

А.И. Шишкин, М.С. Строганова, И.В. Антонов, А.Ж. Адылова

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМ ДОПУСТИМЫХ СБРОСОВ

Введение. В соответствии с изменением природоохранного законодательства регламентируется достижение как экологических, так и технологических нормативов для природно-производственных комплексов. Особенно это относится к крупным водопользователям, таким как предприятия целлюлозно-бумажной отрасли [Шишкин и др., 2019]. Выявлена необходимость для основных и вспомогательных производств достижения эколого-технологических показателей, соответствующих наилучшим доступным технологиям (НДТ), что позволяет значительно повысить уровень экологичности производств для отдельных водных бассейнов [Шишкин и др., 2017]. Однако снижение природоёмкости целлюлозно-бумажных производств связано с серьезными качественными и количественными изменениями во всех составляющих природно-производственных комплексов целлюлозных заводов (ППКЦЗ) как конкретных объектов нормирования допустимых сбросов сточных вод на бассейновом уровне. Рассматриваемая задача ППКЦЗ включает прибрежную территорию Ладожского озера и совокупность производственных объектов целлюлозного завода.

Сложная производственно-технологическая система действующего целлюлозного завода требует для повышения уровня экологичности выявления и корректировки соотношений между входными и выходными потоками в системе и ее подсистемах, что реализуется путём последовательного изучения и анализа структуры производства по отдельным блокам, а также функциональным составляющим подсистем, являющихся отдельными или вспомогательными производствами.

Наиболее радикальным, но затратным вариантом решения проблемы предотвращения загрязнения водных объектов, является применение наилучших доступных технологий в основном производственном процессе. Для действующих производств совершенствуются технологии и методы существующих очистных сооружений с эффективной системой на сбросе

через глубинные рассеивающие водовыпуски, обеспечивающие достижение норм допустимых сбросов (НДС) по всем показателям согласно схеме производственного экологического контроля.

Актуальность работы обусловлена необходимостью комплексного решения задач повышения уровня экологичности производственных систем с учетом изменений природоохранного законодательства по двум направлениям: обеспечению технологических нормативов производств в основном за счет применения НДТ; соизмерению природных и производственных потенциалов за счет взаимоподдерживающих потоков вещества, энергии и информации в пределах бассейновых норм допустимых воздействий (НДВ). Для действующих производств определено, что развитие может идти по обоим направлениям, но с учетом специфики и технологического уровня природно-производственного комплекса. На основе результатов исследований ученых оценивается фактический уровень экологичности как всего предприятия, так и отдельных технологических блоков производства. В дальнейшем выбор и обоснование вариантов реализации водоохранных мероприятий по основным технологиям или для комплекса очистных сооружений позволили сравнить достигаемые уровни экологичности с изменяющимися при этом уровнями сброса.

В нашем исследовании представлен механизм оценки уровня экологичности, который достигается на предприятии при реализации сравниваемых вариантов водоохранных мероприятий по следующим этапам.

1. Выбор и обоснование перечня целевых показателей для щелочесодержащих стоков целлюлозного завода, по которым будет производиться оценка уровня экологичности основного производства и эффективности очистных сооружений.

2. Статистический анализ данных по оценке эффективности работы очистных сооружений целлюлозного завода по целевым показателям с учетом эколого-экономических критериев.

3. Расчет фактического уровня экологичности производственного комплекса для различных природных условий и технологических режимов.

4. Разработка и обоснование комплекса природоохранных мероприятий по интегральным критериям соизмерения природоёмкости производства и техноёмкости природной системы, обеспечивающим достижение уровня экологичности и норм допустимых сбросов.

До настоящего времени в России при нормировании сброса сточных вод в ЦБП применяются общие принципы контроля по полному перечню показателей, который включает в себя как специфические, так и общеса-

нитарные [Заслоновский, Шарапов, 2002; Смирнов и др., 2012]. При переходе на принципы технологического нормирования, введено понятие «маркерное вещество», характеризующее применяемые технологии и особенности производственного процесса. Маркерные вещества отражают технологию, состояние окружающей среды, и структуру экологических платежей, но не отражают качественных характеристик исследуемых стоков [Гермер, 2008].

Сравнительная оценка контролируемых показателей в щелокосодержащих сточных водах по российским и мировым стандартам для целлюлозно-бумажной промышленности сульфатного производства небеленой целлюлозы, по НДТ ИТС1, BREF, рекомендациям ХЕЛКОМ, кластерным нормам США и RAPP, Индонезия [Гермер, 2008; Xiaowei et al., 2019; Markou et al., 2017; Gurbakhash, Wojciech., 2017; Filho, 2015; Ashrafi et al., 2017] показал, что, в основном, все страны используют сокращенный перечень веществ – БПК₅, БПК_{полн}, химическое потребление кислорода, взвешенные вещества, азот общий, фосфор общий, токсичность. В это же время в российской практике нормирования используют расширенный перечень веществ, в который включены: БПК₅ или БПК_{полн}, химическое потребление кислорода, взвешенные вещества, азот общий, фосфор общий, токсичность, сухой остаток, АПАВ, аммоний-ион, нитрат-анион, нитрит-анион, хлорид-анион, фосфаты по Р, сульфат-анион, лигнин сульфатный, фенол, скипидар, метанол, формальдегид и нефтепродукты.

Для повышения экологичности целлюлозно-бумажных производств и эффективности очистки сточных вод по технологическим и экологическим нормам приняты специфические показатели для щелокосодержащих стоков [Боголицын и др., 2010; Личутина, Боголицын, Гусакова, 2011; Личутина и др., 2011].

Методика исследования. На первом этапе оценки уровня экологичности целлюлозного завода требуется выбрать и обосновать перечень целевых показателей и мероприятий для их достижения.

Исследуемый природно-производственный комплекс целлюлозного завода расположен в северо-восточной части Ладожского озера, работает в периодическом режиме варки целлюлозы, использует сульфатный способ, основным товарным продуктом является небеленая сульфатная целлюлоза. На рис. 1 представлена схема технологического процесса производства сульфатной целлюлозы исследуемого предприятия с потоками стоков. Состав сточных вод, которые образуются при варке целлюлозы, зависит от

марки сырья, технологического процесса, а также количественного и качественного состава получаемой целлюлозы. Для сохранения водной экосистемы Ладожского озера применяется достаточно качественная водоочистка с глубинным водовыпуском.

Состав органической части щелочосодержащих сточных вод целлюлозного завода определяет основную техногенную нагрузку [Гусакова и др., 2015; Князева и др., 2016]. Наибольший вклад в комплексный показатель ХПК вносят лигнинные вещества (примерно 55%), летучие органические вещества составляют около 20%, нейтральные вещества 11%, окисленные кислоты 7%, нелетучие фенолы около 5%, неокисленные кислоты 2% [Гусакова и др., 2015].

