

КОМБИНИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД БУМАЖНО-КАРТОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. Н. Штепа, доктор технических наук, декан инженерного факультета

А. В. Козырь, инженер

Полесский государственный университет, г. Писк, Республика Беларусь

Н. А. Заец, доктор технических наук, профессор

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Д. Г. Алексеевский, доктор технических наук, доцент

Запорожский национальный университет Украины

E-mail: shns1981@gmail.com

Аннотация. *В настоящее время не созданы комплексные и унифицированные решения для интенсификации процессов с системами управления согласно интегральных ресурсоэффективных критериев, что повышает актуальность задачи разработки технологического базиса специализированного комбинированного электротехнологического комплекса водоочистки.*

Целью исследований является обоснование структуры и параметров комбинированных электротехнологических процессов очистки сточных вод бумажно-картонного производства.

При очистке сточных вод использовались электрокоагуляционные процессы, характеризующиеся электрохимическим растворением металлических анодов. Также при обработке использовалась химическая коагуляция, в основе которой лежит добавление в сточные воды активных коагулянтов: солей аммония, меди, железа. Для ускорения процессов осаждения после коагуляции использовался биоцидный флокулянт, после внесения которого осветлённый раствор пропусклся через диафрагменный электролизер с неактивной мембранной. Также сточная вода с целью дополнительного окисления лютоантов поддавалась озонированию. Для смешивания коагулянта и стоков использовали подачу атмосферного воздуха. После флотокоагуляции сточная вода седиментационно разделялась и фильтровалась при необходимости через пенополистирольный фильтр. Оценив результаты экспериментальной обработки сточных вод бумажно-картонного производства, предложена комбинированная схема электротехнологического комплекса водоочистки.

Расчёт технико-экономических показателей продемонстрировал, что финансовые затраты на обработку смывов клея и красителей с помощью комбинированного электротехнологического комплекса почти в шесть раз меньше, чем услуги специализированных фирм по утилизации такой сточной воды. Отведение же неочищенных водных растворов бумажно-картонного производства

без очистки недопустимо – с точки зрения их возможной критической антропогенной нагрузки на окружающую среду в таком случае.

Ключевые слова: *экологическая безопасность, электротехнологический комплекс, сточные воды, электрокоагуляция, химическая коагуляция, биоцидный флокулянт, озонирование*

Актуальность. По оценкам экспертов многих организаций в ближайшие десятилетия прогнозируется существенный дефицит пресной воды. В Программах ООН по окружающей среде отмечается, что если экономическую и социальную ситуацию использования водных ресурсов будут по-прежнему определять рыночные факторы, то более половины мирового населения к 2032 г. будет проживать в регионах со значительным дефицитом воды [1].

К основным негативным антропогенным влияниям на экологию относятся и экономия на качественной водоочистке. Так сточные воды на предприятиях, производящих продукцию на основе макулатуры, главным образом формируются на стадиях очистки, сортирования и облагораживания макулатурной массы [2]. Как правило, наиболее загрязнённый сброс создаётся во время промывки оборудования, удаления печатной краски и регенерации волокон. Поэтому сточные воды на предприятиях, использующих макулатуру, включают воду с этапа отделения отходов на сортировках и очистителях; фильтрат от установок промывки, сгущения и обработки осадка; избыток оборотной воды в системе рециркуляции. По классической схеме сточные воды от бумажно-картонного производства сбрасываются после химико-механической и биологической очистки в водные объекты, или после первичной очистки от взвешенных частиц на муниципальные очистные сооружения [3]. Загрязнения таких сточных вод характеризуется показателями химического потребления кислорода (ХПК) и биологического потребления кислорода (БПК₅), биогенными и взвешенными веществами, содержанием тяжелых металлов, абсорбируемого органического хлора, различных солей и других поллютантов.

