. – Текст: непосредственный.
6. Романова, А. Н. Количественная характеристика полей локальных деформаций в образце картона топлайнер при одноосном растяжении / А. Н. Романова, Я. В. Казаков, А. В. Малков // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – №1 (373). – С. 131-132. – Текст: непосредственный.

References:

1. Zhirnov, D.N. Development of technology for cost-effective cardboard with a white top layer / D.N. Zhirnov, E.V. Dernova, O.I. Blinushova // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: materials of the IX All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation, Biysk, May 18–20, 2016. – Biysk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Altai State Technical University named after. I.I. Polzunov” (AltSTU), 2016. – pp. 237-239. – Text: direct.
2. Keyser, P.M. Technology of paper and cardboard: textbook / P.M. Keyser, E. I. Simonova. - St. Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2023. - 92 p. – Text: direct.
3. Midukov, N.P. Import-substituting technology for the production of white-liner cardboard from 100% waste paper / N.P. Midukov, V.S. Kurov, A.S. Smolin [et al.] // Chemical technology. – 2019. – Т. 20, No. 1. – P. 29-34. – Text: direct.
4. Midukov, N.P. Theoretical foundations for the production of multilayer cardboard from waste paper / N.P. Midukov, V.S. Kurov. – St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2021. – 358 p. – Text: direct.
5. Midukov, N.P. Technology of multilayer composite cardboard test liner using dry fibers / N.P. Midukov, V.S. Kurov, A. S. Smolin [etc.] // Chemical technology. – 2019. – Т. 20, No. 10. – P. 445-452. – Text: direct.
6. Romanova, A.N. Quantitative characteristics of local deformation fields in a topliner cardboard sample under uniaxial tension / A.N. Romanova, Ya.V. Kazakov, A.V. Malkov // News of Universities. Forest magazine. - 2020. - No. 1 (373). – pp. 131-132. – Text: direct.

© Шахаев П. Н., 2024

Раздел 3. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА

УДК 336.74

СМАРТ-КОНТРАКТЫ В ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ

канд. техн. наук, профессор **Заяц Анатолий Моисеевич**
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический
университет им. С. М. Кирова

Аннотация. В работе рассматриваются особенности смарт-контрактов и технологии их реализации в блокчейн-сетях. Показаны подходы в применении смарт-контрактов в лесной отрасли и, в частности, в целлюлозно-бумажной отрасли.

Ключевые слова: лесная отрасль, смарт-контракт, блокчейн, этапы жизненного цикла, смарт-контракты.

SMART CONTRACTS IN THE FOREST INDUSTRY

Candidate of Technical Sciences, Professor **Zayats Anatoly Moiseevich**,
St. Petersburg State Forestry
Engineering University named after S. M. Kirov.

Abstract. The paper discusses the features of smart contracts and technologies for their implementation in blockchain networks. Approaches in the application of smart contracts in the forestry industry and in particular in the pulp and paper industry are shown.

Keywords: forestry industry, smart contract, blockchain, life cycle stages of smart contracts.

Несмотря на определенную консервативность развития лесной отрасли, в настоящее время по ряду объективных причин в ней происходит технологический сдвиг, сопровождаемый активной цифровизацией всех бизнес-процессов.

Цифровизация и инновационные решения в развитии лесопромышленного комплекса и целлюлозно-бумажной отрасли, в частности, обеспечивают повышение прозрачности лесного бизнеса и оптимизацию бизнес-процессов за счет компьютерного мониторинга работ, управления древесными запасами, цепочками поставок, планирования и продажи.

Как отмечают эксперты [1], расширение электронной коммерции и переход от пластиковой упаковки к возобновляемым материалам на фоне экологического тренда продвигают процесс цифровой трансформации на основе применения инновационных информационных технологий с использованием умных или смарт-контрактов, реализуемых в блокчейн-системах для заключения и исполнения бизнес-договоров.

В блокчейн-технологии легко встраивается инфраструктура лесных бизнес-систем, обеспечивающая функционирование базисного слоя хранения, обмена данными и выполнения транзакций в лесохозяйственных операционных процессах.

Такой подход позволяет повысить эффективность компаний за счет цифровизации на всех этапах бизнес-процессов: от заготовки лесного сырья до его поставки [2].

При «бумажной» технологии цепочки поставок обременены бумажными системами, где формы договора должны пройти через множество инстанций для утверждения, что увеличивает риск потерь и внесения несанкционированных изменений.

Цифровая трансформация лесной отрасли обеспечит переход от обмена бумажными документами к обмену данными, введения реестровых моделей, отказ от дублирующей и излишней информации практически при неограниченном числе сценариев использования. Посредством блокчейна становится возможным снижение нагрузки на персонал, занимающийся монотонной работой. Благодаря чему возможна оптимизация производства и производительности.

Распределенные системы предоставляют защищенную, доступную цифровую и консенсусную версию всем участникам контракта и автоматизируют исполнение договорных условий и платежи, причем любые действия, реализуемые транзакциями, выполняются при подтверждении их всеми участниками заключенного смарт-контракта.

Смарт-контракт, как инструментальное средство реализации специфической информационной технологии, позволяет заключать и выполнять договора без участия посредников и ненужных проверок.

Технически смарт-контракт оформляется как фрагмент кода, запрограммированный для реализации задач в широком спектре предметных областей, при правильном исполнении заранее predetermined условий на каждом этапе их выполнения.

Для раскрытия сущности рассматриваемой темы определим смарт-контракт как программно оформленную структуру для функционирования и выполнения в реестре блоков транзакций (блокчейне) или иной распределенной информационной системе в целях автоматизированного совершения и (или) исполнения сделок либо совершения иных юридически значимых действий [3-5].

Смарт-контракт – договор в электронной форме, исполнение прав и обязательств по которому осуществляется путем совершения в автоматическом порядке цифровых транзакций в блокчейн в строго определенной таким договором последовательности и при наступлении определенных им обстоятельств. Смарт-контракт – договор, существующий в форме программного кода, имплементированного на платформе блокчейн, который обеспечивает автономность и самоисполнимость условий договора по наступлении заранее определенных событий и выполнении заданных условий.

В настоящее время этапность разработки смарт-контрактов определена их жизненным циклом. Эксперты и ИТ-специалисты включают в жизненный цикл

смарт-контрактов следующие основные этапы: создание (формирование); «замораживание» (запуск); выполнение и завершение [6, 7]. Различные названия этапов не меняют содержания и комплекса реализуемых в них процедур.

На этапе формирования (или создания) смарт-контракта согласовываются общее содержание и цели контракта, обсуждаются его условия, при этом повторение и согласование контракта составляют значительную часть этого этапа. Здесь определяются и документируются все требования, чтобы обеспечить удовлетворение потребностей всех заинтересованных сторон.

Как только содержимое смарт-контракта будет завершено, он должен быть переведен в код, при этом необходимо придерживаться установленных стандартов кодирования. Обычно код смарт-контракта имеет модульную структуру для улучшения читаемости, выявления и устранения ошибок, при его тестировании и обновлении.

Преобразование смарт-контракта в код, как и при традиционном программировании, предполагает выполнение многократных итераций совместно с заинтересованными сторонами и программистами.

После того как стороны согласовали кодифицированную форму договора, он загружается в блокчейн. На этом этапе узлы получают контракт как часть блока транзакции. Контракт доступен для исполнения после того, как большинство узлов подтвердят блок. Всем участникам предоставляется доступ к нему, а их активы замораживаются на соответствующих счетах на необходимую сумму.

После проверки условий и обязательств контракта в блокчейне выполняется транзакция (в случае, если условия соответствуют принятым в контракте). Все действия смарт-контракта могут исполняться как определенный сценарий, «привязанный» к блокчейн. Как только он запускается транзакцией в блокчейне и проверяется узлами, выполняются predetermined действия, отраженные в нем.

После выполнения смарт-контракта обновленная информация о его состоянии и результирующие транзакции помещаются в блокчейн и подтверждаются с использованием процесса консенсуса. Ранее зафиксированные цифровые активы передаются (активы размораживаются), и контракт завершается для подтверждения всех транзакций.

Фактически по своему содержанию договоры (контракты) определяют бизнес-модели, которые регулируют все взаимодействия между сторонами в ходе их выполнения. В реализуемых моделях умных контрактов могут выполняться правила управления бизнес-объектом любого типа и логикой их использования. Большинство блокчейн-платформ предоставляют для смарт-контрактов инфраструктуру для их создания, обслуживания и тестирования, проверки их поведения при выполнении.

С помощью умного контракта можно описать почти бесконечное количество вариантов бизнес-процессов, связанных с неизменностью данных при принятии решений несколькими участниками или организациями. По своей сути, условия любого договора — это алгоритмы развития ситуаций и ответные меры.

Широкие содержательные и функциональные возможности позволяют смарт-контрактам фиксировать и отображать различные состояния объектов, регламентировать и мониторить процессы, которые переводят их из одного состояния в другое. В смарт-контрактах задаются и описываются ключевые бизнес-процессы и определяются данные, которые необходимы для их реализации и совместного использования участниками договора.

С помощью смарт-контрактов логистические компании могут устанавливать цепочку движения груза, которая позволяет отслеживать перемещение от места отправки до места назначения, включая и детализируя все промежуточные этапы по событиям грузоперевозки. Это повышает уровень безопасности и уменьшает число «серых» зон (участков, где нет информации по движению груза) и утерянных отправок.

Применение смарт-контрактов для решения логистических и других бизнес-задач в лесном комплексе могут осуществляться на основе шаблонов, разработанных для типовых и нетиповых сделок. Шаблоны смарт-контрактов разрабатываются под разные задачи и хранятся в блокчейн. Блокчейн-системы предусматривает встроенный алгоритм, который прописывает смарт-контракт под разные типовые формы сделок. Если стороны все устраивает, то им предлагается выбрать тот или иной шаблон сделки и отправить подтверждение.

Если предложенные шаблоны типовых сделок не устраивают стороны, то они могут создать нетиповой договор самостоятельно, оформить его в виде смарт-контракта и отправить подтверждение сделки. Однако создание нетипового договора требует больше затрат из-за особенностей разработки и ее стоимости.

Список литературы:

1. Макарова, Ю. Посчитать деревья и собрать команду: как технологии меняют лесную отрасль. <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/cmr/60f92f149a79473d0d55ca0b?from=copy>.
2. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155>.
3. Заяц, А. М. О некоторых особенностях смарт-контрактов, реализуемых в блокчейн-системе. Информационные системы и технологии: теория и практика: сб. научн. тр. – Вып. 16 / Отв. ред. М. Р. Вагизов. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024.
4. Заяц, А.М. Информационные блокчейн-системы и смарт-контракты: учебное пособие для студентов направлений подготовки 09.03.02, 09.04.02 «Информационные системы и технологии» / А. М. Заяц. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 97 с.
5. Вашкевич, А. М. Смарт-контракты: что, зачем и как / А. М. Вашкевич. – Москва: Симплоер, 2018. — 89 с.
6. Жизненный цикл смарт-контракта в экосистеме блокчейн <https://www.blockchain24.com/articles/zhiznennyu-cikl-smart-kontraktov-v-ekosisteme-blokcheyna>

7. Морозова, Ю. А. Программные решения блокчейн в логистике и управлении цепями поставок / Ю. А. Морозова //Цифровая экономика. Информационное общество, 2019. № 6. – С49-58. <https://publications.hse.ru/en/articles/312179858>.

References:

1. Julia Makarova. Count trees and assemble a team: how technology is changing the forestry industry.
<https://trends.rbc.ru/trends/innovation/cmrm/60f92f149a79473d0d55ca0b?from=cory>
2. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400235155/>.
3. Zayats A.M. On some features of smart contracts implemented in the blockchain system. Information systems and technologies: theory and practice: collection of scientific tr. Issue 16/ ed. by M. R. Vagizov. – St. Petersburg: SPbGLTU, 2024.
4. Zayats, A.M. Information blockchain systems and smart contracts: a textbook for students of training areas 09.03.02, 09.04.02 "Information systems and technologies" / A.M. Zayats. – St. Petersburg: SPbGLTU, 2024. – 97 p.
5. Vashkevich, A.M. Smart contracts: what, why and how. / A.M. Vashkevich.- Moscow: Simpler, 2018. — 89 p.
6. The life cycle of a smart contract in the blockchain ecosystem <https://www.blockchain24.com/articles/zhiznenny-cikl-smart-kontraktov-v-ekosisteme-blokcheyna>.
7. Morozova Yu. A. Blockchain software solutions in logistics and supply chain management. / Yu. A. Morozova//Digital Economy. Information Society, 2019. No. 6. - С49-58 <https://publications.hse.ru/en/articles/312179858>

© Заяц А. М., 2024

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ В ЛЕСАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

соискатель **Карасев Юрий Анатольевич**,
соискатель **Дьяченко Владимир Михайлович**,
канд. техн. наук, доцент **Марков Виктор Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается воздействие колесной и гусеничной техники на почвогрунты криолитозоны. Установлено, что гусеничная техника оказывает на экологию лесов вечной мерзлоты меньшее влияние, чем колесная. Данный эффект достигается за счет большего пятна контакта элементов движителя с почвой.

Ключевые слова: криолитозона, лесные машины, пятно контакта, почвогрунт, гусеничные машины, колесные машины.

ECOLOGICAL JUSTIFICATION OF THE USE OF TRACKED VEHICLES IN THE FORESTS OF THE CRYOLITHOZONE

Applicant **Karasev Yuri Anatolyevich**,
Applicant **Dyachenko Vladimir Mikhailovich**,
PhD in Technical, Associate Professor **Markov Viktor Alexandrovich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper considers the impact of wheeled and tracked vehicles on cryolithozone soils. It has been established that tracked vehicles have less impact on the ecology of permafrost forests than wheeled vehicles. This effect is achieved due to a larger contact spot of the propellant elements with the soil.

Keywords: cryolithozone, forestry machines, contact spot, soil soil, tracked vehicles, wheeled vehicles.

Криолитозона – это область земной поверхности, где температура почвы или горных пород находится ниже 0 °С в течение многих лет. Она характерна для арктических и субарктических регионов, а также для горных районов с высокой холодностью климата. Эту область также называют зоной вечной мерзлоты.

В криолитозоне происходят специфические геологические, геоморфологические и экологические процессы, связанные с промерзанием и

оттаиванием грунтов. Здесь распространены вечномерзлые породы, которые занимают около 25 % суши Земли. Невозможность прогрева почвы в этой зоне вызвана наличием подземных ледников, оказывающих существенное влияние на поверхностную температуру.

Криолитозона оказывает значительное влияние на хозяйственную деятельность человека в высоких широтах. Освоение этих территорий требует особых технологий и техники, учитывающих специфику мерзлых грунтов. Криолитозона также имеет обобщенное название Крайний Север.

Важно отметить, что понятие Крайний Север не следует отождествлять с понятием Арктика. Географически, Арктика меньше, чем Крайний Север, и заканчивается на южной границе тундры. То есть Арктика территориально входит в Крайний Север, и является той ее частью, на которой нет лесных насаждений.

В Российской Федерации около 65 % территории, покрытой многолетней мерзлотой, входит в зону хвойных бореальных лесов, еще 2,5 % территории приходится на лесотундру, 1,5 – на лесостепь, остальные около 31% территории многолетней мерзлоты занимают открытые пространства – тундровые, степные, пустынные [1].

Леса, произрастающие в криолитозоне, крайне чувствительны к антропогенному воздействию, и вмешательство человека может нанести непоправимый вред хрупкой северной природе. Способность лесов криолитозоны восстанавливаться после природных и антропогенных нарушений значительно меньше, чем, например, в умеренном климате. И с очевидным потеплением климата, наблюдаемым в последние десятилетия, способность экосистем лесов криолитозоны восстанавливать нарушения все более снижается [2]. Согласно Приказу Министерства ресурсов и экологии РФ, лесозаготовительные работы в данной географической зоне возможно проводить лишь в зимний период. Только таким образом возможно уберечь почвогрунты и корневые системы деревьев от разрушения. Однако в летний период проводится ряд работ по лесовосстановлению, уходу за насаждениями, а также противопожарные мероприятия, требующие передвижения тяжелой техники по почвогрунту.

На деформацию почвогрунтов северных лесов, особенно лесов криолитозоны, под воздействием движителей тяжелых лесных машин, преобладающих в лесном хозяйстве и в лесозаготовительном производстве предприятий и организаций Российской Федерации, значительное влияние оказывают особенности их устройства [3]. В ходе проведения исследований научной школой «Инновационных разработок в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» было установлено, что колесная техника наносит более высокий вред почвогрунтам, чем гусеничная. Это связано в первую очередь с пятном контакта элементов движителя, которое значительно больше у гусениц, чем у колес. На рисунке 1 показан сравнительный анализ образования колеи различными лесными машинами.

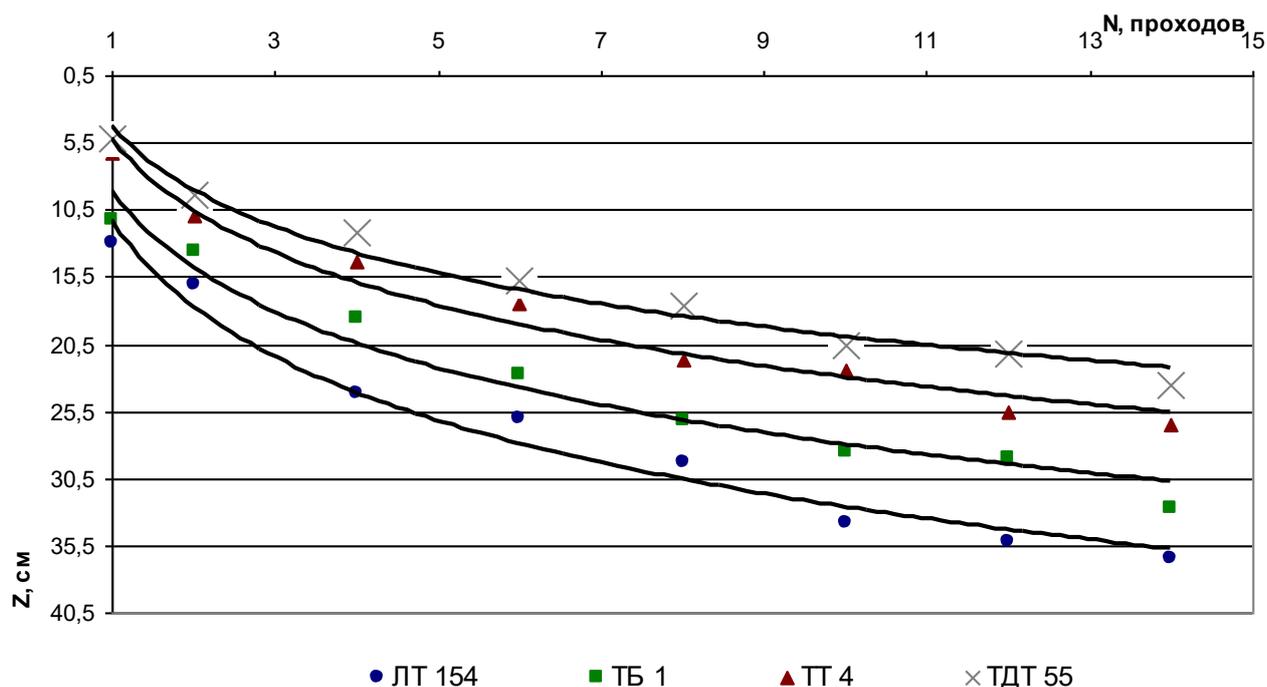


Рисунок 1 – Образование колеи различными лесными машинами

Из данного графика видно, что колесный трактор ЛТ-154 уже после первого прохода оставляет под собой значительно более глубокую колею, чем гусеничный тракторы, а с повышением количества проходов данная динамика увеличивается. Естественным ограничением глубины колеи в данном случае может являться лишь клиренс лесной машины. При многократных проходах колесной лесной машины происходит разрушение подстилающего слоя грунта, приводящее к его размягчению и значительному увеличению глубины колеи. При прохождении же гусеничной машины воздействие на почвогрунт значительно более щадящее [4]. Ширина гусениц играет важную роль для снижения давления на почвогрунт. Для лесных машин выбирают наиболее широкие гусеницы, увеличивая тем самым пятно контакта движителя с почвогрунтом. Стандартные заводские траки для экскаваторов и другой дорожной и складской техники выпускаются заводами производителями с шириной 600 мм, а в то же время для лесной техники применяют гусеницы с шириной в 700 мм. Также учитываются «хрупкость» почвы в криолитозоне, для северных лесов целесообразно было бы применять гусеницы с низким количеством грунтозацепов, которые могли бы повредить корневую систему деревьев при проходе лесной машины. Ни рисунке 2 представлены гусеницы дорожной и лесной техники [5].



гусеница экскаватора – 600 мм



гусеница лесной машины – 700 мм

Рисунок 2 – Гусеницы дорожной и лесной техники

Применение гусеничной техники наиболее предпочтительно для условий Крайнего Севера не только с экологической, но и эксплуатационной стороны. Гусеницы, в отличие от резиновых колес, не подвержены таким факторам как снижение давления эластичности из-за низких температур, повышенный износ, разрывы и порезы. Однако и у гусеничной техники есть свои недостатки. По сравнению с колесной, это в первую очередь динамические характеристики и расход топлива, который у гусеничного трактора значительно выше, чем у трактора с таким же объемом двигателя, но на колесном ходу. Альтернативой в некоторых случаях могут являться съемные гусеницы для колесных машин, однако стоимость их достаточно велика и широкого применения данная технология у российских лесозаготовителей не нашла.

Список литературы:

1. Григорьев, И. В. Перспективный машинный комплекс для заготовки древесины // И. В. Григорьев, А. А. Чураков // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Материалы II международного научно-практического форума. – 2017. – С. 170-175.
2. Константинов, П. Я. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов / П. Я. Константинов, Р. Н. Аргунов, Е. Ю. Герасимов, И. С. Угаров // Криосфера Земли. – Т. IV. – № 3. 2006. – С. 15-22.
3. Григорьев, И. В. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства / И. В. Григорьев, А. А. Чураков, О. И. Григорьева // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 136-139.
4. Григорьева, О. И. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. И. Гринько, С. А. Войнаш // Машиностроение: новые концепции и технологии. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2020. – С. 45-49.

5. Сафин, Р. Р. Технология и машины лесовосстановительных работ: учебное пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, Е. Ю. Разумов. – М.: Деревообрабатывающая промышленность, 2015. – 230 с.

References:

1. Grigoriev I.V. Perspective machine complex for timber harvesting // I.V. Grigoriev, A.A. Churakov // Natural resources and ecology of the Far East region. Proceedings of the II International Scientific and Practical Forum. 2017. С. 170-175.
2. Konstantinov P.Y., Argunov R.N., Gerasimov E.Yu. Ugarov I.S. On the relationship between the depth of seasonal thawing and the interannual variability of the average annual soil temperature // Earth Cryosphere. VOL. IV. NO. 3. 2006. С. 15-22.
3. Grigoryev, I.V. Perspective design of an all-terrain vehicle for forestry / I.V. Grigoryev, A.A. Churakov, O.I. Grigoryeva // Transportation and transport-technological systems. Proceedings of the international scientific and technical conference. - 2017. - С. 136-139.
4. Grigorieva, O.I. Concept of a universal machine for forestry operations and forest fire suppression / O.I. Grigorieva, A.B. Davtyan, O.I. Grinko, S.A. Voynash // Machine building: new concepts and technologies. All-Russian scientific-practical conference of students, postgraduates and young scientists. Krasnoyarsk, - 2020. - С. 45-49.
5. Safin, R.R. Technology and machines of reforestation works. Training manual. / R.R. Safin, I.V. Grigoriev, O.I. Grigorieva, E.Yu. Razumov / М.: Woodworking industry, 2015. - 230 с.

© Карасев Ю. А., Дьяченко В. М., Марков В. А., 2024

МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИИ МЕСТ РУБОК

студент **Кузьмин Рейно Степанович**
студент **Туманян Марк Михайлович**
студент **Лева Дмитрий Сергеевич**
студент **Семенов Роман Андреевич**
магистрант **Кемпи Елена Андреевна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, старший преподаватель
Рего Григорий Эйнович,
Петрозаводский государственный университет,
г. Петрозаводск, Российская Федерация
аспирант **Алексеев Иван Владимирович**
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический
университет им. С. М. Кирова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе описывается модель машинного обучения с подкреплением, предназначенная для оптимизации планирования дислокации мест рубок. Целью создания модели является автоматизация и повышение точности выбора мест рубок, минимизация затрат на строительство дорог и снижение риска ошибок, связанных с человеческим фактором. Модель учитывает экономические, экологические и правовые факторы. Обучение модели произведено на данных лесоустройства. Система использует агента, который принимает решения на основе наград и штрафов, с конечной целью в минимизации затрат на строительство дорог и обеспечении выполнения плана предприятия по породам.

Ключевые слова: обучение с подкреплением, дислокация мест рубок, планирование лесосечного фонда, лесная промышленность, планирование лесозаготовок.

MACHINE LEARNING MODEL FOR OPTIMIZING THE PLANNING OF LOGGING LOCATIONS

Student **Kuzmin Reyno Stepanovich**
Student **Tumanyan Mark Mikhailovich**
Student **Leva Dmitry Sergeevich**
Student **Semenov Roman Andreevich**
Master's Student **Kempi Elena Andreevna**
Academic Advisor: PhD in Technology, Senior Lecturer **Rego Grigory Einovich**
Petrozavodsk State University,
Petrozavodsk, Russian Federation

Postgraduate Student **Alekseev Ivan Vladimirovich**,
Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper describes a reinforcement learning model designed to optimize the planning of logging location dislocation. The goal of the model is to automate and improve the accuracy of selecting logging sites, minimize road construction costs, and reduce the risk of human-related errors. The model takes into account economic, environmental, and legal factors. The training of the model was carried out using forest inventory data. The system uses an agent that makes decisions based on rewards and penalties, with the ultimate goal of minimizing road construction costs while ensuring the company's plan is met regarding tree species.

Keywords: reinforcement learning, logging location dislocation, forest harvesting planning, forestry, timber harvesting planning.

Составление дислокации мест рубок – это процедура определения мест рубок на определенный период по материалам проекта освоения лесов (арендованных лесных площадей). Часто встречаются другие названия данной процедуры: подбор лесосечного фонда, нарезка лесосек [1]. Дислокация мест рубок осуществляется работниками производственно-технического отдела предприятия и лесоинженерами на производственных участках при помощи технических инструментов, которые могут осуществлять только визуализацию и запись информации, относящейся к арендованным кварталам [2; 3]. Эффективность данного процесса напрямую зависит от опыта специалиста и основывается на его субъективном мнении относительно представленных данных.

Планирование мест рубок лесоинженерами требует значительных временных ресурсов и при этом не исключена вероятность ошибок вследствие человеческого фактора [4; 5]. Для решения этих проблем предлагается создать экспертную систему на основе методов машинного обучения для оптимизации планирования дислокации мест рубок. Предлагаемая экспертная система автоматизирует процессы анализа данных и принятия решений, обеспечивая более эффективное и устойчивое использование лесных ресурсов.

Оптимизация лесозаготовительной деятельности в первую очередь направлена на минимизацию затрат при сохранении необходимого уровня доступа к ресурсам. В рамках исследования дислокации мест рубок важно учитывать множество факторов, которые влияют на этот процесс. В контексте определения дислокации мест рубок выделяются следующие группы факторов: экономические, экологические, правовые и нормативные, раскрытые в таблице 1 [6-10].

Таблица 1 – Факторы, влияющие на оптимальность определения дислокации мест рубок

Фактор	Описание
Экономические факторы	Стоимость строительства дорожной инфраструктуры, рыночные цены на древесину и затраты на транспортировку
Экологические факторы	Категория земель, целевая порода, класс бонитета, тип условий местопроизрастания, преобладающая порода, возраст, высота, диаметр древесных насаждений и диаметр. Древесные насаждения – это элементарный, однородный участок леса, отличающийся от соседних по характеру растительности [11]
Правовые и нормативные факторы	Организационно-технические параметры лесосек, ограничения деятельности на лесном участке: наличие особо защитных участков, выделение ключевых биотопов, площадь лесного участка, отведенного в рубку, целевое назначение лесов, категория защитности лесов, особо защитные участки лесов, число зарубов, способ лесовосстановления, организационно-технические параметры лесосек

В ходе исследования было решено сосредоточиться на одном из основных факторов, влияющих на затраты, а именно на расходах, связанных со строительством дорог. Поскольку этот фактор является наиболее значимым и на него можно непосредственно воздействовать, его оптимизация стала приоритетной задачей для снижения общих затрат. Задачу по минимизации затрат на строительство дорог решено передать модели машинного обучения с подкреплением. Модель обеспечит нахождение эффективного решения, за счет наград и штрафов (отрицательных наград), присуждаемых агенту за его действия.

Для учета всех факторов, влияющих на эффективность принятия решения, необходимо, чтобы данные в обучающей выборке (датасете) были репрезентативны реальному положению дел. В нашем случае среда формируется на основе данных, предоставленных партнерами исследования: ПАО "Сегежа Групп" и ООО "Свеза". Основные атрибуты данных, используемых в моделируемой среде, представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Данные предоставленные ПАО «Сегежа Групп»

Наименование данных	Описание данных
SRI	Субъект РФ
MU	Лесничество
MK	Целевое назначение лесов, категория защитных лесов
KV	Номер лесного квартала
LESB	Арендатор, землепользователь, обладатель сервитута/публичного сервитута
REL	Рельеф
AKTM	Год таксации лесов
SKNR	Номер лесотаксационного выдела
PL	Площадь лесотаксационного выдела
VZ	Вид земель
SKP	Особо защитные участки лесов
UP1P	% вырубки
MR	Целевая порода
VMR	Преобладающая порода
BON	Класс бонитета
MTIP	Тип леса
KMET	Год вырубки
SUVL	Тип вырубки
ARD1	Номер яруса
MR1	Древесная порода
AMZ1	Возраст
H1	Высота
D1	Диаметр

Таблица 3 – Данные предоставленные ООО "Свеза"

Наименование данных	Описание данных
id	Id данных необходимое для построения связей
primarykey	Первичный ключ, необходимый для построения связей
foresty	Номер лесничества
geometry	Геометрические данные, необходимые для построения графического отображения объектов на карте
number	Номер квартала
forestdist	Номер лесной местности
firehazard	Уровень пожарной опасности
relief	Рельеф
appraiser	Таксация
area	Площадь объекта
act	Номер акта
forestform	Распределение по породам
classofage	Класс возраста
groupofage	Группа возраста
note	Примечания
forestquar	Номер квартала леса
predominan	Преобладание типа леса
height	Средняя высота насаждений
age	Средний возраст леса
land_categ	Категория земель
targetbree	Целевая порода
layer	Номер слоя

Дислокация мест рубок определяется исходя из потребностей пользователя и стоимости освоения выбранных лесосек [11; 12]. Потребности выражаются в виде плана по вырубкам, который состоит из запаса насаждений с распределением по породам и классам бонитета (таблица 4). В ячейках таблицы указан запас насаждений в м³.

Таблица 4 – Пример плана по вырубкам

Порода	Бонитеты					
	I	II	III	IV	V	Va
Берёза	10	0	0	10	235	0
Дуб	150	0	0	0	0	0
Ель	0	0	120	0	0	0
Кедр	0	63	0	78	0	0
Ива	0	202	0	0	0	0

Стоимость освоения определяется при помощи модели оптимизации, в которой обозначения, названия, меры измерения и области определения переменных модели представлены в таблице 5. Функции оптимизации определяются по формулам (6), (7); ограничения функции – по формулам (8)-(10).

Таблица 5 – Переменные модели оптимизации

Обозначение	Название
n	Количество лесосек в плане рубки в штуках
i	Индекс лесосеки
p	Количество классов бонитета в штуках
j	Индекс класса бонитета
m	Количество пород леса в штуках
k	Индекс породы леса

ρ_{ijk}	Количество стволов j -того бонитета k -того типа леса на гектар для i -той лесосеки в штуках/гектар
v_{jk}	Минимальный необходимый объём леса j -того бонитета k -того типа леса в м ³
o_{i_1, i_2}	Расстояние между лесосеками i_1 и i_2 в плане на 1 год в км
w_i	Ширина i -той лесосеки в км
h_i	Длина i -той лесосеки в км
s_i	Площадь i -той лесосеки из плана в га
S	Суммарная площадь лесосек в плане рубки в га
g	Максимальная площадь лесосеки сплошной рубки в га
l	Максимальная ширина лесосеки в км
rs	Количество запланированных для постройки дорог в штуках
r	Индекс номера дороги в штуках
ses	Количество сегментов дороги <i>road</i> в штуках
se	Индекс сегмента дороги
len_{se}	Длина сегмента дороги в км
$c_{лет}$	Стоимость строительства 1 км всесезонной дороги в рублях
$c_{зим}$	Стоимость строительства 1 км зимника в рублях
bin_{se}	Бинарная переменная, принимающая значение 1 если сегмент дороги – зимник, иначе 0
c_{se}	Стоимость строительства сегмента дороги в рублях
$contain_{se}$	Стоимость содержания сегмента дороги в течение 1 месяца в рублях
$density_i$	Густота посадки лесосеки i под восстановление в штуках/гектар

cr	Стоимость посадочного материала для восстановления лесосеки в рубль/гектар
cd	Стоимость 1 литра ГСМ в рублях
hm_i	Количество литров ГСМ, потреблённое харвестерами на перемещение до лесосеки i в литрах
ht_i	Количество литров ГСМ, потреблённое харвестерами на полную вырубку лесосеки i в литрах
fm_i	Количество литров ГСМ, потреблённое форвардерами на перемещение до лесосеки i в литрах
ft_i	Количество литров ГСМ, потреблённое форвардерами на перемещение по лесосеке i в литрах
crm_i	Количество литров ГСМ, потреблённое лесовозами на перемещение до лесосеки i в литрах
crt_i	Количество литров ГСМ, потреблённое лесовозами на перемещение лесоматериала из лесосеки i в литрах
d_i	Количество литров ГСМ, потреблённое всеми машинами при работе с лесосекой i в литрах

Где переменные $s_i, S, bin_{se}, c_{se}, d_i$ определяются по формулам (1), (2), (3), (4), (5) соответственно. Площадь лесосеки определяется как произведение ее длины h_i на ширину w_i :

$$s_i = w_i * h_i \quad (1)$$

Площадь всех зон вырубki рассчитывается как сумма площадей каждой из лесосек s_i :

$$S = \sum_{i=1}^n s_i \quad (2)$$

Переменная, отвечающая за сезонность дороги, принимает значение “0” летом и “1” зимой:

$$bin_{se} = \{se = \text{лет}: 0; se = \text{зим}: 1\} \quad (3)$$

Стоимость строительства сегмента дороги определяется через произведение сезонности bin_{se} и стоимости $c_{зим}, c_{лет}$:

$$c_{se} = c_{зим} * bin_{se} + c_{лет} * \underline{bin_{se}} \quad (4)$$

Количество ГСМ, необходимого для вырубki лесосеки i , рассчитывается как сумма затрат ГСМ на передвижение и работу харвестеров hm_i, ht_i , передвижение и работу форвардеров fm_i, ft_i , передвижение лесовозов до лесосеки crm_i и от верхнего до нижнего склада crt_i :

$$d_i = hm_i + ht_i + fm_i + ft_i + crm_i + crt_i \quad (5)$$

Используя переменные, описанные в таблице 4 и представленные в виде формул (1-5), составлены функции оптимизации формулы (6) и (7). Расстояние o между любыми различными двумя лесосеками i_1, i_2 должно быть минимально, поскольку в общем случае, если лесосеки находятся рядом друг с другом, то стоимость их освоения будет ниже, за счёт меньших затрат на топливо для машин:

$$o_{i_1, i_2} \rightarrow \min \text{ для } \forall i_1, i_2 \in [1; n]: i_1 \neq i_2. \quad (6)$$

Сумма затрат на освоение лесосек определяется как сумма затрат на строительство дорог $\sum_r^{rs} \sum_{se}^{ses} (len_{se} * c_{se})$, их содержание $\sum_r^{rs} \sum_{se}^{ses} (contain_{se} * 12)$, восстановление леса $\sum_i^n s_i * density_i * cr$ и потребление ГСМ машинами $\sum_i^n d_i * cd$ и должна быть минимально возможной:

$$\sum_r^{rs} \sum_{se}^{ses} (len_{se} * c_{se} + contain_{se} * 12) + \sum_i^n s_i * density_i * cr + \sum_i^n d_i * cd \rightarrow \min \quad (7)$$

Для этой модели оптимизации вводятся ограничения по формулам (8)-(10). Объём леса $s_i * \rho_{ijk}$, вырубленный на всех лесосеках i , должен быть не меньше запланированного v_{jk} для всех бонитетов j и для всех пород k :

$$\sum_{i=1}^n s_i * \rho_{ijk} \geq v_{jk} \text{ для } \forall j \in [1; p]; k \in [1; m]. \quad (8)$$

Расчётная площадь каждой из лесосек s_i не должна превышать максимально допустимую g :

$$s_i \leq g \text{ для } \forall i \in [1; n]. \quad (9)$$

Ширина каждой из лесосек w_i не должна превышать максимально допустимую l :

$$w_i \leq l \text{ для } \forall i \in [1; n]. \quad (10)$$

Главным критерием оптимизации является минимизация стоимости освоения лесосек (7) при учёте выполнения плана (8). Вторая функция оптимизации (6) предназначена для минимизации расстояний между лесосеками. (9) и (10) являются штрафами за нарушение законодательства по размерам лесосеки. Поскольку данные не позволяют точно прогнозировать местоположение и конфигурацию лесосек с использованием регрессионных методов, было решено отказаться от моделей регрессии в пользу обучения с подкреплением [13; 14].

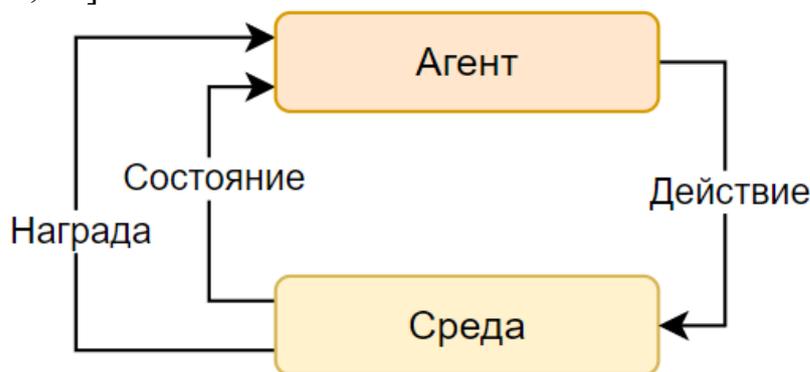


Рисунок 1 – Блок-схема работы обучения с подкреплением

Для выбранной модели требуется определить 2 фактора: среду и агента (рисунок 1). Средой для данной модели машинного обучения является квадратная сетка, в ячейках которой хранятся векторы с данными о выделе. Агентом выступает субъект, осуществляющий действия в среде, за которые он может получить награду, либо штраф.

Для описания модели обучения с подкреплением вводятся новые переменные, не связанные с ранее упомянутыми. Агент выбирает одно из возможных действий. Множество действий состоит из 5 элементов: $A = \{\text{движение влево, движение вправо, движение вверх, движение вниз, рубка леса в текущей клетке}\}$. Для конкретной ячейки множество допустимых действий формируется исходя из ее геометрического положения. Например, из левой верхней ячейки нельзя двигаться влево и вверх. Среда может обрабатывать действия агента и выдавать за них награду, на основе чего агент корректирует свою политику π .

Политикой агента является общее описание плана действий, направленных на достижение определенных целей. Она включает определение того, как агент будет достигать своих целей в долгосрочной перспективе. В данном исследовании стратегия агента заключается в достижении целей по рубке леса с минимальными затратами на строительство дорожного покрытия путем планирования оптимальных маршрутов для прокладки дорог.

Исходя из условий задачи, было принято решение, что агент будет награждаться за выполнение плана по вырубкам и получать штрафы за строительство дороги и превышение допустимых размеров лесосеки. Для того чтобы агент имел возможность рубить лес в любом месте и планировать дорогу от вырубки до построенной дороги, вводятся состояния агента. Каждое состояние описывается 3 параметрами: координатами x , y и типом передвижения. Было выделено два типа передвижения: сквозной проход и планирование дороги. Пока агент осуществляет сквозной проход, он не получает ни штрафов, ни наград до момента первого решения запланировать рубку в клетке, на которой он находится. После этого агент осуществляет планирование дороги. Агент перемещается по клеткам, совершая одно из доступных действий, которые определяют его движение с одной клетки на другую. После каждого перемещения проверяется, есть ли на клетке дорога или запланирована рубка. Если на клетке нет запланированной рубки и дорога там отсутствует, агент строит дорогу, за что получает штраф. Штраф представляет собой отрицательное вознаграждение за действия агента. Агент продолжает свои действия до тех пор, пока не попадет на клетку, где уже есть дорога. Таким образом, можно гарантировать, что от каждой лесосеки будет запланирована дорога до уже существующей.

Предлагаемая система машинного обучения с подкреплением для планирования лесозаготовок автоматизирует процесс выбора мест рубок, учитывая экономические, экологические и правовые факторы. Она оптимизирует расположение лесосек, минимизируя затраты на строительство дорог и снижая риск ошибок, связанных с человеческим фактором. Система обучается на данных лесоустройства, используя агента, который принимает

решения на основе наград и штрафов, обеспечивая выполнение плана рубок и эффективное использование лесных ресурсов. Такой подход позволяет значительно повысить точность и устойчивость планирования. На рисунке 2 представлен план, предложенный агентом для одного квартала и плана по вырубкам в количестве 50 кубометров 3 бонитета берёзы.

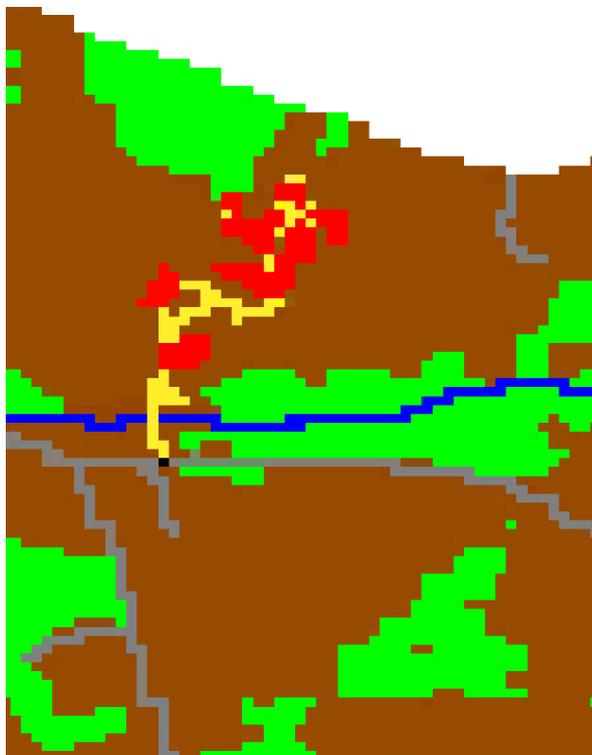


Рисунок 2 – План, предложенный моделью машинного обучения (черным цветом обозначен агент, серым – построенные дороги, зеленым – лес, не входящий в сплошную рубку, коричневый – лес, входящий в сплошную рубку, жёлтый – планируемые в постройку дороги, красный – планируемые агентом сплошные рубки)

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта «Разработка экспертной системы для оптимизации планирования дислокации мест рубок», поддержанного в рамках Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, в 2024 году, финансируемой Правительством Республики Карелия (Договор №3-Г24 от 20.03.2024 между ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» и Фондом венчурных инвестиций Республики Карелия).