Суммарный «органический» ХПК при прохождении через биологическую очистку снижается примерно в 5 раз, ХПК летучих компонентов – более чем в 10 раз. Однако биоокислению подвергаются не все органические компоненты, содержащиеся в сточных водах. Технология биологической очистки сточных вод позволяет эффективно производить ассимиляцию группы летучих и низкомолекулярных фенольных компонентов, при этом транзитом через систему проходит наиболее высокомолекулярная составляющая фракция лигнинных компонентов и экстрактивных веществ, представляющих собой «трудноокисляемую» составляющую величины ХПК [Гусакова и др., 2015; Боголицын и др., 2010; Личутина, Боголицын, Гусакова, 2011; Личутина и др., 2011]. Следует отметить, что после прохождения биологической очистки вклад фракции летучих веществ снижается до 5–10 отн.%, лигнинных веществ – примерно в два раза [Гусакова и др., 2015].

Основными источниками образования загрязняющих веществ в сточных водах являются варочный цех, где образуется 38% сточных вод от общего количества, цеха регенерации химикатов – 32% и сушильный цех – 6,9%.

Данное соотношение объемов сточных вод также предопределяет качественный и количественный состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения и, как следствие, указывает на первоочередность в подборе вариантов для снижения образования или увеличения эффективности очистки показателей, таких как БПК_{полн.}, ХПК, взвешенные вещества, азот общий, фосфор общий. Это приведет к снижению затрат на мероприятия контроля и, с другой стороны, даст четкое представление об эффективности того или иного внедряемого мероприятия.

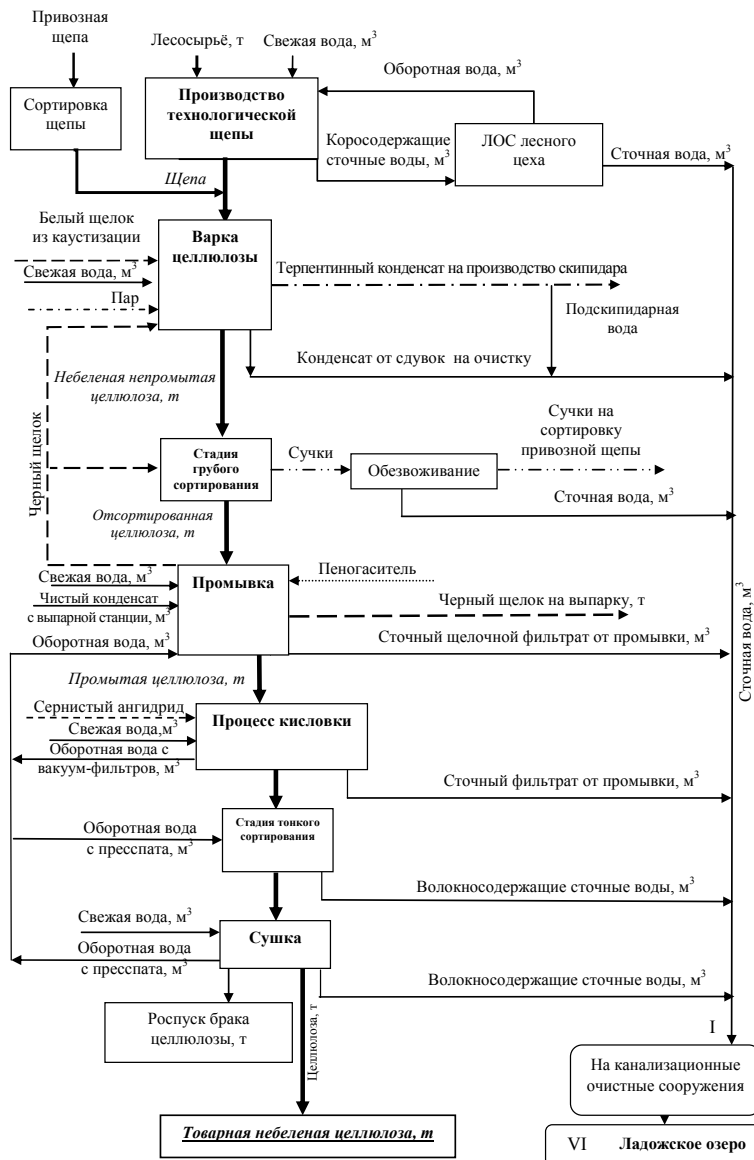


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса производства сульфатной целлюлозы

Fig. 1. Block diagram of the technological process for the production of sulphate pulp

Данный перечень показателей позволяет с достаточным приближением оценивать уровень экологичности (УЭ) технологий основного производства и систем очистки по фактическим данным и прогнозировать эффект с учетом реализации природоохранных мероприятий [Шишкин, Антонов, 2017].

На втором этапе осуществляется статистический анализ данных производственного экологического контроля (ПЭК) на очистных сооружениях по стадиям очистки с помощью специализируемых программных продуктов Statistica.

В ходе данной обработки выявляются закономерности в динамике значений концентраций целевых показателей, а также стадии очистки, лимитирующие весь процесс очистки сточных вод. Строятся временные зависимости значений концентраций для каждой стадии.

На основе выявленных лимитирующих стадий очистки производится оценка фактического уровня экологичности данных сооружений и всего производства в целом по критерию уровня экологичности [Шишкин, Антонов, 2017].

Данный критерий позволяет количественно охарактеризовать процесс очистки и технологии основного производства с точки зрения соответствия НДТ и потенциалу снижения антропогенной нагрузки на водную экосистему.

Определение уровня экологичности по показателям балльной оценки (k_i) производится путем суммирования взвешенных в соответствии с их значимостью нормированных параметров [Шишкин, Антонов, 2017]:

$$УЭ = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \alpha_i k_i, \quad (1)$$

где n – количество рассматриваемых показателей; k_i – балльная оценка показателя; α_i – коэффициент значимости суммируемого показателя.

Таблица 1

Соотношение нормированной шкалы балльной оценки от значения критерия X_i

The ratio of the normalized score scale to the value of criterion X_i

Значения критерия X_i	Балльная оценка k_i
(0;1]	4
(1;2)	(4;3)
[2;10)	[3;2)
[10;50)	[2;1)
[50;∞)	1

Нахождение значений критерия X_i осуществляется по уравнению

$$X_i = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q_{ni}}, \quad (2)$$

где q_{ni} – нормативное значение рассматриваемого показателя, которое соответствует НДТ; N – количество технологических процессов (основного и природоохранного оборудования), включенных в расчёт.

Таблица 2

Нормированная шкала балльной оценки значений показателей использования воды в технологических процессах (основном и природоохранном оборудовании)
Normalized scale of score estimation of water use indicators in technological processes (main and environmental protection equipment)

k_i	$k_{об}$	$k_{повт}$	$k_{пот}$	$k_{исп}$
1	<35	<10	100–80	<0,35
2	35–50	10–20	80–50	0,35–0,50
3	50–75	20–60	50–30	0,50–0,80
4	75–100	60–100	<30	0,80–1,00

В результате расчета критерия предприятию присваивается класс УЭ [Шишкин, Антонов, 2017] и устанавливаются нормативные требования к качеству сточных вод.

При низком значении критерия УЭ оцениваются факторы и рассчитывается группа природоохранных мероприятий по интегральным критериям соизмерения природоёмкости производства и техноёмкости природной системы, которые обеспечат переход предприятия на более высокий класс УЭ и позволят достичь норм допустимых сбросов.

При планировании природоохранных мероприятий следует учитывать также результаты статистической обработки данных ПЭК, по которым были выявлены лимитирующие стадии очистки сточных вод.