Анализ последних исследований и публикаций. Очистка сточных вод фабрик картона представляет до сих пор значительные трудности. Для некоторых небольших фабрик с умеренным сбросом сточных вод (до 100 м³/сутки) оказалась

возможной поливка земельных участков; однако это требует тщательности и больших трудозатрат, а занятые орошаемые площади лишь ограниченно могут быть использованы для сельскохозяйственных нужд [4]. В Нидерландах [2] на крупных фабриках горячие концентрированные сточные воды от регистровых валиков и других мест сбрасываются в метантенках в течение 8 дней. Полученный при этом метан используется для подогрева сточных вод или для других отопительных целей. Перебродившие сточные воды разбавляются затем обычными производственными водами и подвергаются дальнейшему разложению в больших прудах-отстойниках в течение нескольких недель. Хотя полученный эффект разложения был значителен, но большие площади прудов со сточными водами издают неприятный запах, а очистка воды к тому же не соответствует нормативным требованиям.

Процесс удаления печатной краски из макулатуры и ее отбелка приводят к более высоким показателям ХПК стоков. Это объясняется тем, что в процессе подготовки макулатурной массы без удаления печатной краски большая часть загрязнений, приводящих к росту ХПК, задерживается в продукции [4]. Данные об уровне БПК₅ после биологической очистки свидетельствуют о незначительной разнице в значениях этого показателя при переработке макулатуры с удалением печатной краски и без него. На хорошо работающих очистных сооружениях величина БПК₅ после очистки стоков, как правило, менее 20 мг/л, независимо от того, какой она была до очистки [2]. Разница в удельной нагрузке по БПК₅ зависит, в основном, от разницы в расходах воды.

Вместе с тем комплексные и унифицированные решения с интенсификацией процессов и системами управления согласно интегральных ресурсоэффективных критериев в настоящее время не созданы [5, 6] Соответственно, разработка технологического базиса специализированного комбинированного электротехнологического комплекса водоочистки является актуальной задачей.

Цель исследования – обоснование структуры и параметров комбинированных электротехнологических процессов очистки сточных вод бумажно-картонного производства.

Материалы и методы исследования. Базовым предприятием бумажно-картонного производства выступил объект, на котором следующие показатели расхода сточных вод: по красителю – 600 л/сутки, по клею (на основе крахмала) – 400 л/сутки. При этом обрабатывались растворы хранившиеся на протяжении более года и полученные в ближайшие дни к проведению экспериментов. Зафиксированные показатели качества сточных вод представлены в табл. 1.

1. Показатели качества сточных вод бумажно-картонного производства

Показатель качества	«Отстоявшаяся» проба (80 % клея + 20 % красителя)	«Свежая» проба (80 % клея + 20 % красителя)
рН	5,2	11,6
Взвешенные частицы, мг/л	118	644
ХПК, мгО ₂ /л	12200	13800
Азот аммонийный, мг/л	1,3	3,4
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), мг/л	14,6	4,7
Сухой остаток, мг/л	10088	10642
Хлориды мг/л	142	177

При очистке сточных вод использовались электрокоагуляционные процессы, характеризующиеся электрохимическим растворением металлических анодов (металлическая стружка) в соответствии с уравнением:



где M — символ металла; n — его валентность.

Суть протекающих при этом реакций заключается в следующем: при протекании постоянного электрического тока анод подвергается электролитическому растворению с образованием ионов Fe (II) (в случае железной стружки в роли анода), который после окисления является коагулянтom и реализует описанный выше процесс удаления загрязнителей из водных растворов.

Также использовалась при обработке химическая коагуляция, в основе которой лежит добавление в сточные воды активных коагулянтов: солей аммония, меди, железа. При этом поллютанты выпадают в осадок хлопьями; формируются крупные образования благодаря воздействию молекулярных сил сцепления во время перемешивания или движения под воздействием внешнего силового поля. При коагуляции сточных вод осадок в форме хлопьев может составлять почти пятую часть всех фильтруемых сточных вод.