Список литературы:

1. Абрамов, В. В. Ситуационный анализ: методические указания к практическим работам для студентов по направлению подготовки 35.03.02 – Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств /

- В. В. Абрамов, Л. Д. Бухтояров; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – Воронеж, 2016. – 111 с. – Текст: непосредственный.
2. Программный комплекс лесоустroительного проектирования и лесного планирования с использованием лесных карт [сайт]. PLP2015. – Режим доступа: <https://lesproekt.org/?p=plp2015> (дата обращения: 12.09.2024). – Текст: электронный.
 3. АВЕРС: Управление лесным фондом ПРОФ [сайт]. – Режим доступа: <https://www.theforest.ru/> (дата обращения: 12.09.2024). – Текст: электронный.
 4. Ковязин, В. Ф. Основы лесного хозяйства и таксация леса / В. Ф. Ковязин, А. Н. Мартынов, Е. С. Мельников, А. С. Аникин, В. Н. Минаев, Н. В. Беляева. – Москва: Издательство, 2023. – 372 с. – Текст: непосредственный.
 5. Ганнесен, В. В., Соловьёва, Е. Е. Человеческий фактор как одна из основных причин аварийности [Научная статья] // Журнал «Медицинские исследования и практика». – Текст: непосредственный.
 6. Barrow P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographic Information Systems // Journal of Geographical Information Science. 2015. Vol. 7. No. 2. pp. 112-129.
 7. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности лесопользования. – Москва: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2020. – Текст: непосредственный.
 8. Лесной кодекс Российской Федерации: с изменениями на 2023 год. – Москва: Официальное издание, 2017. – Текст: непосредственный.
 9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 315 от 2011 года «Об утверждении Правил использования лесов». – Москва: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2011. – Текст: непосредственный.
 10. Энциклопедия лесного хозяйства / ВНИИЛМ. – Москва: ВНИИЛМ, 2006. – 416 с. – Текст: непосредственный
 11. Гульчеев, В. А. Секреты датасетов: практическое руководство по анализу и обработке данных. – 2023. – Текст: непосредственный.
 12. Атрощенко, О. А., Гутырчик, А. В. Оптимизация лесопользования при участковом методе лесоустройства. – 2001. – Текст: непосредственный.
 13. Биза, М. В. Оценка эффективности алгоритмов обучения с подкреплением для среды CartPole / М. В. Биза; науч. рук. Е. И. Сукач. – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы физики и техники: XII Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов, посвященная 80-летию со дня рождения профессора Максименко Николая Васильевича (Гомель, 20 апреля 2023 г.): сборник материалов / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – С. 305-308.
 14. Моралес, Мигель. Грокаем глубокое обучение с подкреплением / Мигель Моралес. – Москва: Издательство «Умный дом», 2020. – 256 с. – Текст: непосредственный.

References:

1. Abramov V. V., Bukhtoyarov L. D. Situacionnyj analiz: metodicheskie ukazaniya k prakticheskim rabotam dlya studentov po napravleniyu podgotovki 35.03.02 – Tekhnologiya lesozagotovitel'nyh i derevopererabatyvayushchih proizvodstv [Situational analysis: methodical guidelines for practical works for students in the field of 35.03.02 – Technology of logging and wood processing industries]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Voronezh State University of Forestry and Technology named after G.F. Morozov, Voronezh, 2016, 111 p. (in Russian).
2. Programmnyj kompleks lesoustroitel'nogo proektirovaniya i lesnogo planirovaniya s ispol'zovaniem lesnyh kart. PLP2015 [Software for forest design and planning using forest maps. PLP2015]. URL: <https://lesproekt.org/?p=plp2015> (date accessed: 12.09.2024). (in Russian).
3. AVERS: Upravlenie lesnym fondom PROF [AVERS: Forest Fund Management PROF]. URL: <https://www.theforest.ru/> (date accessed: 12.09.2024). (in Russian).
4. Kovyazin V. F., Martynov A. N., Melnikov E. S., Anikin A. S., Minaev V. N., Belyaeva N. V. Osnovy lesnogo hozyajstva i taksaciya lesa [Basics of forestry and forest taxation]. Moscow: Izdatelstvo, 2023, 372 p. (in Russian).
5. Gannesen V. V., Solovyova E. E. Chelovecheskij faktor kak odna iz osnovnyh prichin avarijnosti [The human factor as one of the main causes of accidents]. Zhurnal "Meditsinskie issledovaniya i praktika" [Journal "Medical Research and Practice"]. (in Russian).
6. Barrow P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographic Information Systems. Journal of Geographical Information Science, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 112-129.
7. Metodicheskie rekomendacii po raschetu ekonomicheskoy effektivnosti lesopol'zovaniya [Methodological recommendations for calculating the economic efficiency of forest use]. Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2020. (in Russian).
8. Lesnoj kodeks Rossijskoj Federacii: s izmeneniyami na 2023 god [Forest Code of the Russian Federation: with amendments for 2023]. Moscow: Official Publication, 2017. (in Russian).
9. Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii RF № 315 ot 2011 goda "Ob utverzhdenii Pravila ispol'zovaniya lesov" [Order No. 315 of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation from 2011 "On the approval of the Rules for the use of forests"]. Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2011. (in Russian).
10. Entsiklopediya lesnogo hozyajstva [Encyclopedia of Forestry]. VNIILM, Moscow: VNIILM, 2006, 416 p. (in Russian).
11. Gulcheev V. A. Sekrety datasetov: prakticheskoe rukovodstvo po analizu i obrabotke dannyh [Secrets of datasets: a practical guide to data analysis and processing]. 2023. (in Russian).
12. Atroshchenko O. A., Gutyrchik A. V. Optimizaciya lesopol'zovaniya pri uchastkovom metode lesoustrojstva [Optimization of forest use in the sectional method of forest management]. 2001. (in Russian).

13. Biza M. V. Ocenka effektivnosti algoritmov obucheniya s podkrepleniem dlya sredy CartPole [Evaluation of reinforcement learning algorithms for the CartPole environment]. E. I. Sukach (Ed.). Aktual'nye voprosy fiziki i tekhniki: XII Respublikanskaya nauchnaya konferenciya studentov, magistrantov i aspirantov, posvyashchennaya 80-letiyu professora Maksimenko N. V. [Actual issues of physics and technology: XII Republican Scientific Conference of Students, Master's and Graduate Students dedicated to the 80th anniversary of Professor Maksimenko N. V.]. Gomel: Gomel State University named after F. Skorina, 2023, pp. 305-308. (in Russian).
14. Morales, Miguel. Grokajem glubokoe obuchenie s podkrepleniem [Grokking Deep Reinforcement Learning]. Moscow: Izdatelstvo "Umnyj dom", 2020, 256 p. (in Russian).

© Кузьмин Р. С., Туманян М. М., Лева Д. С.,
Семенов Р. А., Кемпи Е. А., Алексеев И. В.

Раздел 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.54

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИИ «ИДАВАНГ АГРО»

аспирант **Андреев Александр Васильевич**,
науч. руководитель: д.т.н., профессор **Душин Сергей Евгеньевич**,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе анализируется возможность применения биологической очистки сточных вод для рассматриваемого предприятия, а также исследуется возможность работы системы в широком диапазоне параметров загрязнений. В результате проведенных исследований удастся с помощью применения регулирования обеспечить достижение очистки в границах предельно-допустимых концентраций для определенных режимов работы.

Ключевые слова: биологическая очистка, активный ил, аммонийный азот, нитратный азот, модель ASM1, трехзонный биореактор.

CONTROL OF WASTEWATER BIOLOGICAL TREATMENT PROCESSES AT IDAVANG AGRO

Postgraduate Student **Andreev Aleksandr Vasilevich**
Academic Advisor: ScD in Technical Sciences, Associate Professor
Dushin Sergei Evgenevich,
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This work examines the possibility of using biological wastewater treatment for the enterprise under consideration, in addition with studying the possibility of system operation in a wide range of pollution parameters. As a result of the conducted research, it is possible to achieve treatment within the limits of maximum permissible concentrations for certain operating modes using regulation.

Keywords: biological treatment, activated sludge, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, model ASM1, three-zone bioreactor.

В животноводческом комплексе «ИДАВАНГ Агро» существует потребность очистки стоков, причем присутствующая на сегодняшний день система очистки является эффективной (параметры загрязнений после очистки соответствуют предельно-допустимым концентрациям, далее ПДК), но имеет

недостаток из-за выделения аммиака в атмосферу здания на этапе химической очистки. Подобное явление негативно сказывается на технике спустя определенные промежутки времени (выход из строя, износ и т. п.), таким образом персоналу, приходится периодически заниматься поиском решения проблемы и ее своевременным устранением, пока процесс очистки остановлен. Более подробно система очистки стоков комплекса описана в [1].

В виду описанной проблемы можно рассмотреть биологическую очистку (далее биоочистка) как альтернативное решение для обработки стоков после стадии предварительной фильтрации, не имеющее описанного выше недостатка. Следует отметить, что данный метод очистки ранее применялся на самом предприятии, но под другим собственником, однако данные тех времен утеряны.

Таким образом для устранения присутствующего недостатка путем предложения биоочистки как альтернативы возникает задача анализа управляемых процессов биоочистки с использованием моделирования для определения того, возможно ли применение данного метода на рассматриваемом предприятии. Изначально поставленной целью рассматриваемого анализа являлось достижение эффективности (в пределах ПДК) биоочистки сточных вод с использованием компьютерной модели ASM1, причем для осуществления данной цели производились задачи анализа математических моделей (в основном исследовались ограничения для осуществления биоочистки по моделям нитрификации и денитрификации) и построения и исследования компьютерных моделей биоочистки в условиях подачи на вход данных о стоках с предприятия.

В ходе исследования было выяснено, что биологическая очистка на предприятии возможна, но оставался открытым вопрос относительно того, сможет ли система обеспечивать эффективную очистку в случае изменения (повышения/понижения) входных параметров загрязнений и, если может, то в каком диапазоне изменения очистка будет оставаться удовлетворительной. Таким образом, исследование было продолжено с целью определения диапазонов, а также улучшения качества процессов биоочистки сточных вод в условиях, когда она становится неудовлетворительной. Для реализации данной цели решались задачи моделирования системы в условиях изменения концентраций стоков и применения ПИ-регулирования для проверки возможности управления в случаях, когда изменение концентрации загрязнений во входных стоках приводит к неудовлетворительному результату очистки, причем для определенного случая интегральная компонента настраивалась за счет контура адаптации на основе метода MRAC (Model Reference Adaptive Control).

Для исследования моделей с предприятия были получены следующие данные:

- $S_o^{BX} = 6 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация растворенного кислорода,
- $S_{nh}^{BX} = 30 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация аммонийного азота,
- $S_{no}^{BX} = 18.6 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация нитратного азота,
- $S_{ph}^{BX} = 6.5 \text{ экв/м}^3$ – входное значение щелочности,

- $S_s^{BX} = 100 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация растворенного биологически разложимого органического вещества (РОВ),
- $V = 2700 \text{ м}^3$ – объем реактора.

В качестве базовой модели биологической очистки принималась модель активного ила 1 (Activated Sludge Model No. 1 или ASM1), которая описана в [2]. Константы насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий были взяты из [3]. Также из [4] была заимствована информация о ПДК аммонийного и нитратного вида азотов при сбросе сточных вод в водные объекты культурно-бытового водопользования:

$$S_{nh}^{ПДК} = 2 \text{ г/м}^3, S_{no}^{ПДК} = 10 \text{ г/м}^3.$$

Сами исследования моделей проводились в порядке усложнения: модель нитрификации (4 нелинейных дифференциальных уравнения, далее НДУ), модель денитрификации (9 НДУ), модель ASM1 (11 НДУ), модель двухзонного реактора (22 НДУ), модель трехзонного реактора (33 НДУ) и модель трехзонного реактора с мембранным блоком (33 НДУ и 10 алгебраических уравнений). Для всех моделей в качестве начальных условий (далее НУ) принимался начальный старт системы, когда в реакторе присутствуют только организмы ила, а стоки отсутствуют (т. н. сухая загрузка). В результате исследования моделей был сделан выбор в пользу модели трехзонного реактора с мембранным блоком (заимствованы из [3]), а на рисунке 3 – результаты моделирования данного реактора с рассматриваемыми параметрами.

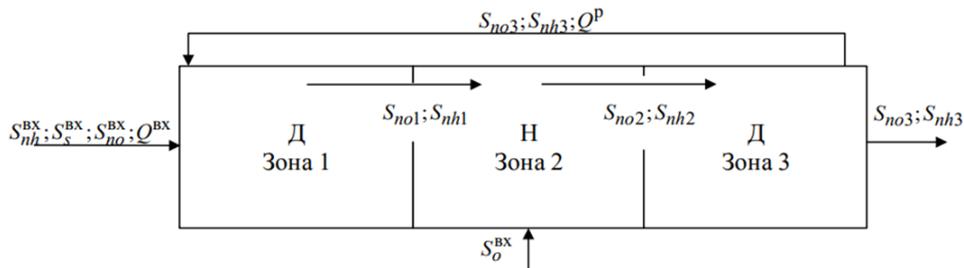


Рисунок 1 – Схема трехзонного реактора

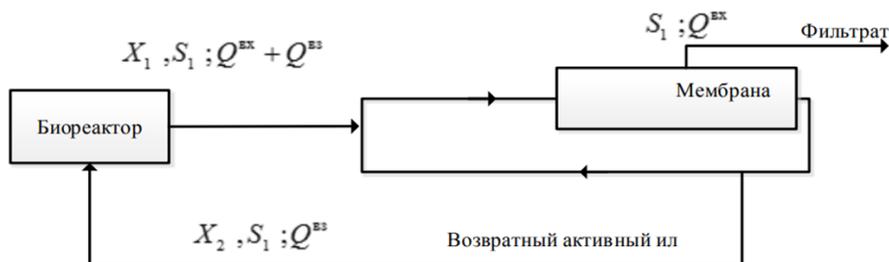


Рисунок 2 – Схема реактора с мембранным блоком

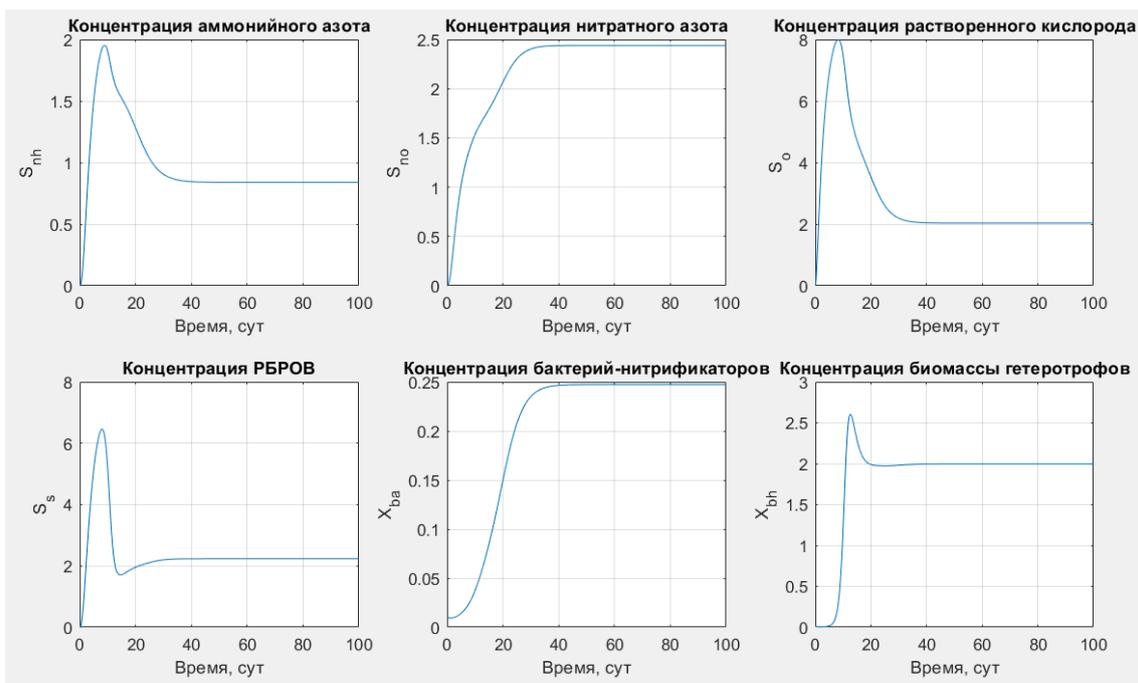


Рисунок 3 – Процессы на выходе рассматриваемого реактора

Как можно наблюдать на рисунке 1, выбранный трехзонный реактор относится к ДНД-типу (содержит в себе последовательно первую зону денитрификации, зону нитрификации и вторую зону денитрификации). Подобное деление на зоны и их комбинация вызвана необходимостью обеспечить взаимодействие процессов денитрификации и нитрификации, когда условия для протекания данных процессов противоположны (для процессов денитрификации необходимо минимизировать присутствие кислорода, для процессов нитрификации, наоборот, максимизировать). Вместе с тем, использование только одного процесса (нитрификации или денитрификации) недостаточно, что показало исследование соответствующих моделей (параметры очистки в данных случаях на выходе всегда превышали ПДК), как и недостаточно использование только одной (модель ASM1) или даже двух зон (ДН-реактор) – в первом случае из-за противоположности условий для протекания процессов попросту невозможно обеспечить удовлетворительный результат, во втором же удастся улучшить качество очистки относительно модели ASM1, но не в пределах ПДК из-за того, что подаваемый в зону нитрификации кислород все равно передается в зону денитрификации и тем самым ухудшает со временем протекание соответствующих процессов. В случае использования трехзонного реактора удастся за счет добавления второй зоны денитрификации уменьшить содержание кислорода в стоках перед их возвратом в первую зону, а при добавлении мембранного блока также удастся решить ситуацию, когда организмы ила претерпевают сброс вместе со стоками, т. е. за счет данного блока ил отфильтровывается от сбрасываемых стоков и остается в системе и возвращается обратно в первую зону реактора. Данные утверждения подтверждаются результатами моделирования, где параметры азота устанавливаются в границах ПДК (рисунок 3), а именно $S_{nh}^{ВЫХ} = 0.83 \text{ Г/М}^3$ и $S_{no}^{ВЫХ} = 2.45 \text{ Г/М}^3$.

После выбора модели, позволяющей достигать эффективной очистки, было произведено исследование на предмет поведения системы в условиях, когда та или иная концентрация на входе отклоняется от полученной с предприятия величины (сами значения с предприятия были получены в ходе взятия проб и их дальнейшего лабораторного анализа, т. е. на текущий момент данные загрязнений на входе могут отличаться). Притом для данного исследования также были скорректированы данные по ПДК относительно потенциальной погрешности измерительных приборов (например, фактически значение аммонийного азота на выходе может составлять $S_{nh}^{в\text{ых, факт}} = 1.99 \text{ г/м}^3$, но в виду погрешности устройства измерения система будет получать данные о значении $S_{nh}^{в\text{ых, устр}} = 2.05 \text{ г/м}^3$). В ходе рассмотрения устройств [5-7] выбор был сделан в сторону датчика “NiCaVis 705 NI” для нитратного азота и “AN-ISE sc с RFID” для аммонийного азота. Таким образом, скорректированные значения ПДК относительно выбранных приборов составляют:

$$S_{nh}^{\text{ПДК, кор}} = 1.71 \text{ г/м}^3, S_{no}^{\text{ПДК, кор}} = 9.7 \text{ г/м}^3.$$

Следует отметить, что изменяющимися из входных параметров полагались только концентрации аммонийного и нитратного азотов, РОВ, а также концентрация растворенного кислорода. Значение щелочности на входе положена неизменной в виду особенности модели ASM1 (щелочность стоков не оказывает влияние на иные параметры, кроме самой щелочности в реакторе, а с предприятия не удалось получить данных относительно допустимых значений щелочности среды, куда происходит сброс). Концентрация растворенного кислорода была исключена из рассмотрения, поскольку согласно структуре выбранного реактора (рисунки 1 и 2) является не только изменяющейся, но и управляемой: существует возможность ее изменять при подаче в зону нитрификации. Таким образом, производилось исследование влияния изменения концентраций аммонийного и нитратного азотов, а также РОВ, в стоках на входе реактора на выходные концентрации загрязнений путем моделирования. Причем на текущий момент было произведено исследование влияния только по одному параметру, без исследования одновременного изменения (например, одновременное повышение концентраций аммонийного азота и РОВ на входе). Результаты исследований сведены в таблицы 1, 2 и 3.

Таблица 1 – Влияние изменения аммонийного азота в стоках

Изменяющийся параметр		Изменение параметров на выходе			
		$S_{nh}^{в\text{ых}}$		$S_{no}^{в\text{ых}}$	
Исходное значение	Изменение	г/м^3	%	г/м^3	%
$S_{nh}^{в\text{х}} = 30 \text{ г/м}^3$	+67%	1.99	+136.9	2.84	+16.39
	+20%	1.09	+29.76	2.64	+8.2
	0%	0.84	0	2.44	0
	-50%	0.63	-25	1.55	-36.48
	-100%	0	-100	1.45	-40.57

Таблица 2 – Влияние изменения нитратного азота в стоках

Изменяющийся параметр		Изменение параметров на выходе			
		$S_{nh}^{в\text{ых}}$		$S_{no}^{в\text{ых}}$	
Исходное значение	Изменение	$\Gamma/\text{м}^3$	%	$\Gamma/\text{м}^3$	%
$S_{no}^{в\text{х}} = 18.6 \Gamma/\text{м}^3$	+497%	0.83	-1.19	10	+309.84
	+200%	0.84	0	5.46	+123.77
	0%	0.84	0	2.44	0
	-50%	0.84	0	1.7	-30.33
	-100%	0.85	+1.19	1.01	-58.61

Таблица 3 – Влияние изменения РОВ в стоках

Изменяющийся параметр		Изменение параметров на выходе			
		$S_{nh}^{в\text{ых}}$		$S_{no}^{в\text{ых}}$	
Исходное значение	Изменение	$\Gamma/\text{м}^3$	%	$\Gamma/\text{м}^3$	%
$S_s^{в\text{х}} = 100 \Gamma/\text{м}^3$	+607%	0.18	-78.57	0.01	-99.59
	+250%	0.91	+8.(3)	0.41	-83.2
	0%	0.84	0	2.44	0
	-25%	0.78	-7.14	2.76	+13.11
	-62%	0.72	-14.29	3.24	+32.79

Согласно данным таблицы 1, допускается изменение аммонийного азота до +67 % от исходного значения, при дальнейшем повышении выходной параметр аммонийного азота находится за скорректированной границей ПДК. Также является недопустимым и снижение аммонийного азота на входе до нуля (-100 %), пусть в данном случае параметры загрязнений на выходе остаются в пределах ПДК, но одновременно происходит отмирание организмов ила, т. е. в дальнейшем потребуется их дополнительная загрузка в систему, иначе при возвращении концентрации аммонийного азота в стоках на входе на прежнее значение очистка не будет удовлетворительной и аммонийный азот будет превышать скорректированную границу ПДК (что отображено на рисунке 4), однако данный режим (снижение концентрации загрязнения в поступающих стоках до нуля) обычно невозможен.

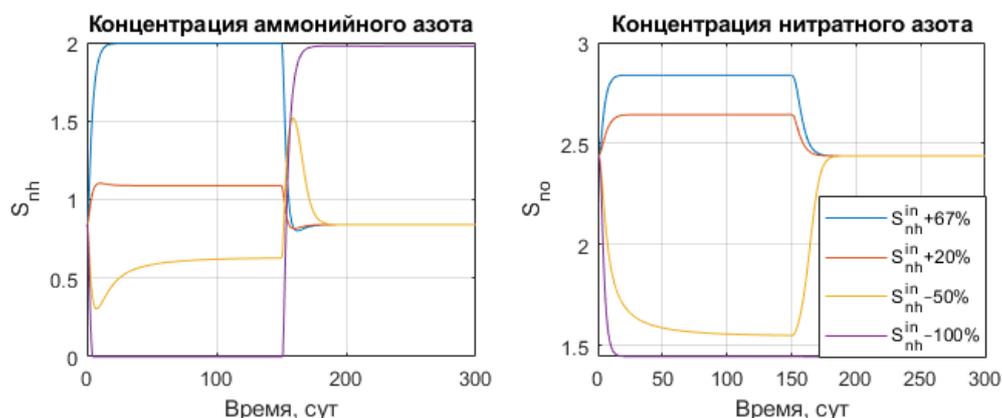


Рисунок 4 – Процессы на выходе реактора при снижении аммонийного азота

Согласно данным таблицы 2, допускается изменение нитратного азота до +497 % от исходного значения, при дальнейшем повышении выходной параметр нитратного азота находится за скорректированной границей ПДК. В отличие от изменения аммонийного азота, снижение нитратного до нуля не приводит к отмиранию организмов ила в системе. Также, согласно данным таблицы 3, допускается изменение РОВ до +607 % от исходного значения, пусть при повышении РОВ на входе происходит улучшение процессов очистки (оба вида азота на входе уменьшаются), но в данном случае также происходит и отмирание организмов ила, в результате чего происходит ситуация, аналогичная приведенной на рисунке 4. Следует отметить, что не удалось провести исследование изменения РОВ ниже –62 %, поскольку система не моделировалась при данных значениях вне зависимости от выбранных настроек и опций в MATLAB/Simulink.

Таким образом, в результате исследования влияния изменения параметров стоков на входе было выяснено, что существуют режимы, требующие регулирования в системе, а именно: повышение аммонийного азота на входе на 67 % и выше, повышение нитратного азота на входе на 497 % и выше, а также повышение РОВ на входе до 607 % и выше.

Следует отметить, что в ходе исследований самих моделей в ходе работы и исследований, приведенных в [3], было выяснено, что управлять процессами в системе можно путем изменения входной подачи стоков Q^{in} , рециркуляционного потока между зонами реактора Q^r , возвратного потока из мембраны в реактор Q^{ret} и концентрацией кислорода в зоне нитрификации S_o^{BX} . Также следует отметить, что при рассмотрении процессов требуется одновременно контролировать не один, а два параметра (аммонийный и нитратный азот). С целью получения понимания поведения процессов при регулировании было решено сначала использовать классическое ПИ-регулирование, причем оказывая в конкретный момент времени воздействие только на одну величину из четырех и используя только один из двух контролируемых параметров. На рисунке 5 слева приведена структурная схема регулирования для случая выбора управляющего воздействия S_o^{BX} и контролируемого параметра S_{nh}^{BYX} , справа – для случая выбора управляющего воздействия Q^r и контролируемого параметра S_{nh}^{BYX} .

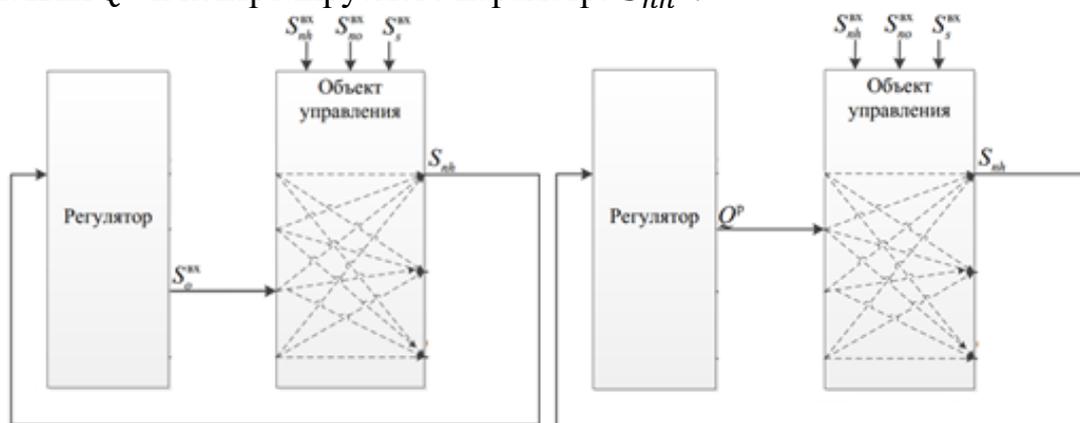


Рисунок 5 – Примеры структурных схем для случаев выбора управляющим воздействием S_o^{BX} или Q^r

Настройка регуляторов производилась вручную: сначала изменялась пропорциональная составляющая, пока контролируемый параметр не достигал 5-10 % отклонения от целевого значения, затем изменялась интегральная компонента. Если данный алгоритм не работал, то выбор производился в пользу применения, например, исключительно П- или И-компонент. В таблицы 4, 5 и 6 сведены результаты исследований регулирования.

Таблица 4 – Результаты регулирования в системе при повышении аммонийного азота в стоках на 67 %

Изменяющийся параметр	S_{nh}^{BX}					
Регулируемая величина	$S_{nh}^{ВЫХ}$			$S_{no}^{ВЫХ}$		
Используемый исполнительный механизм	Q^{in}	Q^r	S_o^{BX}	Q^{in}	Q^r	S_o^{BX}
Параметры регулятора	$P = 100, I = 11$	$P = -1455, I = -136$	$P = -20, I = -10$	$I = 3$	$P = -340$	$P = -2.48$

Таблица 5 – Результаты регулирования в системе при повышении нитратного азота в стоках на 497 %

Изменяющийся параметр	S_{no}^{BX}							
Регулируемая величина	$S_{nh}^{ВЫХ}$				$S_{no}^{ВЫХ}$			
Используемый исполнительный механизм	Q^{in}	Q^r	Q^{ret}	S_o^{BX}	Q^{in}	Q^r	Q^{ret}	S_o^{BX}
Параметры регулятора	$P = -50$	$I = -50$	$I = 50$	$P = -25$	$P = 20$	$P = 90$	$P = -290$	$P = 1$

Таблица 6 – Результаты регулирования в системе при повышении РОВ в стоках на 607 %

Изменяющийся параметр	S_s^{BX}							
Регулируемая величина	$S_{nh}^{ВЫХ}$				$S_{no}^{ВЫХ}$			
Используемый исполнительный механизм	Q^{in}	Q^r	Q^{ret}	S_o^{BX}	Q^{in}	Q^r	Q^{ret}	S_o^{BX}
Параметры регулятора	$P = -30$	$I = 820$	$P = 900$	$P = 4.88$	$P = -11$	$P = 300$	$P = 350$	$P = 1.75$

Согласно данным таблицы 4, вне зависимости от выбора регулируемой величины не удается оказать воздействие на исполнительный механизм возвратной подачи стоков из мембраны в реактор (Q^{ret}), система попросту не моделируется. Вместе с тем, при выборе в качестве регулируемой величины аммонийного азота на выходе системы для всех оставшихся трех случаев удается

проводить удовлетворительное регулирование (т. е. несмотря на повышение аммонийного азота на входе на 67 % аммонийный и нитратный азот на выходе в течение всего времени не превышают ПДК), зеленым выделен случай с наименьшим временем установления. Однако, при выборе в качестве регулируемой величины нитратного азота на выходе, вне зависимости от выбора исполнительного механизма не удается оказать удовлетворительного воздействия: пусть контролируемые параметры и устанавливаются ниже ПДК, однако во время переходного процесса происходит его превышение. Согласно данным таблицы 5, вне зависимости от выбора регулируемой величины удается достичь удовлетворительного результата только оказанием воздействия на механизм входной подачи стоков (Q^{in}), использование иных исполнительных механизмов приводит к неудовлетворительному результату, поскольку в случае выбора аммонийного азота на выходе системы нитратный азот всегда будет выше ПДК, а в случае выбора нитратного азота в системе будет наблюдаться отмирание биоорганизмов. Согласно данным таблицы 6, вне зависимости от выбора регулируемой величины и исполнительного механизма не удается достичь удовлетворительного результата, во всех случаях пусть и наблюдается улучшение процесса очистки (аммонийный и нитратный азоты на выходе снижаются), однако вместе с тем в системе отмирают биоорганизмы. Таким образом, ситуация аналогична отсутствию регулирования, причем само влияние повышения РОВ в стоках действительно компенсируется, что отображено на рисунке 6 для случая регулирования по аммонийному азоту.

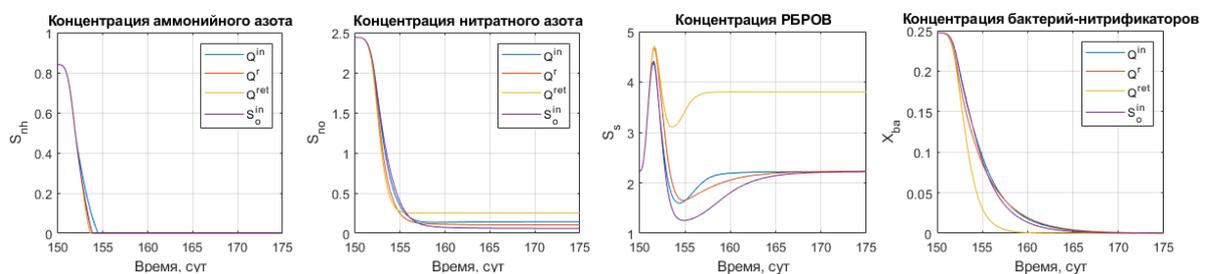


Рисунок 6 – Переходные процессы в системе при изменении в стоках РОВ и регулировании по $S_{nh}^{вых}$

Таким образом, можно наблюдать, что использование подобного метода позволяет оказывать регулирование лишь в частных случаях. Вместе с тем, возвращаясь к данным таблицы 4, где регулирование по нитратному азоту оказалось неудовлетворительным лишь за счет переходного процесса (установившиеся значения ниже ПДК), имеет смысл рассмотреть введение в систему контура адаптации для изменения интегрального параметра и тем самым возможного улучшения переходного процесса. Следует отметить, что существуют разные адаптивные системы, и в виду необходимости проводить адаптивную настройку одного параметра регулятора была выбрана самонастраивающаяся беспоисковая система с эталонной моделью (в англоязычной литературе называется MRAC). Для реализации контура

адаптации было использовано правило МПТ (в т. ч. с алгоритмом нормализации), которое описано в [8]. На рисунке 7 приведена схема системы адаптивного управления.



Рисунок 7 – Схема системы адаптивного управления

Следует отметить, что принимаемая эталонная модель (далее ЭМ) является линейной, данный выбор обоснован тем, что при моделировании системы зачастую переходные процессы аммонийного и нитратного азотов на выходе по своей форме (в особенности для исследуемого случая) напоминали процессы в линейных системах. Для учета того, что переходные процессы контролируемых параметров могут иметь в себе затухающие колебания, ЭМ будет иметь второй порядок. На рисунках 8, 9 и 10 приведены переходные процессы в системе как с применением настроек П- и И-регулятора из таблицы 4, так и с применением механизма адаптации с различным выбором параметров правила МПТ в зависимости от выбора исполнительного механизма.

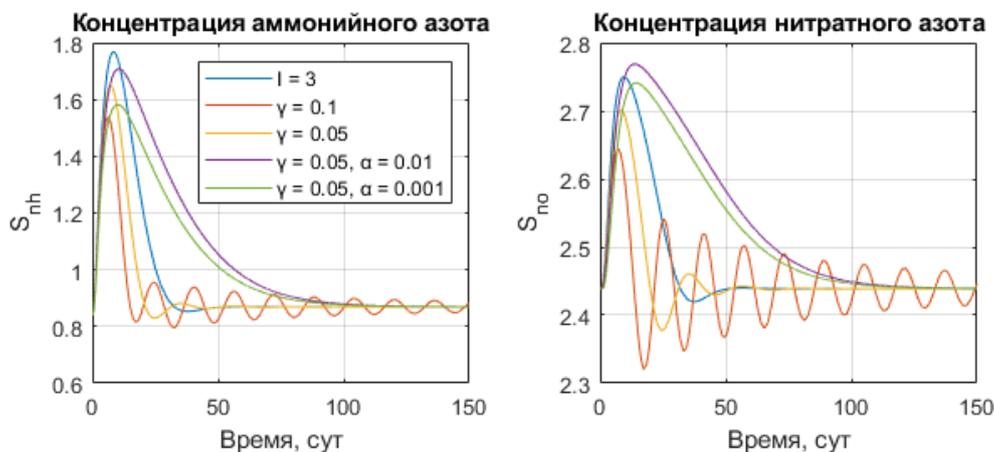


Рисунок 8 – Переходные процессы в системе при оказании воздействия на Q^{in}

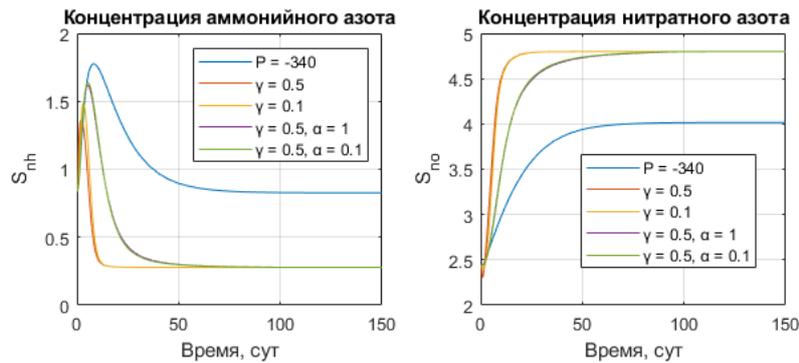


Рисунок 9 – Переходные процессы в системе при воздействии на Q^r

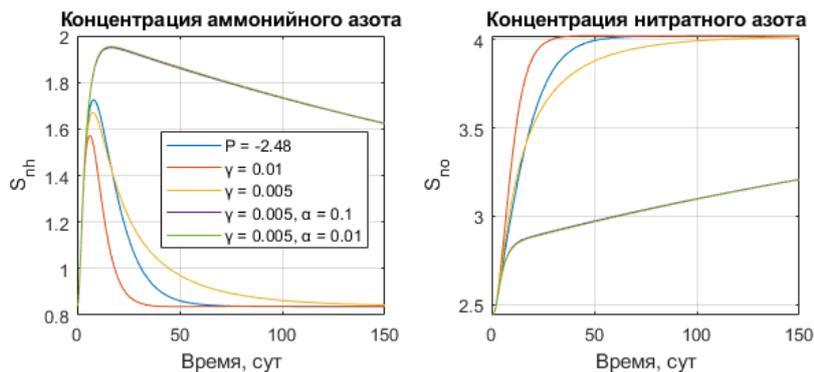


Рисунок 10 – Переходные процессы в системе при оказании воздействия на S_o^{BX}

Как можно наблюдать на рисунке 8, при оказании воздействия на механизм входной подачи стоков (Q^{in}) за счет применения нормализованного правила МПТ с параметрами $\gamma = 0.05$, $\alpha = 0.001$ (параметр γ отвечает за скорость изменения параметра регулятора в зависимости от величины ошибки между выбранной ЭМ и объектом управления, а параметр α – поправочный коэффициент, который присутствует только в случае выбора правила МПТ с нормализацией) удастся снизить перерегулирование настолько, чтобы аммонийный азот не превышал скорректированный ПДК в переходном процессе, то есть очистку в данном случае можно считать эффективной. Вместе с тем, рисунки 9 и 10 демонстрируют, что если при ручной настройке для исполнительных механизмов рециркуляционной подачи между зонами Q^r и подачи кислорода в зону нитрификации S_o^{BX} удавалось подобрать только пропорциональный коэффициент, то за счет введения контура адаптации удастся произвести настройку интегрального коэффициента (пропорциональный остается нулевым) и тем самым уменьшить ошибку между фактическим и заданным параметром S_{nh}^{BX} (рисунок 9) или повысить само быстродействие переходного процесса с уменьшением перерегулирования (рисунок 10). Причем для данных двух случаев достаточно просто применение правила МПТ без нормализации.

Таким образом, для части случаев удалось обеспечить допустимые концентрации на выходе системы в широком диапазоне загрязнений на входе. Потому в дальнейшем планируется продолжить исследования, останавливаясь

на одновременном влиянии изменения параметров стоков (например, одновременно в стоках повышается концентрация аммонийного и нитратного вида азота), а также рассмотреть многомерное регулирование для модели ASM1, поскольку рассмотренное одномерное регулирование не позволяет производить компенсацию при изменении РОВ.

Список литературы:

1. Андреев, А. В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А. А. Вавилова [Электрон. журн.]. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. – С. 8-11. – Режим доступа к журн. – https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf (дата обращения: 21.09.2024)
2. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. London: IAWPRC, 1987
3. Грудяева Е. К., Душин С. Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод / Е. К. Грудяева, С. Е. Душин. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 231 с.
4. ГОСТ 16887-71. Разделение жидких неоднородных систем методами фильтрования и центрифугирования. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
5. Сайт компании «Экоинструмент» // Экоинструмент. [Электронный ресурс] URL: https://www.ecoinstrument.ru/prom/izmeritelnye_sistemy_iqsn/datchiki_sistemy_iq_sensor_net/nicavis_701-705_iq_-ni-_datchik_nitratov-_nitritov-_khpk-_bpk_i_oou/#bx_117848907_7016_props (дата обращения: 21.09.2024).
6. Сайт компании Endress+Hauser // Endress. [Электронный ресурс] URL: https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDBAFA9F1B60D0F48F8/TI00491CRU_0420.pdf (дата обращения: 21.09.2024)
7. Сайт компании «Биолайт» // биолайт. [Электронный ресурс] URL: <https://biolight.info/product/0011978> (дата обращения: 21.09.2024).
8. Сайт издательства RIP // Research India Publications. [Электронный ресурс] URL: https://www.ripublication.com/aeee/62_pp%20%20%20477-484.pdf (дата обращения: 21.09.2024).

References:

1. Andreev A.V. Wastewater treatment system at IDAVANG Agro // Youth school-seminar on control problems in technical systems named after A.A. Vavilov [Electronic journal]. - SPb.: SPbGETU "LETI". 2021. - С. 8-11. - Mode of access to the journal - https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf (date of access: 21.09.2024).
2. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. London: IAWPRC, 1987

3. Grudyaeva E.K., Dushin S.E. Modeling of controlled processes of biological wastewater treatment. - SPb: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2017. - 231 c.
4. GOST 16887-71. Separation of liquid heterogeneous systems by filtration and centrifugation methods. Terms and definitions. - M.: Izd-vo standards, 1986.
5. Ecoinstrument Company Website // Ecoinstrument. [Electronic resource] URL: https://www.ecoinstrument.ru/prom/izmeritelnye_sistemy_iqsn/datchiki_sistemy_iq_sensor_net/nicavis_701-705_iq_-ni-_datchik_nitratov-_nitritov-_khp-_bpbk_i_ou/#bx_117848907_7016_props (date of reference: 21.09.2024).
6. Website of the company Endress+Hauser // Endress. [Electronic resource] URL: https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDBAFA9F1B60D0F48F8/TI00491CRU_0420.pdf (date of address: 21.09.2024)
7. Website of the company "biolight" // biolight. [Electronic resource] URL: <https://biolight.info/product/0011978> (date of reference: 21.09.2024)
8. Website of RIP Publishing // Research India Publications. [Electronic resource] URL: https://www.ripublication.com/aeee/62_pp%20%20%20477-484.pdf (date of address: 21.09.2024)

© Андреев А. В., 2024

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕСОМ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ

аспирант **Анисимова Мария Дмитриевна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Суриков Валерий Николаевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается проблема влияния случайных возмущений на качество выпускаемой продукции. Представлен способ экономии расхода бумажной массы при сохранении качества выпускаемой продукции. Произведена верификация метода в среде Matlab.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, качество управления, точность системы управления, вес бумажного полотна, масса бумажного полотна, флуктуации, колебания.

ON IMPROVING THE ACCURACY OF PAPER WEB WEIGHT CONTROL SYSTEM UNDER DISTURBANCES

Postgraduate Student **Anisimova Maria Dmitrievna**,
Academic Advisor: Ph.D. of Engineering Sciences,
Associate Professor
Surikov Valeriy Nikolayevich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper considers the problem of influence of stochastic disturbances on the quality of output products. The method of saving the consumption of paper stock while maintaining the quality of output products is presented. The method is verified in Matlab environment.

Keywords: paper machine, control quality, control system accuracy, paper web weight, paper web mass, fluctuations, oscillations.

Длительные периодические колебания, обусловленные пульсациями давлений в массоподводящих системах и изменением во времени технологических факторов [1, с. 9], а также высокочастотные колебания, обусловленные вибрацией узлов бумагоделательной машины и динамикой напуска бумажной массы на сетку, приводят к флуктуациям веса бумажного полотна.

Существующие системы управления весом бумажного полотна на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности обеспечивают выпуск

бумажной продукции требуемого качества. Пример работы системы управления представлен на рисунке 1.