Для каждого предлагаемого мероприятия рассчитывается свой критерий уровня экологичности. За наиболее подходящее для реализации принимается мероприятие, по которому УЭ наибольший, а затраты на очистку наименьшие.

Результаты исследования. Анализ статистических данных контроля на разных стадиях очистных сооружений по маркерным показателям позволяет оценить эффективность работы очистных сооружений и определить мероприятия по снижению воздействия целлюлозного завода на водную экосистему Ладожского озера в пределах НДС за счет реализации целевых показателей, что требует планирования исследований модернизации очистных сооружений [Седова и др., 2018].

Для оценки качества поступающей на очистку воды с целью сравнения с проектными характеристиками очистных сооружений завода и повышения эффективности очистки проведен статистический анализ по результатам обработки данных мониторинга сточных вод. Данные мониторинга производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод предоставлены лабораторией очистных сооружений целлюлозного завода на разных стадиях очистки.

На рис. 2 приведена схема канализационных очистных сооружений рассматриваемого целлюлозного завода по стадиям очистки с указанием контролируемых загрязняющих веществ и усредненным значением расхода поступающих на очистку сточных вод.

Выбор контролируемых веществ по стадиям очистки обусловлен направленностью каждого этапа очистки на определенный перечень показателей, по которым оценивается степень очистки сточных вод, а также спецификой производства и состава сточных вод.

После первой стадии очистки, отстойника II, производится регулярный контроль таких показателей, как взвешенные вещества, азот общий, фосфор общий. Данные показатели необходимо контролировать для эффективной работы аэротенка.

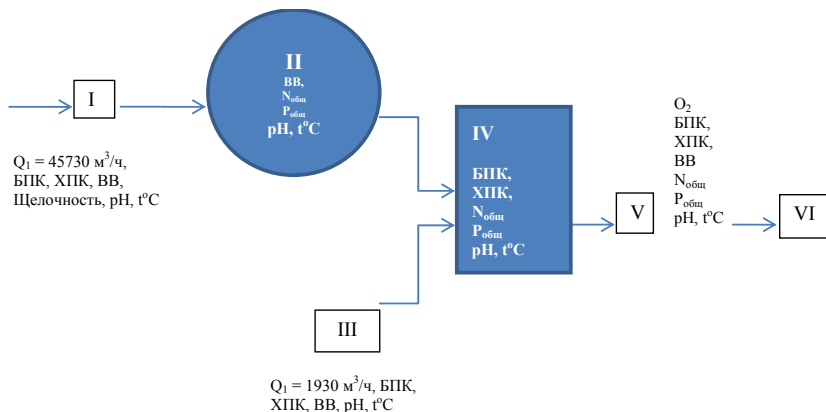


Рис. 2. Принципиальная схема потоков канализационных очистных сооружений целлюлозного завода

I – коллектор поступающих на очистку промышленных сточных вод; II – первичные отстойники; III – коллектор поступающих на очистку хозяйственно-бытовых сточных вод; IV – аэротенк; V – вторичные отстойники; VI – глубокий рассеивающий водовыпуск

Fig. 2. Flow diagram of wastewater treatment plants of a pulp mill

I – collector for industrial wastewater; II – primary settling tanks; III – collector for domestic wastewater; IV – aerotank; V – secondary settling tanks; VI – deep dispersing water outlet

Поступающие на очистку сточные воды целлюлозного завода имеют щелочной характер, так как в процессе варки целлюлозы сульфатным методом щепу обрабатывают щелочным раствором смеси NaOH и Na₂S, что определяет необходимость контролировать показатель щелочности на входе в систему очистки. В своем составе производственные стоки имеют взвешенные вещества, образованные преимущественно органическими соединениями и инертными веществами.

На стадии механической очистки в отстойниках контролируются взвешенные вещества, количество азота общего и фосфора общего, поскольку азот- и фосфоросодержащие вещества необходимы для создания питательной среды активного ила в аэротенке. При необходимости в реактор аэротенка добавляют аммиачную воду и ортофосфорную кислоту для поддержания необходимой среды. На третьей стадии – поступление хозяйственно-бытовых сточных вод контролируют взвешенные вещества, БПК_{полн} и ХПК, как основные параметры органического загрязнения, специфичные для данного типа стоков. В аэротенке контролируют количество соединений азота и фосфора, а также показатели БПК_{полн} и ХПК. На выпуске сточных вод ко всем вышеперечисленным показателям обязательно добавляется уровень растворенного кислорода. На каждом этапе получены данные температурного режима и уровня pH.

Для того чтобы обосновать мероприятия, проведена статистическая обработка данных производственного экологического контроля на очистных сооружениях, которая заключалась в оценке средних значений концентраций за месяц по стадиям очистки. Результаты первичной обработки данных, приведены в табл. 3.

Учитывая особенности технологического процесса получения целлюлозы при ее переводе в растворенное состояние путем обработки древесины концентрированными щелочными растворами выявлено частичное попадание ее в производственные сточные воды.

Щелочной поток производственных сточных вод имеет в своем составе большое количество растворенных органических веществ. Он образуется в варочном, промывном отделах варочного цеха, в выпарном отделе, а также частично на участке регенерации химикатов в отделе СРК цеха ТЭЦ.

Качества этой сточной воды, такие как ее загрязненность и состав, определяются количеством попадающей в нее отработанной щелочи, представляющей собой сложные комплексные соединения, основой которых служат различные органические соединения, вымываемые из древесного сырья. К ним относятся производные лигнина и органические вещества, экстрагируемые при обработке древесины варочным раствором под давлением и при высокой температуре.

Таблица 3

Среднемесячные статистические данные показателей качества сточных вод по стадиям очистки

Monthly statistics wastewater quality parameters of in the stages of purification

Показатели	I. Вход поступающих на очистку производственных СВ	II. Первичные отстойники	III. Вход на очистку хозяйственно-бытовых СВ	IV. Аэротенк	V. Вторичные отстойники
Т °С	26	12	12	26	24
рН, ед рН	7,9	7,3	7,3	6,8	7,0
БПК _{полн} , мгО ₂ /дм ³	99		68	95	7,9
ХПК, мг/дм ³	295		226	277	121
ВВ, мг/ дм ³	127	137	97		13,5
Щелочность, мг-экв/дм ³	0,046				
N _{общ} , мг/дм ³		15,2		0,58	0,3
P _{общ} , мг/дм ³		3,1		1,4	0,36
O ₂ , мгО ₂ /дм ³				4,6	5,9

На рис. 3–7 в качестве примера обработки данных приведены колебания концентраций загрязняющих веществ в сточных водах по стадиям очистки в течение одного месяца (август 2019 г.).

Концентрация взвешенных веществ в результате очистки на очистных сооружениях уменьшается с 590 до 13,5 мг/дм³. Несмотря на высокую степень очистки, концентрация взвешенных веществ на выходе все равно превышает ПДК, равную 2,75 мг/дм³. По графику видно, что концентрация взвешенных веществ в распределительной чаше значительно выше, т. е. преимущественно поступает с хозяйственно-бытовыми сточными водами. Максимальная концентрация составляет 950 мг/дм³ в распределительной чаше. Минимальная концентрация составляет 10 мг/дм³.