Для ускорения процессов осаждения после коагуляции использовался биоцидный флокулянт (БФ) на основе полимерно-коллоидного комплекса. В сточную воду вносилась доза БФ (его показатели: рН = 10,47, TDS = 2870) 0,125 мл/л с концентрацией 1 % (в дальнейшем рабочая доза).

Стоит отметить, что в сточной воде с клеем на основе крахмала после внесения флокулянта начинают крайне интенсивно оседать загрязнители – процесс полного осаждения загрязнителей занимает менее 1 минуты.



Рис. 1. Озонатор для очистки сточных вод

Далее, после внесения БФ осветлённый раствор пропускаться через диафрагменный электролизер с неактивной мембранной (анод и катод выполнены из электродного графита, в анод дополнительно засыпалась стружка) объёмом 3 л при силе тока 10 А. Время электролиза составило 120 с.

Также сточная вода с целью дополнительного окисления поллютантов подавалась озонированию. Расход озона на разрушение загрязняющих веществ зависит от многих факторов: рН водной среды, концентрации вредных веществ, концентрации озона, способа смешения, продолжительности контакта озон-воздушной смеси с обрабатываемой средой. Используемый озонатор генерирует порядка 10 г/час озона (рис. 1). Время обработки озоном – 20 минут.

Процесс озонирования можно интенсифицировать совместным воздействием озона и ультразвука, именно поэтому применялись ультразвуковые акустические колебания с частотой выше 20 кГц.

Для смешивания коагулянта (FeCl_3 , 40 %) и стоков использовали подачу атмосферного воздуха – фактически имела места флотокоагуляция. Режим флотокоагуляционной обработки: расход воздуха – 500 л/час.

Ориентировочный расход реагентов представлен в табл. 2.

2. Ориентировочный расход реагентов

Вид сточной воды	Коагулянт (FeCl_3), мг/л	Щёлочь (NaOH), мг/л
Клей	1100	500
Краситель	4000	2000

После флотокоагуляции сточная вода седиментационно разделялась (отстаивалась на протяжении 2 часов) и фильтровалась при необходимости через пенополистирольный фильтр (ППФ).

Результаты исследований и их обсуждение.

Соответственно, после реагентной и окислительной обработок, отстаивания и фильтрации сточной воды получены осветлённые водные растворы (табл. 3).

**3. Результаты химической обработки и воздействия озона на сточные воды
бумажно-картонного производства**

Режимы обработки	pH	СПАВ, мг/л	ХПК, мгО ₂ /л
№1 (главный загрязнитель – краситель)	12,4	21,3	4650
№2 (главный загрязнитель – краситель)	12,5	9,3	5900
№3 (главный загрязнитель – краситель)	12,5	12,7	4850
№4 (главный загрязнитель – клей)	9,6	6,1	1870
№5 (главный загрязнитель – клей)	7,8	4,6	1625
№6 (главный загрязнитель – краситель)	12,6	30,3	5250
№7 (главный загрязнитель – краситель)	0,71	8,1	4525

Режимы химической обработки и озонирования:

№ 1 – реагентная очистка в щелочной среде;

№ 2 – реагентная очистка в щелочной среде после ультразвуковой (УЗ) интенсификации (обработана проба режима №1);

№ 3 – окисление пробы режима № 1 озоном;

№ 4 – реагентная очистка в щелочной среде;

№ 5 – окисление пробы № 4 озоном;

№ 6 – реагентная очистка в щелочной среде;

№ 7 – подкисление раствора и окисление пробы № 6 озоном.