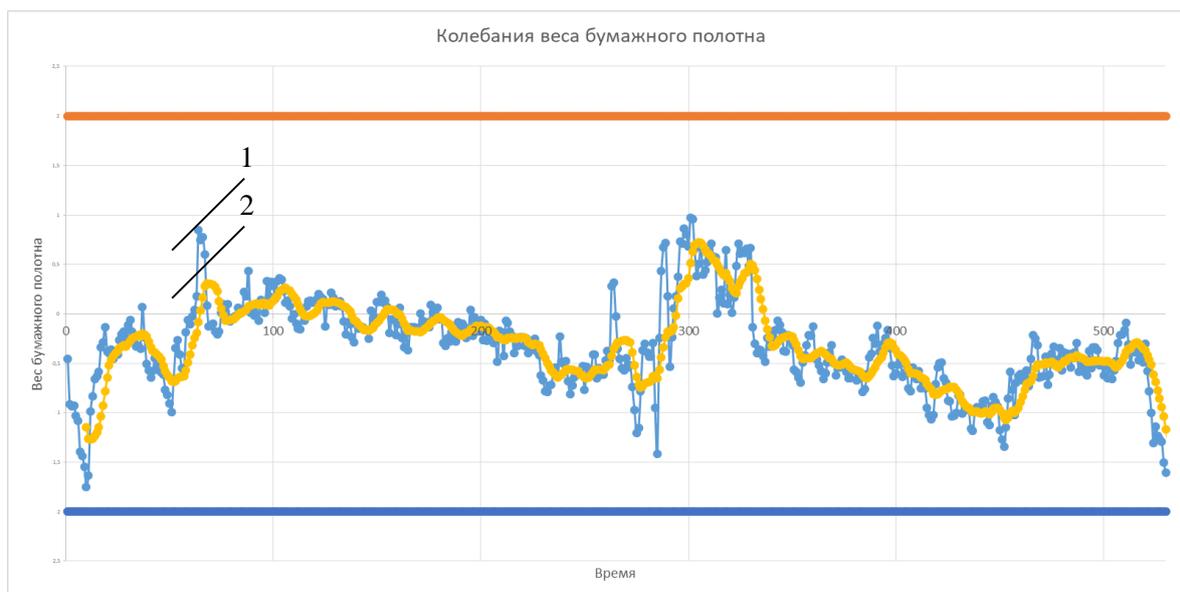


Рисунок 1 – Пример колебаний веса бумажного полотна

Согласно рисунку 1, колебания веса бумажной массы с течением времени изменяют свои характеристики, а именно дисперсию 1 и текущее среднее значение 2, что говорит о нестационарности процесса. Величина текущего среднего значения 2 также имеет значительную амплитуду колебаний. Величина задания смещена к нижней границе регламента. Задания в таких системах задаются операторами вручную или корректируются автоматически.

Для оценки эффективности работы существующей системы управления необходимо дополнительно провести спектральный анализ данных флуктуаций веса бумажного полотна и основных возмущений.

Для выявления основного возмущающего воздействия проводят корреляционный анализ возмущения с выходным параметром. Взаимно корреляционная функция влажности бумажного полотна с весом бумажного полотна, представлена на рисунке 2.

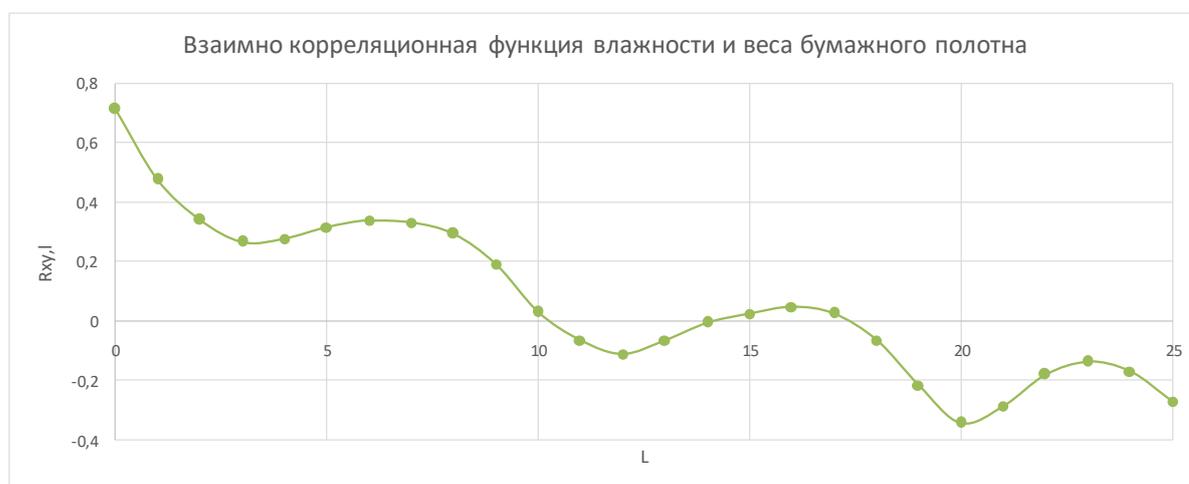


Рисунок 2 – Взаимно корреляционная функция влажности и веса бумажного полотна

Из рисунка 2 видно, что колебаниям влажности и веса бумажного полотна соответствует высокий коэффициент корреляции 0,71. Таким образом, в качестве основного возмущающего воздействия принимаем показатель влажности бумажного полотна.

В статье проведена оценка эффективности работы системы управления на бумагоделательной машине (БДМ) с помощью спектрального анализа, результаты которого приведены на рисунке 3.

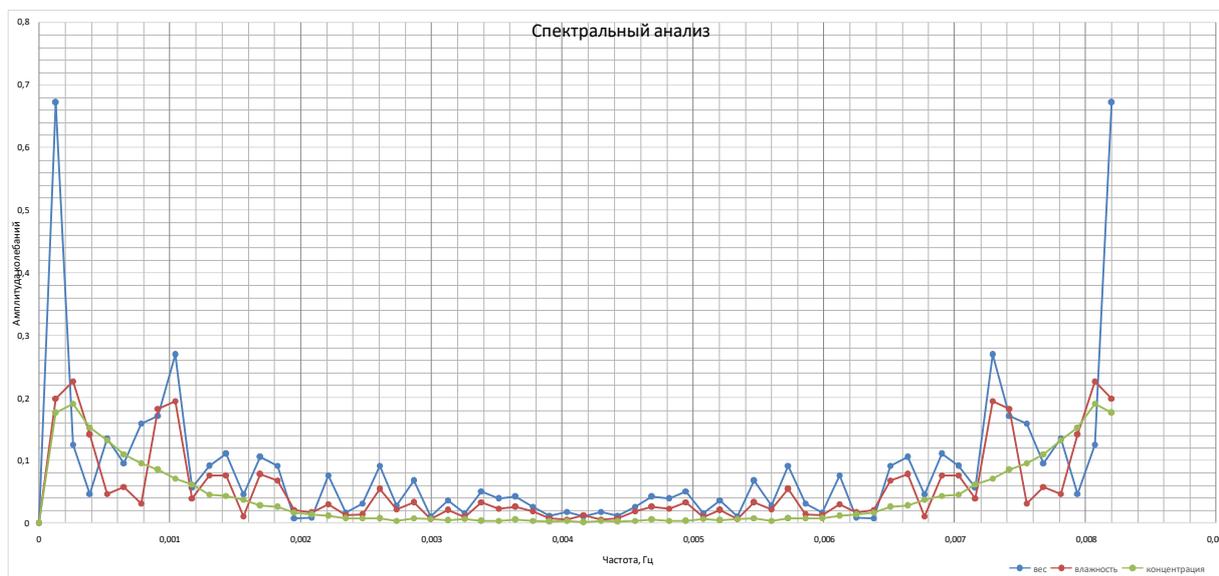


Рисунок 3 – Спектральный анализ флуктуаций веса бумажного полотна и возмущений

Согласно рисунку 3, рассматриваемая система управления не подавляет низкочастотные колебания в пределах от 0 до 0,003 Гц. При условии подавления низкочастотных возмущений существующим контуром управления возможно повысить точность системы введением дополнительного внешнего контура. В таком случае величина дисперсии уменьшится, что позволит сместить задание веса бумажного полотна к нижней границе, установленной регламентом. В результате чего расходы бумажной массы снизятся при выпуске продукции требуемого качества.

Анализ приведенных публикаций показывает различные подходы к повышению точности систем управления весом бумажного полотна.

Большинство подходов основаны на прямых измерениях возмущений с последующей их компенсацией. При таком подходе требуется компенсация различных возмущений, что усложняет проведение синтеза такой системы управления и сложность ее эксплуатацию на производстве.

Например, в цикле работ Ревунова М. С. для решения задачи снижения дисперсии веса бумажного полотна рассматривается вариант создания измерительного канала скорости бумажной массы на основе кросскорреляционного оптического вычислителя и введении дополнительного контура регулирования соотношения скоростей напуска бумажной массы и сетки БДМ. Такое решение повысит быстродействие системы. Внедрение и

апробация результатов исследования были произведены на реальном производстве ООО «Маяк-Техноцелл» и ОАО «Маяк» [2].

Существуют подходы с применением математической модели объекта управления. Применение таких методов значительно повысит затраты на создание и настройку новой системы управления, а получаемая математическая модель в любом случае имеет погрешность и требует периодического обновления.

Математические модели объекта могут использоваться как эталонные модели. В таком случае отличие реального выходного сигнала объекта управления от эталонной модели объекта является ошибкой управления в контуре адаптации. Обратная связь воздействует на регулятор, изменяя его параметры, или формирует сигнал коррекции, который подается на вход объекта. Реализация подобных систем требует предварительной идентификации объекта для определения его ожидаемой математической модели.

Пример системы управления с эталонной моделью представлен на рисунке 4.

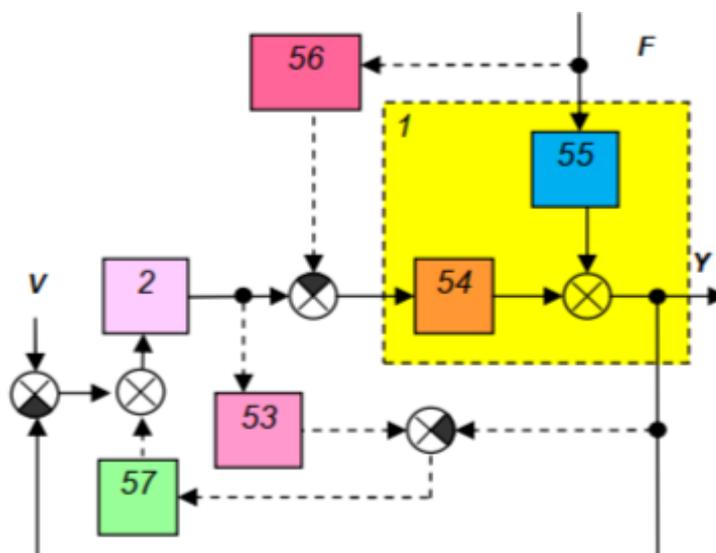


Рисунок 4 – Адаптивная система с эталонной моделью

Принцип действия системы, представленной на рисунке 4, основан на вводе добавочного управляющего воздействия контуром адаптации и компенсации возмущения 56, что позволяет по входу подавлять отклонения выходного сигнала от его требуемого значения. Тогда производится сравнение выходных сигналов эталонной модели 53 и реального объекта 1, полученный сигнал рассогласования подается через корректирующее устройство 57 в контур на регулятор 2 и передаточную функцию объекта по управлению 54. Подобная система может применяться только в том случае, когда известны действующие на объект возмущения и передаточные функции объекта по возмущению 55.

В системах с идентификатором модели объекта на протяжении работы системы основной контур за счет главной обратной связи обеспечивает равенство выходной величины ее предписанному значению, пока

дополнительный контур обеспечивает устойчивость и наилучшую настройку внутреннего контура за счет уточнения параметров модели объекта [3].

В системах с блоком прогноза выхода объекта нежелательное влияние блока запаздывания в составе модели объекта компенсируется введением блока, осуществляющего прогноз выходного сигнала объекта (MPC). Такие системы хорошо подходят для управления медленно текущими процессами. Существует множество их стратегий (DMC, PFC, PCT, SMCA, OPC, APC, GPC), которые отличаются в использовании моделей, описывающих ОУ [4, с. 27].

В работах Лысовой Н. В. приведены обоснования применения алгоритма обработки информации на основе экстремальной фильтрации. Этот подход можно использовать для обнаружения изменения в быстропеременных процессах, что создает возможность для эффективного принятия решений об изменении задания системы управления. Приведенный метод может также использоваться в задачах выделения тренда управляемой величины с отсеиванием шумов или оценивания спектрального состава тренда, например, для экспресс-диагностики системы бумагоделательной машины. Рассматривались алгоритмы управления с использованием методов оптимального, дробного и цифрового регулирования [5].

В работе Никулина С. В. на основе подсистем регулирования веса бумажного полотна с использованием предиктора Смита была предложена комбинированная экстремальная система управления режимом работы БДМ, система управления положением верхней планки напорного ящика с использованием нейросети и экстремальная система определения минимума среднеквадратичного отклонения веса с помехозащищенным алгоритмом. Работа алгоритма проверялась на реальном объекте при выпуске марки «КПС-2». В результате оптимального выбора напора удалось снизить среднеквадратичное отклонение веса бумажного полотна на 4 % в среднем [6].

При реализации предлагаемого решения потребуется адекватная модель технологического процесса производства бумаги как объекта управления. Решение такой задачи является сложной задачей.

На производстве, как правило, используются типовые структуры систем управления и ПИД-регуляторы. При изменении параметров объекта в широких диапазонах и тогда, когда требуется наличие регулятора с заранее рассчитанными параметрами, применяются методы теории робастности, но обычно в статьях отсутствует верификация алгоритмов настройки на производстве.

Настоящая статья посвящена решению задачи повышения точности системы управления весом бумажного полотна с целью экономии бумажной массы с поддержанием требуемого качества бумаги. Предлагаемая система управления представлена на рисунке 5.

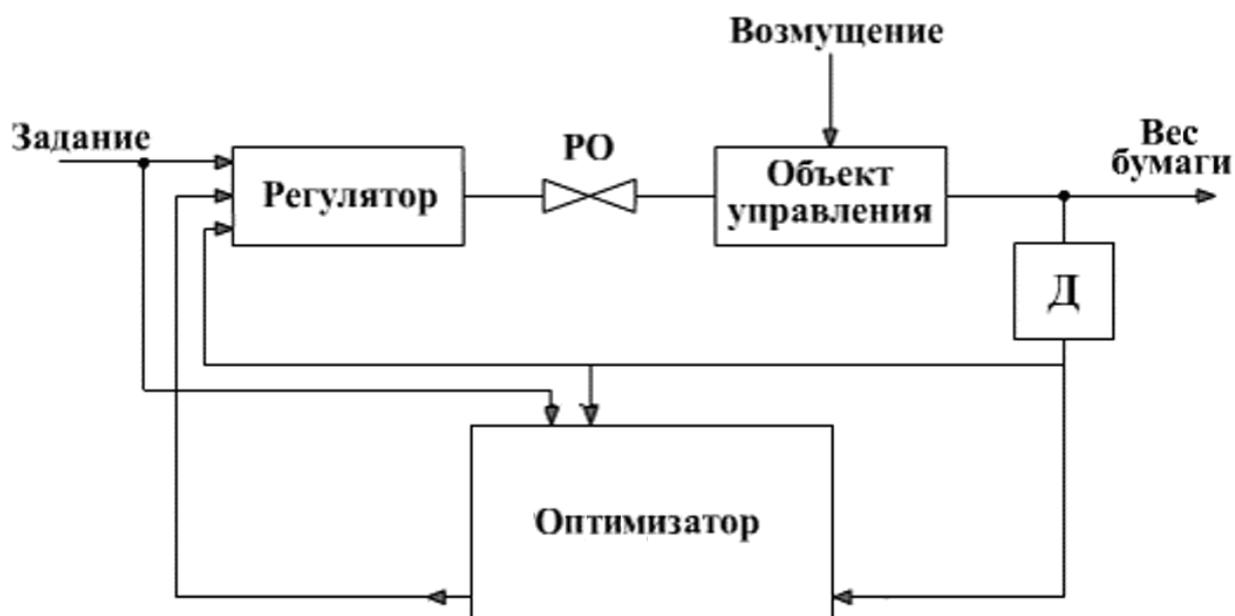


Рисунок 5 – Предлагаемая система управления с оптимизатором качества управления

Согласно рисунку 5, система управления является двухконтурной. Внутренним контуром является уже существующая система управления на БДМ. Внешним контуром является система управления с оптимизатором, которая обеспечивает повышенную точность управления весом бумажного полотна. Такая структура позволяет внести наименьшие изменения в существующую систему управления, повысив ее точность.

В предлагаемой системе управления для оценки качества управления используется текущая дисперсия отклонения веса бумажного полотна от заданного значения.

В условиях производства при воздействии на объект управления множества неконтролируемых возмущающих воздействий снижается вероятность получения точной модели объекта, а активные методы идентификации приводят к нарушению нормального хода технологического процесса, пока пассивные методы идентификации не обладают достаточной точностью. В предлагаемой системе настройка оптимизатора производится поисковыми методами, не требующими адекватной математической модели объекта управления.

Как было показано выше, процесс формирования веса бумажного полотна является нестационарным. Тогда в один промежуток времени на объект управления будут действовать один набор возмущающих воздействий, приводящих к отклонениям показателя дисперсии веса бумажного полотна на определенную величину. Дисперсия на выходе системы управления зависит от настраиваемого коэффициента усиления оптимизатора качества управления, тогда портрет зависимости будет иметь вид согласно ξ_1 .

Принцип действия предлагаемой системы управления заключается в поиске экстремального значения коэффициента усиления оптимизатора K_{opt} для различных реализаций случайного процесса формирования веса бумажного

полотна ξ , согласно рисунку 6. Тогда для зависимости ξ_1 значение коэффициента, обеспечивающего минимум дисперсии, будет равно K_{yopt1} . При изменении характеристик и набора возмущающих воздействий в другой промежуток времени величина дисперсии отклонения веса бумажного полотна изменится, изменится и портрет зависимости дисперсии от коэффициента усиления оптимизатора, а экстремальное значение сместится, и новая зависимость будет иметь вид ξ_2 . Тогда для зависимости ξ_2 снова производится поиск значение коэффициента, обеспечивающего минимум дисперсии, который будет равен K_{yopt2} .

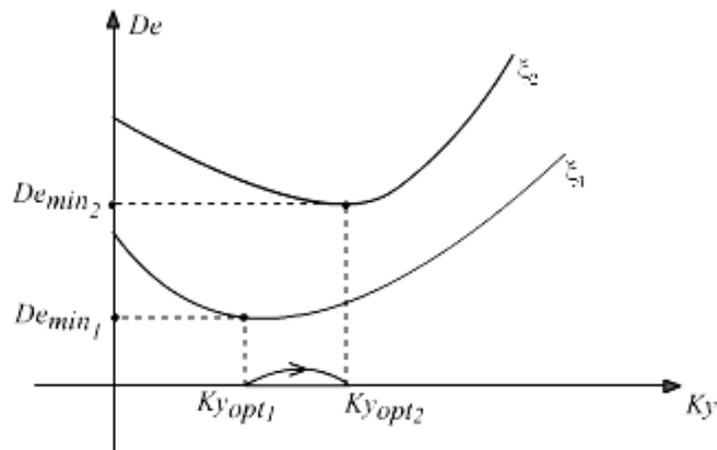


Рисунок 6 – Экстремальная зависимость дисперсии от коэффициента усиления для различных промежутков времени ξ_1 и ξ_2

При изменении свойств объекта управления, а как следствия параметров его математической модели, экстремальный вид характеристики дисперсии от K_{yopt} сохраняется, согласно рисунку 7.

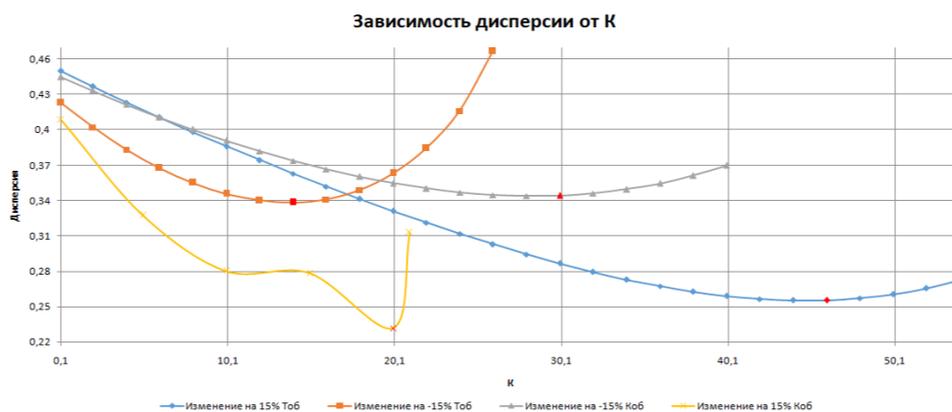


Рисунок 7 – Зависимость дисперсии веса бумажного полотна при изменении коэффициента передаточной функции объекта управления на 15 %

На рисунке 7 отмечены минимумы соответствующих экстремальных зависимостей.

Таким образом, экстремальное значение зависимости дисперсии от коэффициента усиления внешнего контура смещается при изменении дисперсии, зависящей от характеристик возмущающего воздействия и свойств объекта управления. Тогда каждый раз при выходе показателя качества за установленные пределы отклонения от экстремального значения ($\pm 5\%$) должна производиться корректировка параметров внешнего контура до тех пор, пока показатель качества не достигнет экстремального значения. Полученная система управления является инвариантной, так как результатом совокупности воздействия измеряемых и неизменяемых возмущений является отклонение показателей влажности и веса бумажного полотна, которые являются управляемыми и возмущающими параметрами в предлагаемой системе.

Верификация системы управления проводилась в среде MatLab. Моделирование предлагаемой системы производилось при подаче возмущений в виде значений вариаций влажности бумажного полотна, полученных с производства. В результате которого изначальная дисперсия веса бумажного полотна при вводе дополнительного внешнего контура и постоянных характеристиках объекта управления снизилась на 27% . При изменении коэффициентов передаточной функции объекта управления на $\pm 15\%$ дисперсия снижалась на величину от 20% до 43% .

Список литературы:

1. Куров, В. С. Гидродинамика процессов массоподачи на бумагоделательную машину / В. С. Куров, Ю. А. Тихонов; Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 264 с.
2. Ревунов, М. С. Повышение эффективности автоматизированной системы управления технологическим процессом регулирования массы бумажного полотна / М. С. Ревунов, Д. С. Ревунов, А. Д. Семенов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 1(43). – С. 17–23. – DOI 10.21685/2307-5538-2023-1-2. – EDN IZVTVM.
3. Жмудь, В. А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром / В. А. Жмудь // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 2(8). – С. 106–122. – EDN VIUOQF.
4. Александров, А. Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов / А. Г. Александров, М. В. Паленов // Автоматика и телемеханика. – 2014, – № 2. – С. 16–30. – EDN RXKJAF.
5. Лысова, Н. В. Повышение быстродействия алгоритмов обработки информации и управления автоматизированной системы формирования бумажного полотна: диссертация ... кандидата технических наук: 2.3.1. / Лысова Наталья Владимировна; [Место защиты: Пензенский государственный университет; Диссовет 24.2.357.03 (Д 212.186.04)]. – Пенза, 2022. – 149 с.
6. Никулин, С. В. Совершенствование функциональных подсистем АСУТП бумажного производства на основе экстремального, нейросетевого и предиктивного управления: диссертация ... кандидата технических наук:

05.13.06 / Никулин Сергей Васильевич; [Место защиты: Пенз. гос. ун-т]. – Пенза, 2016. – 160 с.

References:

1. Kurov, V.S. Hydrodynamics of mass feeding processes on the Paper-making machine / V.S. Kurov, Yu. Vegetable polymers. - SPb.: Izd-vo Polytechnicheskiye un-ta, 2010. - 264 с.
2. Revunov, M. S. Increasing the efficiency of the automated control system for the technological process of the paper web mass regulation / M. S. Revunov, D. S. Revunov, A. D. Semenov // Measurement. Monitoring. Control. Control. - 2023. - № 1(43). - С. 17-23. - DOI 10.21685/2307-5538-2023-1-2. - EDN IZVTVM.
3. Zhmud, V. A. Adaptive automatic control systems with a single main loop / V. A. Zhmud // Automation and software engineering. - 2014. - № 2(8). - С. 106-122. - EDN VIUOQF.
4. Aleksandrov, A. G. State and prospects of the adaptive PID controllers development / A. G. Aleksandrov, M. V. Palenov // Automation and Telemechanics. - 2014, - № 2. - С. 16-30. - EDN RXKJAF.
5. Lysova, Natalya Vladimirovna. Increasing the speed of information processing and control algorithms of the automated system of paper web forming: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 2.3.1. / Lysova Natalia Vladimirovna; [Place of defense: Penza State University; Dissovet 24.2.357.03 (D 212.186.04)]. - Penza, 2022. - 149 с.
6. Nikulin S.V. Perfection of functional subsystems of the paper production automated control system on the basis of the extreme, neural network and predictive control: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.13.06 / Nikulin Sergey Vasilievich; [Place of defense: Penz. gos. un. university]. - Penza, 2016. - 160 с.

© Анисимова М. Д., 2024

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ МАШИНИСТОВ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

канд. техн. наук, доцент **Благодарный Николай Семенович**,
аспирант **Борко Виолетта Викторовна**,
магистрант **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,
канд. техн. наук, доцент **Кривов Максим Викторович**,
канд. техн. наук, доцент **Колмогоров Алексей Геннадьевич**,
ст. преподаватель **Кобозев Владимир Юрьевич**,
Ангарский государственный технический университет,
г. Ангарск, Российская Федерация

Аннотация. В статье описан функционал компьютерного тренажера трех паровых котлов БКЗ-160-100Ф, разработанного при сетевом взаимодействии Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна и Ангарского государственного технического университета. Тренажер внедрен и успешно эксплуатируется на ТЭЦ-1 АО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, паровой котел, электростанция, БКЗ-160-100Ф, автоматизированная обучающая система, оценка действий операторов, протокол тренинга.

COMPUTER SIMULATOR FOR STEAM BOILER OPERATORS

PhD of Engineering Sciences, Docent **Blagodarnyy Nikolay Semenovich**,
Postgraduate Student **Borko Violetta Viktorovna**,
Master Student **Ivanov Oleg Olegovich**
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russian Federation.
PhD of Engineering Sciences, Docent **Krivov Maksim Viktorovich**,
PhD of Engineering Sciences, Docent **Kolmogorov Aleksey Gennadievich**,
Senior Lecturer **Kobozev Vladimir Yuriyevich**
Angarsk State Technical University, Angarsk, Russian Federation

Abstract. The article describes the functionality of the computer simulator of three steam boilers BKZ-160-100F, developed in the network interaction of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design and the Angarsk State Technical University. The simulator has been implemented and successfully operated at TPP-1 of ILIM Group JSC in Koryazhma.

Keywords: computer simulator, steam boiler, power plant, BKZ-160-100F, automated training system, operator performance assessment, training protocol.

Энергетика играет ключевую роль в экономическом развитии России. Она обеспечивает функционирование всех отраслей промышленности, способствует росту производства и созданию новых рабочих мест. Без энергетики невозможно представить себе современную жизнь, так как она является основой для комфорта и благополучия населения. Развитие этой отрасли способствует укреплению экономической стабильности и повышению качества жизни граждан.

В области производства электроэнергии чрезвычайно ответственной является задача обеспечения бесперебойности и безопасности работы электростанций. За успешное выполнение этой задачи отвечает оперативный персонал, в обязанности которого входит соблюдение технологических режимов работы электростанции, подготовка оборудования к пуску и обеспечение его надёжной и экономичной работы в соответствии с заданным режимом, быстрое реагирование на аварийные ситуации и проведение необходимых мероприятий по их ликвидации, соблюдение правил эксплуатации оборудования, изучение новых технологий и методов работы, участие в тренингах и семинарах и другие обязанности.

Несмотря на то, что руководство электростанций регулярно проводит тренировочные мероприятия, направленные на обучение персонала безопасной эксплуатации энергоустановок, аварийность из-за ошибок персонала остается весьма высокой. Так, по данным начальника Департамента технического контроля АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС») [1], доля аварий, связанных с некорректными действиями персонала при работе с генерирующим и тепломеханическим оборудованием электростанций, находится на уровне 9 %, при 21% невыявленных причин аварий.

Для повышения обученности персонала электростанций АО «СО ЕЭС» разработало стандарт «Профессиональная подготовка, поддержание и повышение квалификации персонала» [2], определяющий подходы к подготовке персонала и этапы обучения. Стандарт предусматривает при проведении профессиональной подготовки, поддержания и повышения квалификации использование современных программных средств обучения и проверки знаний, различные виды компьютерных тренажеров и учебно-тренировочных комплексов [2, с. 10].

Решением Электроэнергетического Совета СНГ (протокол № 51 от 4 ноября 2017 года) приняты «Методические рекомендации по тренажерной подготовке в электроэнергетике государств-участников СНГ», в которых определены технические и организационные требования к тренажерам и организации тренажерной подготовки в электроэнергетике. Хотя документ и носит рекомендательный характер, описанные в нем требования к организации, методическому обеспечению и проведению тренажерной подготовки персонала, призванные обеспечить высокий уровень производительности труда, профессиональной безопасности, надежности и эффективности деятельности

персонала, могут учитываться в инструкциях, положениях и организационно-распорядительных документах, действующих в организациях электроэнергетики государств-участников СНГ.

Известно, что наибольший эффект в обучении оперативного персонала достигается путем использования компьютерных тренажеров. Их применение является сложившейся общемировой практикой профессиональной подготовки персонала.

Наиболее продуктивными, с точки зрения эффективности подготовки операторов, являются полнофункциональные компьютерные тренажерные комплексы (КТК), включающие: динамическую точную модель технологического процесса, модели реальной системы контроля и управления, имитатора рабочего места оператора с мнемосхемами технологического процесса и органами управления, имитатора полевого оборудования и КИП, реализованными в виде технологических схем, фотопанорам или трехмерных экранных форм дополненной реальности с изображением интерактивной ручной запорной арматуры и органов управления по месту, а также набора готовых сценариев и упражнений для обучения и контроля профессиональных навыков оператора.

Разработкой и внедрением «под ключ» таких КТК занимается уже более 20 лет коллектив авторов настоящей статьи. Сегодня на более чем 20 различных технологических установках корпораций «Роснефть», «Группа «ИЛИМ», «Иркутская нефтяная компания» эксплуатируются эти КТК.

Один из таких КТК, включающих три котлоагрегата БКЗ-160-100Ф, внедрен в промышленную эксплуатацию для обучения машинистов парогенерирующих установок и котельного оборудования 1-ой очереди котлотурбинного цеха ТЭЦ-1 АО «Группа ИЛИМ» в г. Коряжма в прошлом году.

КТК предназначен для выработки у машинистов парогенераторов навыков по выполнению безопасных действий в процессе:

- нормальной эксплуатации;
- пуска, нормальной и аварийной остановках;
- возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Основные задачи обучения персонала, связанные с применением КТК, следующие:

- отработка навыков ведения технологического режима парогенераторов в соответствии с технологическими инструкциями и действий машинистов в соответствии с инструкцией по предупреждению и ликвидации аварий и неполадок в котельном участке КТЦ ТЭЦ (ПЛА);
- автоматизированный контроль знаний и навыков ведения технологического режима персоналом, включая фиксацию действий обучаемого и протоколирование результатов контроля;
- отработка навыков действий персонала в штатных, нештатных и аварийных ситуациях по заранее подготовленным сценариям;
- возможность тренинга без участия инструктора.

КТК представляет собой комплекс программных и аппаратных средств, работающих по технологии «клиент-сервер».

В состав аппаратной структуры КТК (рисунок 1) входят:

- рабочая станция инструктора (совмещена с сервером моделирования);
- рабочая станция машиниста;
- локальная вычислительная сеть (ЛВС).

На рабочих станциях инструктора и машиниста установлено приложение «Тренажер ИЛИМ», которое в зависимости от прав пользователя способно работать в двух режимах:

- «АРМ инструктора» – режим для работы инструктора. В нем можно создавать учетные записи машинистов, просматривать и печатать отчеты тренингов;
- «АРМ машиниста» – режим непосредственного тренинга/экзамена машиниста под или без надзора и консультации инструктора.

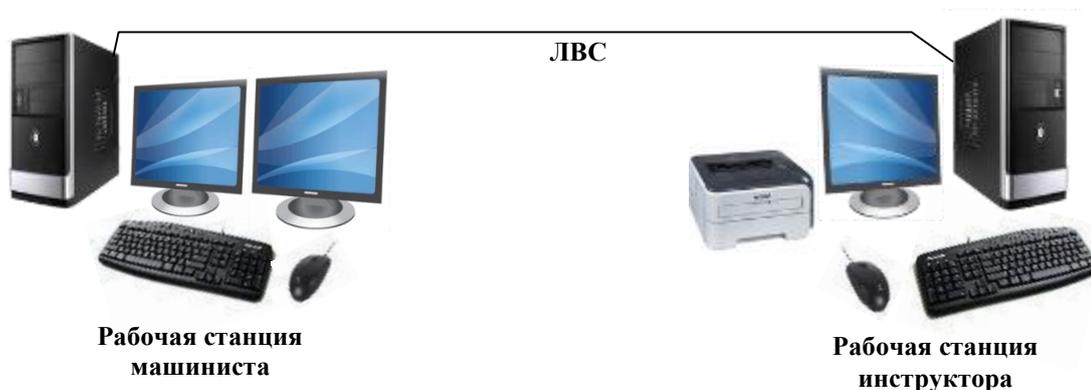


Рисунок 1– Аппаратная структура КТК

На рабочей станции инструктора помимо приложения «ИЛИМ-рабочая станция» установлена серверная часть приложения, на которой ведется хроника действий пользователей, а также хранятся моделируемые ситуации.

Все программные модули КТК работают под управлением операционной системы Windows 10 Pro.

После авторизации обучаемого открывается окно выбора задач тренинга (рисунок 2), где можно не только выбрать требуемую задачу, но и определить, в каком режиме ее нужно решить.

В режиме самообучения тренинг сопровождается подсказками, описывающими правильные действия машиниста в моделируемой ситуации (штатной или нештатной), согласно технологической инструкции или ПЛА. Автоматизированная обучающая система (АОС) оценивает действия, совершенные машинистом на тренажере, и выдает сообщения зеленого цвета, если действия верны, или красного цвета, если они неправильны.

В режиме самоконтроля также происходит задействование АОС, но, в отличие от режима самообучения, подсказки для машиниста отсутствуют, а появляется лишь оценка его действий (красного и зеленого цвета).

В режиме экзамена осуществляется контрольная проверка усвоенных машинистом знаний и навыков, позволяя инструктору напрямую задавать контрольное упражнение с АРМ инструктора. Подсказки машинисту в данном режиме также недоступны.

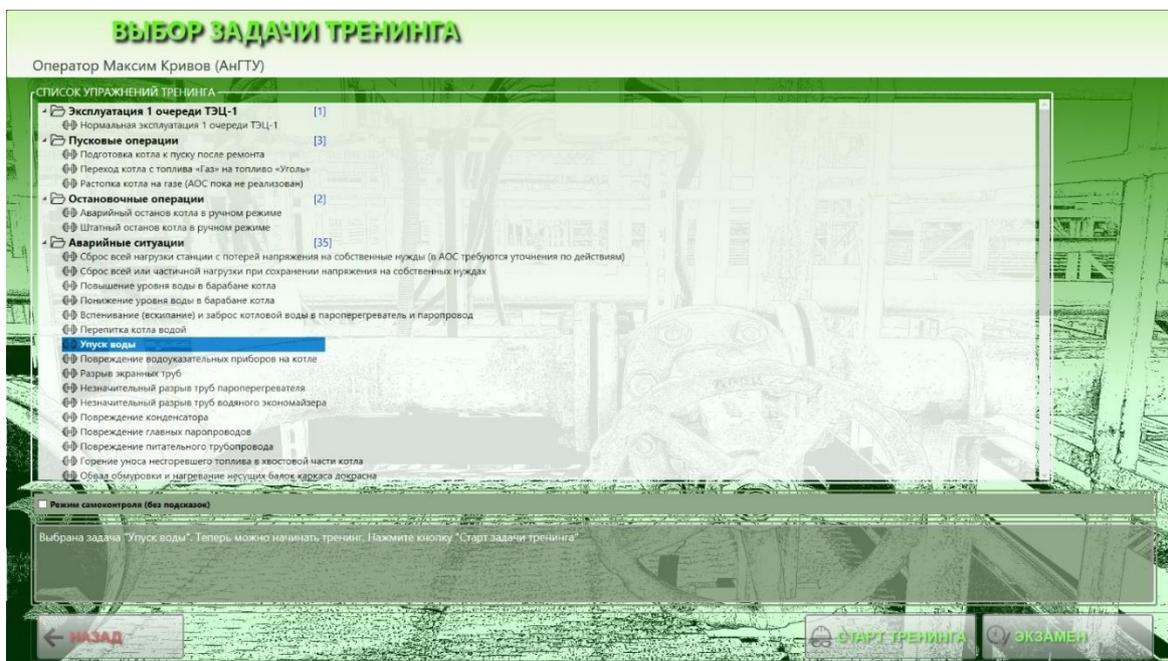


Рисунок 2 – Окно выбора задачи тренинга

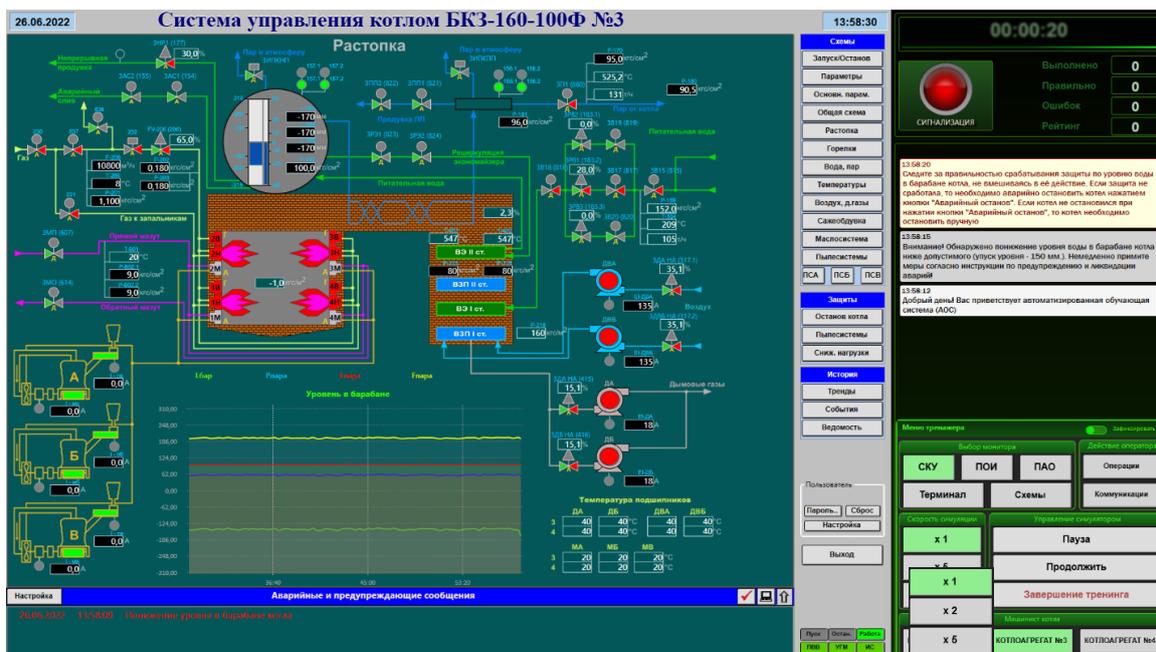


Рисунок 3 – Экран имитации СУК котла

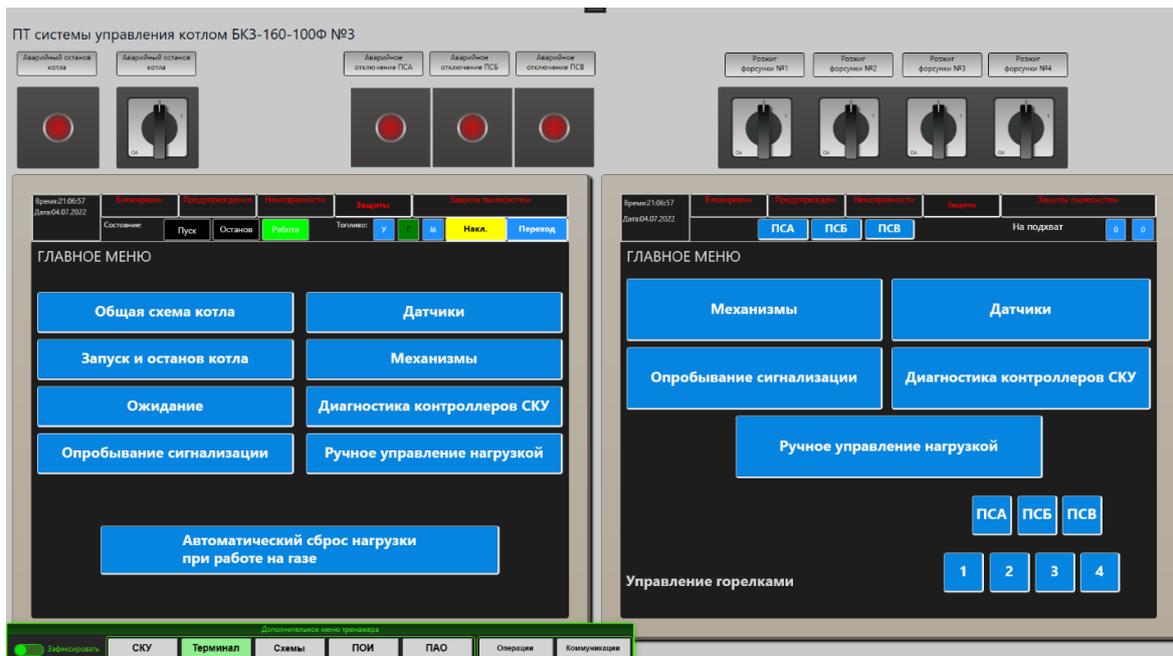


Рисунок 4 – Экран имитации промышленных терминалов котла

Рабочая станция машиниста оснащена двумя мониторами. При загрузке КТК на одном из них загружается графический интерфейс, имитирующий существующую систему контроля и управления (СКУ) котлоагрегатами. На рисунке 3 представлена одна из экранных форм СКУ. Справа от этой экранной формы находится панель выбора других экранных форм существующей СКУ.

На втором мониторе по умолчанию загружается интерфейс, представленный на рисунке 4, имитирующий сенсорные промышленные терминалы (ПТ). На первом мониторе, помимо окна СКУ, расположено меню тренажера. Оно состоит из следующих элементов (рисунок 5):



Рисунок 5 – Меню тренажера

- **Меню выбора мониторов.** Содержит в себе кнопки для перехода в экраны:
 - Система контроля и управления ([СКУ]);
 - Панель общих измерений ([ПОИ]);
 - Пульт аварийного останова ([ПАО])
 - Терминал ([Терминал]);
 - Схемы ([Схемы]).

Экраны «СКУ», «ПОИ», и «Терминал» являются имитацией действующих в реальной системе управления программных интерфейсов.

- **Меню действий машиниста.** Состоит из кнопок [Операции] (переводит машиниста на экран для выполнения действий, не связанных с взаимодействием с СКУ или терминалом), и [Коммуникации] (переводит машиниста в экран устных коммуникаций с персоналом).
- **Меню скорости симуляции.** Позволяет, используя кнопки [x1], [x2] и [x5], изменять моделирование процесса с соответствующим ускорением.
- **Меню управления симулятором.** Предоставляет машинисту возможность кнопками [Пауза], [Продолжить] и [Завершение тренинга] приостановить, продолжить или закончить процесс тренинга, соответственно.
- **Меню выбора котла.** Состоит из кнопок [КОТЛОАГРЕГАТ № 2], [КОТЛОАГРЕГАТ № 3], [КОТЛОАГРЕГАТ № 4], предназначенных для переключения на роль машинистов соответствующих котлоагрегатов.

Экран пульта аварийного отключения ([ПАО]) состоит из программной имитации механических ключей и ламп индикации, находящихся в распоряжении машиниста на реальной панели ПАО. Расположение ключей и индикаторов идентично расположению на реальном пульте (рисунок 6). Все ключи имеют интерактивное управление путем наведения указателя мыши на соответствующий ключ с последующим однократным нажатием левой кнопкой мыши.