При анализе эффективности очистных станций на очистку от азота в верхнем канале аэротенка установлено, что происходит увеличение концентрации азота во второй половине месяца.

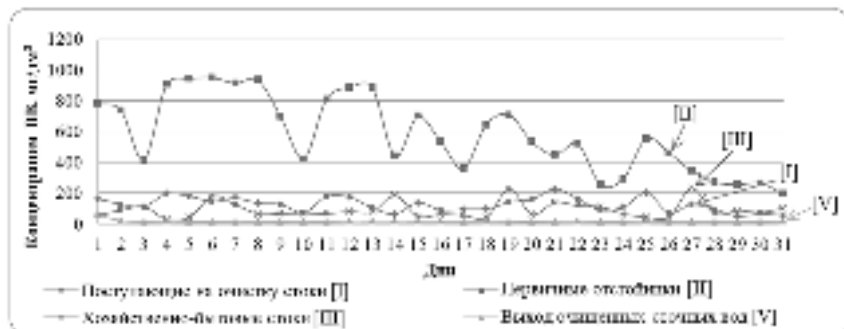


Рис. 3. Зависимость изменения взвешенных веществ во времени по стадиям очистки

Fig. 3. Dependence of changes of suspended substances over time by purification stages

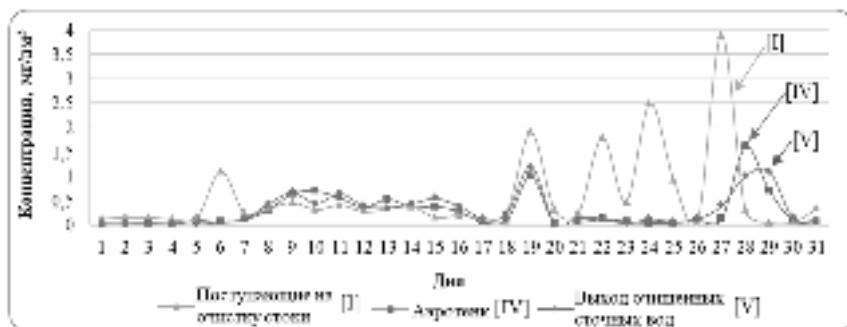


Рис. 4. Временные изменения концентрации азота по стадиям очистки

Fig. 4. Dependence of changes of total nitrogen over time by purification stages

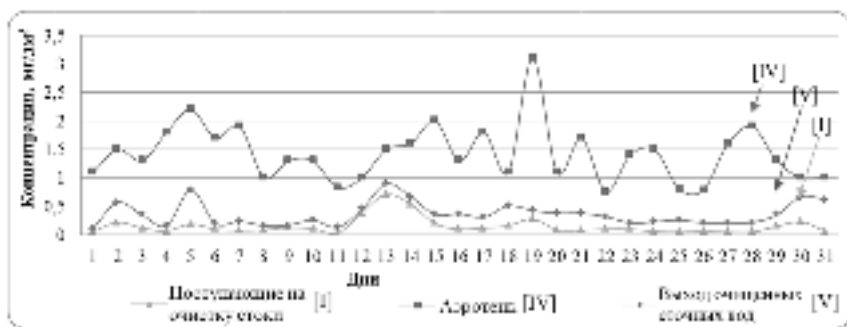


Рис. 5. Временные изменения концентрации фосфора по стадиям очистки

Fig. 5. Dependence of changes of total phosphorus over time by purification stages

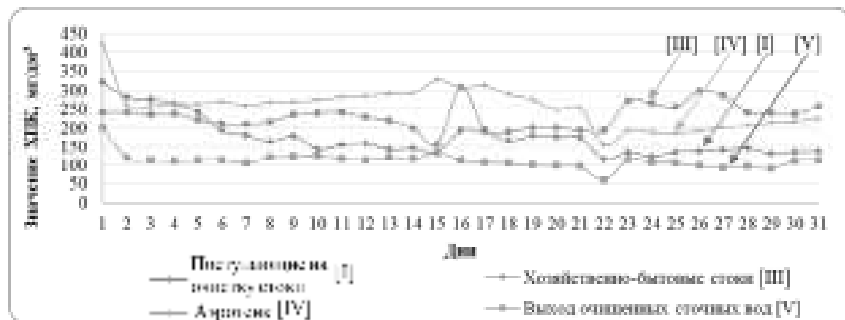


Рис. 6. Зависимость изменения показателя ХПК во времени по стадиям очистки
 Fig. 6. Dependence of changes of COD over time by purification stages

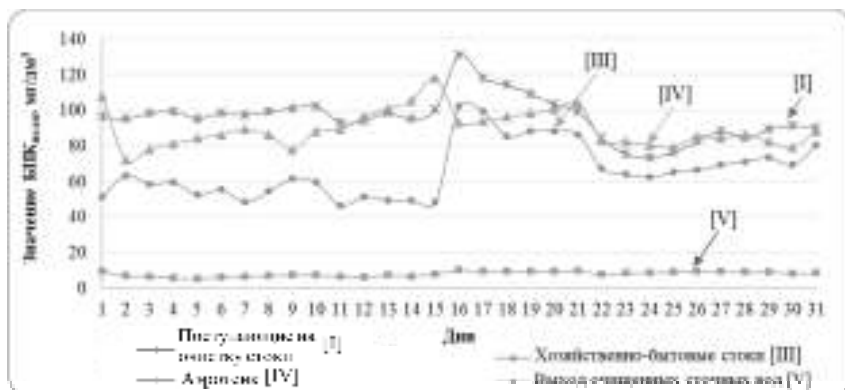


Рис. 7. Временные изменения показателя БПК_{полн} по стадиям очистки
 Fig. 7. Dependence of changes of BOD_{total} over time by purification stages

Значения концентрации фосфора меняются в течение всего месяца, концентрация снижается после очистки в аэротэнке и увеличивается в колодце на выходе. Увеличение концентрации азота и фосфора может быть связано с подкормкой среды активного ила в аэротенке.

Сравнительный анализ графиков ХПК показывает пропорциональное уменьшение концентрации на выходе на 200 мг/дм^3 , по сравнению с поступившей концентрацией.

Анализ графиков величины БПК_{полн} показывает пропорциональное уменьшение концентрации на выходе на 200 мг/дм^3 , по сравнению с по-

ступившей концентрации. Минимальные значения достигают 89 мг/дм^3 в течение месяца, тогда как в проектных данных эти значения равны $38,18 \text{ мг/дм}^3$. Это определяет диапазон реализации мероприятий по повышению эффективности очистки существующих очистных сооружений.

Была проведена оценка изменения показателя щелочности на входе в очистные сооружения. Щелочность производственных сточных вод меняется в течение месяца в пределах $0,033\text{--}0,063 \text{ мг-экв/дм}^3$, в зависимости от производимого вида целлюлозы в тот или иной день.

Комплексным параметром является содержание растворенного кислорода, влияющего на развитие и жизнеспособность активного ила, а также качество биологической очистки. Динамика развития микроорганизмов в аэротенке и их физиологическое состояние находятся в прямой зависимости от количества и скорости растворения кислорода в сточной воде. Кислород является основным фактором, определяющим скорость и глубину биоокисления. При постоянной нагрузке на активный ил скорость окисления определяет удельные его затраты, величину прироста активного ила и, следовательно, затраты на биологическую очистку в целом [Евилевич и др., 1983].