Оценив результаты предварительной химической обработки и воздействия озона на сточные воды бумажно-картонного производства, предложена комбинированная схема электротехнологического комплекса водоочистки (рис. 2). На его первом этапе в ёмкость ректора вносятся реагенты для коррекции pH и

предварительной коагуляции взвешенных и коллоидных частиц. Их отделение выполняется в центрифуге. Осветлённый раствор подаётся в ёмкость реактора с интенсификацией на основе ультразвукового (УЗ) воздействия и потом поступает на электролизное окисление [7]. Для повышения эффекта окисления в электролизный блок подводится озон. Раствор после окисления подаётся на центрифугу для отделения образовавшихся взвешенных частиц. С центрифуги раствор поступает на блок тонкой очистки.

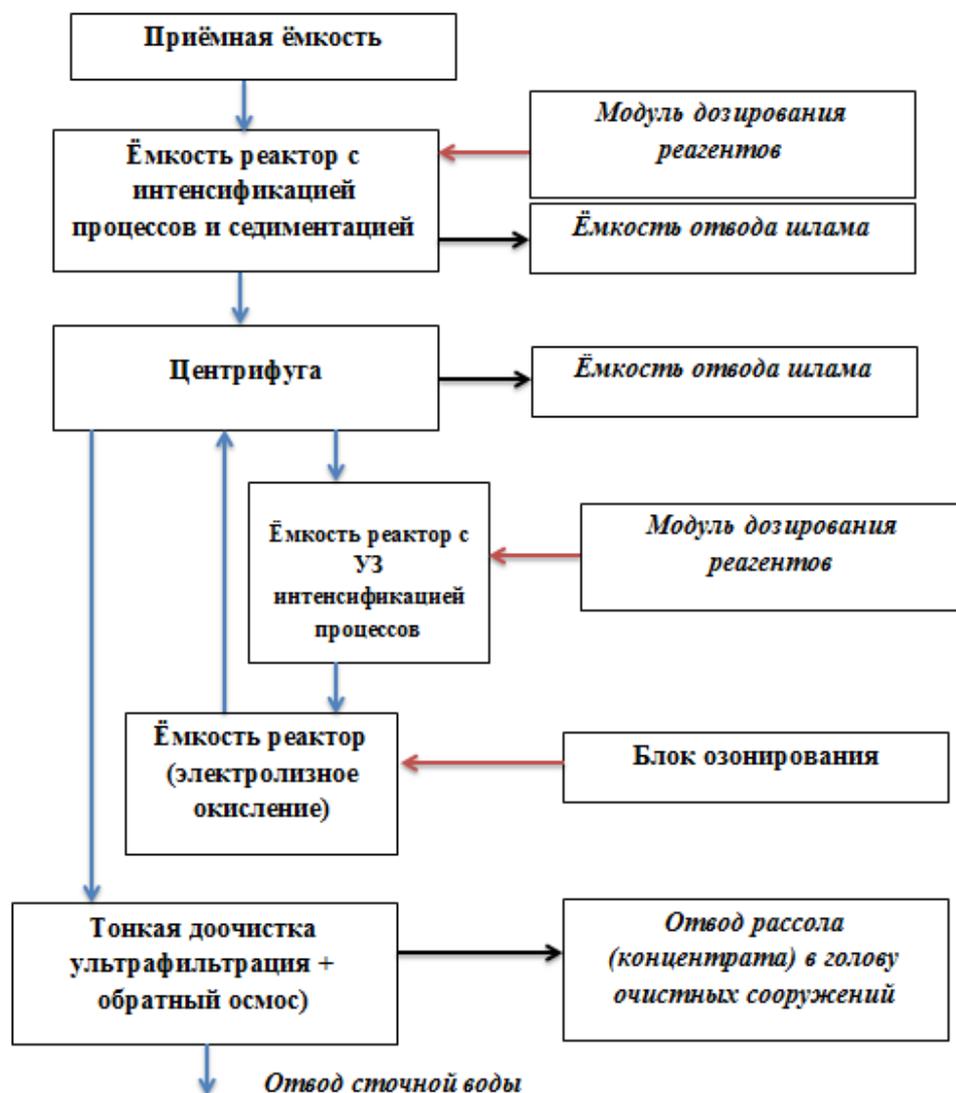


Рис. 2. Структура комбинированного электротехнологического комплекса очистки сточных вод бумажно-картонного производства