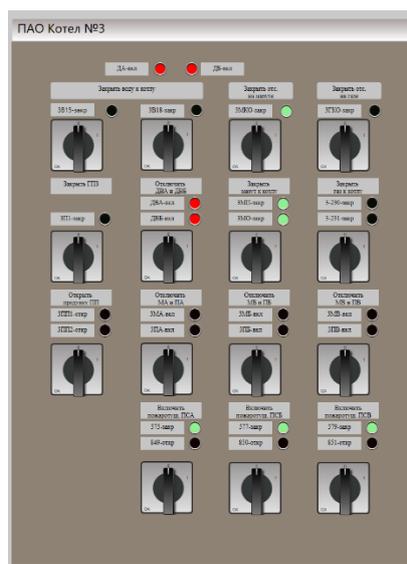


Рисунок 6 – Экран ПАО

Экран схем ([Схемы]) предназначен для имитации взаимодействия обучаемого с полевым оборудованием установки (ручная запорная арматура, манометры) (рисунок 8).

Общая схематическая иллюстрация котлоагрегата объединяет в себе шесть фрагментов технологических схем:

- схемы питательного узла;
- схемы паро-мазутапровода;
- схемы газопровода;
- схемы периодической продувки;
- схемы непрерывной продувки;
- схемы главного паропровода.

При нажатии на соответствующие кнопки открывается интерактивная технологическая схема соответствующего узла (например, как показано на рисунке 8).

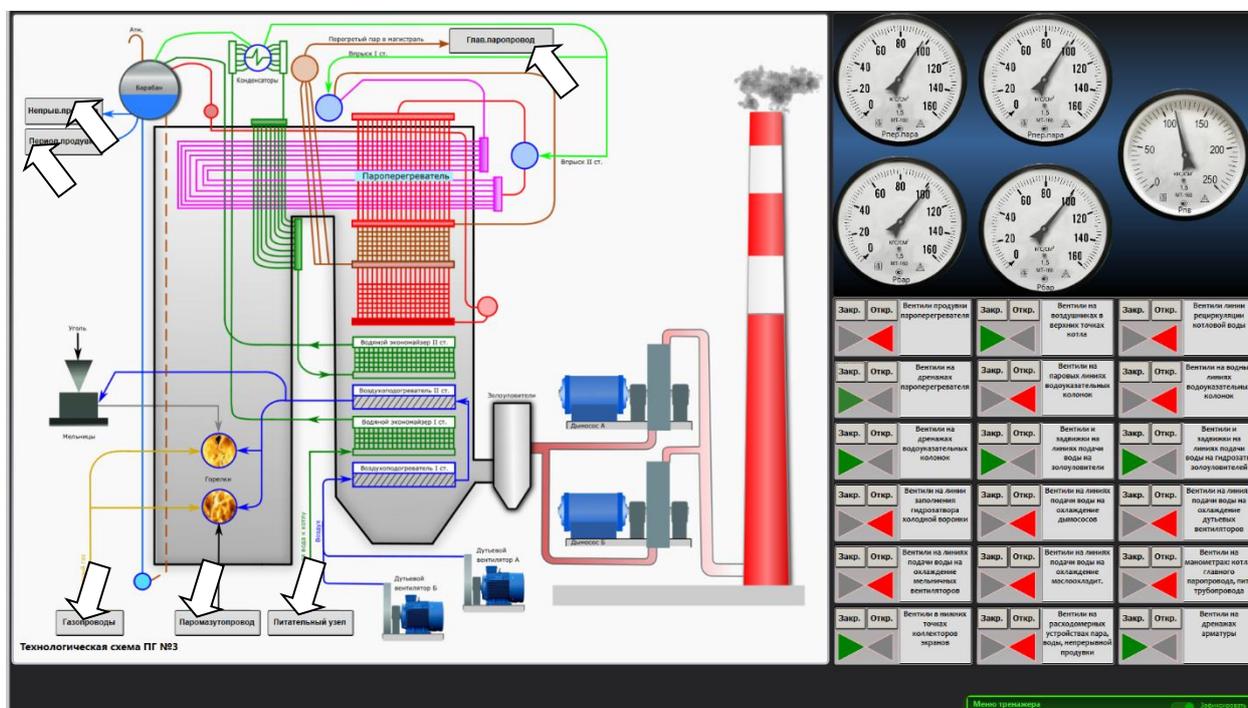


Рисунок 7 – Общий экран интерактивных схем

Нажав ЛК на соответствующее изображение ручной арматуры, вызывается экранная форма управления ручной задвижкой, представленная на рисунке 9. Индикатор «Состояние» указывает на текущее состояние арматуры, а с помощью кнопок [Открыть] и [Заккрыть] это состояние можно изменить.

Также на экране, представленном на рисунке 7, справа отображаются панели управления ручными задвижками (или группами задвижек), которые не входят в состав ни одной из шести схем, но требуются для реализации определенных задач на тренажере.

Окна действий машиниста. Согласно инструкциям и ПЛА, машинист при возникновении штатных и нештатных ситуаций обязан выполнить в

процессе их устранения ряд организационных действий, таких как: телефонные звонки в различные службы, устные сообщения руководителям или персоналу, действия, не связанные с управлением технологическим процессом. В КТК реализована имитация подобных действий при помощи интерактивного окна «Действия машиниста», вызываемого кнопкой [Операции] (рисунок 10) и интерактивного окна «Коммуникации персонала», вызываемого кнопкой [Коммуникации] (рисунок 11).

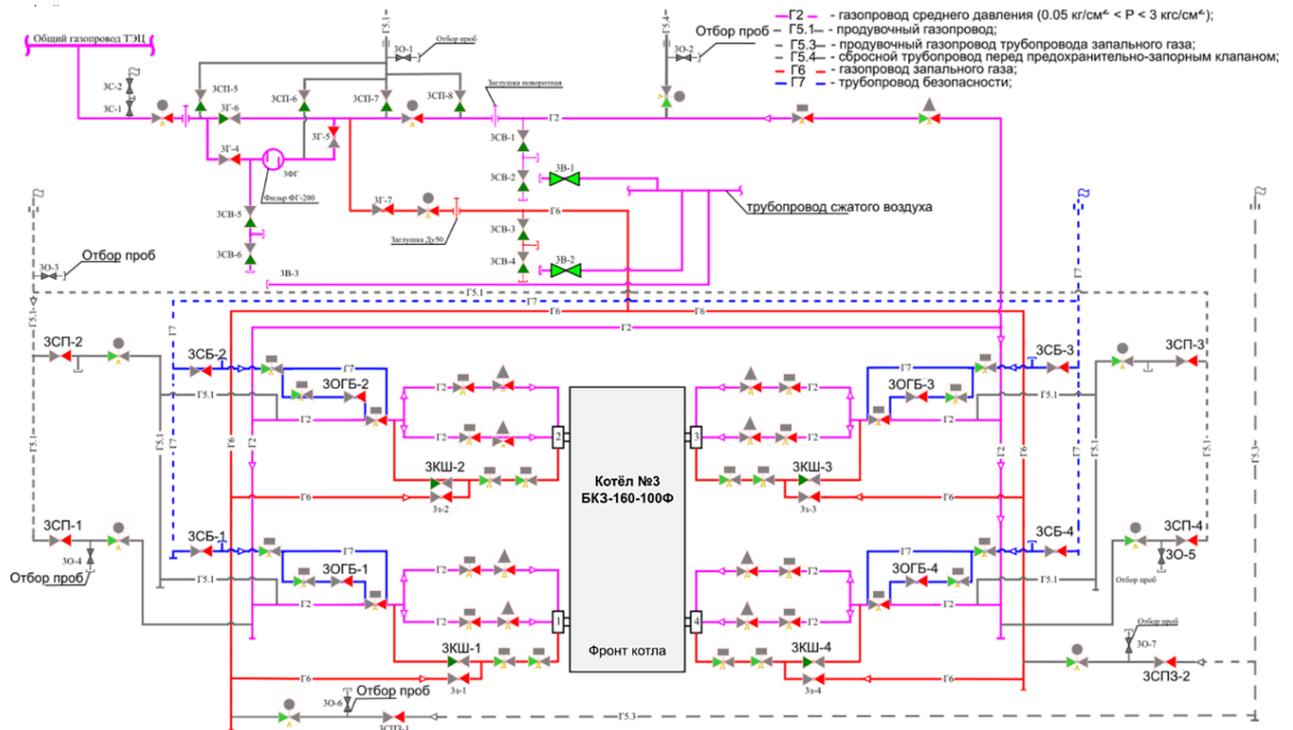


Рисунок 8 – Интерактивная схема газопровода котла № 3

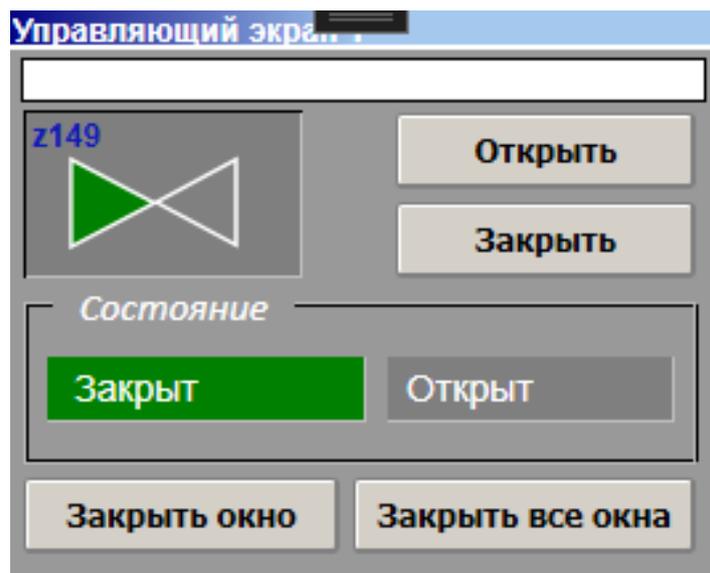


Рисунок 9 – Окно управления ручной задвижкой

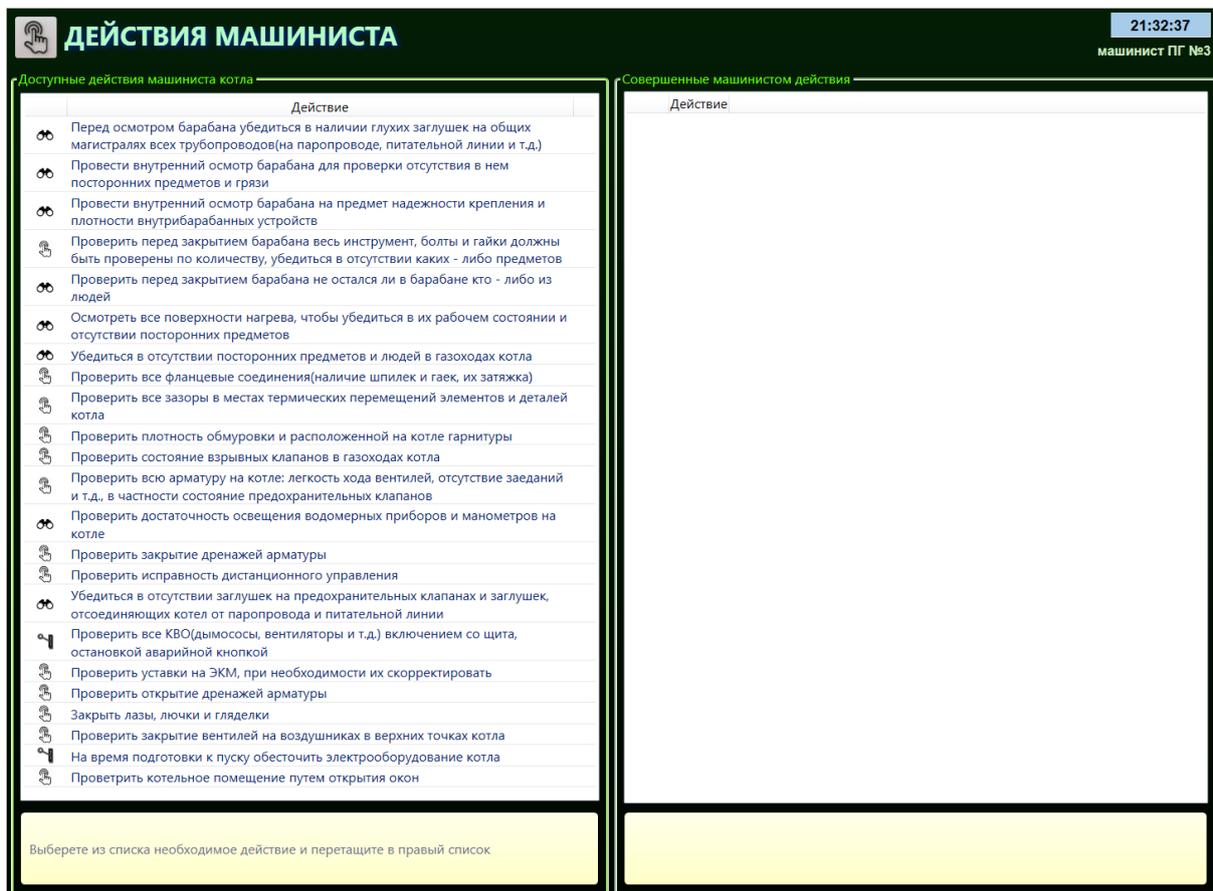


Рисунок 10 – Экран действий машиниста

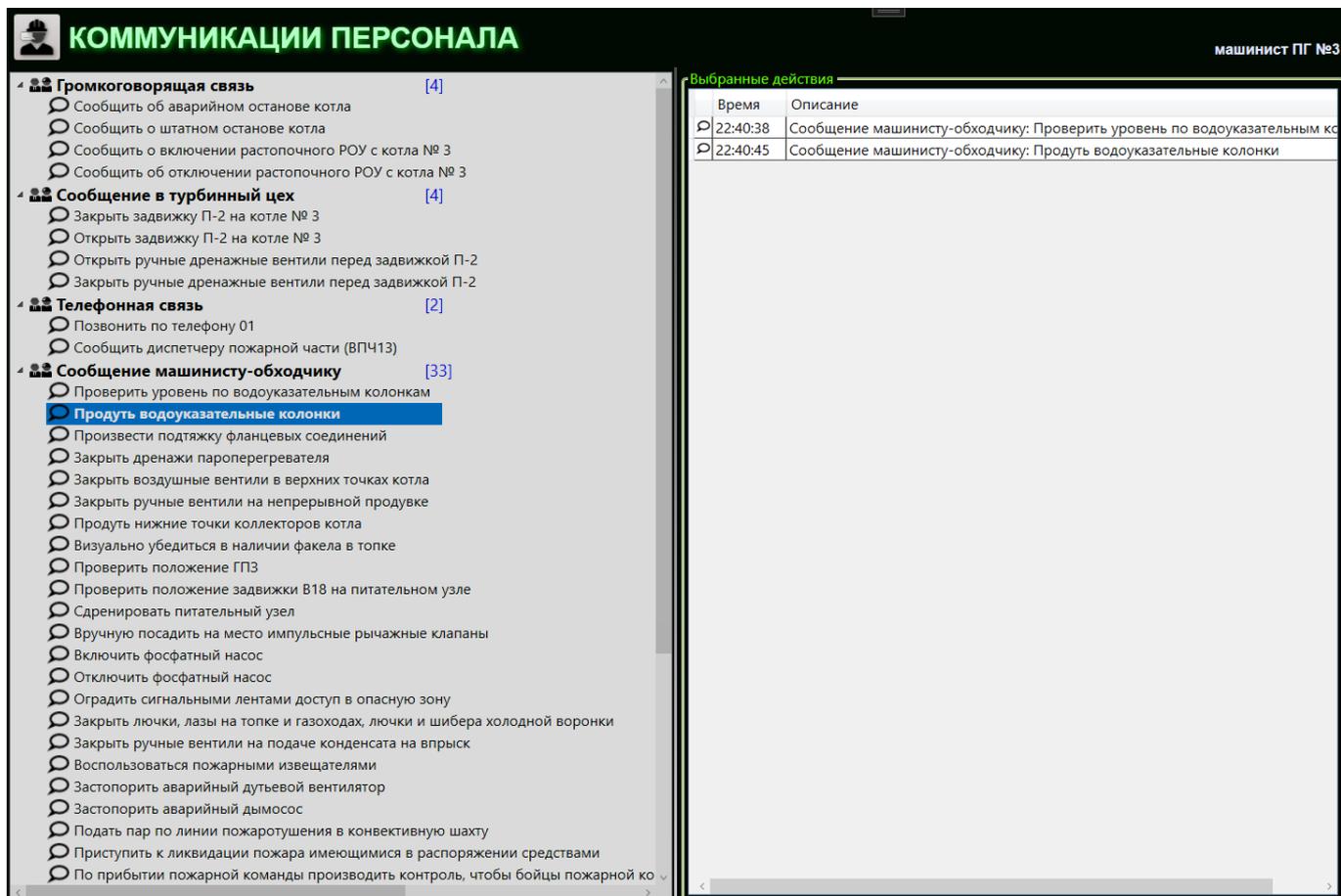


Рисунок 11 – Экран коммуникаций персонала

Первое окно содержит возможный перечень действий, необходимых для реализации действий непосредственно с физическим участием машиниста, второе окно предназначено для реализации возможных устных коммуникаций с персоналом станции.

Каждое из этих окон состоит из двух списков: слева находится список возможных действий или сообщений, а справа – те действия или сообщения, которые машинист выполнил или сказал на данный момент (с указанием времени осуществления данного действия/сообщения).

Для выполнения нужного действия/сообщения необходимо привести курсор мыши на интересующее действие/сообщение, и с зажатой ЛК перенести его из левого списка в правый. Все действия/сообщения выстраиваются в хронологическом порядке.

В КТК встроена АОС, позволяющая машинисту самостоятельно проходить обучение и осуществлять самоконтроль на тренажере без участия инструктора, а также контролировать свои знания при помощи автоматической системы оценки действий. АОС представляет собой систему автоматически появляющихся подсказок и оповещений (рисунок 12).

В верхней части окна расположен таймер, отображающий время выполнения текущего упражнения. Ниже располагается панель статистики выполнения упражнения. На панели отображается:

- суммарное количество выполненных на текущий момент оцениваемых системой действий (пункт «Выполнено»);
- количество набранных на текущий момент правильных действий (пункт «Правильно»);
- количество совершенных на текущий момент ошибочных действий (пункт «Ошибок»);
- итоговый рейтинг выполнения данного упражнения (в процентах). В течение тренинга это значение равно 0 %. Как только будет достигнут конец упражнения, система сформирует оповещение «Упражнение окончено. Для формирования протокола закройте окно тренинга», после этого в окне рейтинга появится значение от 0 до 100 %, при этом 0 % означает, что все действия совершены ошибочно либо не совершены вовсе, а 100 % означает, что машинист выполнил правильно и своевременно все действия; промежуточное значение возникает, когда часть действий выполнена с ошибками. Если машинист завершит упражнение, не дойдя до его конца, значению рейтинга выполнения упражнения будет присвоено 0 %.

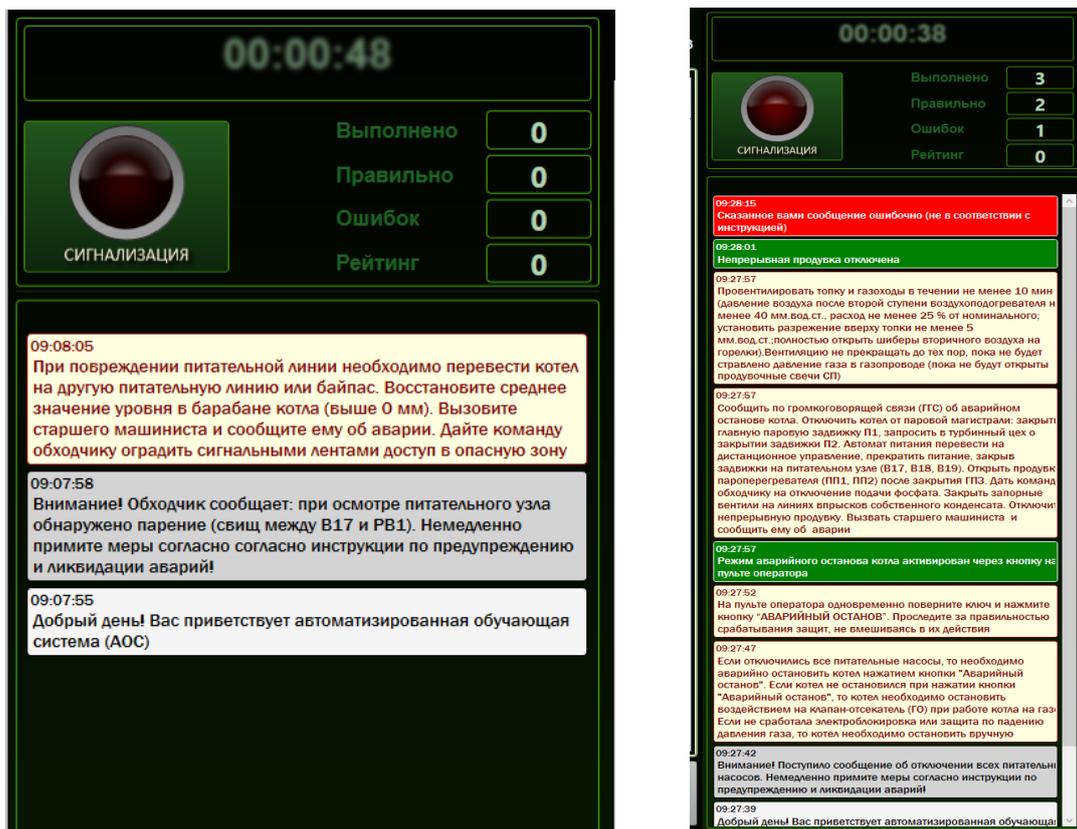


Рисунок 12 – Окно и сообщения автоматической обучающей системы

Подсказки появляются по умолчанию при выборе упражнения. Однако подсказки будут отсутствовать, если машинист в режиме самостоятельного тренинга активизировал пункт «Режим самоконтроля (без подсказок)».

Подсказки (при их наличии) указывают на необходимость выполнения машинистом обязательных действий для текущего упражнения согласно технологического регламента или ПЛА. Подсказки в ленте отображаются в виде сообщений бежевого цвета. На выполнение каждого действия отводится определенное время, которое варьируется для каждого упражнения в зависимости от его сложности и длительности.

Если за отведенное на выполнение указанного действия время машинист выполнит указанные действия, то на экране появится оповещение зеленого цвета (рисунок 12), при этом ему начисляется 1 бонусный балл.

Если за отведенное на выполнение данного действия время машинист не выполнит указанные АОС действия, то на экране появится оповещение красного цвета, и ему будет начислен штрафной балл.

По окончании выполнения упражнения либо в любой момент тренинга (по необходимости) обучаемому нужно нажать на кнопку [Завершение тренинга] меню тренажера (рисунок 3). После этого основной экран КТК закрывается, и пользователю открывается отчет о прохождении текущего сеанса тренинга (рисунок 13).

Отчет можно вывести на печать кнопкой [Печать]. Из данного окна возможен переход к главному меню АРМ машиниста по нажатию кнопки [Начать заново], либо выход из тренажера по нажатию кнопки [Выход].

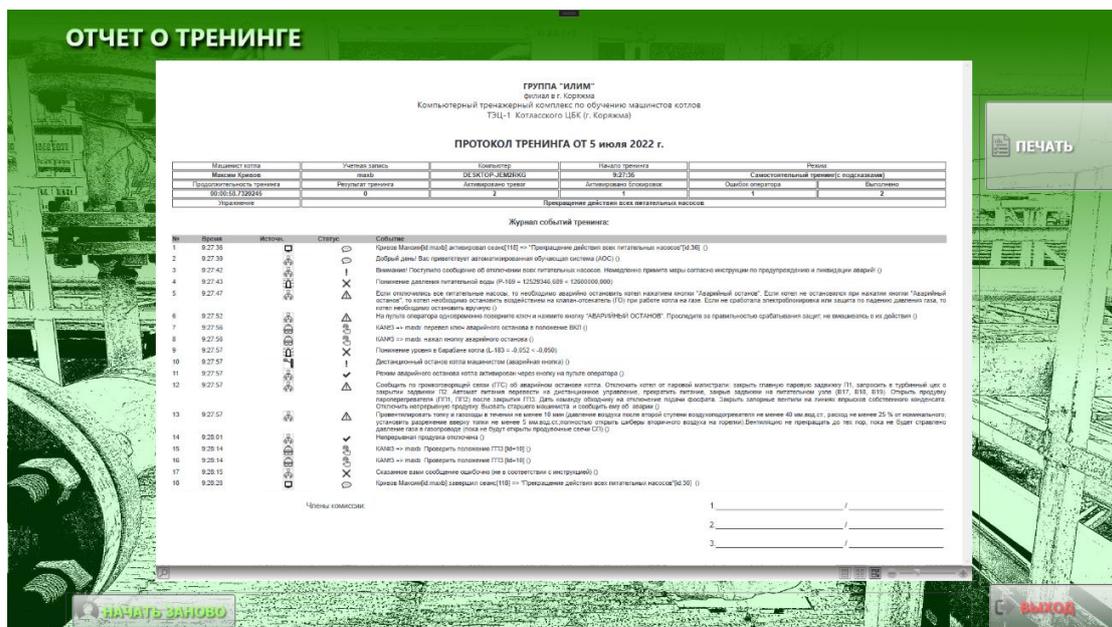


Рисунок 13 – Окно отчета о тренинге

В окне отчета формируется протокол тренинга, представляющий собой электронный документ, отражающий фактические результаты прохождения обучаемым сеанса тренинга. В заголовке протокола отражены:

- дата и время формирования протокола тренинга;
- Ф.И.О. обучаемого;
- имя учетной записи обучаемого;
- имя АРМ машиниста, с которого осуществлялся тренинг;
- время начала сеанса тренинга;
- режим прохождения тренинга;
- продолжительность тренинга;
- название выполняемого упражнения;
- результат тренинга по данному упражнению (рейтинг в процентах);
- количество активированных тревог (сигнализаций);
- количество активированных блокировок;
- количество набранных машинистом ошибок;
- количество правильно набранных баллов.

После заголовка в протоколе приводится журнал событий тренинга. Все записи в нем расположены в хронологическом порядке с указанием соответствующих комментариев.

В КТК имеется возможность вызова окна отчетов тренинга, в котором отображается краткая сводная статистика по выбранному машинисту с указанием количества выполненных упражнений на тренажере, общего времени, затраченного на их выполнение, количества выполненных экзаменационных задач.

Кроме этого, по выбранному пользователю можно сформировать суммарный отчет тренинга (рисунок 14). Данный отчет содержит динамику

оценок по каждому из выполненных упражнений, а также суммарную статистику по всем выполненным задачам. Данный суммарный отчет также можно распечатать, используя кнопку [ПЕЧАТЬ...].

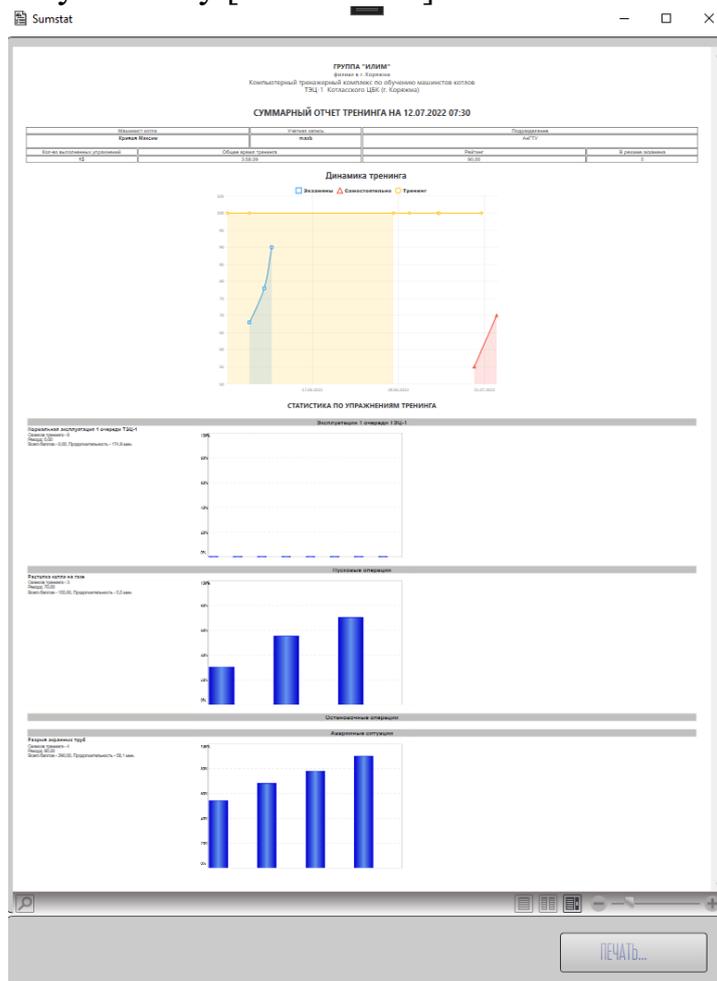


Рисунок 14 – Суммарный отчет тренинга

Опыт эксплуатации КТК позволяет с уверенностью утверждать о высокой эффективности использования тренажеров для обеспечения безопасной эксплуатации технологический объектов. КТК, разрабатываемые Санкт-Петербургским государственным университетом промышленных технологий и дизайна и Ангарским государственным университетом, обладают следующими конкурентными преимуществами [4 – 8]:

- выгодная для Заказчика ценовая политика;
- высокая степень адаптации симулятора под нужды и задачи Заказчика;
- интерактивность и высокая степень погружения в рабочий процесс;
- индивидуальный и групповой тренинг;
- интеграция с пред тренажёрной подготовкой операторов, в том числе по ПЛА;
- автоматизированная оценка действий оператора;
- оперативность технической и методической поддержки.

Список литературы:

1. Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы»: [сайт] / учредитель АО «СО ЕЭС». – Москва, 2024 – URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_5_231018_prez_05_inv.pdf/ (дата обращения: 28.09.2024). – Текст: электронный.
2. Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы»: [сайт] / учредитель АО «СО ЕЭС». – Москва, 2024 – URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_prof.PDF / (дата обращения: 28.09.2024). – Текст: электронный.
3. Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ: [сайт] / учредитель: государства-участники СНГ. – Москва, 2024. – URL: http://energocis.ru/wyswyg/file/RGK.Documents/Методич_рекомен%20по%20тренаж_под.pdf/ (дата обращения: 28.09.2024). – Текст: электронный.
4. Кривов, М. В. Тренажерные модели и компьютерный тренинг операторов при складировании сжиженных углеводородных газов / М. В. Кривов, А. Г. Колмогоров, В. Ю. Кобозев, Н. С. Благодарный // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: Материалы тринадцатой Международной конференции. – Томский государственный университет. Томск, 2020. – С. 20-21.
5. Krivov M. V., Kolmogorov A.G., Kobozev V.Y., Sitosanova O.V., Blagodarnyi N.S. The concept of building training systems for training operators of liquefied hydrocarbon warehouses // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 13. Сер. "Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics" 2020. С. 012027.
6. Кривов, М. В. Применение компьютерного тренинга в корпоративном обучении / М. В. Кривов, Н. С. Благодарный // Образовательные технологии и общество. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 3–10.
7. Благодарный, Н. С. Критерий адекватности тренажёрной модели / Н. С. Благодарный, А. Г. Колмогоров, В. Ю. Кобозев, М. В. Кривов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – №7. – С. 59-65.
8. Благодарный, Н. С. Компьютерные тренажеры-имитаторы для обучения персонала безаварийной эксплуатации энерготехнологических котлов / Н. С. Благодарный, В. Ю. Кобозев, А. Г. Колмогоров, М. В. Кривов, Н. В. Мороз // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 7-14.

References:

1. Joint Stock Company System Operator of the Unified Energy System: [website] / founder of JSC “SO UES”. - Moscow, 2024 - URL: <https://www.soups.ru/>

ups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_5_231018_prez_05_inv.pdf/
(date of reference: 28.09.2024). - Text : electronic.

2. Joint Stock Company “System Operator of the Unified Energy System”: [website] / founder of JSC “SO UES”. - Moscow, 2024 - URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_prof.PDF / (date of reference: 28.09.2024). - Text: electronic.
3. Executive Committee of the CIS Electric Power Council: [website] / founder: CIS member states. - Moscow, 2024 - URL: http://energo-cis.ru/wyswyg/file/RGK/Documents/Methodical_recommend%20to%20training_under.pdf/ (date of access: 28.09.2024). – Text: electronic.
4. Krivov, M.V.; Kolmogorov, A.G.; Kobozev, V.Yu.; Blagodarny, N.S. Training models and computer training of operators in the storage of liquefied hydrocarbon gases // New information technologies in the study of complex structures. Materials of the Thirteenth International Conference. Tomsk State University. Tomsk, 2020. C. 20-21.
5. Krivov M.V., Kolmogorov A.G., Kobozev V.Y., Sitosanova O.V., Blagodarnyi N.S. The concept of building training systems for training operators of liquefied hydrocarbon warehouses // Proceedings: Journal of Physics: Conference Series. In Proceedings: Journal of Physics: Conference Series. 13. Ser. “Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics” 2020. C. 012027.
6. Krivov M.V., Blagodarny N.S. Application of computer-based training in corporate training // Educational Technologies and Society. 2019. T. 22. № 1. C. 3-10.
7. Grigorodarny, N.S.; Kolmogorov, A.G.; Kobozev, V.Yu.; Krivov, M.V. Adequacy criterion of the simulator model (in Russian) // Automation in industry. 2010. №7. C. 59-65.
8. Grigorodarny N.S., Kobozev V.Yu., Kolmogorov A.G., Krivov M.V., Moroz N.V. Computer simulators-simulators for training the personnel for accident-free operation of energy-technological boilers // Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University. 2015. T. 1. № 1. C. 7-14.

© Благодарный Н. С., Борко В. В, Иванов О. О.,
Кривов М. В., Колмогоров А. Г., Кобозев В. Ю., 2024

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМ АСУТП ПРИ СЖИГАНИИ ОБЕЗВОЖЕННОГО ОСАДКА
С БИОЛОГИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

студент **Иванов Михаил Сергеевич**,
инженер **Иванов Сергей Сергеевич**,
канд. техн. наук, доцент **Ковалёв Дмитрий Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается вопрос автоматизации процессов сжигания обезвоженных отходов с очистных сооружений ЦБК. Описаны состав отходов и особенности их сжигания и предложены методы оптимизации и улучшения процесса утилизации за счет использования автоматизированных систем. Результаты исследований могут быть полезны для других предприятий отрасли, применяющих метод сжигания обезвоженных отходов.

Ключевые слова: автоматизация, утилизация промышленных отходов, повышение эффективности производства, производство бумаги, сжигание отходов очистных сооружений.

**PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF AUTOMATION TOOLS
AND APCS SYSTEMS IN THE BURNING OF DEWATERED SLUDGE
FROM BIOLOGICAL TREATMENT FACILITIES OF A PULP
AND PAPER ENTERPRISE**

Student **Ivanov Mikhail Sergeevich**,
Engineer **Ivanov Sergey Sergeevich**,
PhD in Technology, Associate Professor
Kovalev Dmitrii Alexandrovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article addresses the issue of automation of the processes of combustion of dehydrated waste at pulp and paper mill treatment plants. The composition of the waste and the features of its combustion are described, and methods for optimizing and improving the recycling process through the use of mechanical systems are proposed. The research results may be useful for other enterprises using the method of incinerating dehydrated waste.

Keywords: automation, recycling of industrial waste, increasing production efficiency, paper production, incineration of sewage treatment plant waste.

Биологические очистные сооружения (БОС) являются одним из основных методов очистки сточных вод от органических и неорганических загрязнений, образуемых на целлюлозно-бумажных предприятиях (ЦБП). В результате работы таких сооружений образуется обезвоженный осадок, который требует дальнейшей обработки и утилизации. Здесь и далее нами будет рассматриваться осадок с БОС, обезвоженный с помощью установки декантерной центрифуги, как один из наиболее эффективных методов обезвоживания, позволяющий достигать до 70 % влажности осадка [1]. Состав обезвоженного осадка определяет его дальнейшую судьбу и безопасность для окружающей среды. Специфичность сферы производства бумаги играет ключевую роль в определении компонентов, попадающих в осадок [2].

Физический состав отходов включает в себя различные частицы, такие как целлюлозные волокна, клетчатка, легко и трудноокисляемые органические и неорганические примеси, а также взвешенные вещества. Целлюлозные волокна являются основным компонентом, образующим основу бумаги, их размер и форма могут варьироваться в зависимости от исходного сырья и технологических процессов. Клетчатка представляет собой остатки растительных структур, которые не переработаны в процессе производства. Все это так или иначе приводит к попаданию отработанных структур и компонентов в отходы после очистки.

Химический состав отходов включает в себя остатки химических веществ, используемых в процессах обработки целлюлозы и производства бумаги. Это могут быть остатки от химических реагентов, использованных для отбеливания целлюлозы, красителей, антисептиков и других добавок. В отходах также могут присутствовать органические соединения, такие как линейные и ветвистые углеводороды, ароматические соединения, а также различные продукты окисления и гидролиза.

Процентное соотношение компонентов, содержащихся в отходах с очистных сооружений целлюлозно-бумажного предприятия, может варьироваться в зависимости от применяемого технологического процесса, сульфатного или сульфитного способа получения целлюлозы. Также роль будет играть используемое сырье и требуемое качество промежуточного продукта, беленая или небеленая целлюлоза. Так, например, для сульфатного процесса получения целлюлозы компоненты отходов могут быть представлены следующим образом:

- неорганические компоненты — до 33 %;
- в их составе: различные соли натрия и иные щелочи;
- органические компоненты – до 67 %;
- в т. ч. оксикислоты и лактоны – 33 %;
- в т. ч. фенолы, смоляные и жирные кислоты – 24 %;
- в т. ч. лигнин – 36 %;
- в т. ч. муравьиная кислота – 1 %;

- в т. ч. уксусная кислота – 0,7 %.

Для сульфитного процесса получения целлюлозы характерно преобладающее количество органических компонентов – до 90 %, и малое количество неорганических компонентов – до 10 %. Так или иначе, обезвоженные отходы с очистных сооружений ЦБП имеют сложную структуру компонентов, изменяющихся в зависимости от технологических процессов на основном производстве [3].

Так, например, рассмотрим Кондопожский ЦБК, основным продуктом которого является газетная бумага, состоящая на 77 % из древесной массы и на 23 % из целлюлозы. Мощность Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината составляет около 670 000 тонн в год различных видов бумаг [4].

Для БОС ЦБК такого масштаба и специфики характерны следующие субкомпоненты избыточного активного ила – одного из компонентов отходов, образуемых при очистке сточных вод:

- свободные смоляные и жирные кислоты: от 34 % до 48,9 %;
- нейтральные омыляемые и неомыляемые вещества: от 50,7 % до 62,8 % [5].

Одной из актуальных проблем современной промышленности является определение наиболее эффективного способа утилизации обезвоженного осадка. В настоящее время существуют несколько методов, таких как компостирование, сжигание, захоронение на полигонах ТБО и использование в качестве удобрения. Однако каждый из этих методов имеет свои недостатки, связанные с экологической безопасностью и экономической эффективностью. В рамках настоящей статьи рассматривается наименее распространенный в сфере изготовления бумаги метод утилизации – сжигание. Здесь и далее в качестве установки по сжиганию осадка нами будет рассматриваться установка инсинератора, работающая по принципу пиролиза – термического разложения отходов при высоких температурах и в условиях отсутствия кислорода [6].

Процесс сжигания осадка имеет сложную технологическую схему, требующую тщательного контроля и управления. Главными исследуемыми вопросами настоящей статьи можно назвать возможные увеличения эффективности установок по сжиганию обезвоженного осадка, увеличение уровня безопасности эксплуатации таких установок и снижение эксплуатационных расходов. Автоматизация технологических процессов (АТП) и системы автоматизации технологических процессов (АСУТП) рассматриваются в текущей статье как основной рычаг решения озвученных вопросов, и, помимо прочего, в качестве средства минимизирования негативного воздействия на окружающую среду.

Исследуемые проблемы процесса утилизации обезвоженных отходов путем сжигания:

1. Нестабильность работы установки по сжиганию. Обуславливается неравномерностью подачи исходного обезвоженного осадка и отсутствием контроля качества и состава подаваемого обезвоженного осадка с БОС. Также, одной из причин может являться отсутствие интеграции существующих автоматических систем сбора данных и контроля технологических параметров на БОС в систему АСУТП секции сжигания

осадка.

2. Высокий риск возникновения аварийно-опасных ситуаций, связанных с перегревом секций котла и топки. Обуславливается отсутствием контроля температурных перепадов, возникающих при изменении мощности установки по сжиганию в виду изменчивого состава исходных обезвоженных отходов с БОС.
3. Нарушение экологических норм и правил при выбросах дымовых газов. Обуславливается отсутствием локальных блоков контроля выпуска дымовых газов. Предусмотренные системы очистки газов могут не справляться с резким изменением количества и качества выпускаемых дымовых газов.
4. Экономические потери и высоки энергозатраты. Обуславливается отсутствием автоматических систем контроля и регулирования подачи топлива и удаления золы. Существующие механизированные системы управления являются частой причиной возникновения человеческой ошибки и отклонений от заданных параметров и значений [7].

1. Исследуемые средства автоматизации процесса сжигания обезвоженного осадка.

1.1. Автоматическое управление подачей исходной среды и топлива. Автоматическое управление процессом подачи осадка в топку котла является одним из основных методов автоматизации сжигания осадка. Оно позволяет поддерживать постоянную мощность котла и предотвращать перегрузки и перегревы топки. Для управления подачей осадка используются датчики уровня топлива в бункере и кориолисовые датчики расхода осадка, измеряющие массу и плотность подаваемых сред.

1.2. Автоматическое управление температурой горения. Автоматическое управление температурой горения является иным важным методом автоматизации процесса сжигания осадка. Оно позволяет поддерживать оптимальную температуру горения и предотвращать образование золы и шлака. Для управления температурой горения используются датчики температуры в топке, датчики расхода воздуха и воды для контроля систем охлаждения. Помимо прочего, контроль температуры является важнейшим способом защиты от перегрева и иных аварийных ситуаций.

1.3. Автоматическое управление удалением золы. Автоматическое управление удалением золы является еще одним важным методом автоматизации процесса сжигания осадка. Оно позволяет поддерживать чистоту топки и предотвращать закупоривание каналов удаления золы. Для управления удалением золы используются датчики уровня золы в зольном бункере, датчики расхода золы и системы управления механизмами удаления золы.

1.4. Автоматический контроль дымовых газов. Автоматический контроль дымовых газов посредством применения современных газоанализаторов, измеряющих процентный состав газов, вихревых расходомеров, измеряющих количество газов, и специализированных термометров, измеряющих

температуру проходящих газов, может в значительной степени повысить уровень безопасности производства в секции сжигания осадка [8].

2. Особенности внедрения систем АСУТП при сжигании обезвоженного осадка.

2.1. Системы управления технологическим процессом (СУТП), как часть внедряемой АСУТП, позволяют автоматизировать управление отдельными участками технологической схемы. Для построения СУТП используются автоматические контрольно-измерительные средства. Такие средства используются для решения локальных задач на производстве, таких как управление подачей осадка, температурой горения, удалением золы и контроля состава дымовых газов [9].

3. При выборе структуры и внедрении системы АСУТП сжигания обезвоженного осадка необходимо учитывать следующие факторы:

3.1. Характеристики технологического процесса. При выборе систем АСУТП необходимо учитывать характеристики технологического процесса сжигания осадка, включая особенности исходной среды, установленную технологическим регламентом температуру горения, влажность осадка и состав золы. Системы АСУТП должны быть способны эффективно управлять процессом сжигания осадка в широком диапазоне условий работы, в том числе в случаях аварийных сбросов на очистных сооружениях.