Насыщение кислородом происходит во время подъема пузырьков воздуха к поверхности с возникающим газлифтовым эффектом, создающим восходящий поток жидкости, который, в свою очередь, создает циркуляцию жидкости по сечению аэротенка [Евилевич и др., 1983].

Полученные результаты свидетельствуют о недостаточной очистке сточных вод по показателям БПК_{полн}, ХПК, взвешенные вещества, азот общий, фосфор общий до установленных норм ПДК, в связи с чем параметры сточных вод не удовлетворяют проектным показателям очистных сооружений, т. е. целлюлозный завод нарушает установленные законодательством нормативы допустимого сброса, а также технологические нормативы.

Данные результаты предопределяют реализацию комплекса мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод. Большое число исследований было посвящено тематике реконструкции очистных сооружений целлюлозно-бумажных предприятий и технологического процесса [Xiaowei et al., 2019; Markou et al., 2017; Gurbakhash et al., 2017; Filho, 2015; Ashrafi et al., 2017; Евилевич и др., 1983; Князева и др., 2016; Байбородин и др., 2010; Рыбников и др., 2013; Смирнов и др., 2012]. Принимая во внимание накопленный опыт и лучшие практики, мы предлагаем три различных направления модернизации очистных сооружений, оценка которых приведена ниже.

Для повышения эффективности очистных сооружения предприятия проведено сравнение трех вариантов повышения уровня экологичности.

В первом случае при применении каталитических загрузок в биосооружениях имеется возможность достичь эффективности очистки сточных вод по таким ингредиентам, как БПК и ХПК (на 85–90%), СПАВ (на 75%), метанол (на 99%), фенолы (на 90–95%), нефтепродукты (на 85–90%), серо-содержащие (на 99%), азотные соединения (на 85%).

Для внедрения данного технологического решения на стадии биологической очистки проводится организация технологических зон нитри- и денитрификации, дефосфатации. Для интенсификации данных процессов устанавливаются гетерогенные металлокомплексные катализаторы в виде сетчатых объемных блоков.

Эффективность действия катализатора достигается за счет способности его поверхности сорбировать на своих активных центрах кислород из водной и воздушной фаз, переводя его молекулярную форму O_2 в активные формы кислорода O . За счет окислительно-восстановительных процессов с участием атомарных форм кислорода обеспечиваются более высокие скорости и глубокое протекание процессов окисления.

Глубокое удаление органических веществ и биогенных элементов осуществляется с помощью организации многостадийных процессов, которые требуют обеспечения различных условий среды. Применение катализатора позволяет значительно увеличить скорость протекания процессов биоокисления, сократить время перехода стадий нитри-, денитрификации и дефосфатации, исключить наличие недоокисленных форм органических соединений, а также нивелировать условия внешней среды.

Выявлены следующие преимущества применения каталитических загрузок.

1. Увеличение эффективности очистки по всем компонентам (органические соединения, азотсодержащие соединения, соединения металлов, фосфаты и др.).

2. Высокая эффективность использования подаваемого воздуха в аэротенки, уменьшение интенсивности подачи воздуха (расход воздуха для аэрации в 3–4 раза меньше, чем на типовых биосооружениях).

3. Сокращение продолжительности обработки сточных вод на биологических очистных сооружениях (время аэрации сокращается в 1,5–2 раза), что позволяет уменьшить площадь сооружений биологической очистки.

4. Уменьшение концентрации активного ила в 1,5–2 раза, что облегчает проблемы с его утилизацией.

5. Повышение ферментативной активности ила.
6. Уменьшение энергозатрат до 40% (за счет снижения мощностей оборудования для обезвоживания осадка, воздуходувок и др.).
7. Отсутствие биообрастания каталитических блоков.
8. Срок службы катализатора 10 лет без регенерации (по истечении срока работы катализатор забирается поставщиком).

Самым экономически затратным, но эффективным является строительство узла доочистки биологически очищенных сточных вод с применением технологии фильтрации на дисковых фильтрах с возможным применением флокулянта для лигнина сульфатного. Таким образом, снижается содержание взвешенных веществ, органических веществ – БПК_{полн}, ХПК и соответственно лигносульфонатов на выпуске с очистных сооружений. Повысить эффективность очистки от лигносульфонатов можно с помощью улучшения процесса промывки и контроля лигнина сульфатного на выходе из цеха промывки. При этом дисковые фильтры требуют на порядок меньшего перепада высот, занимают значительно меньше места в здании, процесс фильтрации на дисковых фильтрах происходит непрерывно, без остановки на промывку, работа дисковых фильтров полностью автоматизирована, и очистка более эффективна и стабильна, по сравнению с традиционными фильтрами с зернистой загрузкой.

Другим способом увеличения эффективности работы очистных сооружений является применение увеличенной дозы концентрации активного ила в аэротенке и повышение его возраста путем установки биологической загрузки (носителей биомассы) в аэротенк. Этим методом можно добиться снижения нагрузки органического вещества примерно на 60%. Достоинствами метода являются значительное увеличение окислительной мощности сооружений биологической очистки сточных вод, повышение эффективности устранения взвешенных и органических веществ, а также аммонийного азота и фосфатов, долговечность и химическая стойкость в рабочей среде, высокая удерживающая способность биомассы за счет развитой площади ершовой загрузки и равномерное заполнение объема биофильтров.

В табл. 4 представлены характеристики предлагаемых мероприятий для повышения эффективности очистки щелочесодержащих сточных вод целлюлозного завода.

Одним из мероприятий, повышающих эффективность аэрации в аэротенке и интенсифицирующих очистку сточных вод, является мероприятие по установке каталитических загрузок в аэротенк. Для интенсификации данных процессов устанавливаются гетерогенные металлокомплексные катализаторы в виде сетчатых объемных блоков.

Таблица 4

Сравнительная характеристика предлагаемых мероприятий для повышения эффективности очистки щелочесодержащих сточных вод целлюлозного завода

Comparative characteristics of the proposed measures to improve the efficiency of treatment of alkali-containing wastewater of a pulp mill

Наименование мероприятия	Описание технологии	Эффективность	
		Показатель	Очистка, %
Применение каталитических загрузок	Представляют собой сетчатые конструкции, устанавливаемые в аэротенки. Активные виды кислорода, образующиеся на поверхности катализатора, окисляют органические вещества, растворенные в воде гораздо активнее, чем обычный кислород	БПК _{полн} и ХПК	85–90
		СПАВ	75
		МЕТАНОЛ	99
		фенолы	90–95
		Нефтепродукты	85–90
		Серосодержащие	99
Строительство узла доочистки биологически очищенных сточных вод с применением технологии фильтрации на дисковых фильтрах	Дисковые фильтры – простой и доступный вариант применения современных мембранных технологий для очистки воды. Загрязненная вода пропускается через фильтрующий элемент, который представляет собой комплект плотно сжатых дисков, в которых есть специальные канавки. Чистая вода проходит внутрь этих канавок и попадает на выход фильтра, а механические загрязнения не проходят внутрь и остаются на поверхности фильтрующего элемента	БПК _{полн} и ХПК	87
		Взвешенные вещества	80
		Лигнин сульфатный	82
Применение увеличенной дозы концентрации активного ила в аэротенке и повышение его возраста путем установки биологической загрузки	Дозу ила в аэротенке можно увеличить, используя инертные носители биомассы. В качестве инертного носителя применяются плоские рамы и кассеты с размещенными в них пористыми материалами или винилпластовой пленкой. Блоки и кассеты с насадкой располагаются в аэротенке, чтобы обеспечить эффективную циркуляцию иловой смеси в загрузке	БПК _{полн} и ХПК	98
		СПАВ	95
		Фосфор общий	90
		Азот общий	98

Для каждого из рассмотренных мероприятий по исследуемому целлюлозному заводу определен критерий уровня экологичности. В качестве исходных данных (табл. 5) взяты значения удельных показателей содержания загрязняющих веществ в сточных водах по стадиям очистки. В качестве удельных нормативов проведено сравнение технологических показателей по существующим предприятиям с сульфатным методом варки целлюлозы [Шишкин, Антонов, 2017].