Используя структуру такого комплекса (см. рис. 2), были выполнены дальнейшие экспериментальные исследования, которые продемонстрировали

обоснованность предложенной схемы (рис. 3) по удалению ключевых загрязнителей: 1 – старые смывы клея, 2 – новые смывы клея, 3 – раствор нового клея (50 %) и красителя (50 %), 4 – обработка новых смывов клея БФ с фильтрацией через ППФ, 5 – обработка старых смывов клея БФ с фильтрацией через ППФ, 6 – обработка старых смывов клея и красителя (в соотношении 50 % на 50 %), 7 – обработка новых смывов клея с внесением БФ и электролизом, 8 – обработка красителя коагулянтом (хлоридом железа), 9 – обработка красителя электролизом с внесением коагулянта (хлорида железа), 10 – нормативные требования к качеству сточных вод (предельно-допустимые концентрации).

Отдельно необходимо отметить, что неприятный запах сточных вод значительно уменьшается после внесения биоцидного флокулянта. Он удаляется полностью после электролизной обработки осветлённого раствора с использованием БФ водного раствора. Соответственно, использование биоцида решает две крайне актуальные задачи экологической безопасности: флокуляцию загрязнителей сточной воды и дезодорацию запахов.

Расчёт технико-экономических показателей показал значительность финансовых затрат на обработку смывов клея и красителей (табл. 4).

4. Техничко-экономические показатели использования разработанного комбинированного электротехнологического комплекса очистки сточных вод бумажно-картонного производства

Суточный объем стока, м ³	3,00
Максимальные затраты на реагенты в сутки, у.е.	99,11
Затраты на электроэнергию, у.е.	24,36
Стоимость очистки 1 м ³ , у.е.	57,40
Стоимость очистки 3 м ³ , у.е.	172,20