3.2. Влияние внедрения автоматизации на безопасность и экологию. При выборе систем АСУТП необходимо учитывать требования к безопасности и экологии процесса сжигания осадка. Системы АСУТП должны быть способны предотвращать аварии и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду в виде непредвиденных выбросов в атмосферу. В исследуемой плоскости методы снижения аварийности секции сжигания особенно важны. Комплексы автоматических контрольно-измерительных средств, отвечающие за контроль температурных перепадов, равномерной подачи топлива и аварийной сигнализации персонала позволяют в значительной степени снизить риск аварийных происшествий на производствах с применением установок по сжиганию отходов.

3.3. Экономическая эффективность. При выборе систем АСУТП необходимо учитывать экономическую эффективность их внедрения. Применение новейших средств автоматизации и систем АСУТП позволит снизить риск и частоту возникновения аварийных ситуаций. Помимо прочего, рациональное применение автоматических контрольно-измерительных систем способно оптимизировать затраты топлива на осуществление процесса сжигания осадка. Что, в свою очередь, напрямую влияет на экономические показатели всего предприятия [10].

Заключение

По результатам проведенных исследований можно заключить, что автоматизация технологических процессов и применение систем АСУТП являются важными средствами повышения эффективности работы целлюлозно-бумажного предприятия в части утилизации отходов и экономии

энергоресурсов. Исследуемые методы автоматизации и системы АСУТП позволяют поддерживать постоянную мощность котла, предотвращать перегрузки и перегревы топки, поддерживать оптимальную температуру горения и предотвращать образование золы и шлака. При выборе и внедрении систем АСУТП необходимо учитывать многие аспекты и характеристики технологического процесса, требования к безопасности и экологии, а также экономическую эффективность.

Список литературы:

1. Чистяков, А. Э. Проблемные вопросы обработки и утилизации отходов, образующихся в результате очистки сточных вод на объектах военной инфраструктуры Минобороны России / А. Э. Чистяков, Р. Л. Кащеев, В. С. Игнатчик, Ю. П. Анисимов. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Военный инженер». – 2021. – № 4 (22). – С. 5–9.
2. Буркова, С. А. Совершенные методы очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий / С. А. Буркова, И. А. Шаньбязов. – Текст: непосредственный // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2021. – № 6 (39). – Т. 2. – С. 169–171.
3. Насирова, Н. К., Турабджанов С. М., Мухамедов Ж. К. Методы очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий / Н. К. Насирова, С. М. Турабджанов, Ж. К. Мухамедов. – Текст: непосредственный // Book of abstract «WOMEN IN STEM» International Forum, Tashkent, February 13 – 15, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10643244> – 2024. – С. 163–164.
4. Информация о компании «Кондопожский ЦБК»: [сайт]. – URL: <https://alestech.ru/factory/150-kondopozhskiy-tsbk>. – Текст: электронный.
5. Гелес, И. С. Состав жирных кислот «Белвитамила» Кондопожского ЦБК и избыточного активного ила Сегежского ЦБК / И. С. Гелес, Н. А. Васильева, М. А. Коржова. – Текст: непосредственный // Ведущий научный журнал «Лесной вестник». – 2010. – № 4. – С. 164–167.
6. Тимофеев, П. А. Обоснование разработки современной инсинераторной установки с возможностью сжигания нефтяных остатков / П. А. Тимофеев. – Текст: непосредственный // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Спец. выпуск № 1 – С. 142-145.
7. Ковалев, Д. А. Теория автоматического управления: Практикум / Д. П. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. – Текст: электронный // СПб.: ВШТЭ СПбГТУРП. – 2022. – С. 134.
8. Горобченко, С. Л., ERP-системы для арматурных предприятий / С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев, Ю. С. Ковалева. – Текст: непосредственный // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2022. – № 3 (120). – С. 58–61.
9. Суриков, В. Н. Повышение эффективности применения регулирующей арматуры в современных системах управления технологическими процессами / В. Н. Суриков, С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020. – № 4. – С. 105–111.
10. Сагдеева, Г. С. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала / Г. С. Сагдеева, Г. Р. Патракова. –

References:

1. Chistyakov A.E., Kascheev R.L., Ignatchik V.S., Anisimov Y.P., Problematic issues of treatment and utilization of waste generated as a result of wastewater treatment at the military infrastructure facilities of the Ministry of Defense of Russia / A.E. Chistyakov, R.L. Kascheev, V.S. Ignatchik, Y.P. Anisimov. - Text : direct // Scientific journal “Military Engineer”. - 2021. - №4 (22). - С. 5-9.
2. Burkova, S.A.; Shan'yazov, I.A., Sovernye metodov purification of the pulp and paper enterprises waste water / S.A. Burkova, I.A. Shan'yazov. - Text : direct // International scientific journal “VESNIK NAUKI”. - 2021. - NO. 6 (39) VOL. 2 - P. 169-171.
3. Nasirova N.K., Turabdjanov S.M., Mukhamedov J.K., Methods of wastewater treatment of pulp and paper enterprises / N.K. Nasirova, S.M. Turabdjanov, J.K. Mukhamedov. - Text : direct // Book of abstract “WOMEN IN STEM” International Forum, Tashkent, February 13 - 15, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10643244> - 2024. - С. 163-164.
4. Information about the company “Kondopoga Pulp and Paper Mill”: [website]. - URL: <https://alestech.ru/factory/150-kondopozhskiy-tsbk>. - Text : electronic.
5. Geles I.S., Vasilieva N.A., Korzhova M.A., Composition of fatty acids of “Belvitamyl” of Kondopoga Pulp and Paper Mill and excessive activated sludge of Segezha Pulp and Paper Mill / I.S. Geles, N.A. Vasilieva, M.A. Korzhova. - Text : direct // Leading scientific journal “Forest Gazette”. - 2010. - №4. - С.164-167.
6. Timofeev, P.A., Justification of the development of a modern incinerator unit with the possibility of burning oil residues / P.A. Timofeev. - Text : direct // Proceedings of the Krylov State Research Center. - 2018. - Special. issue No. 1 - P. 142-145.
7. Kovalev, D.A., Theory of automatic control: Practicum / D.P. Kovalev, V.A. Sharyakov, O.L. Sharyakova. - Text : electronic // SPb.: VShTE SPbGTURP. - 2022. - С. 134.
8. Gorobchenko, S. L., ERP-systems for armature enterprises / S. L. Gorobchenko, D. A. Kovalev, Y. S. Kovaleva. - Text : direct // Truboprovodnaya armature and equipment. - 2022. - № 3 (120). - С. 58-61.
9. Surikov, V. N., Increasing the efficiency of the regulating armature application in the modern control systems of technological processes / V. N. Surikov, S. L. Gorobchenko, D. A. Kovalev // Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. - 2020. - № 4. - С. 105-111.
10. Sagdeeva G.S., Patrakova G.R., Recycling of production and consumption waste using their resource potential / G.S. Sagdeeva, G.R. Patrakova. - Text : direct // Vestnik of Technological University. - 2014 - vol.17, v.6 - P. 194-198.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

канд. техн. наук, доцент **Ковалёв Дмитрий Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики
аспирант **Прылипко Егор Сергеевич**,
доктор техн. наук, профессор **Русинов Леон Абрамович**,
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы автоматизированной диагностики содорегенерационных котлоагрегатов, используемых в целлюлозно-бумажных производствах. Основное внимание уделено диагностике процессов регенерации черного щелока. Описаны возможности применения экспертных систем, нейронных сетей, нечеткой логики и математического моделирования для своевременного выявления и прогнозирования неисправностей. Подчеркивается необходимость внедрения онлайн-инструментов мониторинга для повышения точности диагностики и предотвращения аварийных ситуаций. Приводится анализ преимуществ и недостатков различных методов диагностики, предлагаются перспективы интеграции методов искусственного интеллекта для адаптивного управления и прогнозирования отклонений.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, автоматизированная диагностика, баланс серы и натрия, теплотворная способность, системы технического зрения, машинное обучение, математическое моделирование, целлюлозно-бумажное производство.

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF AUTOMATED DIAGNOSTICS AND CONTROL OF SODA RECOVERY BOILERS

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kovalev Dmitrii Alexandrovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy
PhD Student **Prylipko Egor Sergeevich**,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Rusinov Leon Abramovich,
Saint Petersburg State Technological
Institute (Technical University),
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article explores modern methods of automated diagnostics for soda recovery boilers used in pulp and paper production. The focus is on the diagnostics of black liquor recovery processes. The paper discusses the application of expert systems, neural networks, fuzzy logic, and mathematical modeling for timely fault detection and prediction. The need for implementing online monitoring tools to enhance diagnostic accuracy and prevent emergency situations is emphasized. An analysis of the advantages and disadvantages of various diagnostic methods is provided, along with prospects for integrating artificial intelligence methods for adaptive control and deviation prediction.

Keywords: soda recovery boiler, automated diagnostics, sulfur and sodium balance, calorific value, machine vision systems, machine learning, mathematical modeling, pulp and paper production.

Содорегенерационные котлоагрегаты (СРК) являются неотъемлемым элементом целлюлозно-бумажных производств, обеспечивая комплексное решение задач по утилизации побочных продуктов производства и регенерации используемых химикатов. Основной задачей этих агрегатов является переработка черного щелока – побочного продукта процесса варки целлюлозы, содержащего органические остатки и неорганические соли. В результате сжигания черного щелока в содорегенерационном котле происходит восстановление химических веществ, таких как сульфид натрия и карбонат натрия, которые затем возвращаются в процесс варки, что позволяет сократить расходы на закупку новых химикатов и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Управление СРК представляет собой сложный многофакторный процесс, требующий учета множества взаимосвязанных параметров, таких как температура, давление, состав черного щелока и условия подачи воздуха. Сложность процесса повышает вероятность возникновения внештатных ситуаций, что может привести к снижению эффективности, увеличению вредных выбросов и авариям [1, 2].

Необходимость оперативной диагностики аварийных ситуаций становится критически важной для обеспечения безопасной и эффективной работы СРК. Своевременное обнаружение и анализ отклонений в работе системы позволяют принять оперативные меры по их устранению, минимизируя риск негативных последствий. Однако одним из основных ограничений является недостаток онлайн-инструментов для мониторинга ключевых параметров процесса, таких как вязкость и теплотворная способность черного щелока, размер капель при распылении, высота и пористость слоя топлива.

Одним из основных препятствий для **оперативной диагностики аварийных ситуаций** в содорегенерационных котлоагрегатах является недостаток онлайн-инструментов для измерения ключевых параметров процесса. Отсутствие данных о переменных состояния, таких как состав и вязкость черного щелока, его теплотворная способность, размер капель при распылении, высота и пористость огарка, а также некоторых температурных показателях, затрудняет своевременное обнаружение отклонений. Эволюция технологий управления и автоматизации СРК связана с необходимостью более

точного и адаптивного контроля за параметрами процесса при минимизации человеческого вмешательства [3, 4].

Характеристика СРК как объекта автоматизированной диагностики

Содорегенерационный котлоагрегат представляет собой сложное инженерное устройство, выполняющее функции химического реактора, в котором одновременно протекает множество взаимосвязанных физических и химических процессов. Основной компонент агрегата – топка котла, где происходят ключевые этапы переработки черного щелока, такие как:

- подача воздуха и его смешивание с газами в топке;
- подача черного щелока и его распыление на капли;
- сушка капель черного щелока;
- пиролиз черного щелока и сгорание пиролизных газов;
- восстановление серных соединений до сульфида натрия;
- слив расплавленной соли (плава), состоящей из сульфида и карбоната натрия.

Кроме перечисленных основных процессов, в топке СРК происходят также менее желательные процессы, включающие испарение соединений натрия и серы, что приводит к образованию отложений, которые снижают эффективность теплопередачи и способствуют коррозии оборудования, что требует дополнительных мер по очистке и защите теплообменных поверхностей [5-7].

Поддержание стабильного технологического процесса требует глубокого понимания перечисленных физико-химических процессов, происходящих в СРК, а также эффективного использования автоматизированных систем диагностики. Автоматизированная диагностика играет ключевую роль в оперативном выявлении отклонений и возможных неисправностей в процессе сжигания черного щелока. Сложность процесса сжигания и восстановления химических соединений в СРК создает ряд особенностей, которые усложняют диагностику и требуют постоянного мониторинга ключевых параметров для предотвращения аварийных ситуаций и поддержания эффективности работы [8].

Многомерность процесса

Одной из ключевых особенностей СРК как объекта диагностики является наличие множества взаимосвязанных входных и выходных переменных. Так, подача черного щелока и воздуха в топку должны быть синхронизированы для обеспечения оптимальных условий сгорания и восстановления химикатов. Эти параметры оказывают взаимное влияние друг на друга, и даже небольшие отклонения могут привести к значительным изменениям в работе котла [9, 10].

Таблица 1 – Взаимосвязь ключевых параметров СРК

Параметр	Описание	Связанные параметры	Возможные последствия отклонений
Расход черного щелока	Количество черного щелока, подаваемого в топку за единицу времени	Расход воздуха, температура, скорость сжигания	Неполное сгорание, отложения, снижение тепловой эффективности
Расход воздуха	Объем воздуха, подаваемого в топку, для поддержания процессов горения и восстановления	Расход щелока, температура, состав дымовых газов	Неполное сгорание, избыточное охлаждение, повышение выбросов
Температура в топке	Температурный режим в различных зонах топки, важный для процессов сжигания, пиролиза и восстановления	Расход щелока, расход воздуха, скорость сжигания	Накопление несгоревших остатков, испарение натрия и серы
Скорость сжигания	Скорость сжигания органических и неорганических веществ в топке	Температура, расход воздуха	Неполное восстановление химикатов, увеличение углеродных остатков
Влажность черного щелока	Содержание влаги в щелоке перед подачей в топку.	Температура, расход воздуха	Увеличение тепловой нагрузки, снижение эффективности
Состав дымовых газов	Концентрация компонентов в отходящих газах, таких как кислород, угарный газ и сероводород	Расход воздуха, температура, скорость сжигания	Повышение выбросов угарного газа и недожженных компонентов

Необходимость быстрой адаптации к изменяющимся условиям

Состав и физические свойства черного щелока могут существенно изменяться в зависимости от качества исходного сырья, условий производства и режимов работы других участков производства целлюлозы. Эти изменения требуют от системы управления диагностики быстро адаптироваться, чтобы поддерживать стабильные условия сгорания и восстановления химических веществ. Однако создание такой адаптивной системы, которая могла бы

эффективно справляться с этими изменениями в реальном времени, представляет собой сложную техническую задачу [11].

Учет динамических свойств системы

СРК обладает значительной инерцией и сложной динамикой, что затрудняет управление в условиях быстро меняющихся внешних факторов. Например, изменение состава щелока может не сразу привести к изменениям температуры и давления, что создает задержки в выработке системой диагностикой корректирующих воздействий. Необходимость учета этих динамических свойств требует использования сложных математических моделей и алгоритмов управления, способных предсказывать поведение системы и компенсировать задержки [12, 13].

Основные подходы, применяемые в автоматизированной диагностике СРК

Темпы развития автоматизации СРК зависят от ряда ключевых факторов, включая эволюцию технологических процессов и их влияние на проектирование и возможности автоматизации, совершенствование измерительных приборов и моделей, а также разработку стратегий управления. Одной из главных проблем является отсутствие онлайн-инструментов для измерения таких важных параметров, как вязкость и состав черного щелока, теплотворная способность, высота и пористость огарка, а также температурные показатели и размеры капель при распылении. Эти параметры имеют критическое значение для стабильности работы СРК и требуют постоянного мониторинга для своевременного выявления неисправностей и отклонений.

Одной из главных проблем автоматизированной диагностики СРК является измерение температуры в топке котла. В современных условиях, где сжигание чёрного щелока должно быть оптимально сбалансированным для эффективной регенерации химикатов, малейшие отклонения температуры могут привести к серьёзным проблемам. Недостаточно точные приборы могут не зафиксировать локальные перегревы или, наоборот, участки с недостаточной температурой, что снижает эффективность сжигания и может привести к неполной регенерации химикатов. Кроме того, температурные колебания могут привести к ухудшению качества варочного раствора и увеличить производственные потери.

Существующие методы измерения температуры в топке, такие как термопары, пирометры и фотоэлектрические пирометры, обладают ограничениями. Термопары, к примеру, могут не давать точной картины температурного распределения, поскольку фиксируют температуру только в конкретных точках, а температурные поля в топке могут быть весьма неоднородными. Пирометры и фотоэлектрические пирометры, хотя и более точные, также могут сталкиваться с проблемами, такими как влияние на измерения высоких концентраций золы и других частиц в газах, что затрудняет точное измерение температуры в рабочей зоне топки [14-16].

Контроль процесса горения также вызывает трудности. Определение полноты сгорания чёрного щелока и своевременная реакция на возможные отклонения в процессе требуют использования чувствительных и точных газоанализаторов, которые могли бы фиксировать концентрацию таких газов, как кислород, углекислый газ и другие продукты сгорания. Однако даже

современные приборы для анализа дымовых газов могут столкнуться с проблемами при работе в условиях высоких температур, а также при наличии агрессивных сред и сложных химических составов, присутствующих в процессе сжигания щелока.

Трудности с анализом состава газов в топке напрямую влияют на точность регулирования процесса подачи воздуха. Ошибки в определении соотношения топливо-воздух могут привести к нарушению процессов горения, что в свою очередь снижает эффективность всего котлоагрегата. Проблемы возникают также в связи с изменениями состава чёрного щелока в зависимости от типа используемой древесины или изменений в технологии производства [17].

С учетом особенностей процесса, таких как многомерность и сложность динамики, были выбраны наиболее подходящие методы диагностики, применительно к процессу регенерации черного щелока в СРК (таблица 2).

Таблица 2 – Методы диагностики, пригодные для процесса регенерации черного щелока в СРК

Метод	Характеристика	Преимущества	Недостатки
Математические модели	Модели, основанные на физических уравнениях (например, законы термодинамики и гидродинамики), описывающие процесс регенерации и сжигания черного щелока	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая точность моделирования и диагностики. - Учет динамических изменений процесса. - Прогнозирование аварийных ситуаций. - Поддержка оптимизации процессов 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуют глубокого знания процесса. - Необходимы точные данные для калибровки. - Высокие затраты на вычисления, особенно в реальном времени
Экспертные системы	Основаны на продукционных правилах «если-то», используют знания и опыт экспертов для создания диагностических алгоритмов	<ul style="list-style-type: none"> - Простота внедрения на основе накопленных знаний. - Быстрая диагностика типичных неисправностей. - Удобны для стандартных ситуаций и рутинных операций 	<ul style="list-style-type: none"> - Ограничены набором правил - Не справляются с новыми или нестандартными проблемами - Требуют регулярного обновления базы знаний

Метод	Характеристика	Преимущества	Недостатки
Нейронные сети	Машинное обучение, способное выявлять сложные зависимости между параметрами процесса, обучаясь на больших объемах данных	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая гибкость. - Могут выявлять скрытые закономерности в данных. - Прогнозирование неисправностей до их фактического проявления. - Способны адаптироваться к изменяющимся условиям процесса. - Повышают точность диагностики с накоплением данных 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуют больших объемов данных для обучения. - Сложны в интерпретации («черный ящик»). - Высокие вычислительные затраты на обучение и работу.
Статистические модели (МГК, регрессия)	Анализ данных на основе статистических методов, таких как множественная линейная регрессия, для выявления зависимостей и трендов	<ul style="list-style-type: none"> - Легкость реализации. - Способны эффективно анализировать данные, не требуя детальных знаний процесса. - Предсказывают на основе трендов и исторических данных. - Легкость внедрения при наличии статистических данных 	<ul style="list-style-type: none"> - Могут быть неэффективны для сложных нелинейных процессов. - Зависимость от качества данных (ошибки в данных могут снизить точность прогнозов)
Нечеткая логика	Использует «мягкие» пороги и интервалы для оценки параметров, что позволяет обрабатывать данные в условиях неопределенности	<ul style="list-style-type: none"> - Хорошо работает при неопределенности и неполноте данных. - Гибкость в установлении порогов. - Может дать рекомендации до достижения критических значений. - Имитирует человеческую логику принятия решений 	<ul style="list-style-type: none"> - Менее точна, чем математические модели. - Сложна в настройке и требует тщательной разработки правил. - Ограничена при сильных отклонениях параметров.

С развитием технологий и повышением требований к эффективности промышленных процессов на первый план выходят такие методы, как модельно-

предиктивное управление (МРС), адаптивное управление и нейронные сети. Эти подходы не только улучшают управление процессами, но и находят широкое применение в автоматизированной диагностике. МРС и адаптивное управление, используя математические модели и алгоритмы предсказания, позволяют своевременно выявлять отклонения от нормы и прогнозировать будущие неисправности, что существенно повышает точность диагностики. Нейронные сети, анализируя большие объемы данных, способны предсказывать потенциальные сбои и оптимизировать диагностические процессы, обучаясь на примерах предыдущих ситуаций [18].

Существенным шагом вперед в развитии автоматизированной диагностики стало внедрение технологий на основе нечеткой логики и нейронных сетей. Эти методы позволяют гибко и оперативно реагировать на сложные и нестабильные процессы, которые сложно поддаются точному прогнозированию. Нейронные сети, анализируя большой объем данных, способны предсказать изменения в работе системы, что позволяет диагностировать потенциальные неисправности до их возникновения и снизить вероятность аварийных ситуаций [19-21].

Актуальные исследования в области диагностики СРК также рассматривают возможность интеграции с искусственным интеллектом и машинным обучением для повышения точности прогнозов и автоматической адаптации систем к изменяющимся условиям. Это позволит значительно повысить надежность и эффективность работы котлоагрегатов, минимизируя риск аварий и снижая воздействие на окружающую среду.

Применение систем технического зрения является важным инструментом для диагностики нарушений работы СРК. Эти системы позволяют в реальном времени отслеживать ключевые параметры процесса, такие как форма и объем огарка, температура в топке и состояние теплообменных поверхностей. Благодаря этому можно оперативно выявлять и устранять отклонения, которые могут привести к снижению эффективности или возникновению неполадок [22].

Рисунок 1 демонстрирует применение систем технического зрения в СРК для мониторинга и контроля различных аспектов работы котла.

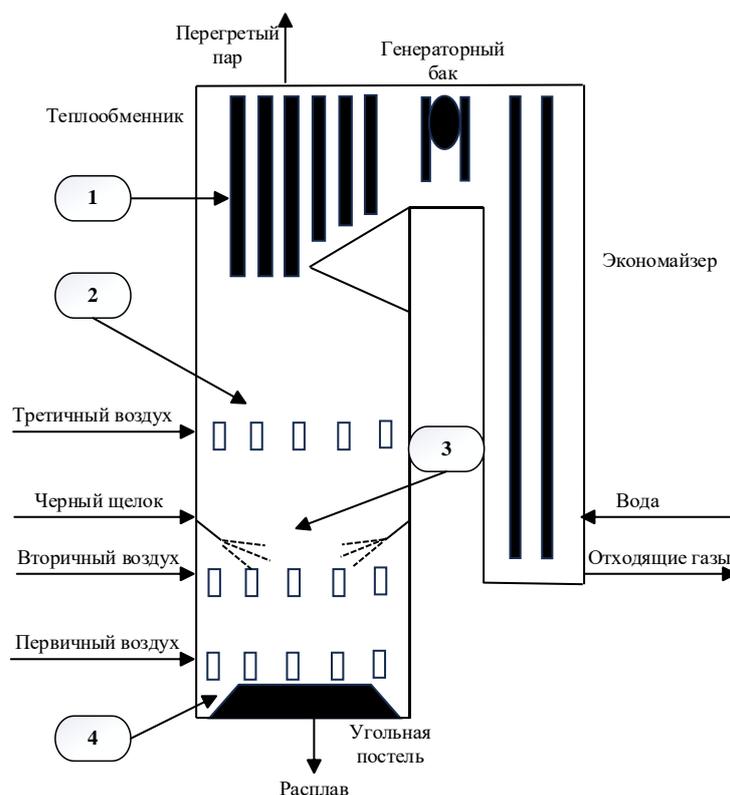


Рисунок 1 – Возможные места для установки камер технического зрения

Одним из важных элементов системы технического зрения являются **камеры, установленные в зоне теплообменников (1)**. Эти камеры предназначены для контроля состояния теплообменных поверхностей, выявления возможных загрязнений (нагаров) и структурных повреждений. Визуальный контроль помогает своевременно обнаружить и предотвратить возможные аварийные ситуации, связанные с нарушением целостности оборудования, что, в свою очередь, позволяет поддерживать высокий уровень теплопередачи и общую эффективность работы котла [23].

Камеры в зоне смесительных желобов (2) контролируют объем, скорость движения и качество смеси, а также возможные засоры. Качество щелока и наличие мерцания (вспышек) являются важными показателями стабильности процесса восстановления химических веществ. Эти камеры позволяют оператору и системе управления вовремя реагировать на изменения в процессе и поддерживать оптимальные условия для восстановления химикатов.

Камеры, установленные в зоне **распылительных сопел черного щелока (3)**, обеспечивают мониторинг направления распыления, возможных засоров и размеров капель. Эти параметры критичны для обеспечения равномерного и полного сгорания щелока, что в свою очередь влияет на общую теплопередачу и эффективность работы котла. Контроль данных параметров помогает предотвратить образование недожогов и перегрева отдельных зон котла.

В нижней части котлоагрегата, в зоне огарка, установлены **камеры контроля огарка (4)**. Эти камеры мониторят форму и объем огарка, изменения температуры, а также возможные отложения на стенках котла. Важным аспектом является контроль за внезапным коллапсом огарка, что может существенно

повлиять на процесс горения и восстановление химических соединений. Точные данные о состоянии огарка позволяют оптимизировать процесс сжигания и избежать неэффективного использования топлива.

Заключение

Автоматизированная диагностика содорегенерационных котлоагрегатов (СРК) является важнейшим фактором обеспечения стабильности и эффективности их работы. Внедрение современных методов, таких как системы технического зрения, математическое моделирование, нейронные сети и нечеткая логика, позволяет не только выявлять неисправности на ранних стадиях, но и прогнозировать их развитие, что значительно повышает безопасность эксплуатации и минимизирует риски аварийных ситуаций. Особое внимание необходимо уделить применению экспертных систем, которые демонстрируют высокую пригодность для диагностики процессов регенерации черного щелока в СРК. Эти системы обладают высокой скоростью обработки данных и возможностью оперативного реагирования на стандартные неисправности на основе правил и накопленного опыта, что делает их эффективным инструментом в условиях ограниченности данных и сложности процессов.

Несмотря на внедрение указанных технологий, следует подчеркнуть, что область автоматизированной диагностики процессов регенерации черного щелока в СРК на сегодняшний день остается недостаточно исследованной и крайне актуальной темой для дальнейших научных исследований. Недостаток онлайн-инструментов для мониторинга таких ключевых параметров, как вязкость и теплотворная способность черного щелока, размер капель при распылении и состояние огарка, существенно ограничивает возможности своевременного выявления и предотвращения отклонений в работе котлоагрегатов.

Перспективы дальнейшего развития автоматизированной диагностики заключаются в более глубокой интеграции методов искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволит повысить точность прогнозирования и обеспечить адаптацию систем диагностики к изменяющимся условиям технологического процесса. Проведение дальнейших исследований в данной области представляется крайне актуальным для повышения эффективности работы СРК, снижения эксплуатационных затрат и минимизации экологических рисков. Таким образом, автоматизированная диагностика процессов регенерации черного щелока является перспективным направлением, требующим активного изучения и развития для обеспечения устойчивой и безопасной работы целлюлозно-бумажных производств.

Список литературы:

1. Горьковой, Е. В. Диагностика состояния содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения эффективности его работы: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2012. – 24 с.

2. Романова, Л. В. Факторы, влияющие на безопасную эксплуатацию содорегенерационного котлоагрегата при сжигании сульфатных черных щелоков / Л. В. Романова, А. В. Полозов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. – 2020. – № 4. – С. 271–278.
3. Ковалёв, Д. А. Разработка диагностической модели для подсистем содорегенерационного котлоагрегата / Д. А. Ковалёв, Л. А. Русинов, В. В. Куркина // Системный синтез и прикладная синергетика: материалы XI Всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург: СПбГТИ, 2022. – С. 40–45. DOI: 10.18522/syssyn-2022-6.
4. Sharp, W.B.A. Inspection of Recovery Boilers // TAPPI Journal. – 2001. – № 5. – С. 5-10.
5. Dhivakar, S., Sureshkumar, T. Hazards Identification in Soda Recovery Boiler // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2020. – Vol. 07, Issue 08. – P. 3872–3874.
6. Kovalev, D. A., Rusinov, L. A. Increase in Environmental Safety of Recovery Boiler // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – Vol. 990, No. 1. – 012068. DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012068.
7. Сиваков, В. П. Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование: учебное пособие / В. П. Сиваков, А. В. Вураско, В. И. Музыкантова. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2015. – 141 с.
8. Tran, H., Arakawa, Y. Recovery Boiler Technology in Japan // Proceedings of the 2001 Tappi Engineering Conference. – 2001. – P. 1–8.
9. Али, Р. Х., Абдель Саме, А. А., Агталла, М., Маграбие, Х. М. Энергетический и эксергетический подход к когенерационной системе в целлюлозно-бумажной промышленности с химической утилизацией черного щелока и соды // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 42. – P. 102712. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102712.
10. Лежюн, М., Лозин, В., Лозина, И., Рагаб, А., Якут, С. Недавние достижения в теории и практике логического анализа данных / М. Лежюн, В. Лозин, И. Лозина, А. Рагаб, С. Якут // European Journal of Operational Research. – 2019. – Vol. 275. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.011.
11. Дамасено, А. Одновременное прогнозирование производства пара и эффективности восстановления в котлах целлюлозно-бумажного процесса / А. Дамасено, Л. Карнейро, Н. Андраде, С. Васконселос, Р. Брито, К. Брито // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 275. – P. 124103. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124103.
12. Льюис, Д. Диагностика неисправностей на основе знаний с адаптивным обновлением вероятностей в секции каустизации целлюлозно-бумажного завода / Д. Льюис, Х. Романьоли, К. Бигаран // IFAC Papers. – 2017. – Vol. 50. – P. 87–93. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.11.149.

- 13.Макколум, К. Критический обзор систем воздушного снабжения котлов для восстановления щелока / К. Маккулум // TAPPI Journal. – 1987. – Vol. 40. – P. 281–290.
- 14.Kumar, R., Ray, A.K. Artificial neural network for solving paper industry problems: A review // Journal of Scientific & Industrial Research. – 2006. – Vol. 65, No. 7. – P. 565–573.
- 15.Vakkilainen, E. K., Hamaguchi, M. Grouping statistically emissions from a recovery boiler: Conference paper. – 2010. – 10 с. DOI: 10.1016/j.energy.2010.06.015.
- 16.Cresko, J., Thekdi, A., Nimbalkar, S., et al. Thermal process intensification: Transforming the way industry uses thermal process energy. – Advanced Manufacturing Office, US Department of Energy, 2022. – 250 с.
- 17.Pukkila, N. Utilizing model predictive control in continuous cooking application: Master's thesis. – Tampere University of Technology, 2015. – 69 с.
- 18.Hupa, M. M. Recovery boiler chemical principles. – Åbo Akademi University, 2007. – 75 с.
- 19.Leiviskä, K. Introduction to applications in pulp and paper industry: Conference paper. – 1998. – 12 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2039.6485.
- 20.Schratzer, B. Modelling unbleached pulp line in Matlab Simulink: Master's thesis. – Vienna University of Technology, 2014. – 150 с.
- 21.Platon, R., Demirli, K., Amazouz, M. Soft sensor development for black liquor concentration in the Kraft pulping process. – CANMET Energy Technology Centre, 2009. – 85 с.
- 22.Välimäki, E., Vakkilainen, E. K. Effect of lignin separation to black liquor and recovery boiler operation: Conference paper. – TAPPI, 2009. – 12 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2039.6485.
- 23.Partanen, V. Separation of lignin in Pulp Mill process and its effect on sodium-sulphur balance: Master's thesis. – Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2015. – 68 с.

References:

1. Gorkovoy, E. V. Diagnostics of the state of the sodoregeneration boiler unit for the purpose of increasing the efficiency of its operation: abstract of Cand. Cand. of Technical Sciences. - St. Petersburg: St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2012. - 24 с.
2. Romanova, L. V., Polozov, A. V. Factors affecting the safe operation of sodoregeneration boiler unit at combustion of sulfate black liquors // Bulletin of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. - 2020. - № 4. - С. 271-278.
3. Kovalev, D. A., Rusinov, L. A., Kurkina, V. V. Development of the diagnostic model for the subsystems of the soda regeneration boiler unit // System synthesis and

- applied synergetics: Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference. - St. Petersburg: SPbGTI, 2022. - C. 40-45. DOI: 10.18522/syssyn-2022-6.
4. Sharp, W.B.A. Inspection of Recovery Boilers // TAPPI Journal. - 2001. - № 5. - C. 5-10.
 5. Dhivakar, S., Sureshkumar, T. Hazards Identification in Soda Recovery Boiler // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). - 2020. - Vol. 07, Issue 08. - P. 3872-3874.
 6. Kovalev, D. A., Rusinov, L. A. Increase in Environmental Safety of Recovery Boiler // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. - 2022. - Vol. 990, No. 1. - 012068. DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012068.
 7. Sivakov, V. P., Vurasko, A. V., Muzykantova, V. I. Regeneration of chemicals and heat in recovery boiler units. Device and diagnostics: textbook. - Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2015. - 141 c.
 8. Tran, H., Arakawa, Y. Recovery Boiler Technology in Japan // Proceedings of the 2001 Tappi Engineering Conference. - 2001. - P. 1-8.
 9. Ali, R. H., Abdel Sameh, A. A., Attallah, M., Maghrabieh, H. M. Energy and exergy approach to cogeneration system in pulp and paper industry with chemical utilization of black liquor and soda // Case Studies in Thermal Engineering. - 2023. - Vol. 42. - P. 102712. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102712.
 10. Lejeune, M., Lozin, V., Lozina, I., Ragab, A., Yakut, S. Recent advances in the theory and practice of logical data analysis // European Journal of Operational Research. - 2019. - Vol. 275. - P. 1-15. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.011.
 11. Damaseno, A., Carneiro, L., Andrade, N., Vasconcelos, S., Brito, R., Brito, C. Simultaneous prediction of steam production and recovery efficiency in pulp and paper process boilers // Journal of Cleaner Production. - 2020. - Vol. 275. - P. 124103. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124103.
 12. Lewis, D., Romagnoli, J., Bigaran, C. Knowledge-based fault diagnosis with adaptive probability updating in the causticization section of a pulp and paper mill // IFAC Papers. - 2017. - Vol. 50. - P. 87-93. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.11.149.
 13. McCollum, C. A critical review of air supply systems for liquor recovery boilers // TAPPI Journal. - 1987. - Vol. 40. - P. 281-290.
 14. Kumar, R., Ray, A.K. Artificial neural network for solving paper industry problems: A review // Journal of Scientific & Industrial Research. - 2006. - Vol. 65, No. 7. - P. 565-573.
 15. Vakkilainen, E. K., Hamaguchi, M. Grouping statistically emissions from a recovery boiler: Conference paper. - 2010. - 10 c. DOI: 10.1016/j.energy.2010.06.015.
 16. Cresko, J., Thekdi, A., Nimbalkar, S., et al. Thermal process intensification: Transforming the way industry uses thermal process energy. - Advanced Manufacturing Office, US Department of Energy, 2022. - 250 c.
 17. Pukkila, N. Utilizing model predictive control in continuous cooking application: Master's thesis. - Tampere University of Technology, 2015. - 69 c.

18. Hupa, M. M. Recovery boiler chemical principles. - Åbo Akademi University, 2007. - 75 с.
19. Leiviskä, K. Introduction to applications in pulp and paper industry: Conference paper. - 1998. - 12 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2039.6485.
20. Schratzer, B. Modelling unbleached pulp line in Matlab Simulink: Master's thesis. - Vienna University of Technology, 2014. - 150 с.
21. Platon, R., Demirli, K., Amazouz, M. Soft sensor development for black liquor concentration in the Kraft pulping process. - CANMET Energy Technology Centre, 2009. - 85 с.
22. Välimäki, E., Vakkilainen, E. K. Effect of lignin separation to black liquor and recovery boiler operation: Conference paper. - TAPPI, 2009. - 12 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2039.6485.
23. Partanen, V. Separation of lignin in Pulp Mill process and its effect on sodium-sulphur balance: Master's thesis. - Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2015. - 68 с.

© Ковалёв Д. А., Прылипко Е. С., Русинов Л. А., 2024

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ

соискатель, преподаватель **Кузина Екатерина Ивановна**,
Военная академия связи им. С. М. Будённого,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Кузин Павел Игоревич**,
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлен обзор программируемых устройств и особенности применения каждого из них. В процессе осуществления своей деятельности технолог получает большое количество данных, анализ и обработка которых требуют огромного количества сил и времени. Анализ существующих программируемых устройств поможет выбрать оптимальный продукт при осуществлении автоматизации процессов.

Ключевые слова: промышленный контроллер, программируемый логический контроллер, автоматизация процессов.

APPLICATION OF PROGRAMMABLE DEVICES IN PROCESS AUTOMATION

Applicant, Lecturer **Kuzina Ekaterina Ivanovna**,
Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny.
Academic Advisor: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kuzin Pavel Igorevich,
St. Petersburg State Forest Engineering University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents an overview of programmable devices and peculiarities of application of each of them. In the process of carrying out its activities, a technologist receives a large amount of data, the analysis and processing of which require a huge amount of effort and time. The analysis of existing programmable devices will help to choose the optimal product when automating processes.

Keywords: industrial controller, programmable logic controller, process automation.

Промышленный контроллер, также известный как программируемый логический контроллер (ПЛК) – это цифровой компьютер, используемый для автоматизации электромеханических процессов [1].

Все типы ПЛК созданы для выполнения программ управления. Их объединяет фундаментальная концепция, сбор и обработка данных, а затем отправка управляющих сигналов на исполнительные механизмы (рисунок 1).

Промышленные контроллеры имеют как цифровые входы (DI), так и цифровые выходы (DO). Цифровые входы используются для обнаружения изменений в условиях, таких как температура или уровень напряжения, а цифровые выходы – для управления двигателями или другими исполнительными механизмами на основе результатов логических операций, выполняемых процессором ПЛК [2].



Рисунок 1 – Применение промышленных контроллеров

Кроме того, многие современные ПЛК включают:

- аналоговые входы (AI) для измерения непрерывных величин, таких как давление или скорость потока во времени;
- аналоговые выходы (AO) для управления серводвигателями;
- коммуникационные порты для подключения удаленных систем;
- модули памяти для хранения данных;
- пользовательские интерфейсы, такие как сенсорные экраны;
- интерфейсы программирования для настройки программ, написанных с помощью специализированных программных пакетов.

Контроллеры находят множество применений в современной промышленности, включая робототехнику, системы машинного зрения, системы автоматизации производства, автоматизированные системы обработки материалов, промышленные сети управления (например, SCADA), системы управления технологическими процессами (например, PID), регуляторы скорости вращения двигателя (например, VFDS) и многое другое.

ПЛК могут использоваться в любых промышленных условиях, где требуется автоматизация, например, на автомобильных заводах, производствах пищевой промышленности, электростанциях, химических и лесопромышленных предприятиях [3].

Каждый тип устройства имеет свои уникальные преимущества в зависимости от его предполагаемого применения, но все они служат одной цели: обеспечение надежной автоматизации с прецизионной точностью при управлении оборудованием в промышленных условиях [4].

Необходимо понимание того, что на контроллерах сделать нельзя.

Устройства, которые мы рассматриваем, предполагает процесс от момента срабатывания датчика до реакции контроллера в 100 мс. Число в 100 мс, как среднее для большинства ПЛК время реакции, на которое можно рассчитывать. Оно может быть меньше или больше в отдельных приборах, но не в тысячи раз. Иными словами, в некоторых случаях у вас есть возможность получить время реакции 5 миллисекунд, но это не будут микро- или наносекунды, как если бы мы использовали оборудование типа микроконтроллеров или специализированных систем управления (ЧПУ) [5].

Именно поэтому контроллеры не подойдут, например, для реализации перемещения с использованием шаговых двигателей.

Частый вопрос: «А можно ли автоматизировать станок с ЧПУ при помощи контроллера?» В целом, можно, но это нецелесообразно. Для ЧПУ станков существуют специальные контроллеры ЧПУ, которые имеют весь необходимый функционал. Менять их на ПЛК нет никакого смысла. Во-первых, это достаточно сложно, а во-вторых ПЛК не создан для этих целей из-за своего времени реакции.

Однако можно использовать контроллер для управления ЧПУ станком или линией ЧПУ станков, например, чтобы отправлять им G-код или организовать их последовательное включение-выключение. Также есть сферы, где ПЛК не применяются по юридическим причинам из соображений безопасности. Это медицина и пожарно-охранные системы.

Дело в том, что в перечисленных сферах весь программно-аппаратный комплекс, включающий контроллер и программу на нем, должны быть сертифицированы. А программируемый контроллер невозможно сертифицировать с «программной стороны», ведь он обычно предусматривает перепрограммирование. И чтобы получить сертификат и на ПО, и на устройство, мы должны исключить возможность замены этого самого ПО. Такая сертификация – достаточно сложный процесс с юридической точки зрения, и обычно это не имеет смысла. Ведь для таких специальных нужд уже существует свое сертифицированное оборудование.

Типы программируемых устройств. Условно можно выделить три типа программируемых устройств, используемых в промышленности (рисунок 2):

- программируемое реле (ПР);
- программируемый логический контроллер (ПЛК);
- промышленный компьютер (ПК).



Рисунок 2 – Типы программируемых устройств

На самом деле, такое деление достаточно условно. Особенно сложно найти грань между ПР и ПЛК.

Современные ПР (умные реле или смартреле) отличаются от ПЛК тем, что это устройства «малой автоматизации». При этом ПР может быть практически тем же самым устройством, что и ПЛК. Но количество вводов-выводов у смартреле обычно значительно меньше. Условно, к ПР не получится подключить 1000 датчиков, а к ПЛК получится.

Можно было бы подумать, что смартреле отличаются от ПЛК в плане производительности, что у них используются более слабые процессоры, а в ПЛК – более мощные. Но это не так.

Рассмотрим типичный пример. Есть ПЛК Segnetix Pixel, который имеет в своём ядре микросхему ATmega328. Это восьмиразрядный микроконтроллер. Если же мы возьмем смартреле Owen ПР200, то в нём используются STM32F103, а это 32-разрядный процессор, который примерно в 40 раз мощнее, чем в Pixel. При этом ПР 200 – это все-таки смартреле, а Pixel – ПЛК, к которому можно подключить 1000 датчиков.

Следующими по списку идут ПЛК. Это широко распространённый тип приборов, который используется на большинстве объектов. Тройка лидеров на отечественном рынке – Owen, Segnetics и МЗТА, но есть и другие, менее известные. Что касается импортных производителей, то их множество. Самые популярные: Siemens, Omron, Schneider, Danfoss, Delta. В некоторых странах есть свой рынок с уникальными производителями, которых мы не встречали здесь, а они там не встречали наших контроллеров.

Среди ПЛК можно выделить два вида: непосредственно программируемые контроллеры и конфигурируемые контроллеры.

Поставляемый с завода контроллер не умеет ничего. В лучшем случае, если подать на него питание, он напишет что-нибудь дружелюбное на экране или, если у него нет экрана, включит светодиод. Все алгоритмы работы закладывает туда именно программист. Он описывает все действия, каждый символ на экране, каждую вспышку светодиода, все входы-выходы, абсолютно всё. Такой контроллер способен управлять любой системой. Это свободнопрограммируемый контроллер.

Конфигурируемые контроллеры не являются программируемыми. Работа с ними происходит примерно так же, как настройка Wi-Fi роутера. Ведь никто не говорит, что сотрудники техподдержки, которые пришли подключить интернет, занимаются программированием. Верно, будет назвать это конфигурированием. Аналогично при работе с конфигурируемыми ПЛК специалисты выбирают нужные параметры, соответствующие данной системе, условиям, объекту, и заставляют систему работать по алгоритмам, заранее заложенным на заводе. Вмешаться в работу такого устройства не представляется возможным. Такие контроллеры как раз и используются в системах коммерческого учёта энергоресурсов, в пожарно-охранных системах и в медицине. Работа с ними не требует высокой квалификации. Чаще всего те специалисты, которые занимаются монтажом, также занимаются и пусконаладкой этих приборов.

Отдельно нужно выделить ПЛК с операционной системой Linux. Такие устройства (особенно, если производитель не закрывает полноправный доступ к операционной системе) по своей сути, являются ПК.