Таблица 5

Исходные данные для расчета уровня экологичности (УЭ)

Initial data for calculating the level of environmental friendliness

Специфический показатель	Удельный норматив (для действующих предприятий), кг/т / (мг/дм ³) (м ³ /т)	Удельные значения, (кг/т) / (мг/дм ³)			
		Факт	Мероприятие 1	Мероприятие 2	Мероприятие 3
БПК _{полн}	0,7 / 2,1	2,68 / 18,31	0,35 / 2,39	2,48 / 16,95	1,07 / 7,31
ХПК	12	18,19 / 124,29	2,37 / 16,19	18,19 / 124,29	18,19 / 124,29
ВВ	1,2 / фон +0,25	2,19 / 14,96	2,19 / 14,96	1,97 / 13,46	2,19 / 14,96
Азот общий	0,4	0,51 / 3,48	0,076 / 0,52	0,51 / 3,48	0,51 / 3,48
Фосфор общий	0,04	0,6 / 4,10	0,095 / 0,65	0,6 / 4,10	0,6 / 4,10
Удельное водопотребление	70	180,9	180,9	36,18	180,9

Результаты расчета уровня экологичности для фактического положения и после внедрения мероприятий приведены в табл. 6.

Ранжирование мероприятий по УЭ показало, что большую эффективность для данного предприятия будет иметь первое мероприятие – применение каталитических загрузок в биологических сооружениях. При внедрении данных решений предприятие переходит из категории «Среднеэффективные» в категорию «Эффективные», что приближает его к наилучшим доступным технологиям на данном этапе [Шишкин, Антонов, 2017].

Таблица 6

Изменение уровня экологичности предприятия в зависимости от мероприятий

Changes in the level of environmental friendliness of the enterprise depending on the activities

Показатель	Фактические значения		Мероприятие					
			1		2		3	
	X_i	k_i	X_i	k_i	X_i	k_i	X_i	k_i
БПК	3,8	2,8	0,5	4	3,5	2,8	1,5	3,5
ХПК	1,5	3,5	0,2	4	1,5	3,5	1,5	3,5
ВВ	1,8	3,2	1,8	3,2	1,6	3,4	1,8	3,2
Азот общий	1,3	3,7	0,2	4	1,3	3,7	1,3	3,7
Фосфор общий	15	1,9	2,4	2,9	15	1,9	15	1,9
Удельное водопотребление	2,6	2,9	2,6	2,9	0,5	4	2,6	2,9
УЭ	3		3,5		3,2		3,1	
НДС, т/год								
БПК	67,400		75,825		67,400		67,400	
ХПК	457,736		514,953		457,736		457,736	
ВВ	62,494		70,306		62,494		62,494	
Азот общий	12,834		14,438		12,834		12,834	
Фосфор общий	15,098		16,985		15,098		15,098	

Выводы. Полученные результаты позволили развить методологию эколого-технологического нормирования на основе предложенного показателя уровня экологичности природно-производственного комплекса целлюлозного завода. Учтены определяющие факторы и количественные значения сбалансированности природоёмкости ППКЦЗ «прибрежная акватория Ладожского озера – совокупность производственно-хозяйственных объектов целлюлозного завода».

Проведены длительные исследования на различных стадиях очистки сточных вод целлюлозного завода по перечню показателей, который отра-

жает требования, предъявляемые при технологическом нормировании предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Выделены основные этапы очистки, которые являются лимитирующими с точки зрения недостаточного уровня эффективности очистки.

Достижения эколого-технологических нормативов для целлюлозной отрасли, включая нормативы допустимого сброса по основным ингредиентам, дифференцированы по вариантам мероприятий повышения уровня экологичности, которые направлены на изменения в основной технологии производства, а также в технологии локальных и внеплощадочных очистных сооружений. По результатам оценки уровня экологичности определены мероприятия, минимизирующие воздействие на водный объект и затраты.

Сравнительная оценка водоохраных мероприятий на основе статистического анализа позволила повысить уровень экологичности до 3,5.

Расчет НДС выполнен по БПК_{полн}, ХПК, взвешенным веществам, азоту общему, фосфору общему.

Разработанный алгоритм и реализованная на его основе методика могут быть применены для широкой категории действующих природно-производственных комплексов при использовании интегральных критериев соизмерения природоёмкости производства и техноёмкости природных систем, а также на межотраслевом уровне бассейновых норм допустимых воздействий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90128

Библиографический список

Байбородин А.М., Воронцов К.Б., Богданович Н.И. Локальная очистка загрязнённых сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности // Санитарный врач. 2010. № 3. С. 36–38.

Боголицын К.Г., Соболева Т.В., Гусакова М. А., Почтовалова А.С., Личутина Т.Ф. Научные основы эколого-аналитического контроля промышленных сточных вод ЦБП. Екатеринбург, 2010. С. 60–108.

Гермер Э.И. Современная концепция экологического нормирования технологических процессов ЦБП и возможные пути ее реализации в России. О проекте новой системы экологического нормирования – предпосылки его появления и концептуальные решения; проблемы, оставшиеся за рамками проекта // Известия вузов. Лесной журнал. 2008. № 2. С. 108–117.

Гусакова М.А., Бровко О.С., Константинова С.А., Христофорова Г.И. Оптимизация системы контроля и мониторинга загрязняющих веществ в стоках целлюлозно-бумажной промышленности. // Наилучшие доступные технологии.

Определение маркерных веществ в различных отраслях промышленности: сб. статей. 3. М.: Перо, 2015. С. 35–66.

Евлевич М.А., Наумов А.В., Николаев А.Н. Энергетический баланс и оптимизация систем биологической очистки сточных вод // Бумажная промышленность. 1983. № 2. С. 28–29.

Заслоновский В.Н., Шаранов Н.М. О региональных проблемах нормирования качества воды водных объектов // Материалы V Международного конгресса «Экватэк–2002. Вода: экология и технология». М., 2002. С. 12–16.

Князева Ю.А., Махотина Л.Г., Кутнар А., Аким Э.Л. Оценка жизненного цикла как характеристика экологичности продукции ЦБП. Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016. № 8. С. 70–75.