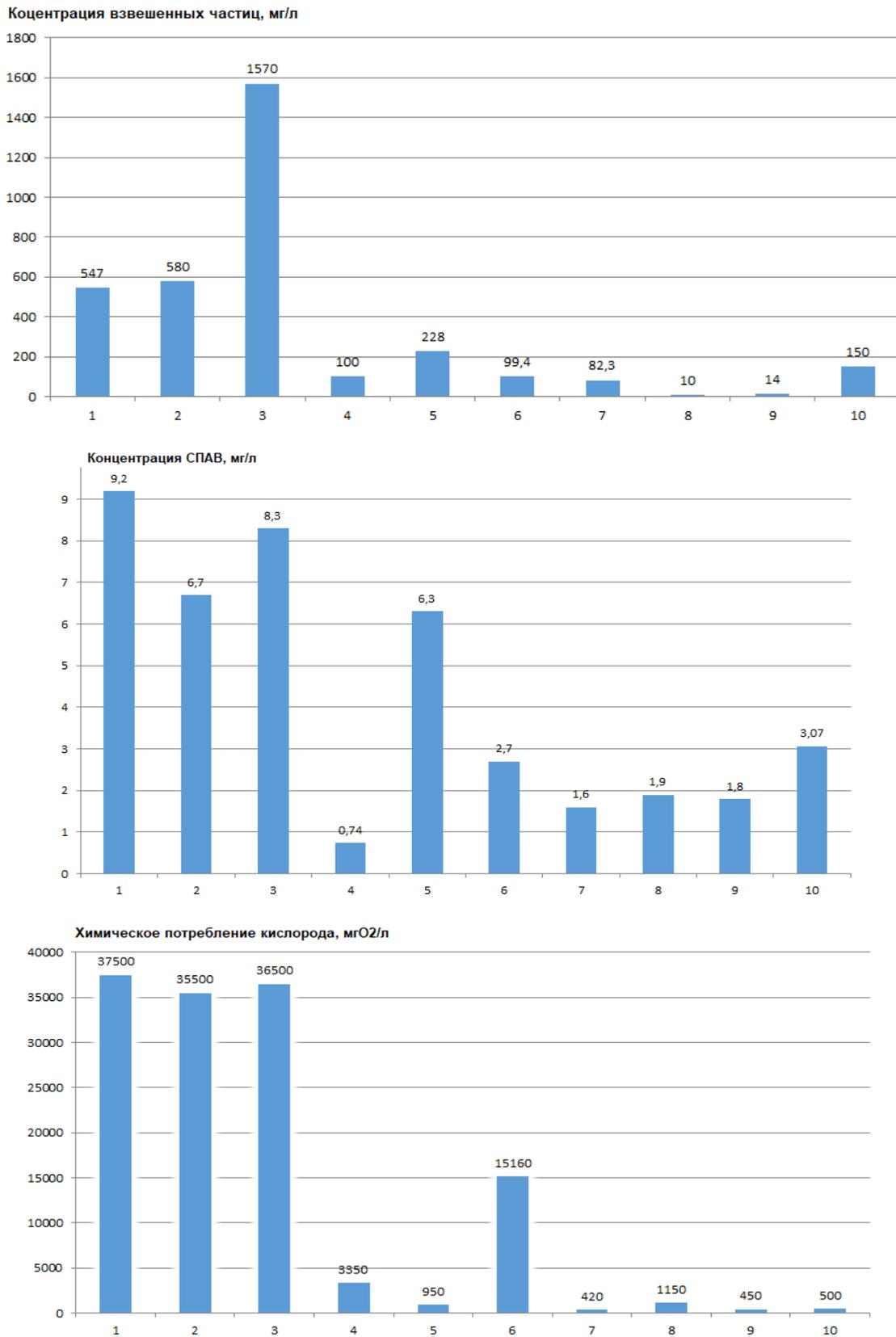


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований использования комбинированного электротехнологического комплекса очистки сточных вод бумажно-картонного производства

Вместе с тем практика показывает, что услуги специализированных фирм по утилизации такой сточной воды значительно более затратные – рыночная цена более 300 у.е. за 1 м³ с вывозом за пределы предприятий-загрязнителей. Отведение же неочищенных водных растворов бумажно-картонного производства без очистки недопустимо – с точки зрения их возможной критической антропогенной нагрузки на окружающую среду в таком случае.

Выводы и перспективы. Использование электролизной обработки осветлённого раствора с применением биоцида решает две актуальные задачи экологической безопасности: флокуляцию загрязнителей сточной воды и дезодорацию запахов.

Основываясь на результатах экспериментальной обработки сточной воды бумажно-картонного производства, предложена комбинированная схема электротехнологического комплекса водоочистки с использованием химических и биохимических методов воздействия на растворы (коагуляция и флокуляция), механической обработки (центрифугирование, фильтрация и седиментирование), физико-химического оборудования (электролизного и озонализного окисления) с ультразвуковой интенсификацией.

Расчёт технико-экономических показателей показал, что финансовые затраты на обработку смывов клея и красителей с помощью комбинированного электротехнологического комплекса почти в шесть раз меньше, чем услуги специализированных фирм по утилизации такой сточной воды.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на обоснование, создание и параметризацию математических моделей комбинированных электротехнологических комплексов водоочистки.

Список использованных источников

1. Мазоренко Д. І., Цапко В. Г., Гончаров Ф. І. Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва. Київ: Знання, 2006. 376 с.
2. Яблочкин Н. И., Комаров В. И., Ковернинский И. Н. Макулатура в технологии картона. Архангельск: АГТУ, 2004. 252 с.
3. Как организовать промышленное производство бумажной упаковки на примере изготовления коробок из картона и гофрокартона. В производство: журнал

бизнес идей. URL: http://vproizvodstvo.ru/proizvodstvennye_idei/kak_organizovat_proizvodstvo_bumazhnoj_upakovki_gofrokartona/ (дата обращения: 23.08.2019).