Но из-за более тонкого технологического процесса, применяемого для производства их процессоров (транзисторы меньше, чем в обычных микроконтроллерах, вроде stm32 или avr) такие ПЛК имеют большую электромагнитную уязвимость. Иными словами, надежность их работы меньше, что делает их непригодными для прямого управления ответственными узлами. На такую задачу лучше поставить надежный прибор с RTOS на борту.

Однако контроллеры с Linux незаменимы для взаимодействия через Интернет, имеют безграничные возможности для расширения состава системы и, таким образом, могут, в том числе, поддерживать любые протоколы передачи данных.

Теперь может возникнуть ощущение, что у нас есть выбор, с каким контроллером мы будем работать. Что если контроллеров так много, то можно выбрать любой из них и научиться работать с ним. Но это не всегда так. Дело в том, что современные программисты чаще всего попадают на объект, когда уже какой-то контроллер есть и нужно запрограммировать именно его. Именно поэтому, для того, чтобы оставаться востребованным специалистом, нужно уметь программировать все контроллеры. Так есть возможность взять в работу практически любой объект.

Последний тип программируемых устройств – это ПК. В современном мире ПК используются в задачах, где требуется обработка большого количества информации в сжатые сроки. Например, из-за недостаточной вычислительной мощности на ПЛК невозможно реализовать алгоритмы машинного зрения. Поэтому для этой цели нужны ПК. Это же касается и применения искусственных нейронных сетей для различных задач.

Слабой стороной промышленных компьютеров является их низкая (по сравнению с ПЛК) надежность. К счастью, этот вопрос можно частично решить за счет резервирования компьютеров.

Система управления, построенная на резервируемых ПК, имеет много конкурентных преимуществ над системами с ПЛК. Нерешаемым остается только вопрос с быстродействием системы контроля, так как даже самые

высокопроизводительные системы на ПК не могут обеспечить удовлетворительного быстродействия ввода-вывода для некоторых промышленных задач, таких как позиционирование исполнительных механизмов, обработка сигналов энкодеров и т.д. Скорость выполнения программы на этих устройствах, несмотря на их более высокую производительность, никогда не превышает скорость ПЛК, а в некоторых случаях вообще составляет до 10 раз большее время.

В большинстве случаев работа с ПК предполагает шефмонтаж и шефналадку – это когда организация, которая поставляет оборудование, присылает своего специалиста для того, чтобы он произвел пусконаладочные работы на объекте. Это не всегда выгодно для управления производством.

Отдельно стоит упомянуть про одноплатные компьютеры (ОК), отладочные платы, Arduino и прочее (рисунок 3). Они так же являются программируемыми устройствами, но они не вписаны в стандарт МЭК 61131-3, несмотря на то, что некоторые из этих устройств можно запрограммировать на языках программирования стандарта МЭК 61131-3.

Основной причиной является то, что это не промышленные и не серийные устройства. Иными словами, если на объекте сделано решение при помощи Arduino, то рано или поздно оно сломается, и возникнет вопрос – на что его менять или как его починить.



Рисунок 3 – Одноплатный компьютер Firefly ROC-RK3588-RT

Хорошо, если специалист, который его устанавливал, все еще работает на объекте. Никто, кроме него, не сможет разобраться, а даже если сможет, то скорее всего это будет дороже, дольше и сложнее, чем собрать систему заново на промышленной автоматике.

Таким образом, можно сделать вывод, что для коммерческих целей при осуществлении автоматизации процессов целесообразно использовать серийные изделия, ПР, ПЛК, которые можно в любой момент заказать и приобрести у надежного поставщика, загрузить необходимое программное специализированное обеспечение и включить в систему на место вышедшего из строя оборудования. Так как это стандартизированное оборудование и выпускается в рамках международных стандартов. Тогда как одноплатные компьютеры, Arduino и прочие устройства лучше всего оставить для учебно-опытной автоматизации.

Список литературы:

1. Кузин, П. И. Внедрение новых технологий и их применение в военной области / П. И. Кузин // Вестник ИНЖЭКОНа. – Серия: Экономика. – 2012. – № 6. – С.281-283.
2. Бирюков, А. А. Электроника: учебное пособие / А. А. Бирюков, С. Е. Иванов, П. И. Кузин. – СПб. – Военная академия связи, 2018.
3. Байкова, О. В. Электронная техника: учебное пособие / О. В. Байкова, Н. П. Грачев, П. И. Кузин, И. А. Потапов. – СПб. – Военная академия связи, 2016.
4. Z. Zhu, W. Lu, L. Zhang and N. Ansari, "Dynamic Service Provisioning in Elastic Optical Networks With Hybrid Single-/Multi-Path Routing," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 1, pp. 15-22, Jan.1, 2013, doi: 10.1109/JLT.2012.2227683.
5. Наний О. Е. Форматы модуляции для оптических DWDM систем связи с канальной скоростью 40 и 100 Гбит / О. Е. Наний, В. Н. Трещиков // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2011. – № 8. – С. 76–78.

References:

1. Kuzin P.I. Introduction of new technologies and their application in the military field. Vestnik INZHECON. Series: Economics. 2012. №6. C.281-283.
2. Biryukov A.A., Ivanov S.E., Kuzin P.I. Electronics. Tutorial. SPb. Military Academy of Communications. 2018.
3. Baikova O.V., Grachev N.P., Kuzin P.I., Potapov I.A. Electronic Engineering. Study guide. SPb. Military Academy of Communications. 2016.
4. Z. Zhu, W. Lu, L. Zhang and N. Ansari, "Dynamic Service Provisioning in Elastic Optical Networks With Hybrid Single-/Multi-Path Routing," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 1, pp. 15-22, Jan.1, 2013, doi: 10.1109/JLT.2012.2227683.
5. O.E. Nanii, V.N. Treschikov Modulation Formats for Optical DWDM Communication Systems with Channel Rate 40 and 100 Gbit/s // T-Comm-Telecommunications and Transport. T. 2011. № 8. C. 76-78.

© Кузина Е. И., 2024

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОМОЩНОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И УСТРОЙСТВОМ СНЭ

аспирант **Марковчин Кирилл Владимирович**,
аспирант **Гугин Михаил Васильевич**,
канд. техн. наук, доцент **Ковалёв Евгений Николаевич**
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены принципы работы подключенного параллельно с сетью устройства СНЭ в режиме компенсации реактивной мощности и компенсации гармоник тока, вызванных мощной нелинейной нагрузкой. Представлены результаты моделирования в системе MatLab Simulink однофазной сети переменного тока с нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, маломощная сеть, фазовый угол, нелинейная нагрузка, компенсация нелинейности.

ANALYSIS OF LOW-POWER NETWORK OPERATION MODES WITH NONLINEAR LOAD AND A CFD DEVICE

Postgraduate Student **Markovchin Kirill Vladimirovich**,
Postgraduate Student **Gugin Mikhail Vasilievich**,
PhD in Technology, Associate Professor **Kovalev Evgeny Nikolaevich**.
Saint Petersburg State University
of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The principles of operation of the SNE device connected in parallel with the grid in the mode of reactive power compensation and compensation of current harmonics caused by a powerful nonlinear load are considered. The results of modelling in MatLab Simulink system of single-phase AC network with nonlinear load are presented

Keywords: energy storage device, low-power network, phase angle, nonlinear load, nonlinearity compensation.

Системы накопления электрической энергии (СНЭ) находят все более широкое применение в различных секторах электроэнергетики. Если сначала повышение интереса к СНЭ было связано с ростом возобновляемых источников энергии (ВИЭ) как к средству устранения дисбаланса между выработкой и

спросом на электроэнергию, то в настоящее время подавляющая доля реализованных проектов СНЭ не связана прямо с проблемами ВИЭ [1]. Помимо задач повышения эффективности генерации ВИЭ с помощью систем накопления электроэнергии решаются такие задачи как компенсация реактивной мощности, улучшение гармонического состава и симметрии напряжения, сглаживание пиков потребляемой мощности и резервирование при перерывах электроснабжения и т. п. [2].

Расчетные формулы, векторные диаграммы и графики типовых стационарных процессов для устройства накопления энергии, включенного параллельно с сетью, приведены, например, в работе [3]. Структура СНЭ, включающего двунаправленный преобразователь тока и аккумуляторную батарею, позволяет придать устройству накопления электроэнергии также функции компенсации реактивной мощности, функции активного фильтра гармоник.

Проблема с качеством гармонического состава электроэнергии в большой мере связана с применением мощных преобразователей частоты, ток этих преобразователей имеет существенную долю высших гармоник. О влиянии высших гармоник электропитания на электрооборудование и способах устранения этих гармоник есть множество публикаций [4, 5]. На рисунке 1 показан спектр тока сборной шины распределительного устройства (РУ), обслуживающего частотные электроприводы содорегенерационного котла.



Рисунок 1 – Состав гармоник тока на шинах распределительного устройства

В составе нагрузок РУ имеются нелинейные потребители, такие как мощные преобразователи частоты. Токи фаз $i_c(t)$ кроме основной гармоники 50 Гц содержат нелинейную составляющую $i_{нг}(t)$, эту составляющую принято выражать суммой высших гармоник порядка n . Если фазовый сдвиг тока ϕ_1 не равен нулю, то нагрузкой потребляется или генерируется реактивная мощность.

$$i_c(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_1) + i_{\text{нр}}(t), \quad (1)$$

где $i_{\text{нр}}(t) = \sum_{n \neq 1}^{\infty} \sin(n \cdot t - \varphi_n)$ – высшие гармоники тока нелинейных потребителей.

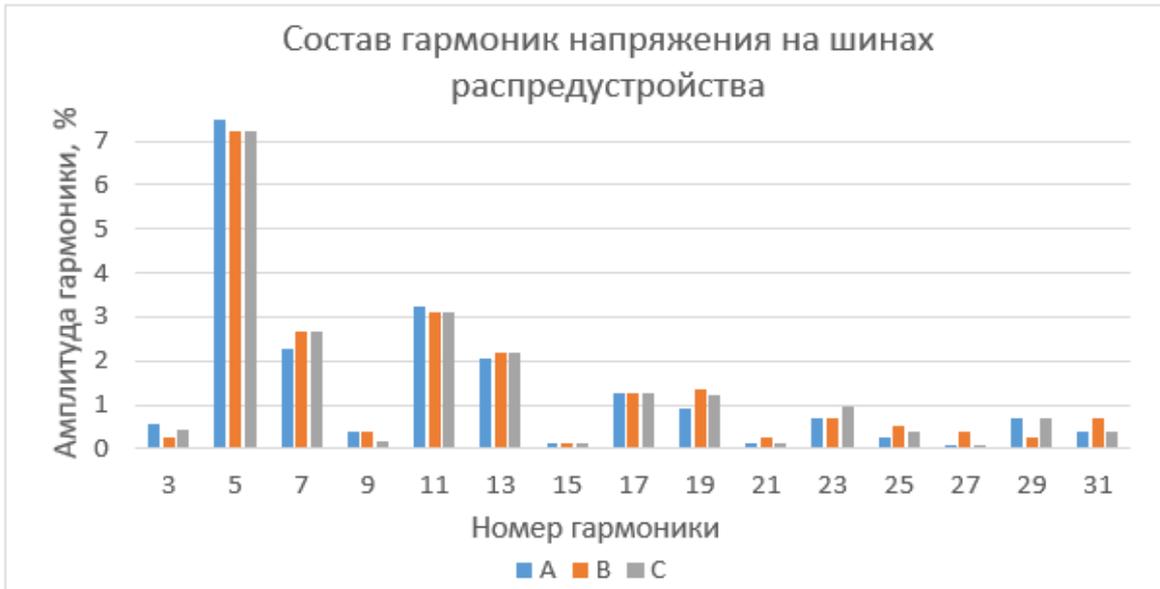


Рисунок 2 – Состав гармоник напряжения на шинах распреустройства

Рассмотрим принцип работы подключенного параллельно с сетью устройства СНЭ в режиме компенсации реактивной мощности и компенсации гармоник тока, вызванных мощной нелинейной нагрузкой на примере схемы, представленной на рисунке 3. Будем рассматривать однофазную сеть переменного тока.

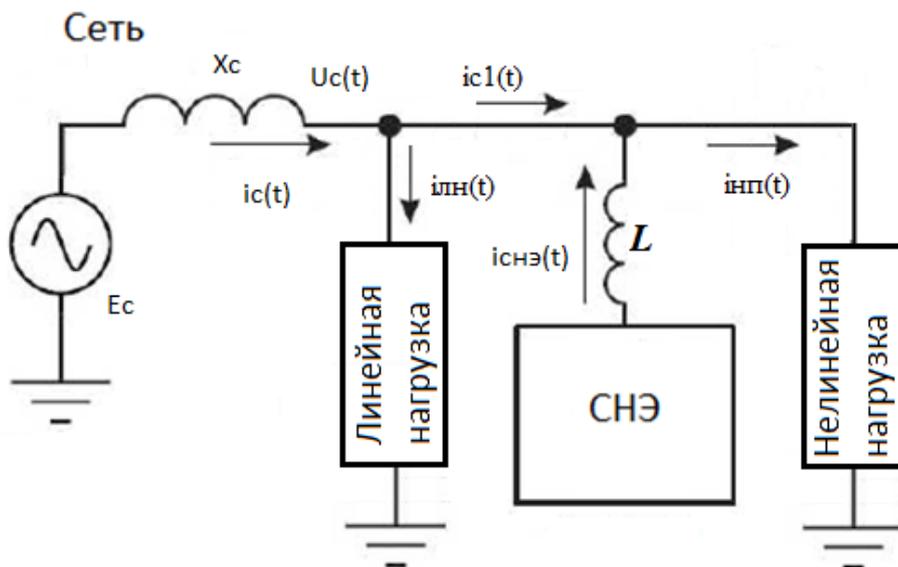


Рисунок 3 – Структура сети с линейными и нелинейными потребителями

На рисунке 3 обозначены: E_c – ЭДС источника (сети); X_c – сопротивление источника; $i_c(t)$ – общий ток сети, включая ток линейных потребителей;

$i_{c1}(t)$ – ток сети за исключением линейных потребителей; $i_{снэ}(t)$ – ток от СНЭ; $i_{нп}(t)$ – ток нелинейных потребителей.

Подключение СНЭ к сети с нелинейными потребителями, как показано на рисунке 3, позволяет скорректировать нелинейность потребляемого тока $i_{нп}(t)$ так, чтобы составляющая тока $i_{c1}(t)$ стала синусоидальной.

Ток нелинейного потребителя можно представить в виде:

$$i_{нп}(t) = I_{мэ} \cdot \sin(\omega t + \varphi_э) + i_{нр}(t), \quad (2)$$

где $I_{мэ}$ – эталонная (желаемая) амплитуда синусоидальной составляющей тока потребителя; $\varphi_э$ – эталонный (желаемый) фазовый сдвиг тока относительно напряжения; $i_{нр}(t)$ – нелинейная составляющая тока потребителя.

Вычитая из тока $i_{нп}(t)$ эталонную составляющую $I_{мэ} \cdot \sin(\omega t + \varphi_э)$, можно определить необходимую величину компенсирующего тока СНЭ $i_{снэ}(t)$, равного току $i_{нр}(t)$ с обратным знаком:

$$i_{снэ}(t) = [i_{нп}(t) - I_{мэ} \cdot \sin(\omega t + \varphi_э)] \cdot (-1). \quad (3)$$

Возникает естественный вопрос: как задать эталонную величину для тока $i_{c1}(t)$, принимая во внимание, что ток потребителя может меняться в процессе работы. Можно рассмотреть некоторые способы определения этого эталона.

1. Применив контроллер с алгоритмом быстрого преобразования Фурье, можно выделить амплитуду первой гармоники (50 Гц) тока нелинейного потребителя; эту величину можно принять за $I_{мэ}$. Эталонный фазовый сдвиг $\varphi_э$ можно принять исходя из желаемого коэффициента мощности $\cos\varphi$ для этого потребителя.

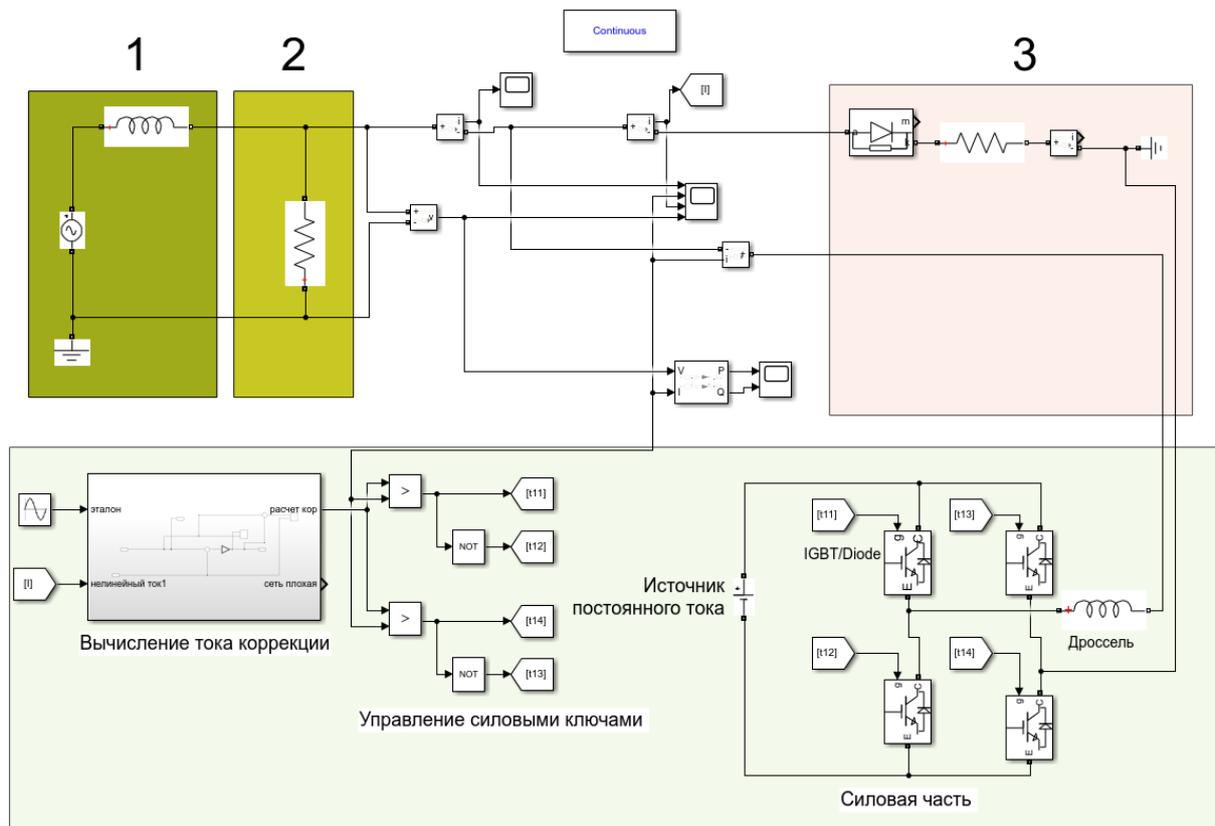
2. Распределительные щиты РУ обычно оборудованы измерителями мощности, например PowerLogic™ PM5300. Эти приборы предназначены для измерений токов, линейных и фазных напряжений, мощностей P , Q , S , коэффициента мощности. Измеренную величину тока I можно принять для оценки эталона $I_{мэ} = I \cdot \sqrt{2}$, а эталонный фазовый сдвиг $\varphi_э$ можно принять исходя из желаемого коэффициента мощности.

Следует отметить, что ошибка в оценке амплитуды $I_{мэ}$ приведет к тому, что будет выполняться зарядка или разрядка аккумуляторной батареи СНЭ. Этот процесс легко идентифицировать и скорректировать величину эталонной амплитуды $I_{мэ}$.

Моделирование режимов работы СНЭ

Ниже приведены результаты моделирования режимов работы маломощной однофазной сети с нелинейной нагрузкой и устройством СНЭ.

На рисунке 4 приведена схема модели в MatLab Simulink.



4

Рисунок 4 – Модель сети с нелинейными и линейными потребителями и СНЭ

В модели представлены следующие элементы сети:

- 1 – однофазная сеть с синусоидальной E_c с внутренним сопротивлением X_c ;
- 2 – линейная нагрузка (резистор);
- 3 – нелинейная нагрузка (Диод с резистором);
- 4 – СНЭ в составе:
 - система вычисления компенсирующего тока СНЭ $i_{\text{CHЭ}}(t)$;
 - система управления силовыми ключами;
 - аккумуляторная батарея;
 - однофазный инвертор;
 - выходной дроссель.

Кроме того, модель содержит блоки измерения токов, напряжений, активной и реактивной мощностей.

Вычисление компенсирующего тока СНЭ $i_{\text{CHЭ}}(t)$ выполняется в соответствии формулой (3).

Однофазный инвертор выполнен по мостовой схеме на ключах «11», «12», «13», «14».

Рассчитанные значения компенсирующего тока СНЭ $i_{\text{CHЭ(рас)}}(t)$ сравниваются с фактическим выходным током СНЭ $i_{\text{CHЭ(фак)}}(t)$.

Условия коммутации ключей выбраны следующие:

Если

$$i_{\text{снэ(расч)}} > i_{\text{снэ(факт)}}, \quad (4)$$

то открываются ключи «11» и «14».

Если

$$i_{\text{снэ(расч)}} < i_{\text{снэ(факт)}}, \quad (5)$$

то открываются ключи «12» и «13».

Таким образом, для формирования компенсирующего тока $i_{\text{снэ}}(t)$ не требуется разложение в ряд Фурье нелинейного тока нагрузки. В данной работе используется структура следящей системы с заданием $i_{\text{снэ(расч)}}$ и релейным регулятором, работающим в соответствии с формулами (4) и (5).

Влияние СНЭ на маломощную сеть

На рисунке 5 показан ток и напряжение сети с мощной нелинейной нагрузкой без подключения СНЭ.

В модели принято:

- Амплитуда ЭДС сети 100 В;
- Частота 50 Гц;
- Внутреннее сопротивление сети – индуктивность 3 мГн;
- Нагрузка представляет собой диод с последовательно включенным резистором 0,5 Ом.

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети от нелинейного тока нагрузки приводит к искажению выходного напряжения сети. Амплитуда тока нагрузки – 110 А.

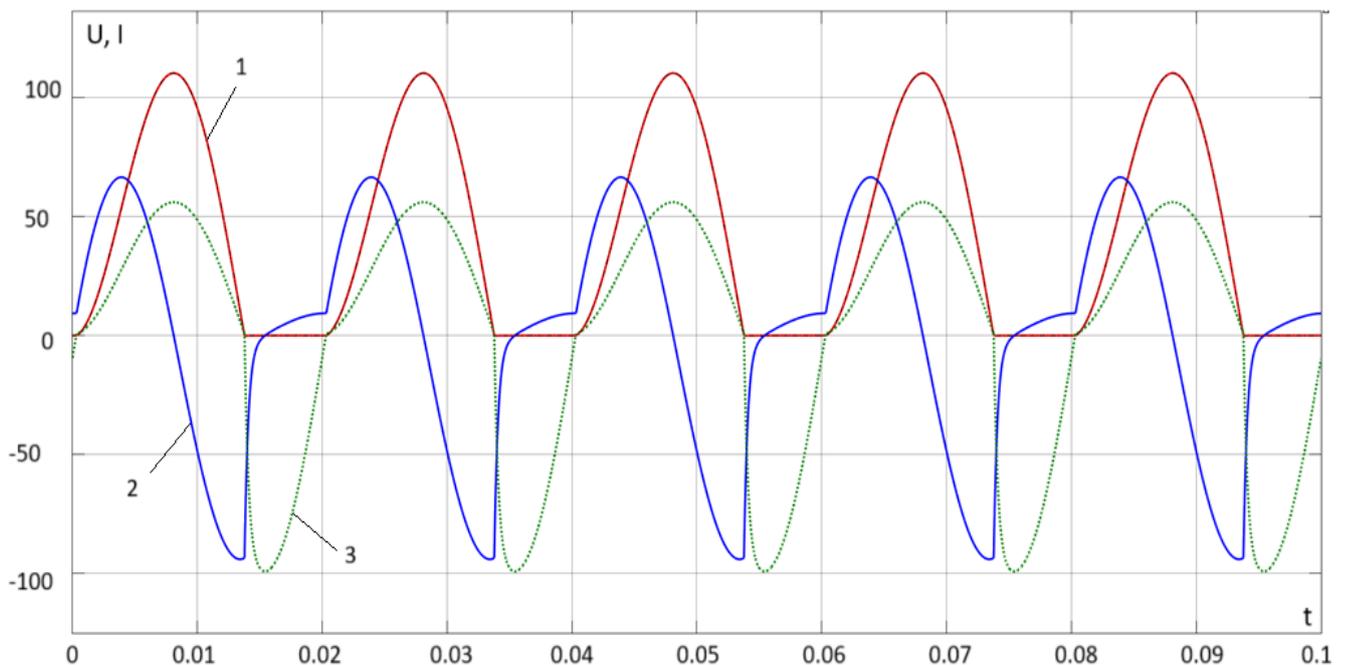


Рисунок 5. Ток и напряжение сети с мощной нелинейной нагрузкой:
Кривая (1) – ток нелинейной нагрузки, кривая (2) – падения напряжения на внутреннем сопротивлении сети, кривая (3) – напряжение сети

С теми же параметрами питающей сети и нелинейной нагрузки на рисунке 6 показаны напряжение сети (кривая 1), ток сети $i_{c1}(t)$ (2) перед СНЭ, ток компенсации $i_{снэ}(t)$ (3), ток нелинейной нагрузки (4) $i_{нп}(t)$. В расчетах принято: желаемая амплитуда тока $i_{c1}(t)$ составляет 20 А, фазовый угол – 0 радиан.

В модели приняты следующие параметры СНЭ:

- Напряжение аккумуляторной батареи – 200 В;
- Индуктивность выходного дросселя – 2 мГн.

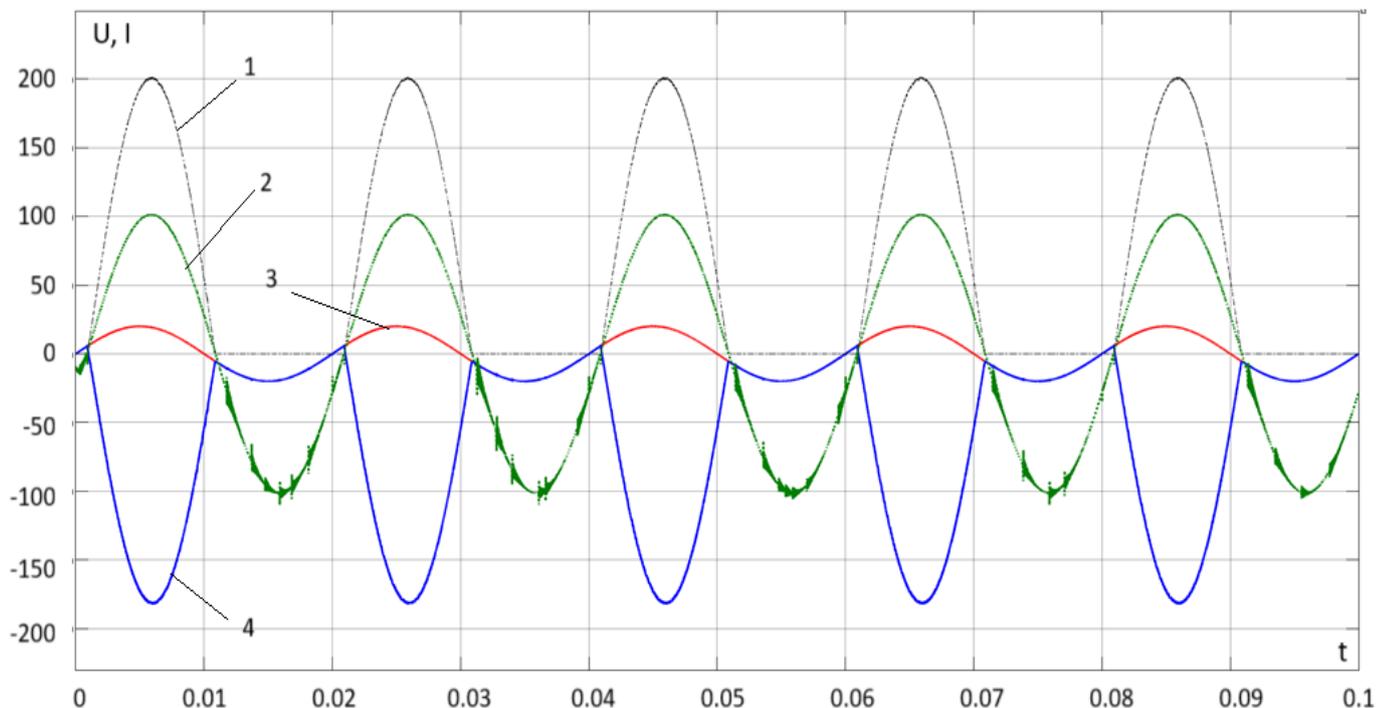


Рисунок 6 – Ток нагрузки и напряжение сети с мощной нелинейной нагрузкой:

Кривая (1) – ток нелинейной нагрузки, кривая (2) – напряжение сети, кривая (3) – ток сети, кривая (4) – ток СНЭ

Из сравнения рисунков 5 и 6 видно, что подключение СНЭ обеспечило синусоидальность напряжения сети и увеличение тока нагрузки за счет энергии, поступающей от СНЭ. Амплитуда тока нагрузки увеличилась до 200 А, а напряжение сети (кривая 1) стало синусоидальным с амплитудой 100 В.

Выбор амплитуды эталонного тока ограничен мощностью аккумуляторной батареи СНЭ, а также индуктивностью выходного дросселя. Для действующего значения тока СНЭ $I_{снэ}$ запишем:

$$I_{снэ} = \frac{U_c - U_{dc}}{X_{снэ}}, \quad (6)$$

где $X_{снэ}$ – сопротивление дросселя с индуктивностью $L_{снэ}$.

На рисунке 7, с принятыми выше параметрами питающей сети и нагрузки, показаны процессы при уменьшении напряжения аккумуляторной батареи СНЭ до 120 В. Из этого рисунка видно, что величины тока СНЭ недостаточно для полной компенсации нелинейности нагрузки.

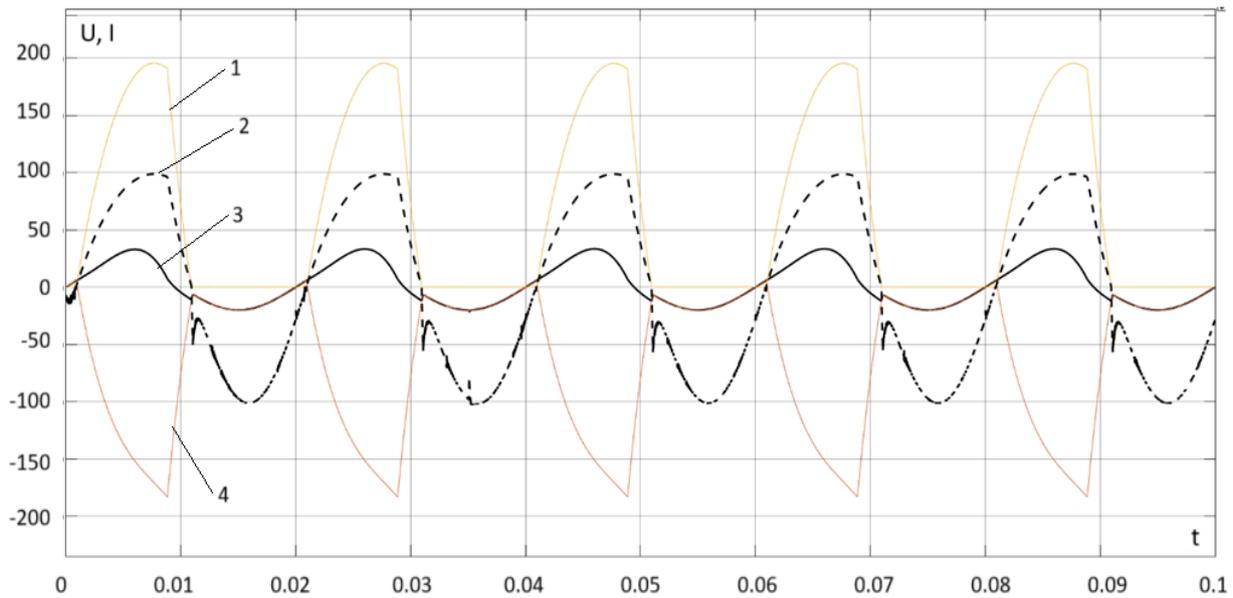


Рисунок 7 – Снижение напряжения аккумуляторной батареи СНЭ
Кривая (1) – ток нелинейной нагрузки, кривая (2) – напряжение сети,
кривая (3) – ток сети, кривая (4) – ток СНЭ

Величина тока СНЭ определяется соотношением напряжения аккумуляторной батареи к напряжению сети и индуктивностью выходного дросселя. Для модели, результаты которой показаны на рисунке 7, были уменьшена индуктивность выходного дросселя с 2 мГн до 1 мГн. Как видно из рисунка 8, удалось полностью восстановить компенсацию нелинейности нагрузки; напряжение сети (кривая 2) и ток сети $i_{c1}(t)$ (3) стали синусоидальными.

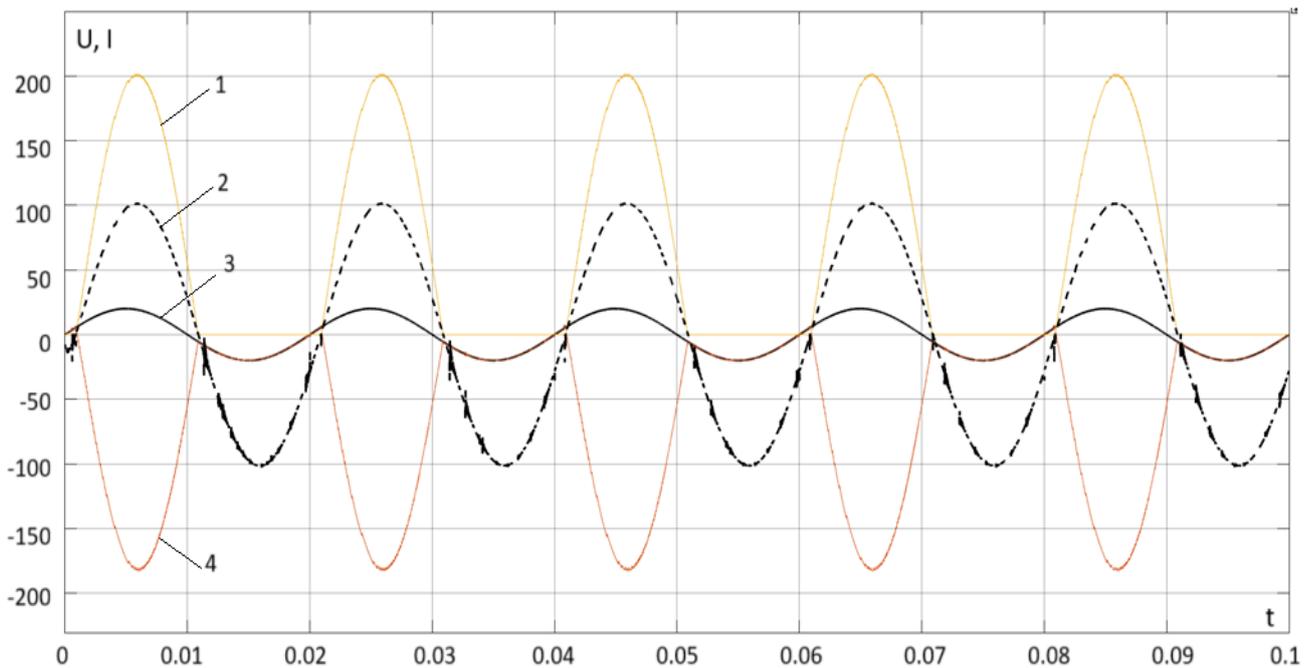


Рисунок 8 – Изменение индуктивности выходного дросселя с 2 до 1 мГн
Кривая (1) – ток нелинейной нагрузки, кривая (2) – напряжение сети,
кривая (3) – ток сети, кривая (4) – ток СНЭ

Таким образом, для полной компенсации нелинейной составляющей тока нагрузки необходимо обеспечить определенное соотношение напряжения сети U_c , напряжения звена постоянного тока СНЭ U_{dc} и индуктивности $L_{CHЭ}$ выходного дросселя СНЭ.

Изменение фазы эталонного тока

Изменением желаемой фазы эталонного тока СНЭ можно корректировать коэффициент мощности нагрузки в сети. Ниже представлены результаты моделирования режимов сети с нелинейной активно-индуктивной нагрузкой.

Параметры модели:

- амплитуда ЭДС сети – 100 В;
- частота – 50 Гц;
- внутреннее сопротивление сети – индуктивность 3 мГн;
- резистор нагрузки – 1 Ом;
- индуктивность нагрузки – 2 мГн;
- напряжения аккумуляторной батареи – 400 В;
- амплитуда эталонного тока – 100 А.

На рисунке 9 показаны графики мгновенной мощности СНЭ при выборе эталонного тока с фазовым сдвигом φ_3 равным 60 градусов и -60 градусов.

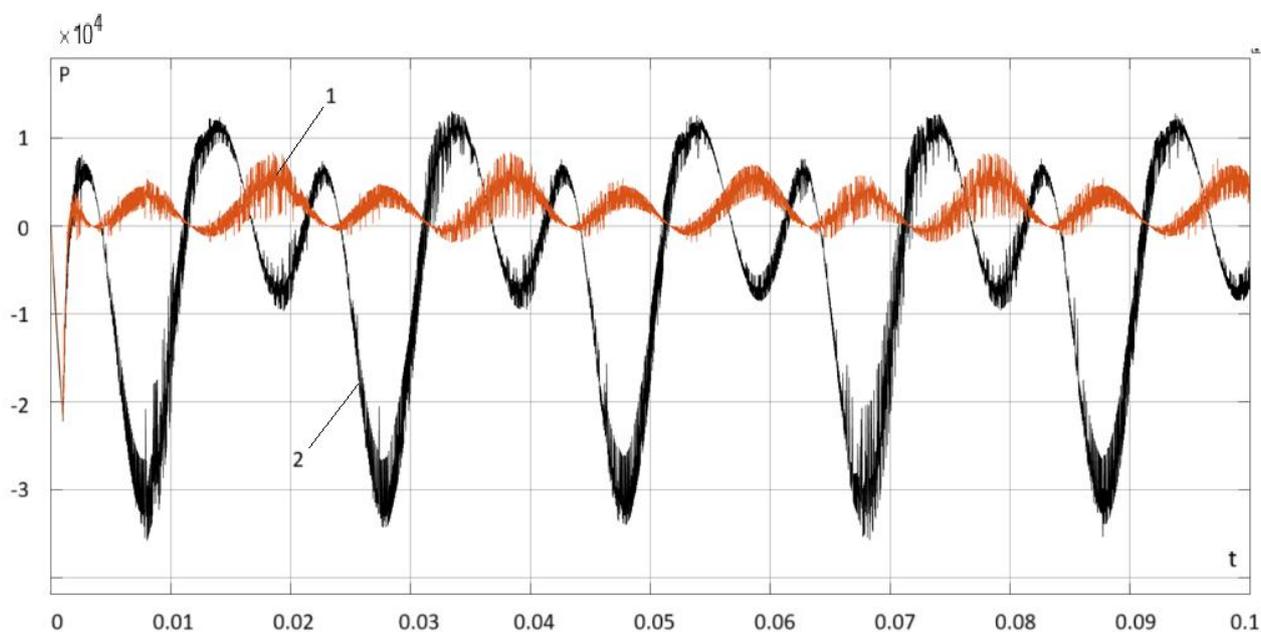


Рисунок 9 – Мгновенная мощность СНЭ фазовым сдвигом эталонного тока φ_3 при 60 градусов и -60 градусов:

Кривая (1) – фазовый сдвиг эталонного тока при -60 градусов,
кривая (2) – фазовый сдвиг эталонного тока при 60 градусов

Из графиков видно, что при $\varphi_3=60^\circ$ средняя мощность отрицательная, т. е. СНЭ отдает энергию в сеть; при $\varphi_3=-60^\circ$ средняя мощность положительная, СНЭ потребляет энергию из сети, заряжая аккумуляторную батарею.

На рисунке 10 показаны графики активной и реактивной мощностей и график коэффициента мощности нелинейной нагрузки с подключенным СНЭ при изменении фазового сдвига эталонного тока φ_3 в диапазоне $\pm 180^\circ$.

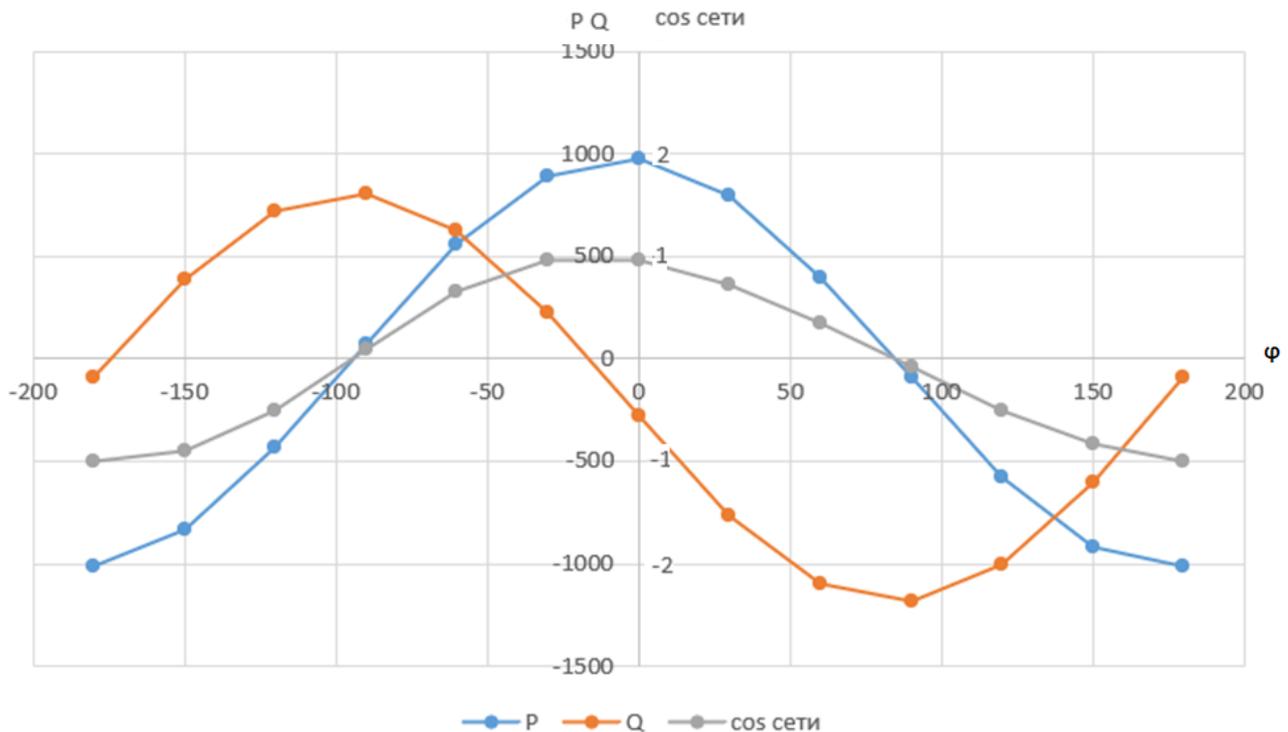


Рисунок 10 – Изменение мощности при изменении фазового сдвига эталонного тока φ_3

Из рисунка следует, что изменением фазового сдвига эталонного тока φ_3 возможно регулирование величины направления реактивной мощности (выполняется функция устройства компенсации реактивной мощности), а также применение СНЭ позволяет выполнять роль дополнительного источника энергии, т. е. активная мощность отдается в питающую сеть.