Личутина Т.Ф., Боголицын К.Г., Гусакова М.А. Комплексная оценка негативного воздействия на окружающую среду предприятий ЦБП в соответствии с технологическими нормативами Европейского сообщества // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2011. № 8. С. 52–62.

Личутина Т.Ф., Гусакова М.А., Мискевич И.В. [и др.] Экологическая оценка производства продукции на целлюлозно-бумажных предприятиях бассейна р. Северная Двина в соответствии с требованиями Европейского сообщества // Известия вузов. Лесной журнал. 2011. № 1. С. 84–89.

Рыбников О.В., Бондаренко Н.П., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Поэтапная эколого-технологическая реконструкция интегрированного предприятия ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 5. С. 62–68.

Седова Е.Л., Воронцов К.Б., Богданович Н.И. Применение метода планированного эксперимента в исследованиях процессов очистки сточных вод // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 25–28 марта 2018 г. Архангельск: Северный (Арктический) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2018. С. 165–170.

Смирнов М.Н., Гусарова Г.А., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Вступление России в ВТО и проблемы водоснабжения на целлюлозно-бумажных предприятиях // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2012. № 3. С. 66–71.

Шишкин А.И., Антонов И.В. Алгоритм обоснования НДС для предприятий целлюлозно-бумажной отрасли с применением геоинформационных технологий // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, 2017, № 3. С. 41–47.

Шишкин А.И., Строганова М.С., Антонов И.В. Нормирование нагрузки при сбросе стоков ЦБП на трансграничном участке реки Вуокса // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2019. № 2. С. 88–93.

Ashrafi O., Yerushalmi L., Haghghat F. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission // Journal of Environmental Management. 2015. P. 146–157

Filho A.M. Heat-killing of Legionella in biological sludge from a paper and pulp mill water treatment plant // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2015. No. 30 (1). P. 121–125.

Gurbakhash B., Wojciech J. Universal industrial sectors integrated solutions module for the pulp and paper industry // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2017. No. 32 (3). P. 375–385. [Doi.org/10.3183/npprj-2017-32-03-p375-385](https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-03-p375-385).

Markou V., Kontogianni M.C., Frontistis Z., Tekerlekopoulou A.G., Katsaounis A., Vayenas D. Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes // *Journal of Environmental Management*. 2017. No. 202 (1). P. 217–224.

Xiaowei Zh., Zhou W., Hong Y., Li W., Pan X.Chen Sh. Experiment on pretreatment of waste water from bamboo heat treatment by combination of iron-carbon micro-electrolysis and Fenton method // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2019. No. 34 (3). P. 354–361. [Doi.org/10.1515/npprj-2018-0030](https://doi.org/10.1515/npprj-2018-0030)

References

Ashrafi O., Yerushalmi L., Haghghat F. Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *Journal of Environmental Management*, 2015, pp. 146–157

Bajborodin A.M. Voroncov K.B., Bogdanovich N.I. Lokal'naya ochistka zagryaznyonnyh stochnyh vod cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti. *Sanitarnyj vrach*, 2010, no. 3, pp. 36–38. (In Russ.)

Bogolitsyn K.G., Soboleva T.V., Gusakova M.A., Pochtovalova A.S., Lichutina T.F. Nauchnye osnovy ekologo-analiticheskogo kontrolya promyshlennyh stochnyh vod CBP. Yekaterinburg, 2010, pp. 60–108. (In Russ.)

Evilevich, M.A., Naumov A.V., Nikolaev A.N. Energeticheskij balans i optimizaciya system biologicheskoy ochistki stochnyh vod. *Bumazhnaya promyshlennost*, 1983, no 2, pp. 28–29 (In Russ.)

Filho A.M. Heat-killing of Legionella in biological sludge from a paper and pulp mill water treatment plant. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2015, no. 30 (1), pp. 121–125.

Germer E.I. Sovremennaya koncepciya ekologicheskogo normirovaniya tekhnologicheskikh processov CBP i vozmozhnye putiee realizacii v Rossii. O proekte novoj sistemy ekologicheskogo normirovaniya – predposylki ego poyavleniya i konceptual'nye resheniya; problemy, ostavshiesya za ramkami proekta. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2008, no 2, pp. 108–117. (In Russ.)

Gurbakhash B., Wojciech J. Universal industrial sectors integrated solutions module for the pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2017, no. 32 (3), pp. 375–385. [Doi.org/10.3183/npprj-2017-32-03-p375-385](https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-03-p375-385).

Gusakova M.A., Brovko O.S., Konstantinova S.A., Hristoforova G.I. Optimizaciya sistemy kontrolya i monitoring zagryaznyayushchih veshchestv v stokah cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti. Moscow: Pero, 2015, pp. 35–66. (In Russ.)

Knyazeva Yu.A., Makhotina L.G., Kutnar A., Akim E.L. Ocenka zhiznennogo tsikla kakharakteristika ekologichnosti produktsii CBP. *Селлюлоза. Бумага. Картон*, 2016, no. 8, pp. 70–75 (In Russ.)

Lichutina T.F., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A. Kompleksnaya ocenka negativnogo vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatij CBP v sootvetstvii s tekhnologicheskimi normativami Evropejskogo soobshchestva. *Селлюлоза. Бумага. Картон*, 2011, no. 8, pp. 52–62. (In Russ.)

Lichutina T.F., Gusakova M.A., Miskevich I. [et al.] Ekologicheskaya ocenka proizvodstva produktsii na sellulozno-bumazhnyh predpriyatiyah bassejna r. Severnaya Dvina v sootvetstvii s trebovaniyami Evropejskogo soobshchestva. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2011, no 1, pp. 84–89. (In Russ.)

Markou V., Kontogianni M.C., Frontistis Z., Tekerlekopoulou A.G., Katsaounis A., Vayenas D. Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes. *Journal of Environmental Management*, 2017, no. 202 (1), pp. 217–224.

Rybnikov O.V., Bondarenko N.P., Mandre Yu.G., Akim E.L. Poetapnaya ekologo-tekhnologicheskaya rekonstruktsiya integrirovannogo predpriyatiya CBP. *Селлюлоза. Бумага. Картон*, 2013, no. 5, pp. 62–68. (In Russ.)

Sedova E.L., Vorontsov K.B., Bogdanovich N.I. Primenenie metoda planirovannogo eksperimenta v issledovaniyah processov ochistki stochnyh vod. *Materialy II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem 25–28 marta 2018 – Arhangel'sk: Severnyj Federal'nyj universitet imeni M.V. Lomonosova*, 2018, pp. 165–170. (In Russ.)

Shishkin A.I., Antonov I.V. Algoritm obosnovaniya NDS dlya predpriyatij sellulozno-bumazhnoj otrasli s primeneniem geoinformatsionnyh tekhnologij, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna Saint Petersburg*, 2017, no. 3, pp. 41–47. (In Russ.)

Shishkin A.I., Stroganova M.S., Antonov I.V. Normirovanie nagruzki pri sbrose stokov CBP na transgranichnom uchastke reki Vuoksa. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 2 (1), pp. 88–93. (In Russ.)

Smirnov M.N., Gusarova G.A., Mandre Yu.G., Akim E. L. Vstuplenie Rossii v VTO i problem vodosnabzheniya na sellulozno-bumazhnyh predpriyatiyah. *Селлюлоза. Бумага. Картон*, 2012, no. 3, pp. 66–71. (In Russ.)