4. Ванчаков М.В., Дубовый В.К., Кулешов А.В., Коновалова Г.Н. Технология и оборудование для переработки макулатуры: учеб. пособие. 2-е изд. Санкт Петербург: СПбГТУРП, 2011. 84с.

5. Вертай С. П., Штепа В. Н. Обоснование структуры и заданий системы поддержки принятия решений обобщённой оценки перспективности инновационных технологий. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 240. С. 86-93.

6. Штепа В. Н., Левчук А. П. Концепция управления оборудованием водоочистки с учетом доминирующего загрязнителя. Агропанорама: научно-технический журнал. 2018. № 5. С. 33-38.

7. Штепа В. М., Гончаров Ф. І., Сироватка М. А. Обґрунтування та розробка критерію енергоефективності функціонування електротехнологічних систем водопідготовки. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 161. С. 187–193.

8. Штепа В. М. Обґрунтування робочої міри ефективності електротехнологічної водоочистки. Енергетика і автоматика. 2018. № 4. С. 99-111. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>, (дата звернення: 16.10.2019).

References

1. Mazorenko, D. I., Tsapko, V. G., Goncharov, F. I. (2006). Inzhenerna ekolohiya sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva [Engineering ecology of agricultural production]. Kyiv: Knowledge, 376.

2. Yablochkin, N. I., Komarov, V. I., Koverninsky, I. N. (2004). Makulatura v tekhnologii kartona [Waste paper in cardboard technology]. Arkhangelsk: AGTU, 252.

3. Kak organizovat' promyshlennoye proizvodstvo bumazhnoy upakovki na primere izgotovleniya korobok iz kartona i gofrokartona [How to organize industrial production of paper packaging on the example of making boxes from cardboard and corrugated board]. In production: a magazine of business ideas. URL: http://vproizvodstvo.ru/proizvodstvennye_idei/kak_organizovat_proizvodstvo_bumazhnoj_upakovki_gofrokartona.

4. Vanchakov, M. V, Dubovy, V. K, Kuleshov, A. V, Konovalova, G. N. (2011). Tekhnologiya i oborudovaniye dlya pererabotki makulatury [Technology and equipment for processing waste paper]. Saint Petersburg: SPbGTURP, 84.

5. Vertai, S. P., Shtepa V. N. (2016). Obosnovaniye struktury i zadaniy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy obobshchonnoy otsenki perspektivnosti innovatsionnykh tekhnologiy [Justification of the structure and tasks of the decision support system for generalized assessment of the prospects of innovative technologies]. Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine. Series: APC Engineering and Energy, 240, 86-93.

6. Shtepa, V. N., Levchuk, A. P. (2018). Kontseptsiya upravleniya oborudovaniyem vodoochistki s uchetom dominiruyushchego zagryaznitelya [Concept control of the water treatment equipment with consideration the dominant pollutant]. Agropanorama: scientific and technical journal, 5, 33-38.

7. Shtepa, V. M. Goncharov, F. I., Sirovatka, M. A. (2011). Obhruntuvannya ta rozrobka kryteriyu enerhoefektyvnosti funktsionuvannya elektrotekhnolohichnykh system vodopidhotovky [Justification and development of the criterion of energy efficiency of the functioning of electrotechnological systems of water treatment]. Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, series: APC Engineering and Energy, 161, 187–193.