Заключение

1. В работе показано, что формирователь компенсирующего тока может быть выполнен на базе структуры следящей системы с заданием $i_{\text{СНЭ(расч)}}$ и релейным регулятором, работающим в соответствии с формулами (4) и (5).
2. На точность компенсации нелинейной составляющей тока влияют: чувствительность компаратора расчетного и фактического токов СНЭ; быстродействие ключей. Повышением быстродействия ключей и чувствительности компаратора можно уменьшить амплитуду неизбежных высокочастотных пульсаций тока СНЭ.
3. Для полной компенсации нелинейной составляющей тока нагрузки необходимо обеспечить определенное соотношение напряжения сети U_c , напряжения звена постоянного тока СНЭ U_{dc} и индуктивности $L_{\text{СНЭ}}$ выходного дросселя СНЭ.

4. Соответствующим выбором амплитуды I_m и фазового сдвига φ эталонного тока можно обеспечить режимы накопления и выдачи энергии от СНЭ в сеть; обеспечить необходимое значение коэффициента мощности; устранить значимые гармоники тока и напряжения сети.

Список литературы:

1. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры. Экспертно-аналитический отчёт [сайт]. – 2024. – URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf?ysclid=lpfa76t4wr509424612> / (дата обращения: 19.09.2024). – Текст: электронный.
2. Сайт компании «ООО «Системы Постоянного Тока» [сайт]. – 2024. – URL: <https://estorsys.ru/> / (дата обращения: 25.09.2024). – Текст: электронный.
3. Анализ режимов работы накопителя энергии параллельно с сетью потребителя. – Текст: электронный // Энергетика и автоматизация в современном обществе – 2023. – Изд. 2. – URL: https://gturp.spb.ru/wp-content/uploads/2023/10/Энергетика-и-автоматизация-2-2023_compressed.pdf/ (дата обращения: 25.09.2024).
4. Вредное влияние гармоник на электрооборудование [сайт]. – 2024. – URL: https://guru-pnr.ru/index.php?appl=textviewer&type=posts&article=equipment-vrednoe_vliianie_garmonik_na_elektrooborudovanie / (дата обращения: 25.09.2024). – Текст: электронный.
5. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии/ К. В. Замула, Ю. В. Соколов, А. В. Карманов. – ООО «Энергия-Т». – URL: <https://www.energy-t.ru/about/articles/aktivnyij-filtr-garmonik-kak-sredstvo-povyisheniya-kachestva-elektricheskoy-energii.html?ysclid=lk2j9sdw6s785736287> / (дата обращения: 25.09.2024).

References:

1. Application of energy storage systems in Russia: opportunities and barriers. Expert-analytical report. [website]. - 2024. - URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf?ysclid=lpfa76t4wr509424612> / (date of reference: 19.09.2024). - Text: electronic.
2. Site of the company ‘ООО “Sistemi Standing Current”’. [site]. - 2024. - URL: <https://estorsys.ru/> / (date of address: 25.09.2024). - Text: electronic.
3. Analysis of operation modes of the energy storage device in parallel with the consumer's network. - Text: electronic // Energy and automation in modern society - 2023. - Ed. 2. - URL: https://gturp.spb.ru/wp-content/uploads/2023/10/Энергетика-и-автоматизация-2-2023_compressed.pdf/ (date of address: 25.09.2024).

4. Harmonic influence of harmonics on electrical equipment. [website]. - 2024. - URL: https://guru-pnr.ru/index.php?appl=textviewer&type=posts&article=equipment-vrednoe_vliianie_garmonik_na_elektrooborudovanie / (date of reference: 25.09.2024). - Text: electronic.
5. Active harmonic filter as a means of improving the quality of electrical energy
Authors: K.V. Zamula, Y.V. Sokolov, A.V. Karmanov, LLC 'Energiya-T' - URL: <https://www.energy-t.ru/about/articles/aktivnyij-filtr-garmonik-kak-sredstvo-povysheniya-kachestva-elektricheskoy-energii.html?ysclid=lk2j9sdw6s785736287> / (date of address: 25.09.2024).

© Марковчин К. В., Гугин М. В., Ковалёв Е. Н., 2024

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

студент **Мерзлая Дарья Михайловна**,
науч. руководитель: старший преподаватель
Кундюков Олег Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Асинхронные двигатели получили широкое распространение в многих областях промышленности. Вследствие их популярности в использовании остро стоит вопрос о диагностировании неисправностей, во избежание несвоевременных поломок, которые могут повлиять на весь технологический процесс. В данной работе были изучены возможные причины возникновения дефектов при работе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, выявлены наиболее распространенные из них. Произведена оценка необходимости проведения диагностирования во время эксплуатации электродвигателя. Рассмотрены известные методы диагностирования, а также проведен их анализ и выбран наиболее лучший способ.

Ключевые слова: диагностика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, спектральный анализ, вибродиагностика, тепловизионная диагностика, электромагнитная диагностика.

MODERN METHODS OF DIAGNOSTICS OF ASYNCHRONOUS SQUIRREL CAGE MOTORS

Student **Merzlaya Daria Mikhailovna**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Kundukov Oleg Anatolievich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Induction motors are widely used in many industrial applications. Due to their popularity in use, the question of fault diagnosis is acute, in order to avoid untimely failures, which can affect the entire technological process. In this paper the possible causes of defects in the operation of squirrel cage induction motors have been studied, the most common of them have been identified. The necessity of diagnostics during the operation of the electric motor has been assessed. The known methods of diagnostics are considered, and also their analysis is carried out and the best method is chosen.

Keyword: diagnostics of asynchronous motor with squirrel cage rotor, spectral analysis, vibrodiagnostics, thermal imaging diagnostics, electromagnetic diagnostics.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором наиболее распространены в сравнении с другими типами электрических машин благодаря своей высокой надежности и простоте в эксплуатации. Такие электродвигатели используются во многих отраслях промышленности: нефтедобывающей, горнодобывающей, транспортной, энергетической. Однако с течением времени за счет увеличения времени эксплуатации, в данных двигателях возникают различные неисправности, которые впоследствии несут за собой ряд проблем, таких как аварийные ситуации, снижение коэффициента полезного действия, повышение потребляемых токов, дополнительные затраты электроэнергии, остановка технологического процесса, выход из строя двигателя. Причины поломок асинхронных короткозамкнутых электродвигателей подразделяют на конструктивные, технологические и эксплуатационные. К конструктивным отказам относятся те, что возникают из-за неправильного проектирования и конструирования электрической машины, к технологическим – возникающие из-за нарушения процесса производства или ремонта, к эксплуатационным – вследствие неправильного применения или нарушений условий эксплуатации. Исследования по возникновению аварий асинхронных двигателей дали результаты, что выходы из строя двигателей обусловлены неисправностями [1]: подшипников – 51 %, обмоток статоров и роторов – 15,8 % и 4,7 %, соединительных валов, муфт – 2,4 % и внешних устройств – 15,6 %. Таким образом, основные отказы электродвигателей происходят в двух узлах: в обмотке и в подшипниках. Одним из видов дефекта, связанного с обмоткой статора, является межвитковое замыкание в пазе, которое представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Межвитковое замыкание обмотки статора

Дефект, возникающий при износе подшипников и называемый «задевание ротора за статор», изображен на рисунке 2. При возникновении данной ситуации происходит междуфазное короткое замыкание, которое приводит к дорогостоящему

ремонту или полному выходу из строя электрической машины. Для избегания вышеизложенных негативных влияний внедряются методы диагностики, которые предназначены для выявления и предупреждения отказов и неисправностей, поддержания эксплуатационных показателей в допустимых пределах, прогнозирования состояния в целях полного использования ресурса [2].



Рисунок 2 – Задевание ротора за статор

Существующие методы диагностики разделяются на две группы. К первой группе относится тестовая диагностика, которая подразумевает измерение сопротивления изоляции, токов утечки, внутреннего сопротивления обмоток и др. Данный вид диагностики производится только в случае временной остановки работы электродвигателя, что является одним из главных недостатков данного способа диагностирования. Вторым не менее важным недостатком является тот факт, что такая диагностика способствует появлению различных дефектов. Так, например, во время проведения плановых ремонтных работ двигатель подвергается испытаниям повышенным напряжением, которое, в свою очередь, оказывает негативное воздействие на изоляцию электрической машины. Таким образом, тестовая диагностика имеет ряд недостатков, что ставит под сомнение целесообразность ее использования.

Ко второй группе относятся методы функциональной диагностики, интерес к которым в последнее время значительно возрастает, так как не требует остановки асинхронного двигателя [3]. Данная группа диагностирования позволяет своевременно обнаружить дефекты на ранней стадии развития, что позволит предупредить аварию, в результате которой может произойти остановка производства, также она способствует снижению расходов на ремонт двигателя и увеличения срока его службы. Такой вид диагностирования считается наиболее предпочтительным с экономической точки зрения, поскольку не требует вывода из эксплуатации электрооборудования. Рассмотрим существующие методы функциональной диагностики.

Одним из методов функционального диагностирования является вибродиагностика, основанная на анализе вибраций отдельных элементов

агрегата, которые позволяют анализировать процессы, происходящие в работающих машинах. Такими процессами являются, например, процессы износа, распространения ударных импульсов и электромагнитные воздействия. Вибродиагностика основывается на том, что при наличии неисправностей в двигателе возникает изменение в характере вибрационных колебаний. Эти изменения фиксируются с помощью датчиков вибрации, которые устанавливаются на корпус электродвигателя. Каждое изменение в характере вибрации может соответствовать определенной неисправности, например, износ подшипников может вызывать характерные высокочастотные колебания. Неудобство монтажа специальных виброакустических датчиков, а также сложность интерпретации полученных результатов являются недостатками вибродиагностики [4].

К функциональному диагностированию также относятся методы электромагнитной диагностики, которые основаны на измерении электрических и магнитных величин, зависящих от прогрессивности дефекта. Такой способ заключается в фиксировании внешнего магнитного поля, которое возникает вокруг двигателя в результате его работы, с помощью специального электромагнитного датчика, размещенного рядом с двигателем. Данные методы позволяют обеспечить точную диагностику, так как измеряемые величины непосредственно зависят от дефекта [5].

Методы, основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины, называются методами тепловизионного контроля. Такие методы позволяют достаточно точно определять состояние подшипниковых узлов электрических машин. Стоит отметить, что данные методы диагностики непригодны для контроля внутренних повреждений изоляции машины. В качестве датчиков температуры могут быть использованы бесконтактные инфракрасные пирометры. Это позволяет их использовать при отсутствии непосредственного доступа к диагностируемой машине. Однако закрытое исполнение приводов не позволяет использовать бесконтактные датчики [6].

Представленные методы имеют ряд недостатков, например, в методах тепловизионного контроля требуется прибор, имеющий значительно высокую стоимость, а также на качество тепловизионных снимков может влиять влажность окружающей среды. В работе [7] отмечается, что при вибродиагностике существует проблема локализации и идентификации источников повышенной виброактивности. Методы электромагнитной диагностики распространены для высоковольтных машин, установка датчиков магнитного поля требует непосредственного доступа к объекту диагностирования, что возможно при изготовлении или ремонте машины.

В последнее время широко развиваются методы диагностики состояния асинхронных двигателей, основанные на контроле потребляемого тока статора с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала. Это позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя, поскольку ток статора, наряду с другими факторами, зависит от магнитных потоков в воздушном зазоре ротора и от тока ротора. Поэтому анализ тока статора может помочь обнаружить неисправности

не только в статоре, но и в роторе электродвигателя, а также в его приводе. Сигнатурный анализ представляет собой более продвинутый и высокотехнологичный метод диагностики. Он позволяет анализировать электрические сигналы, полученные от работающего двигателя, и использовать их для выявления особенностей его функционирования. С помощью методов обработки данных, таких как временные и частотные анализы, можно: обнаружить аномалии в работе, предсказать вероятные неисправности на основе полученных данных. Сигнатурный анализ тока позволяет обнаруживать следующие неисправности двигателей: трещины стержней ротора; дефекты литья ротора; обрывы стержней короткозамкнутого ротора; трещины в кольцах ротора; повышенный эксцентриситет воздушного зазора; повреждения подшипников; межвитковые замыкания в обмотке статора; неисправности привода.

Для проведения диагностики методом спектрального анализа необходим измерительный комплекс, включающий в себя электропривод с электродвигателем и исполнительным механизмом, низкочастотный фильтр, аналого-цифровой преобразователь, портативный компьютер со специализированным программным обеспечением для сбора информации, датчик тока. Сигнатурный анализ тока выполняют в реальном масштабе времени при полной нормальной нагрузке. Частотный состав тока в фазном проводе определяют с использованием токоизмерительных клещей, охватывающих кабель питания электродвигателя (рисунок 3) [8].

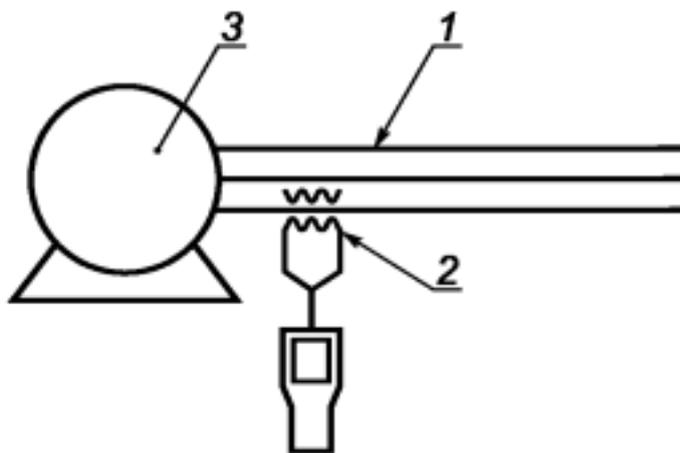


Рисунок 3 – Измерения тока в фазном проводе:
 1 – фазный провод; 2 – токоизмерительные клещи; 3 – двигатель с короткозамкнутым ротором

Для наглядного примера в различиях спектрального анализа нового электродвигателя и изношенного, имеющего дефекты, на рисунках 4 и 5 представлены частотные спектры соответствующих двигателей. На рисунке 5 заметно увеличение количества частотных полос. Это говорит о различных дефектах, образовавшихся в течение эксплуатации [9].

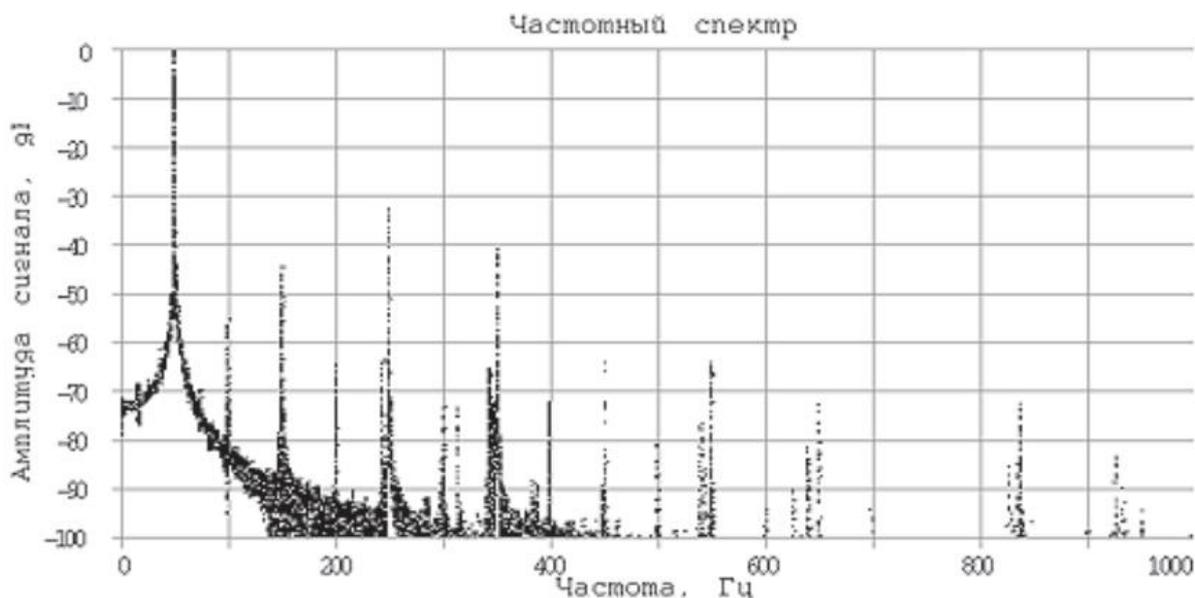


Рисунок 4 – Спектральный анализ нового электродвигателя

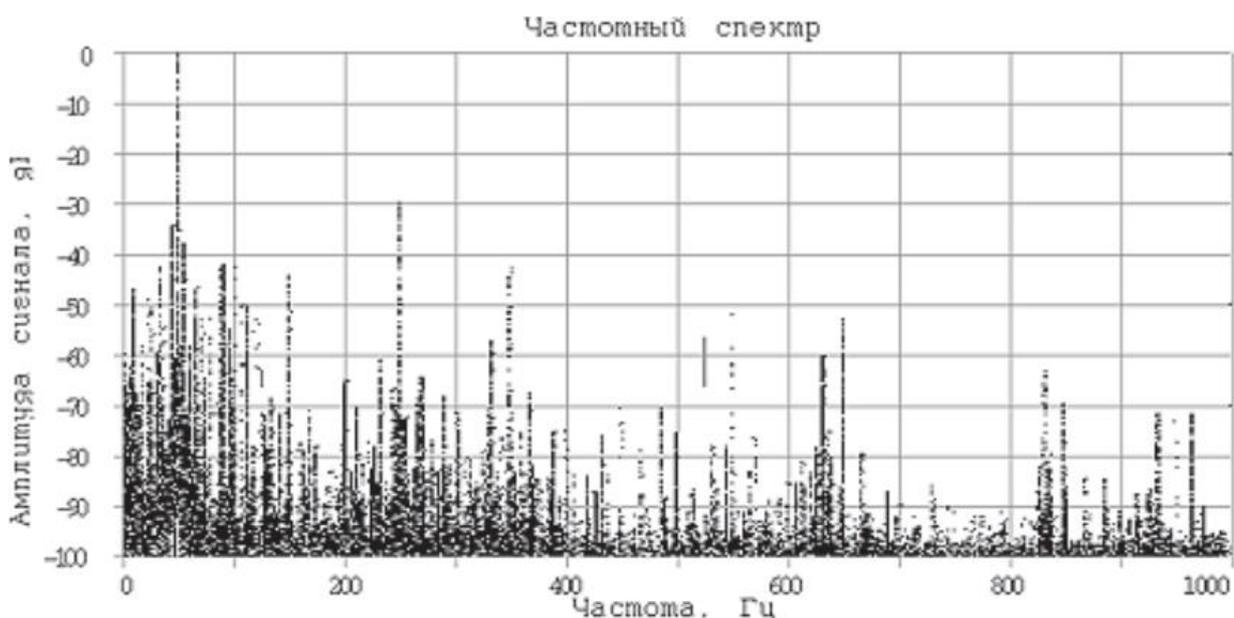


Рисунок 5 – Спектральный анализ электродвигателя, используемого 5 лет

Достоинствами токовой диагностики являются возможность выполнения измерений без непосредственного доступа к двигателю, определение технического состояния электрической и механической части двигателя. Исследование пусковых токов для целей диагностирования является перспективным с точки зрения того, что некоторые дефекты в начальной стадии развития могут слабо проявляться в номинальном режиме работы.

Таким образом, диагностирование электродвигателей является важным фактором при их работе. При своевременном выявлении дефектов можно избежать различных негативных ситуаций, связанных с выходом из строя оборудования. Существующие методы диагностики получили широкое применение, однако некоторые из них имеют свои недостатки, например, при

тестовой диагностике могут возникать новые неисправности. Более современными и предпочтительными способами диагностирования являются методы функциональной диагностики, так как они не требуют отключения электродвигателей. Но стоит отметить, что из рассмотренных методов функциональной диагностики наиболее перспективным считается метод сигнатурного анализа, поскольку его спектр выявляемых неисправностей шире, что позволяет значительно повысить надежность работы приводных систем и увеличить срок службы асинхронного короткозамкнутого электродвигателя.

Список литературы:

1. Таджибаев, А. И. Современные методы и средства диагностирования электромагнитной системы асинхронных двигателей / А. И. Таджибаев, М. П. Цыпкин // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 3: Диагностика, контроль состояния, релейная защита и обслуживание электродвигателей. – Санкт-Петербург: ПЭИПК. – 1997. – С. 50-54. – Текст: непосредственный.
2. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М., 1996. – 276 с. – URL: Ширман А. Р., 1996. Практическая вибродиагностика.djvu / Облако Mail. – Текст: электронный.
3. Сидельников, Л. Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л. Г. Сидельников, Д. О. Афанасьев // Недропользование. – 2013. – №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-asinhronnyh-dvigatelay-v-protsesse-ekspluatatsii> (дата обращения: 27.09.2024). – Текст: электронный.
4. Сафин, Н. Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сафин Наиль Рамазанович; Уральский федеральный университет имени Президента России Б. Н. Ельцина – Екатеринбург, 2017. – Текст: непосредственный.
5. Рогачев, В. А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Рогачев Вячеслав Анатольевич. // Новочеркасск, 2008. – 173 с. – URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004240616.pdf. – Текст: электронный.
6. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / С. В. Бабурин, В. Л. Жуковский, А. А. Коржев, А. В. Кривенко; С.-Петерб. гос. горн. ин-т им. Г. В. Плеханова. – СПб., 2009. – 163 с. – Текст: непосредственный.
7. Пашали, Д. Ю. Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Пашали Диана Юрьевна. – Текст: электронный – Уфа, 2004. – 182 с. – URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01002738764.pdf. – Текст: электронный.

8. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя, ГОСТ ISO 20958-2015 – Текст: электронный // М., 2019. – URL: https://vk.com/doc159959036_678798166?hash=SeTtI9v002zEwIwYdDvg1U8GPzrKqsKbWI7CFZmwzag&dl=4Wb1VzO6ZxlgLmk2Pw04z5xrfozJv7IoEAnrjOnQVcX. – Текст: электронный.
9. Шевчук, В. А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В. А. Шевчук, А. С. Семёнов // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14100> – Текст: электронный.

References:

1. Tadjibaev, A.I. Modern methods and means of diagnosing the electromagnetic system of induction motors / A.I. Tadjibaev, M.P. Tsypkin // Methods and means of evaluating the state of power equipment. Issue. 3: Diagnostics, state control, relay protection and maintenance of the electric motors. - St. Petersburg: PEIPK. - 1997. - P. 50-54 - Text: direct.
2. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Practical vibrodiagnostics and condition monitoring of the mechanical equipment. - Text: electronic// - М., 1996. - 276 p. - URL: Shirman A.R. 1996 Practical vibrodiagnostics.djvu / Cloud Mail
3. Sidelnikov Leonid Grigorievich, Afanasyev Dmitry Olegovich Review of methods of control of technical condition of asynchronous motors in the process of operation - Text: electronic // Nedropolzovanie. 2013. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-asinhronnyh-dvigatelay-v-protsesse-ekspluatatsii> (date of reference: 27.09.2024)
4. Safin N. P. Improvement of the methodology of current diagnostics of asynchronous motors with squirrel cage rotor: thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Safin Nail Ramazanovich; Ural Federal University named after the President of Russia B.N. Yeltsin - Yekaterinburg, 2017.
5. Rogachev, V.A. Diagnostics of the rotor eccentricity of asynchronous electric motors on the harmonic composition of the stator current: Cand. ... candidate of technical sciences: 05.09.01 / Rogachev Vyacheslav Anatolievich. - Text: electronic// NovoCherkassk, 2008. - 173 p - URL:https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004240616.pdf
6. Modern methods of the nondestructive control and diagnostics of the technical state of the electric drives of the mining machines (in Russian) / S.V. Baburin, V.L. Zhukovsky, A.A. Korzhev, A.V. Krivenko; St. Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov. G.V. Plekhanov. - SPb., 2009. - 163 c. - Text: direct.
7. Pashali, D.Y. Diagnostics of the electromechanical converters by the external magnetic field: Cand. ... candidate of technical sciences: 05.09.01 / Pashali Diana Yuryevna. - Text: electronic - Ufa, 2004. - 182 c. -URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01002738764.pdf
8. Signature analysis of electrical signals of three-phase induction motor, GOST ISO 20958-2015 -Text: electronic. // Moscow 2019. - URL:

https://vk.com/doc159959036_678798166?hash=SeTtI9v002zEwIWYdDvg1U8GPzrKqsKbWI7CFZmwzag&dl=4Wb1VzO6ZxlgLmk2Pw04z5xrfozJv7IoEAnrj0nQBcX

9. Shevchuk V.A., Semenov A.S. Comparison of methods of diagnostics of asynchronous motor - Text: electronic // International Student Scientific Bulletin. - 2015. - № 3-4.;

URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14100>

©Мерзлая Д. М., 2024

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

канд. пед. наук, доцент **Оробинский Алексей Михайлович**
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы модернизации систем резервного (автономного) электроснабжения типовых промышленных объектов. В качестве перспективного направления выбран путь совершенствования характеристик преобразователей напряжения на базе современных транзисторов с промежуточным высокочастотным преобразованием. Обосновано применение двухтактного многоканального преобразования для систем средней мощности. Предложена структура модернизированной схемы трехфазного преобразователя напряжения, а также принципиальная схема инверторного блока с решением проблемы индуктивностей рассеяния первичных обмоток трансформаторов. Приведены некоторые результаты имитационного компьютерного моделирования разработанных схем.

Ключевые слова: резервное электропитание, конвертор, инвертор, преобразователь напряжения, промежуточное высокочастотное преобразование, многоканальное преобразование напряжения.

VOLTAGE CONVERTER FOR THE SYSTEM BACKUP POWER SUPPLY FOR INDUSTRIAL MECHANISMS

PhD in Pedagogy, Associate Professor **Orobinsky Alexey Mikhailovich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article discusses the issues of modernization of backup (autonomous) power supply systems for typical industrial facilities. As a promising direction, a way has been chosen to improve the characteristics of voltage converters based on modern transistors with intermediate high-frequency conversion. The application of push-pull multichannel conversion for medium-power systems is justified. The structure of the upgraded circuit of a three-phase voltage converter is proposed, as well as a schematic diagram of an inverter unit with a solution to the problem of inductance scattering of primary windings of transformers. Some results of computer simulation of the developed schemes are presented.

Keywords: backup power supply, converter, inverter, voltage converter, intermediate high-frequency conversion, multi-channel voltage conversion.

В настоящее время среди тенденций развития электроэнергетических систем самого различного назначения можно выделить увеличение спроса на резервные источники электропитания. В этой связи актуализируются вопросы повышения технико-экономических характеристик таких систем.

Одним из перспективных направлений создания техники новых поколений, в данном случае систем резервного (автономного) электроснабжения (РСЭ) со статическими преобразователями (СП), является использование при их синтезе эффективных энерго- и ресурсосберегающих принципов преобразования параметров электроэнергии. При этом типовым способом реализации этого направления является использование при построении электротехнических комплексов промежуточного высокочастотного преобразования (ПВЧП), которое позволяет в ряде случаев существенно снизить массу активных материалов силовой части (СЧ) СП за счет снижения не менее, чем на порядок массы их трансформаторного узла при достаточно высоком значении общего КПД [1, с. 110].

Объектом исследования в данной научной работе являются преобразователи напряжения для РСЭ типовых промышленных объектов с применением ПВЧП.

Цель исследования – разработка структурной и принципиальной схем преобразователя напряжения для РСЭ.

Сегодня ПВЧП как один из принципов структурно-алгоритмического синтеза СП широко используется в классе конверторных схем (в преобразователях типа DC/DC), выполненных на базе современных транзисторов. При этом наиболее распространен диапазон малых мощностей в единицы и десятки ватт, что, в свою очередь, определяет класс источников электропитания. Достаточно распространены также конверторы с диапазоном мощности до единиц киловатт, которые могут использоваться на различных технических объектах в качестве как основных, так и резервных систем электропитания.

В практических разработках значения частот ПВЧП в зависимости от ряда факторов находятся в диапазоне от нескольких десятков килогерц до примерно 100 кГц. В диапазоне более высоких мощностей острота и актуальность эффективного решения проблемных задач по структурно-алгоритмическому и параметрическому синтезу этих устройств значительно возрастает. В частности, при малых мощностях целесообразно использование одноканального и одноканального преобразования, но уже при средних мощностях до единиц киловатт и низких значениях напряжения питания (до 30 В) более эффективным представляется переход на двухтактное многоканальное преобразование [2, с. 28].

Конверторы напряжения в рамках РСЭ могут применяться как самостоятельные устройства, так и в составе более сложных преобразователей, например, в инверторах [3, с. 74]. В настоящее время при организации электроснабжения автономных объектов широко применяются преобразователи

DC/AC – однофазные и трехфазные инверторы напряжения, которые решают задачу преобразования нестабилизированного напряжения постоянного тока до 30 В в стабилизированное с заданной точностью напряжение переменного тока с частотой до 400 Гц и действующим значением до 380 В.

При проектировании РСЭ сегодня одними из основных критериев являются [4, с. 466]:

- жесткие ограничения по массогабаритным показателям;
- обеспечение заданного КПД при заданных условиях охлаждения.

В этих условиях использование при синтезе РСЭ принципа ПВЧП является особенно актуальным.

В рамках данной работы предлагается вариант модернизированной схемы трехфазного преобразователя напряжения для типовой РСЭ, обобщенный вид которой показан на рис. 1.

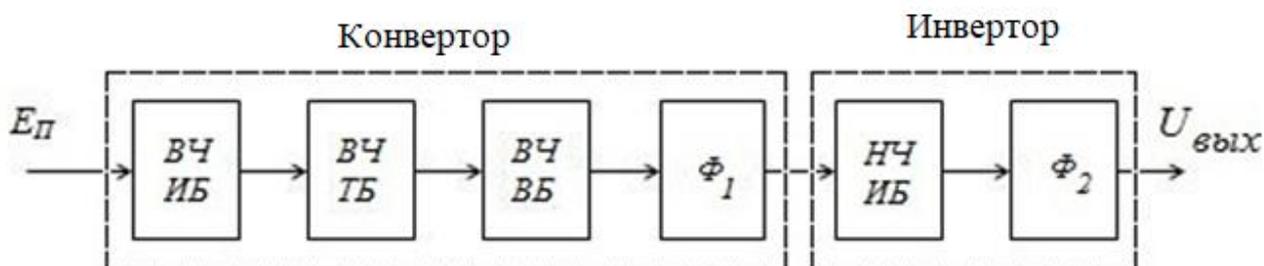


Рисунок 1 – Блок-схема преобразователя с ПВЧП для РСЭ

Данная структура содержит два основных блока – конверторный блок (КБ) и инверторный блок (ИБ). КБ решает задачу преобразования нестабилизированного напряжения постоянного тока порядка 30 В (например, от аккумуляторной батареи) в стабилизированное напряжение постоянного тока более высокого уровня (до 600 В) с использованием ПВЧП. КБ состоит из высокочастотного инверторного блока (ВЧ ИБ), высокочастотного трансформаторного блока (ВЧ ТБ), высокочастотного выпрямительного блока (ВЧ ВБ), а также сглаживающего фильтра Φ_1 . Выходное напряжение КБ является напряжением питания инверторного блока, который затем преобразует это напряжение в трехфазное стабилизированное с заданной точностью напряжение переменного тока с частотой 50 Гц уровня 220/380В и с искажениями, не превышающими 5 %. ИБ состоит из низкочастотного инверторного блока (НЧ ИБ) и фильтра переменного тока Φ_2 .

Одной из типовых проблем при использовании фильтров является их неудовлетворительные массогабаритные показатели [5, с. 30]. В данной работе для решения данной проблемы предлагается при формировании выходного напряжения фильтра Φ_2 использовать алгоритм широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону с частотой порядка 5 кГц, а также осуществлять стабилизацию выходного напряжения не в ИБ, а в КБ.

Для обеспечения требуемой мощности преобразователя при реализации КБ используется двухканальная структурно-алгоритмическая организация,

которая требует смещения по фазе алгоритмов переключения ключей одного канала относительно другого канала на угол $\pi/2$. При этом, форма выпрямленного напряжения КБ в области значений углов от 0 до $\pi/2$ приобретает вид частичного широтно-импульсного регулирования, существенно улучшается качество напряжения, что облегчает фильтрацию.

Если взять типовое значение рабочей частоты трансформаторов 20 кГц, то частота пульсаций выпрямленного напряжения КБ будет равна 80 кГц (в каждом канале – 40 кГц).

Принципиальная схема ИБ с низкочастотным выходом 50 Гц с ПВЧП показана на рисунке 2.

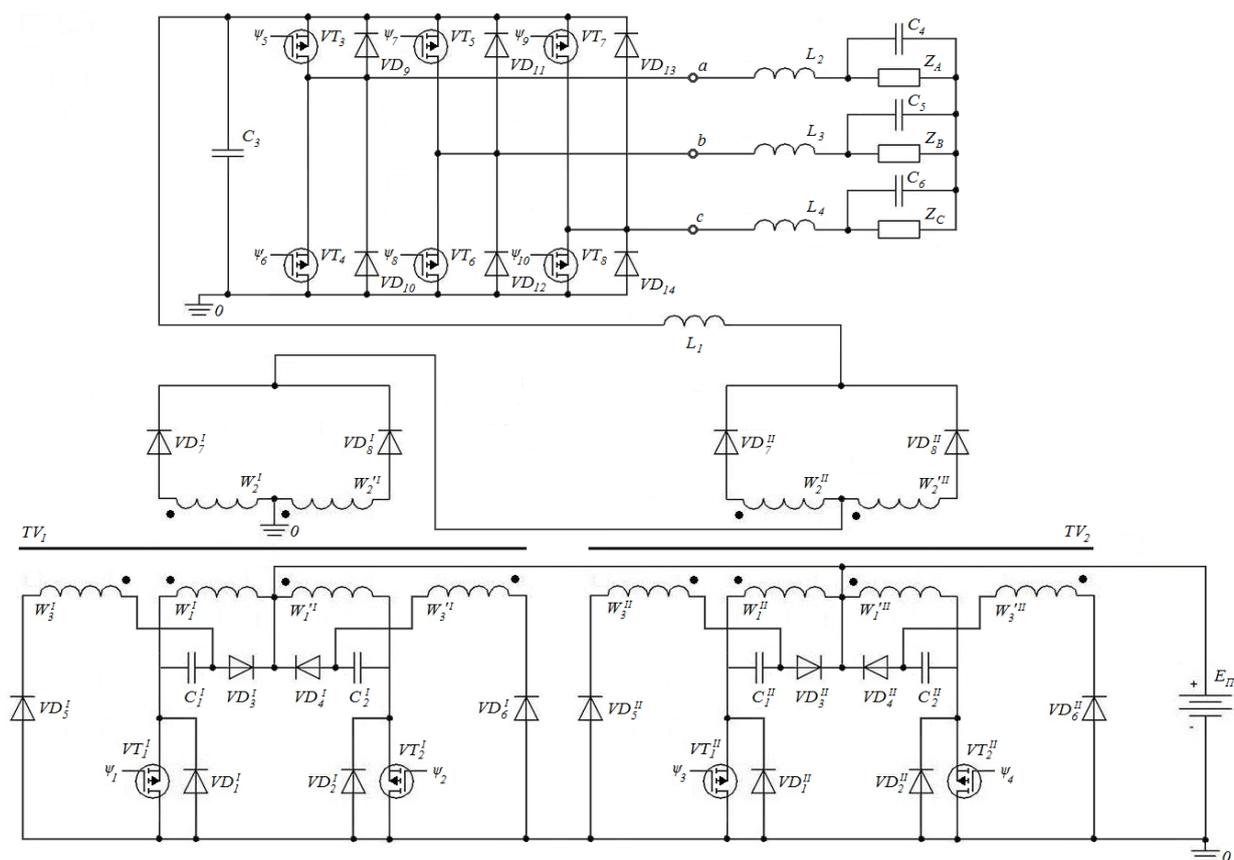


Рисунок 2 – Принципиальная схема инверторного блока с низкочастотным выходом 50 Гц для ПВЧП

Одним из типовых недостатков подобных схемных решения является наличие индуктивностей (ИР) рассеяния первичных обмоток трансформаторов, которые создают импульсные перенапряжения на транзисторах в моменты их запираения. В предлагаемой схеме для компенсации ИР трансформаторов в каждом канале используются защитные цепочки в виде специальных снабберов. Снабберы состоят из следующих элементов: VD_5 , W_3 , C_1 , VD_3 (для левого плеча); VD_6 , W_3 , C_2 , VD_4 (для правого плеча).

Проведенный анализ позволил выбрать в качестве средства для проведения имитационного компьютерного моделирования пакет *OrCAD PSpice Schematics*.

На рисунке 3 показаны результаты моделирования при условии следующих допущений:

- не учитывались нелинейность магнитопроводов трансформаторов и дросселей индуктивности и потери в них;

- индуктивность первичных обмоток трансформаторов соответствует току холостого хода.

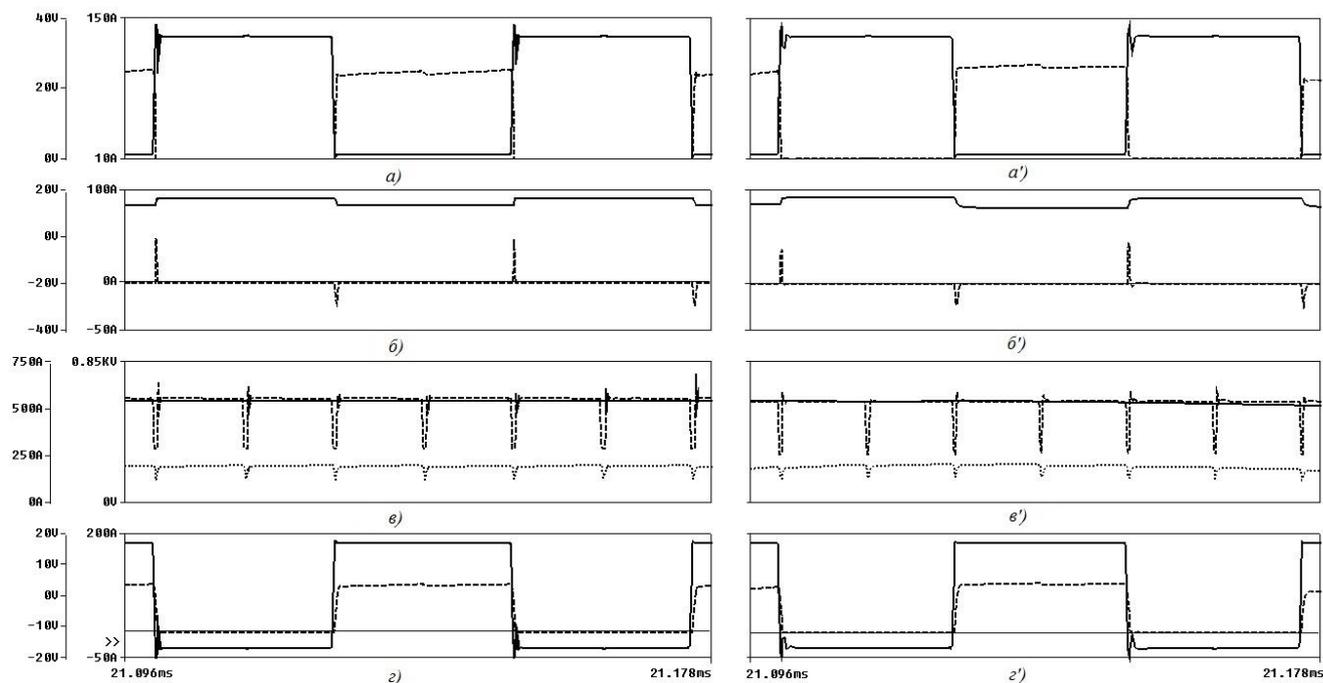


Рисунок 3 – Временные диаграммы процессов в КБ в автономном режиме и при совместной работе с ИБ

Проведенное компьютерное моделирование предлагаемой схемы позволяет оценить КПД исследуемого устройства, величина которого не менее 0,80–0,85. Для повышения КПД целесообразно использование современных транзисторов с меньшими потерями, а также применение трансформаторов на основе магнитопроводов, выполненных из современных материалов, допускающих работу на значительно более высоких частотах (в сравнении с традиционным значением 50 Гц), а также меньшими коммутационными издержками.

Список литературы:

1. Оробинский, А. М. Повышение энергоэффективности и качества электрооборудования переработки сельскохозяйственной продукции / А. М. Оробинский. – Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства. Сборник статей IX Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2024. –С. 110-113. – Текст: непосредственный.
2. Белов, Г. А. Расчет и анализ внешних характеристик и КПД преобразователя постоянного напряжения с последовательным резонансным инвертором при

двухполярных импульсах тока на половине периода / Г. А. Белов // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 2 (62). – С. 26–32. – Текст: непосредственный.

3. Малинин, Г. В. Системы управления преобразователями для солнечных модулей на базе инверторов с ШИМ / Г. В. Малинин, Г. А. Белов // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 68–80. – Текст: непосредственный.
4. Пономарев, Ю. Г. Разработка энергоэффективных объектно-ориентированных преобразователей частоты для питания ручного инструмента на базе асинхронного двигателя / Ю. Г. Пономарев. // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь, 2016. – С. 466-469. – Текст: непосредственный.
5. Глебов, Б. А. Мостовой резонансный DC/DC-преобразователь с фазовым управлением силовыми транзисторами / Б. А. Глебов // Практическая силовая электроника. – 2015. – № 1(57). – С. 29-35. – Текст: непосредственный.

References:

1. Orobinsky, A.M. Increasing energy efficiency and quality of electrical equipment for processing of agricultural products / A.M. Orobinsky. - Resource-saving technologies and technical means for crop and livestock production. Collection of articles of IX International scientific-practical conference. - Text: direct // Penza, 2024. С. 110-113.
2. Belov, G.A. Calculation and analysis of the external characteristics and the efficiency of the constant voltage converter with the series resonant inverter at the bipolar current pulses on the half of the period / G.A. Belov. - Text: direct // Practical power electronics. 2016. № 2(62). С. 26-32.
3. Malinin, G.V. Control systems of the converters for the solar modules based on the inverters with PWM / G.V. Malinin, G.A. Belov. - Text: direct // Vestnik of Chuvash University. 2015. № 3. С. 68-80.
4. Ponomarev, Yu.G. Development of the energy-efficient object-oriented frequency converters for power supply of the hand tool on the basis of the asynchronous motor / Yu.G.Ponomarev. - Text: direct // Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2016. Perm, 2016. С. 466-469.
5. Glebov, B.A. Bridge resonant DC/DC converter with the phase control of the power transistors / B.A. Glebov. - Text: direct // Practical power electronics. 2015. № 1(57). С. 29-35.

© Оробинский А. М., 2024

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ

студент **Протченко Олег Владимирович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Иванов Владимир Леонидович,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается автоматизация электроприводов с помощью нейросетей – технология, которая позволяет управлять механизмами и оборудованием, используя искусственный интеллект. Нейросети могут обрабатывать большое количество данных, а также адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени. Это позволяет значительно повысить эффективность и надежность работы электроприводов, снизить затраты на их обслуживание и улучшить качество производства. В этой статье мы рассмотрим принципы работы нейросетей, а также примеры их применения в автоматизации электроприводов.

Ключевые слова: автоматизация, нейросеть, электропривод, оптимизация, моделирование, прогнозирование.

AUTOMATION OF ELECTRIC DRIVES USING NEURAL NETWORKS

Student **Protchenko Oleg Vladimirovich**,
Academic Advisor: PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ivanov Vladimir Leonidovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article discusses the automation of electric drives using neural networks – a technology that allows you to control mechanisms and equipment using artificial intelligence. Neural networks can process a large amount of data, as well as adapt to changing conditions in real time. This makes it possible to significantly increase the efficiency and reliability of electric drives, reduce maintenance costs and improve production quality. In this article, we will look at the principles of neural networks, as well as examples of their application in the automation of electric drives.

Keywords: automation, neural network, electric drive, optimization, modeling, forecasting.

Сегодня нейросети являются важной частью нашей жизни. Они нашли широкое применение в различных областях, проникая в самые разнообразные области: от медицины и финансов до игр и виртуальной реальности, в том числе и в автоматизации производственных процессов. Одной из важных задач в этой области является управление электроприводами, которые используются для механизмов и оборудования. Традиционные методы управления электроприводами имеют свои ограничения, что может приводить к недостаточной производительности и эффективности производственных процессов. В данной статье мы рассмотрим, как использование нейросетей может помочь в автоматизации электроприводов и добиться максимальной производительности в производственных процессах.