Xiaowei Zh., Zhou W., Hong Y., Li W., Pan X.Chen Sh. Experiment on pretreatment of waste water from bamboo heat treatment by combination of iron-carbon micro-electrolysis and Fenton method. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2019, no. 34 (3), pp. 354–361. [Doi.org/10.1515/npprj-2018-0030](https://doi.org/10.1515/npprj-2018-0030)

Zaslonsky V.N., Sharapov N.M. O regional'nyh problemah normirovaniya kachestva vody vodnyh obektov. *Materialy V Mezhdunarodnogo kongressa «Ekvatek-2002. Voda: ekologiya i tekhnologiya»*. Moscow. 2002, pp. 12–16. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.06.2020

Шишкин А.И., Строганова М.С., Антонов И.В., Адылова А.Ж.

Повышение уровня экологичности целлюлозного природно-производственного комплекса для обеспечения норм допустимых сбросов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 208–232. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.208-232

Изменение природоохранного законодательства предопределило необходимость развития и создания новой методологии эколого-технологического нормирования допустимого сброса по критериям уровня экологичности производства, как суммы производственных природоемкостей при необходимости их соизмерения с региональным природным потенциалом. Исследованы и предложены решения по отдельным определяющим факторам и количественным значениям сбалансированности природоемкости для природно-производственного комплекса «прибрежная акватория Ладожского озера – совокупность производственно-хозяйственных объектов целлюлозного завода». В соответствии с экологической техноёмкостью обозначенной акватории Ладожского озера определены два этапа расчета норм допустимых сбросов (НДС): по предельно допустимым концентрациям (ПДК) для расчетных показателей целлюлозного завода после очистки на сбросе; с учетом конструкции и характеристик глубинного водовыпуска, а также эффекта струйного и основного разбавления до контрольного створа. Представлены структура и методология оценки фактического уровня экологичности целлюлозного природно-производственного комплекса на примере первого расчетного этапа достижения НДС по ПДК. Предложенные в работе мероприятия поэтапного повышения экологичности до 3,5 и соответствующего уровня по степени очистки сбрасываемых стоков с учетом эффектов струйного и основного разбавления обеспечивают достижение НДС. Выполнен комплекс исследований и статистического анализа, который позволил оценить фактический уровень экологичности основного и вспомогательного производств целлюлозного завода, а также по целевым показателям с учетом специфики щелокосодержащих стоков. Предложен для реализации ряд целевых технологических мероприятий, повышающих уровень экологичности целлюлозного завода и минимизирующих соответственно техногенную нагрузку в пределах экологической техноёмкости водной акватории по рыбохозяйственным стандартам специфических для целлюлозного завода показателям.

Ключевые слова: уровень экологичности, целевые показатели, целлюлозный природно-производственный комплекс, щелокосодержащие стоки, нормы сбросов, природоемкость, природный потенциал, экологическая техноёмкость.

Shishkin A.I., Stroganova M.S., Antonov I.V., Adylova A.Zh. Increasing the environmental friendliness level of the pulp natural production complex to ensure acceptable discharge rates. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, is. 232, pp. 208–232 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.208-232

Changing environmental legislation decreed for the authors, in this paper, the necessity of development and creation of new methodology of ecological-technological regulation of the permissible discharge criteria level of environmentally friendly production, as the sum of the production nature intensity their commensuration with the regional natural potential. The paper investigates and proposes solutions for certain determining factors and quantitative values of the balance of natural resource intensity for the natural production complex «coastal waters of lake Ladoga – a set of production and economic objects of a pulp mill». In accordance with the environmental technology intensity of the designated lake Ladoga water area, two stages of calculating the permissible discharge rates (PDR) were determined: according to the threshold limit value (TLV) for the calculated indicators of a pulp mill after treatment at the discharge; taking into account the design and characteristics of the deep water outlet, as well as the effect of jet and main dilution to the control gate. The structure and methodology of assessing the actual level of environmental friendliness of the cellulose natural production complex is presented on the example of the first calculated stage of achieving PDR under the TLV. The actual security proposed in the work activities gradual increase of ecological compatibility to 3.5 and the appropriate level according to the degree of purification of wastewater taking into account the effects of the jet and the primary dilution to achieve PDR. A set of studies and statistical analysis was performed, which allowed us to assess the actual level of environmental friendliness of the main and auxiliary production of the pulp mill, as well as target indicators, taking into account the specifics of alkali-containing effluents. Proposed to implement aep number of targeted technology events, enhance the level of environmental performance at the pulp mill and minimize, respectively, the anthropogenic load in the range of environmental technology intensity water areas for fisheries management standards specific to pulp mill performance.

Keyword: environmental friendliness level, targets, cellulose natural production complex, alkali-containing effluents, discharge rates, natural intensity, natural potential, environmental technology intensity.

ШИШКИН Александр Ильич – профессор Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, академик МАНЭБ, руководитель научно-педагогической школы «Прогнозирование и экологическое нормирование нагрузки на природные экосистемы» и лаборатории экологического нормирования. Orcid ID 0000-0001-5767-2105, SPIN: 5278-1810.

Санкт-Петербург, Россия. E-mail: aishishkin@yandex.ru

SHISHKIN Alexander I. – professor, Higher school of technology and energy, Saint Petersburg state University industrial technology and design, academician of International Academy of Sciences of ecology human security and nature, head of the scientific-pedagogical school «Forecasting and environmental regulation pressures on natural ecosystems», and the laboratory of ecological standardization. Orcid ID 0000-0001-5767-2105, SPIN: 5278-1810.

St. Petersburg, Russia. E-mail: aishishkin@yandex.ru

СТРОГАНОВА Мария Сергеевна – аспирант 4-го года обучения Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Orcid ID 0000-0002-0982-2356, SPIN: 5192-1725.

Санкт-Петербург, Россия, E-mail: masha199407@list.ru

STROGANOVA Mariia S. – 4th year post-graduate student, Higher school of technology and energy of the Saint Petersburg state University of industrial technologies and design. Orcid ID 0000-0002-0982-2356, SPIN: 5192-1725.

St. Petersburg, Russia. E-mail: masha199407@list.ru

АНТОНОВ Иван Владимирович – старший преподаватель Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Orcid ID 0000-0002-6737-5945, SPIN: 5432-3424

Санкт-Петербург, Россия. E-mail: antonovivv@yandex.ru

ANTONOV Ivan V. – senior lecturer, Higher school of technology and energy of the Saint Petersburg state University of industrial technologies and design, Orcid ID 0000-0002-6737-5945, SPIN: 5432-3424.

St. Petersburg, Russia. E-mail: antonovivv@yandex.ru

АДЫЛОВА Асель Жумагалиевна – магистрант 2-го года обучения Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Orcid ID 0000-0001-5415-7108, SPIN: 5468-7463.

Санкт-Петербург, Россия. E-mail: adylova97@mail.ru

ADYLOVA Asel Zh. – 2nd year master's student, Higher school of technology and energy, Saint Petersburg state University of industrial technologies and design, Orcid ID 0000-0001-5415-7108, SPIN: 5468-7463

St. Petersburg, Russia. E-mail: adylova97@mail.ru