8. Shtepa, V. M. (2018). Obhruntuvannya robochoi miry efektyvnosti elektrotekhnolohichnoi vodoochystky [Justification of the working measure of the efficiency of electrotechnological water purification]. Power engineering and automation, 4, 99-111. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>

КОМБІНОВАНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПАПЕРОВО-КАРТОННОГО ВИРОБНИЦТВА

В. М. Штепа, А. В. Козир, Н. А. Заєць, Д. Г. Олексійвський

Анотація. *Нині не існують комплексні і уніфіковані рішення для інтенсифікації процесів з системами керування відповідно до інтегральних ресурсоефективних критеріїв, що підвищує актуальність завдання розробки технологічного базису спеціалізованого комбінованого електротехнологічного комплексу водоочищення.*

Метою досліджень є обґрунтування структури і параметрів комбінованих електротехнологічних процесів очищення стічних вод паперово-картонного виробництва.

При очищенні стічних вод використовувалися електрокоагуляційні процеси, які характеризуються електрохімічним розчиненням металевих анодів. Також при обробці використовувалася хімічна коагуляція, в основі якої лежить додавання в стічні води активних коагулянтів: солей амонію, міді, заліза. Для прискорення процесів осадження після коагуляції використовувався біоцидний флокулянт, після внесення якого освітлений розчин пропускався через мембранний електролізер з неактивною мембраною. Також стічна вода з метою додаткового окислення політантів піддавалася озонуванню. Для змішування коагулянту і стоків використовували подачу атмосферного повітря. Після флокоагуляції стічна вода седиментаційно поділялася і фільтрувалася при необхідності через пінополістирольний фільтр. Оцінивши результати експериментальної обробки стічних вод паперово-картонного виробництва, запропонована комбінована схема електротехнологічного комплексу водоочищення.

Розрахунок техніко-економічних показників продемонстрував, що фінансові витрати на обробку змивів клею і барвників за допомогою комбінованого електротехнологічного комплексу майже в шість разів менше, ніж послуги спеціалізованих фірм з утилізації такої стічної води. Відведення ж неочищених водних розчинів паперово-картонного виробництва без очищення неприпустимо - з

точки зору їх можливого критичного антропогенного навантаження на навколишнє середовище в такому випадку.

Ключові слова: екологічна безпека, електротехнологічний комплекс, стічні води, електрокоагуляція, хімічна коагуляція, біоцидний флокулянт, озонування

COMBINED ELECTRICAL TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR PAPER AND CARDBOARD PRODUCTION WASTEWATER PURIFICATION

V. Shtepa, A. Kozir, N. Zaiets, D. Alekseevskiy

Abstract. *At the moment, complex and unified solutions have not been created, with the intensification of processes and control systems in accordance with integral resource-efficient criteria, which increases the urgency of the task of developing a technological basis for a specialized combined electrotechnological complex for water treatment.*

The aim of the research is to substantiate the structure and parameters of the combined electrotechnological processes of wastewater treatment in paper and cardboard production.

When treating wastewater, electrocoagulation processes were used, characterized by the electrochemical dissolution of metal anodes. Also, during the processing, chemical coagulation was used, which is based on the addition of active coagulants to the wastewater: ammonium, copper, and iron salts. To accelerate the precipitation processes, after coagulation, a biocidal flocculant was used, after which the clarified solution was passed through a diaphragm electrolyzer with an inactive membrane. Also, wastewater was subjected to ozonation for the purpose of additional oxidation of pollutants. To mix the coagulant and effluents, we used an atmospheric air supply. After flotation coagulation, the wastewater was separated by sedimentation and filtered, if necessary, through a polystyrene foam filter. After evaluating the results of experimental wastewater treatment of paper and cardboard production, a combined scheme of an electrotechnological water treatment complex is proposed.

Calculation of technical and economic indicators showed that the financial costs of processing glue and dye washes using a combined electrotechnical complex are almost six times less than the services of specialized companies for the disposal of such wastewater. Disposal of untreated aqueous solutions of paper and cardboard production without purification is unacceptable - from the point of view of their possible critical anthropogenic load on the environment in such cases.

Key words: *environmental safety, electrotechnological complex, wastewater, electrocoagulation, chemical coagulation, biocidal flocculant, ozonation*