Нейросети – это компьютерные системы, вдохновленные структурой и функционированием мозга. Они способны обучаться, распознавать закономерности и принимать решения на основе данных.

Классификация нейронных сетей основана на задачах, с которыми они работают:

- многослойные нейронные сети, или перцептроны, обрабатывают числовые данные;
- свёрточные нейронные сети работают с изображениями;
- рекуррентные нейронные сети собирают и обрабатывают информацию, которая меняется с течением времени;
- генеративные нейронные сети создают контент – тексты, изображения [1].

В настоящее время можно выделить 5 основных задач, для решения которых могут использоваться нейросети.

- *Классификация.* Для распознавания лиц, эмоций, типов объектов: например, квадратов, кругов, треугольников. Также для распознавания образов, то есть выбора конкретного объекта из предложенного множества: например, выбор квадрата среди треугольников.
- *Регрессия.* Для определения возраста по фотографии, составления прогноза биржевых курсов, оценки стоимости имущества и других задач, требующих получения в результате обработки конкретного числа.
- *Прогнозирования временных рядов.* Для составления долгосрочных прогнозов на основе динамического временного ряда значений. Например, нейросети применяются для предсказания цен, физических явлений, объёма потребления и других показателей. По сути, даже работу автопилота Tesla можно отнести к процессу прогнозирования временных рядов.
- *Кластеризация.* Для изучения и сортировки большого объёма незамеченных данных в условиях, когда неизвестно количество классов на выходе, то есть для объединения данных по признакам. Например, кластеризация применяется для выявления классов картинок и сегментации клиентов.
- *Генерация.* Для автоматизированного создания контента или его трансформации. Генерация с помощью нейросетей применяется для

создания уникальных текстов, аудиофайлов, видео, раскрашивания чёрно-белых фильмов и даже изменения окружающей среды на фото.

Нейросети, благодаря своим уникальным возможностям анализа данных и оптимизации работы системы, могут стать мощным инструментом для автоматизации электроприводов и повышения их эффективности [2].

Электропривод представляет собой систему, которая преобразует электрическую энергию в механическое движение, обеспечивая работу различных механизмов и машин. Со стороны управляемой машины электропривод состоит из нескольких ключевых компонентов:

1. Электродвигатель – основной элемент, который преобразует электрическую энергию в механическую.
2. Редуктор – механизм, который изменяет скорость и крутящий момент, передаваемые от двигателя к рабочему органу машины.
3. Система управления – включает в себя контроллеры, датчики и программное обеспечение, которые регулируют работу электродвигателя и редуктора [3].

Для улучшения работы электропривода с помощью нейросетей можно сосредоточиться на оптимизации следующих аспектов:

1. Прогнозирование и оптимизация работы: нейросети могут анализировать данные о работе электропривода и предсказывать его поведение в различных условиях. Это позволяет заранее оптимизировать параметры управления.
2. Адаптивное управление: использование нейросетей для создания адаптивных систем управления, которые могут изменять свои параметры в зависимости от изменений в окружающей среде или в характеристиках нагрузки.
3. Обнаружение аномалий: нейросети могут обучаться на нормальных данных работы привода и выявлять аномалии, что позволяет осуществлять предиктивное обслуживание и предотвращать поломки.
4. Управление в реальном времени: нейросети могут использоваться для управления электроприводами в реальном времени, обеспечивая более точное и быстрое реагирование на изменения в системе.
5. Оптимизация энергопотребления: с помощью нейросетей можно анализировать режимы работы привода и находить оптимальные параметры для снижения энергозатрат.
6. Моделирование и симуляция: нейросети могут использоваться для создания моделей поведения электроприводов, что позволяет проводить симуляции и тестировать различные сценарии управления.
7. Интеграция с IoT: нейросети могут обрабатывать данные, поступающие от сенсоров в реальном времени, что позволяет улучшить управление и мониторинг состояния электроприводов.
8. Улучшение качества продукции: в производственных процессах нейросети могут контролировать работу электроприводов и обеспечивать высокое качество продукции за счет точного управления.

Для успешной реализации этих подходов необходимо учитывать специфику конкретного применения, а также доступность данных для обучения нейросетей [4].

Подобные подходы применяют современные энергетические компании.

IBM

Использование искусственного интеллекта растет по мере того, как все больше отраслей, таких как энергетические компании, внедряют технологию, имитирующую человеческие способности и обеспечивающую прогнозную аналитику в рамках своей повседневной деятельности.

ИИ включает в себя такие компоненты, как машинное обучение, нейронные сети и естественный язык. Энергетическая отрасль использует его для прогнозирования потенциальных отказов оборудования, коррозии или нарушений безопасности, повышения эффективности и продуктивности и повышения безопасности работников.

ABB

Компании используют искусственный интеллект для обнаружения неисправностей, таких как трещины в трубопроводах и оборудовании, путем анализа изображений. Это экономит деньги компаний и сводит к минимуму время простоя при поломке оборудования

Schneider Electric использует возможности машинного обучения Microsoft Copr для удаленного мониторинга и настройки насосов на нефтегазовых месторождениях, поскольку раннее обнаружение неисправности насоса позволяет избежать многодневного выхода оборудования из строя и затрат на ремонт до 1 миллиона долларов.

В энергетике нейросети могут использоваться для прогнозирования спроса на энергию, управления энергосистемами и даже для обнаружения аномалий в работе оборудования [5].

В заключение можно сказать, что интеграция нейросетей в систему управления электроприводами открывает новые горизонты для повышения эффективности, надежности и адаптивности производственных процессов. Нейросети позволяют реализовать высокоточные и адаптивные алгоритмы управления, предсказывать и предотвращать возможные неисправности, а также оптимизировать энергопотребление. Эти технологии не только улучшают эксплуатационные характеристики электроприводов, но и значительно снижают эксплуатационные расходы и повышают общую производительность предприятия. В условиях растущей конкуренции и стремления к устойчивому развитию использование нейросетей для автоматизации электроприводов становится не просто преимуществом, а необходимостью для современных промышленных предприятий.

Список литературы:

1. Рыбаков, Д. А. Развитие и применение нейросетей в различных отраслях: [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-i-primeneniye-neyrosetey->

- v-razlichnyh-otraslyah/viewer/ (дата обращения: 18.09.2024). – Текст: электронный.
2. Корченко, М. Д. Способы применения нейросетей в энергетике: [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-primeneniya-neyrosetey-v-energetike/viewer/> (дата обращения: 19.09.2024). – Текст: электронный.
 3. Области применения нейросетей: [сайт]. – URL: <https://www.etxt.ru/subscribes/oblasti-primeneniya-neyrosetey/> (дата обращения: 20.09.2024). – Текст: электронный.
 4. Хайду, Н. Нейросети – что это и как работает: [сайт]. – URL: <https://www.bitrix24.ru/journal/neyroset-cto-eto/> (дата обращения: 21.09.2024). – Текст: электронный.
 5. Чанг Э. 5 энергетических компаний, использующих искусственный интеллект для повышения экономической эффективности: [сайт]. – URL: <https://money.usnews.com/investing/stock-market-news/articles/2022-04-12/5-energy-companies-using-ai-for-cost-efficiency/> (дата обращения: 22.09.2024). – Текст: электронный.

References:

1. Haidu N. Neuroseti — chto eto i kak rabotaet: [Neural networks — what it is and how it works]. – URL: <https://www.bitrix24.ru/journal/neyroset-cto-eto/> (date accessed: 21.09.2024).
2. Oblasti primeneniya neurosetei: [Applications of neural networks]. – URL: <https://www.etxt.ru/subscribes/oblasti-primeneniya-neyrosetey/> (date accessed: 20.09.2024).
3. Korchenko M.D. Sposobi primeneniya neurosetei v energetike: [Ways to use neural networks in the energy sector]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-i-primeneniya-neyrosetey-v-razlichnyh-otraslyah/viewer/> (date accessed: 19.09.2024).
4. Rybakov D.A. Ruzvitie i primeneniya neurosetei v ruzlichnh otruslyh: [Development and application of neural networks in various industries]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-i-primeneniya-neyrosetey-v-razlichnyh-otraslyah/viewer/> (date accessed: 18.09.2024).
5. Chang E. 5 energeticheskikh kompanii, ispolzuushih iskusstvenniy intelekt dly povisheniya ekonomicheskoy effektivnosti: [5 Energy Companies Using Artificial Intelligence to Improve Economic Efficiency]. – URL: <https://money.usnews.com/investing/stock-market-news/articles/2022-04-12/5-energy-companies-using-ai-for-cost-efficiency/> (date accessed: 22.09.2024).

© Протченко О. В., 2024

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛОБАЛЬНОГО ОБНОВЛЕНИЯ ФЕРОМОНОВ В АЛГОРИТМАХ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

канд. техн. наук, доцент **Хабаров Сергей Петрович**,
Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет им. С. М. Кирова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируется эффективность различных методов глобального обновления феромонов в алгоритме муравьиных колоний для решения задачи о рюкзаке. Сравниваются пять методов, среди которых метод средних значений оказался наиболее эффективным, показывая лучшие результаты по качеству решений и скорости поиска. Этот подход значительно ускоряет процесс оптимизации и снижает риск получения субоптимальных решений, предлагая улучшения для решения комбинаторных задач.

Ключевые слова: алгоритм муравьиной колонии, глобальное обновление феромонов, задача о рюкзаке, метод средних значений, комбинаторные задачи.

RESEARCH ON GLOBAL PHEROMONE UPDATE METHODS IN ANT COLONY ALGORITHMS

PhD, Associate Professor **Khabarov Sergey Petrovich**
Saint Petersburg State Forest Technical
University named after S. M. Kirov
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the effectiveness of various global pheromone update methods in the ant colony algorithm for solving the knapsack problem. Five methods are compared, with the average value method proving to be the most effective, showing superior results in solution quality and search speed. This approach significantly accelerates the optimization process and reduces the risk of suboptimal solutions, offering improvements for solving combinatorial problems.

Keywords: ant colony algorithm, global pheromone update, knapsack problem, average value method, combinatorial problems.

Роевой интеллект в настоящее время стал одной из ключевых технологий для разработки современных интеллектуальных систем. Широко применяются различные алгоритмы, моделирующие поведение стай животных и насекомых. Среди них особенно выделяются три метаэвристических метода: оптимизация колоний муравьев, колоний пчел и алгоритм летучих мышей [1, 2]. Основной целью роевого интеллекта является эффективность решения сложных задач. Несмотря на то, что один муравей или пчела в отдельности не проявляют высокого интеллекта, их колонии демонстрируют удивительную способность

находить оптимальные решения благодаря взаимодействию агентов в рое. В рамках роевого интеллекта множество однородных агентов формируют локальные решения, а глобальное решение возникает на их основе, постепенно приближаясь к оптимальному результату. Этот подход представляет собой метод решения задач «снизу вверх». Наиболее распространенным из роевых является алгоритм муравьиных колоний (ACO, Ant Colony Optimization), где слепые муравьи работают синхронно, чтобы найти лучшие источники пищи, координируясь через механизм испарения феромонов [3, 4].

Муравьиные алгоритмы широко применяются для решения задач маршрутизации, планирования, распределения ресурсов и при дискретной оптимизации [5]. Они охватывают такие задачи, как поиск кратчайших путей в графах и задачи коммивояжера, которые актуальны в сетевых коммуникациях [6] и робототехнике. Применение алгоритмов муравьиных колоний к этим задачам привлекательно еще и тем, что они допускают распараллеливание, что значительно сокращает время вычислений [9].

Одной из классических задач комбинаторной оптимизации является задача о рюкзаке. Суть заключается в выборе оптимального набора предметов при ограниченных ресурсах, таких как вес или объем, с целью максимизации полезности или стоимости выбранных предметов. Эта задача находит широкое применение в различных производственных и прикладных областях благодаря возможности формализации множества оптимизационных ситуаций. Например, задачу о рюкзаке используют для оптимизации загрузки транспортных средств с учетом веса и стоимости товаров, выбора оптимального набора материалов для производства или управления запасами на складе с учетом ограничений по пространству.

Постановка задачи

Для успешного применения алгоритма муравьиных колоний к задачам комбинаторной оптимизации, таким как задача о рюкзаке, необходимо адаптировать алгоритм под специфику каждой задачи. Одним из ключевых аспектов является правильная настройка процесса обновления феромонов, поскольку они играют критическую роль в поиске оптимальных решений.

Адаптация феромонов представляет собой процесс изменения их уровня на основе качества найденных решений. Это позволяет алгоритму «учиться» на предыдущих итерациях: усиливать хорошие пути и ослаблять плохие. Как результат, муравьиный алгоритм может быстрее находить оптимальные решения и избегать повторения неудачных попыток. В стандартных реализациях ACO обновление феромонов происходит следующим образом:

$$\tau_i^{(t+1)} = (1 - \rho)\tau_i^{(t)} + \sum_{k=1}^n \Delta\tau_i^{(k)},$$

где $\Delta\tau_i^{(k)} = \frac{q}{V_k}$ – это изменение феромона, зависящее от стоимости V_k решения, найденного муравьем k ; ρ – коэффициент испарения феромона.

Адаптация феромонов – это процесс изменения их уровня на основе качества решений, найденных муравьями. Это позволяет алгоритму «учиться» на предыдущих итерациях: усиливать хорошие пути и ослаблять плохие.

Благодаря этому муравьиный алгоритм может быстрее находить оптимальные решения и избегать повторения неудачных попыток. Адаптация феромонов может быть выполнена различными методами, среди которых наиболее распространенными являются:

– *Локальное обновление феромонов*: Изменения феромонов происходят во время построения решения. Например, феромоны обновляются на каждом этапе пути муравья, что позволяет им влиять на последующие решения.

– *Глобальное обновление феромонов*: Изменения феромонов происходят после завершения построения всех решений за итерацию. Это позволяет учитывать качество всех решений, найденных муравьями, и корректировать феромоны на основе этого.

В реальных задачах, таких как нахождение оптимального маршрута в графе или оптимизация сложных систем, глобальное обновление феромонов более эффективно направляет поиск, используя собранную информацию обо всех возможных путях. Это помогает АСО избегать преждевременной сходимости к субоптимальным решениям и улучшает способность находить глобальные оптимумы, улучшая общую эффективность муравьиных алгоритмов.

Методы глобального обновления феромонов

В данной статье мы сосредоточимся на методах глобального обновления феромонов, поскольку они позволяют оценить результаты работы всей колонии муравьев и делать более обоснованные изменения в распределении феромонов. Будет исследовано пять наиболее известных методов.

1. *Обновление феромонов без итерационного улучшения (Plain Update)*. В этом методе каждый муравей обновляет феромоны на основе своего решения. Каждый элемент, через который прошел муравей, получает дополнительное количество феромонов пропорционально обратному значению качества решения. Простейший способ, который не учитывает лучший путь в итерации:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \sum_{k=1}^N \frac{Q}{V_k},$$

где $\tau_i(t)$ – количество феромонов на элементе i в текущий момент времени, N – количество муравьев, V_k – значение решения, найденное муравьем k , Q — константа.

2. *Итерационное наилучшее решение (Iteration Best Update)*. В этом методе феромоны обновляются только на основе пути лучшего муравья, который нашел лучшее решение за итерацию. Это позволяет сосредоточить внимание на наиболее успешных путях:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \frac{Q}{V_{best}},$$

где V_{best} – значение лучшего решения, найденного за итерацию.

3. *Среднее значение решений (Average Solution Update)*. Обновление на основе среднего значения всех решений, найденных муравьями. Это позволяет учитывать общий уровень качества решений и делает обновление менее чувствительным к одиночным экстремальным решениям.

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \frac{Q}{\bar{V}},$$

где \bar{V} – среднее значение всех найденных решений за итерацию, то есть

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k.$$

4. *Несколько лучших решений* (Top-n Solutions Update). В этом методе феромоны обновляются на основе нескольких лучших решений за итерацию. Это позволяет использовать несколько успешных путей для улучшения поиска:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \sum_{k=1}^n \frac{Q}{V_{best,k}},$$

где n – количество лучших решений, используемых для обновления, а V_{best} – значение k -го лучшего решения, найденного за итерацию.

5. *Среднее значение* (Mean Value Update). В этом методе значение Q используется как среднее значение всех решений. Феромоны обновляются с учётом качества решений каждого муравья, но коэффициент Q равен среднему значению всех решений:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \sum_{k=1}^N \frac{\bar{Q}}{V_k},$$

где \bar{Q} – среднее значение всех решений за итерацию, то есть $\bar{Q} = \bar{V}$, а V_k – значение решения, найденное k -м муравьем.

Каждый из этих методов имеет свои особенности и может быть более или менее эффективен в зависимости от типа задачи и ее требований. Общим для всех этих подходов является то, что все они включают в себя механизм добавления феромонов на основе значений решений, найденных муравьями. В каждом подходе присутствует величина Q для масштабирования вклада феромонов. При этом следует отметить, что:

– Plain Update и Mean Value Update подходят для задач, где важно избегать преждевременной сходимости и необходимо широкое исследование пространства решений.

– Iteration Best Update и Top-n Solutions Update эффективны для задач, где требуется быстрое нахождение хорошего решения, но могут требоваться дополнительные меры для предотвращения преждевременной сходимости.

– Average Solution Update обеспечивают баланс между исследованием и сходимостью, сглаживая обновления феромонов.

Анализ методов глобального обновления феромонов

Для проведения этого анализа будем использовать модель [10], в которой решалась задача: «Дано N участков лесного фонда, каждый из которых имеет площадь w_i и объем биомассы v_i , где $i = 1, 2, \dots, N$ – это номер участка. Требуется определить подмножество участков $S \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ так, чтобы их суммарная площадь не превышала заданного значения W , обеспечиваемого финансированием на плановые работы».

В этой статье [10] для случая 80 участков лесного фонда и коэффициента влияния эвристической информации $\beta = 2$ было получено, что ни один из 50 запусков программы при 10 муравьях и 10 итерациях не достиг оптимального решения, а полученные субоптимальные решения на 10-15 % отличались от

оптимального значения. Там же было показано, что значительного улучшения результатов можно добиться счет увеличения значения β . Попробуем теперь выяснить, могут ли методы глобального обновления феромонов улучшить производительность АСО. С этой целью программную реализацию всех пяти методов вставим в основной код и выполним тестирование исходной модели.

Таблица 1 – Исследование методов глобального обновления феромонов

Кол-во предметов = 80, $\beta = 2$, Кол-во итераций в АСО = 10,			
Метод обновления феромонов	Среднее время работы (сек)	Среднее отклонение от оптимума	Максимальное отклонение от оптимума
1	0.623	921.78 (10.75%)	1283 (15%)
2	0.582	890.50 (10.38%)	1278 (15%)
3	0.603	931.24 (10.86%)	1376 (16%)
4	0.577	913.18 (10.65%)	1192 (14%)
5	0.732	27.90 (0.33%)	186 (2%)

Из анализа таблицы 1 следует, что только один из методов обеспечил существенное улучшение работы алгоритма (рисунок 1).

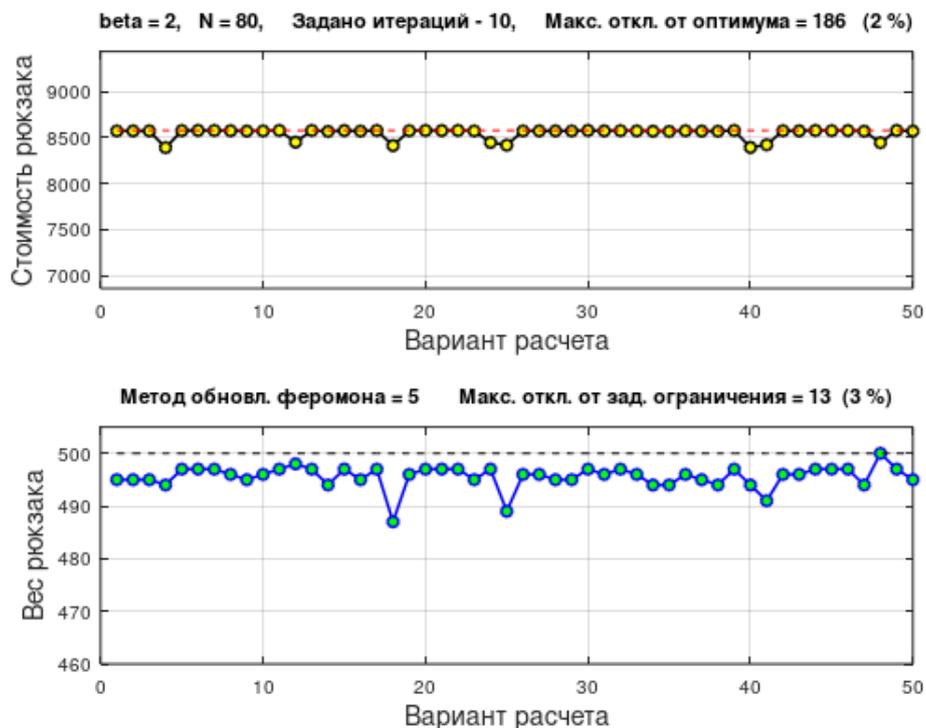


Рисунок 1 – Метод Mean Value Update (80 участков, 10 итераций, $\beta=2$)

При использовании метода глобального обновления феромонов Mean Value Update удалось всего 10 муравьям за 10 итераций 42 раза из 50 запусков программы (84 %) найти оптимальные решения, в остальных случаях решения

отличались от оптимальных решений не более, чем на 2 %. Все остальные методы глобального обновления ничем не превосходили классический метод обновление феромонов без итерационного улучшения (Plain Update). Поэтому далее будет рассмотрен сравнительный анализ только этих двух методов, с акцентом на возможности применения метода средних значений для различных случайно генерируемых наборов данных, состоящих из 100, 200, 500 и 1000 предметов, которые требуется разместить в рюкзаке.

С этой целью в исходный программный код была добавлена функция, которая, приняв параметр, указывающий количество предметов, возвращает три массива, соответствующий размерности: v – массив стоимостей предметов, w – массив весов предметов и W – максимальный допустимый вес рюкзака. Но чтобы проводить тестирование и оценку эффективности различных методов, надо знать точные оптимальные решения для сгенерированных наборов данных. Используя для этого метод динамического проектирования, можно получить оптимальные решения для сгенерированных наборов данных.

Таблица 2 – Результаты решения задачи о рюкзаке точным методом

Количество предметов в наборе	Время решения, сек		Суммарная стоимость рюкзака	Суммарный вес рюкзака
	Мат. ожидание	СКО		
20	1.08	0.028	3516	498
50	2.68	0.011	5873	500
100	5.73	0.453	7116	497
200	11.42	0.000	10704	500
500	27.35	0.758	12648	500
1000	54.35	0.875	14047	500

Имея данные таблицы 2, можно перейти к тестированию работы метода средних значений для адаптивного обновления уровня феромонов и оценке качества его работы на сгенерированных наборах данных.

Результаты анализа метода средних значений

Решение задачи о рюкзаке требует значительных вычислительных ресурсов и времени для поиска точного решения. Муравьиные алгоритмы направлены на преодоление этой проблемы, заменяя поиск идеальных решений нахождением приемлемых решений за относительно короткое время. Такой подход позволяет эффективно решать задачи, где идеальная точность может быть уступлена в пользу быстрогодействия.

Ключевыми метриками для оценки работы муравьиных алгоритмов являются точность решения, время выполнения и качество найденного решения по сравнению с оптимальным значением. Если муравьи найдут результат в пределах 1-3 % от лучшего известного решения, то в большинстве прикладных задач он может считаться успешным. Исходя из этого вариант, представленный на рисунке 1, уже может быть занесен в положительный баланс метода средних

значений. Проведем аналогичные тесты и с другими наборами данных. Для этого будем использовать колонию всего из 10 муравьев.

Они в течение всего 10 итераций должны будут оптимизировать рюкзак, используя классический метод глобального обновления феромонов и метод средних значений. При этом еще и оценивая влияние на качество результата степени учета эмпирической информации. Результаты, полученные на основе выполнения 50 циклов АСО для каждого из вариантов, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение двух методов глобального обновления феромонов

Кол-во предметов	Индекс метода	β	Средн. время работы (сек)	Средн. отклонения от оптимума		Макс. отклонения. от оптимума	
Кол-во итераций в АСО = 10, Кол-во муравьев = 10							
100	1	2	0.57	776.2	10.9 %	1060	15%
100	5	2	0.70	67.5	0.94 %	197	3.0%
100	1	5	0.78	55.0	0.77 %	130	2.0 %
100	5	5	0.20	2.25	0.03 %	19	0.0 %
200	1	2	0.73	1719	16 %	217	20 %
200	5	2	0.96	252.9	2.4 %	415	4 %
200	1	5	1.20	199.3	1.9 %	315	3 %
200	5	5	0.92	17.35	0.1 %	64	1 %
500	1	2	0.81	3464	27 %	4147	33 %
500	5	2	1.19	513.5	4.1 %	808	6 %
500	1	5	1.36	486.6	3.5 %	661	5 %
500	5	5	1.42	75	0.6 %	133	1 %
1000	1	2	1.05	4933	35 %	5709	41 %
1000	5	2	1.39	1035	7.4 %	1443	10 %
1000	1	5	1.83	904.6	6.4 %	1142	8 %
1000	5	5	2.07	129.8	0.9 %	252	2 %
100 *	5	5	В этом режиме было получено 85 % точных решений				

Как видно из таблицы 3, метод средних значений (метод 5) на всех наборах данных дает лучшие результаты по среднему и максимальному отклонению от оптимума, чем классический метод (метод 1). При большом числе предметов в случае $\beta = 2$ классический метод вообще не справляется с задачей, и только увеличение β позволяет получить приемлемые результаты.

Также из таблицы 3 следует, что для всех наборов данных более весомый учет эмпирической информации ($\beta = 5$) позволяет в несколько раз повысить качество получаемых решений для каждого из методов обновления феромонов. Практически все полученные результаты АСО лежат в области допустимой инженерной погрешности (10 %), а многие из них попадают в 1-3 % область, занимая время в разы меньше, чем аналитические методы. Например, для 1000 предметов АСО дает с точностью 98 % результат за время в 27 раз меньшее, чем метод динамического программирования.

Подводя итог сравнению методов обновления феромонов, можно сказать, что использование метода средних значений с повышенным коэффициентом β является предпочтительным, так как обеспечивает более высокую точность и качество решений при относительно небольшом времени выполнения, что особенно важно при решении сложных оптимизационных задач (рисунок 2).

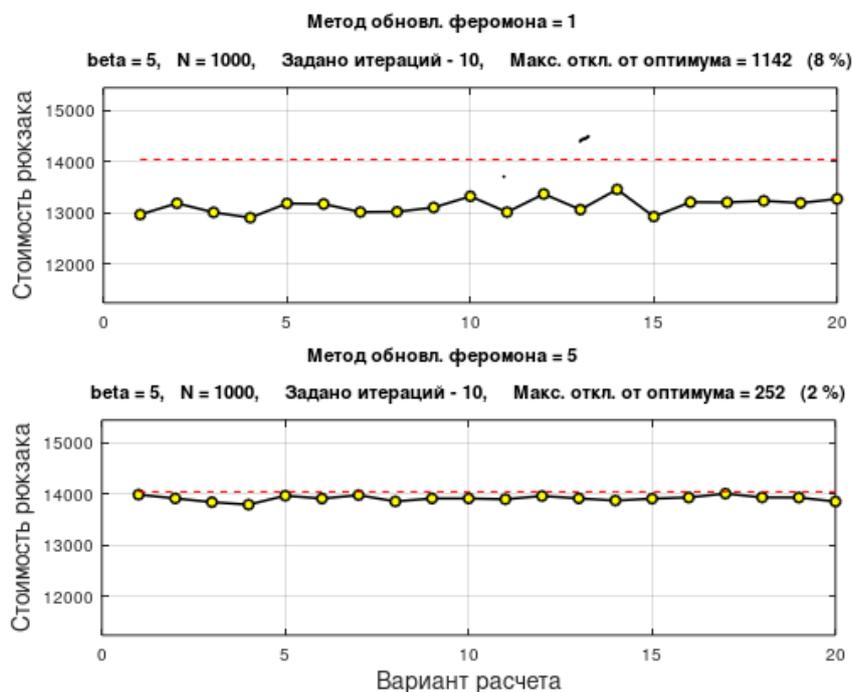


Рисунок 2 – Вариант 1000 предметов (10 итераций, 10 муравьев и $\beta=5$)

При этом надо подчеркнуть, что все полученные результаты не являются точными оптимальными решениями, а только их 1-3 % приближениями, что может быть достаточно для большинства практических задач с огромным набором исходных данных. Для поиска точных решений потребуется больше итераций, муравьев и настройки параметров АСО, что вызовет и увеличение затрат времени на поиск решения.

Затраты времени работы муравьиного алгоритма на поиск оптимальных решений рассмотрим на уже ранее используемом нами наборе данных из 100 предметов, для которого уже известны некоторые результаты. Для проведения анализа затрат времени снимем в основном коде ограничения на количество выполняемых итераций, а в самом алгоритме АСО предусмотрим выход из основного цикла при достижении решения, которое будет равно оптимальному значению. Это значение нам известно из предварительного расчета методом динамического программирования. Результат двадцати обращений к коду АСО, который настроен на классический метод обновления феромонов, и в котором предусмотрено изменение параметра β , представлен на рисунке 3.

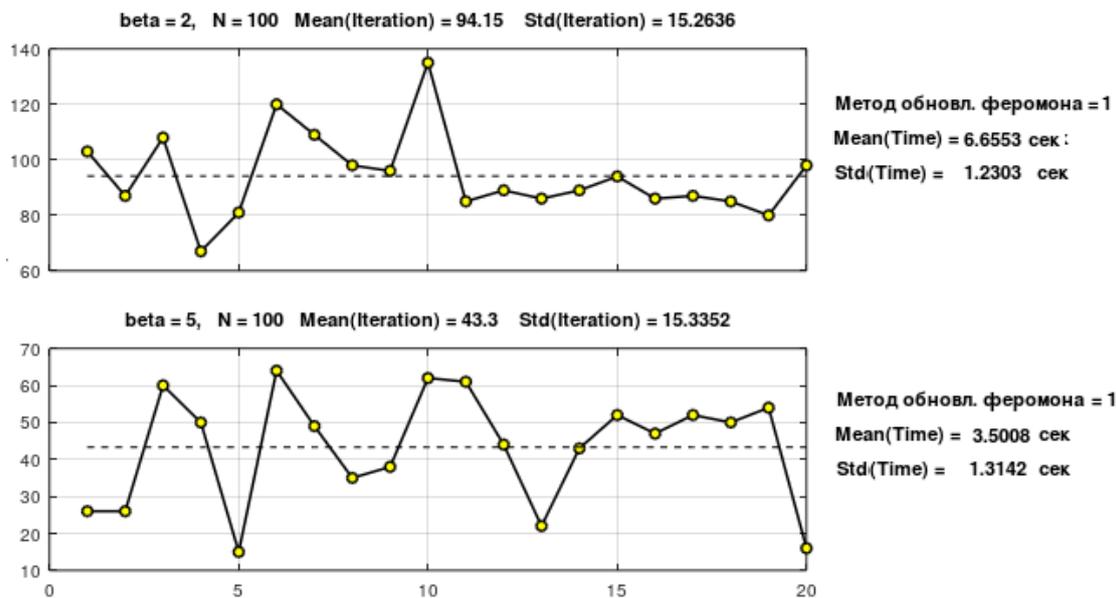


Рисунок 3 – Поиск оптимального решения с использованием метода 1

На основе представленных данных можно сделать вывод, что АСО с классическим методом обновления феромона позволяет при использовании 10 муравьев и стандартных настройках алгоритма находить оптимальные решения для набора данных из 100 предметов. Скорость достижения оптимального решения существенно зависит от величины параметра β , и составляет 6.7 ± 1.23 секунд в первом случае и 3.5 ± 1.31 секунд во втором случае. Изменение практически в два раза. Если вспомнить, что точное решение было получено за 5.73 ± 0.453 секунды, то результат можно уже признать удовлетворительным.

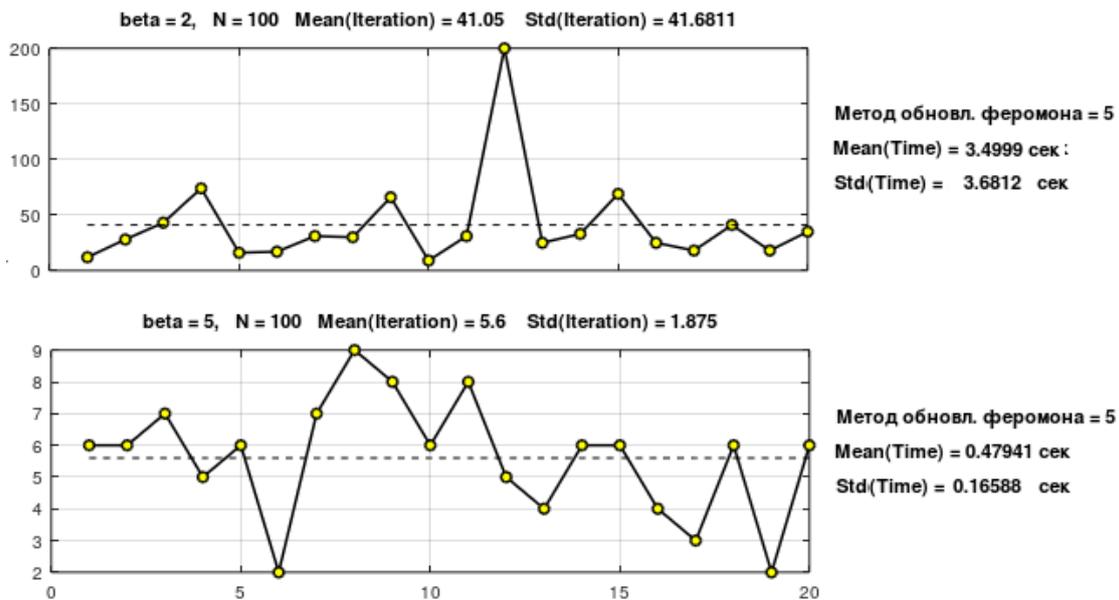


Рисунок 4 – Поиск оптимального решения с использованием метода 2

Однако существенного прогресса в скорости работы АСО можно будет добиться, если перейти на метод средних значений, который без повышения значения β обеспечивает примерно такой же статистический результат. Но к нему надо относиться с осторожностью. Дело в том, что обеспечивая быструю сходимость поиска решения, метод средних значений имеет тенденцию к залипанию на локальных максимумах, что можно видеть на рисунке 4 при двенадцатом запуске алгоритма. Точка на графике информирует лишь о том, что АСО просто достиг установленного в коде максимального ограничения по числу итераций, не найдя до двухсотой итерации оптимального решения. Значительно лучше дело обстоит в случае использования метода средних значений с параметром $\beta = 5$. Этот пример демонстрирует способность алгоритма АСО находить оптимальное решение за время меньше 0,5 секунды, что почти в 10 раз быстрее аналитического метода.

Следует отметить, что и на больших наборах данных АСО также работает значительно быстрее динамического программирования (рисунок 5).

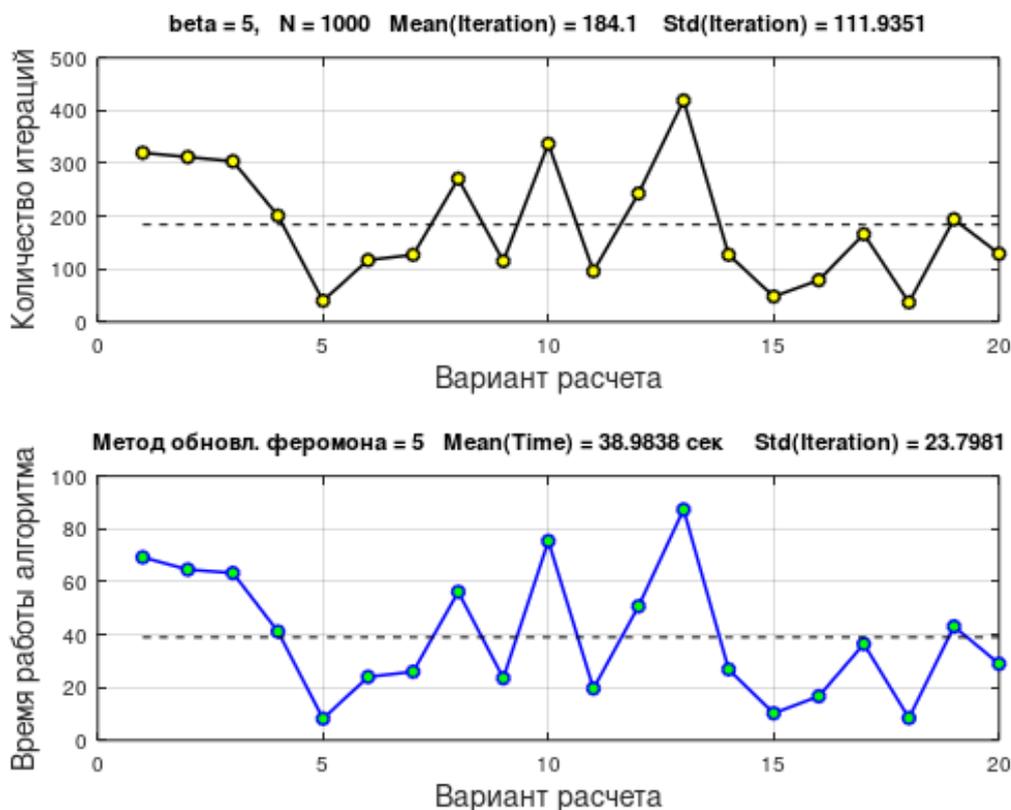


Рисунок 5 – Поиск оптимального решения среди 1000 предметов

Подводя итоги, надо особо подчеркнуть, что анализ методов глобального обновления феромонов показал, что из пяти исследованных методов только метод средних значений значительно улучшает производительность алгоритма муравьиной колонии при решении задачи о рюкзаке. В частности, при тестировании на наборе из 80 предметов этот метод позволил достигать оптимальных решений в 84 % случаев. В других случаях отклонения от оптимума были минимальны, не превышая 1-2 %.

Выводы:

Преимущества метода средних значений проявляются особенно ярко при увеличении числа предметов. На всех протестированных наборах данных (100, 200, 500 и 1000 предметов) данный метод демонстрировал лучшее среднее и максимальное отклонение от оптимума по сравнению с классическим методом. Более того, для рассматриваемого класса задач при увеличении значения β качество решений значительно возрастало для обоих методов обновления феромонов, что указывает на важность параметра эмпирической информации.

Метод средних значений оказался особенно эффективен для больших наборов данных, позволяя получать решения с точностью до 98 % за время в 27 раз меньшее, чем метод динамического программирования. Это делает его предпочтительным для задач, требующих быстрого получения приближенных решений с допустимой погрешностью.

Однако стоит отметить, что, несмотря на высокую скорость сходимости, метод средних значений склонен к залипанию на локальных максимумах, что требует осторожности при его применении. Для предотвращения этой проблемы

можно использовать стратегии, такие как введение случайных пертурбаций в процесс обновления феромонов или периодическое изменение значения β , чтобы стимулировать более широкий поиск решений и избежать преждевременной сходимости.

Проведенный анализ показал, что несмотря на стохастическую природу поиска, АСО дает стабильные и качественные результаты, приближаясь к оптимальным решениям даже в сложных сценариях. Предложенный подход с использованием АСО показывает значительные перспективы для практических приложений, особенно при решении траекторных задач [11], проектировании беспроводных сетей и маршрутизации данных.

Список литературы:

1. Swarm intelligence. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_intelligence# (дата обращения: 01.09.2024).
2. Ислам, Т., Ислам, М. и Рухин, М. Анализ поведения фуражировки и эхолокации алгоритмов роевого интеллекта в оптимизации: АСО, ВСО и ВА. Международный журнал науки об интеллекте, 2018, vol. 8 , p.1-27.
3. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization //MIT Press. – 2004. – 321с.
4. Штовба, С. Д. Муравьиные алгоритмы: теория и применение / С. Д. Штовба // Программирование. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 3-18. – EDN HSCKQV.
5. Популяционные алгоритмы оптимизации: Искусственная пчелиная колония (Artificial Bee Colony – ABC). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mql5.com/ru/articles/11736> (дата обращения: 02.07.2024).
6. Заяц, А. М. Графовые модели в анализе и синтезе беспроводных сенсорных сетей // Информационные системы и технологии: теория и практика. сб. научн. тр. вып. 14/ отв. ред. М. Р. Вагизов. – СПб.: СПбГЛТУ, 2022. – С. 118-127.
7. Хабаров, С. П. Муравьиный подход к проектированию экологических троп / С. П. Хабаров // Технические и естественные науки: вчера, сегодня, завтра: Сборник научных статей. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью «Сфера», 2024. – С. 16-21.
8. Хабаров, С. П. Реализация метода муравьиной колонии для решения ограниченной задачи коммивояжера в среде Octave // Вопросы науки. – 2024. – № 3.
9. Микулик, И. И. Распараллеливание гибридного алгоритма муравьиной колонии с изменяющимися с помощью генетического алгоритма параметрами / И. И. Микулик, Е. А. Благовещенская // Проблемы информатики. – 2023. – № 2(59). – С. 86-94. – EDN HVTPLC.
10. Хабаров, С. П. Реализация в Octave муравьиного подхода к распределению ресурсов лесного фонда / С. П. Хабаров // Технические и естественные науки: вчера, сегодня, завтра: Сборник научных статей. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью «Сфера», 2024. – С. 8-15.
11. Вагизов, М. Р. Расчет траектории движения БПЛА с учетом требования снижения его скорости в конечной точке // Информация и космос. – 2022. – № 1. – С. 122-128. – EDN YRTHKE.

References:

1. Swarm intelligence. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_intelligence# (date accessed: 01.09.2024).
2. Islam, T. , Islam, M. and Ruhin, M. (2018) An Analysis of Foraging and Echolocation Behavior of Swarm Intelligence Algorithms in Optimization: ACO, BCO and BA. International Journal of Intelligence Science, 8, 1-27.
3. Dorigo M., Stützle T. (2004) Ant Colony Optimization //MIT Press. – 321c.
4. Shtovba, S. D. Ant algorithms: theory and application / S. D. Shtovba // Programming. – 2005. – Vol. 31, No. 4. – Pp. 3-18. (in Russian).
5. Population optimization algorithms: Artificial Bee Colony (ABC). URL: <https://www.mql5.com/ru/articles/11736> (date accessed: 01.09.2024). (in Russian).
6. Zayats, A. M. Graph models in the analysis and synthesis of wireless sensor networks // Information systems and technologies: theory and practice. collection of scientific papers, issue 14 / ed. M.R. Vagizov. – SPb.: SPbGLTU, 2022. – P. 118-127. (in Russian).
7. Khabarov, S. P. Ant approach to designing ecological trails // Technical and natural sciences: yesterday, today, tomorrow: Collection of scientific articles. – Volgograd: Limited Liability Company "Sfera", 2024. – P. 16-21. (in Russian).
8. Khabarov, S. P. Implementation of the ant colony method for solving the restricted traveling salesman problem in the Octave environment // Questions of Science – 2024. – No. 3. P. (in Russian).
9. Mikulik, I. I. Parallelization of a hybrid ant colony algorithm with parameters changing using a genetic algorithm / I. I. Mikulik, E. A. Blagoveshchenskaya // Problems of Informatics. – 2023. – No. 2 (59). – P. 86-94. (in Russian).
10. Khabarov, S. P. Implementation in Octave of the ant approach to the distribution of forest resources // Technical and natural sciences: yesterday, today, tomorrow: Collection of scientific articles. – Volgograd: Limited Liability Company "Sfera", 2024. – P. 8-15. (in Russian).
11. Vagizov, M. R. Calculation of the trajectory of the UAV taking into account the requirement to reduce its speed at the end point // Information and space. – 2022. – No. 1. – P. 122-128. (in Russian).

© Хабаров С. П., 2024

МАТЕРИАЛЫ

Всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса», приуроченной к 95-летию юбилею Кондопожского ЦБК

2024

Редактор и корректор Е. О. Тарновская
Технический редактор М. Д. Баранова

Научное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 27.12.2024 г. Рег. № 5348/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.