

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 628.54

Ю.А. ФЕОФАНОВ

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД БУМАЖНОЙ ФАБРИКИ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНОМ СЫРЬЕ

В статье дается сравнительный анализ результатов работы сооружений локальной физико-химической и полной биологической очистки сточных вод бумажной фабрики при переработке разного вида сырья: целлюлозы и макулатуры. Определены и проанализированы данные об эффективности работы станций локальной и полной биологической очистки сточных вод, включающих биореактор с подвижной загрузкой (1-я ступень) и аэротенки (2-я ступень). Получены зависимости по определению окислительной мощности и скорости изъятия органических загрязнений для биореактора и аэротенков. Даны предложения по повышению эффективности работы очистных сооружений.

Ключевые слова: сточные воды бумажных фабрик, физико-химическая очистка сточных вод, биологическая очистка сточных вод, биореактор с подвижной загрузкой, аэротенк.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-752-8-34-41

Введение. В настоящее время в нашей стране наращивается производство тарного картона, газетной бумаги и продукции санитарно-гигиенического назначения (продукция тисью). Бумажные фабрики, специализирующиеся на выпуске этой продукции, могут использовать в производстве разное сырье, в частности, привозную целлюлозу либо местную макулатуру [1]. В зависимости от вида сырья (целлюлоза или макулатура) расход и состав сточных вод фабрик существенно различаются. При переработке макулатуры происходит более высокое водопотребление и сбрасываются большие объемы загрязнений со сточными водами, чем при производстве на привозной целлюлозе [2–5].

Специфика состава стоков указанных предприятий, в свою очередь, определяет технологические параметры работы очистных сооружений. Современные бумажные фабрики, как правило, имеют локальные (внутрицеховые) очистные сооружения и внеплощадочные станции биологической очистки сточных вод. Локальные очистные сооружения (ЛОС) фабрик располагают эффективным оборудованием для очистки образующихся в производстве

© Феофанов Ю.А., 2021

сточных вод, которое позволяет извлекать из них значительные объемы загрязняющих веществ. Для этой цели обычно используется физико-химический метод очистки с применением напорной флотации и реагентов [3–6]. Локальная очистка сточных вод позволяет не только существенно снизить объем загрязнений, сбрасываемых фабриками на внеплощадочные очистные сооружения, но также повторно использовать очищенную воду и задержанные ценные вещества в производстве. Тем самым работа ЛОС значительно сокращает расходы свежей воды и исходного сырья.

Внеплощадочные станции бумажных фабрик представлены, главным образом, сооружениями биологической очистки (БОС). Традиционная технология очистки сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной отрасли включает усреднение расхода и состава сточных вод, предварительную их аэрацию, добавку биогенных солей, биологическую очистку в аэротенках и доочистку [3–6]. На некоторых фабриках для биологической очистки вместе с аэротенками применяют также биореакторы с неподвижной либо подвижной загрузкой [3–10]. Литературные данные о работе станций очистки сточных вод отдельно расположенных бумажных фабрик пока немногочисленны и противоречивы, поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения.

Целью работы являлось изучение и сравнение основных технологических параметров и эффективности работы очистных сооружений локальной и полной биологической очистки сточных вод бумажной фабрики при использовании в качестве сырья целлюлозы и макулатуры.

Обследованная фабрика расположена в центральной европейской части России и специализируется на выпуске туалетной бумаги, бумажных салфеток и полотенец. В качестве сырья на фабрике используется целлюлоза сульфатная беленая из лиственных и хвойных пород древесины, а также макулатура разных марок.

Описание очистных станций фабрики. На фабрике в производственном цикле используется подземная вода, добываемая из скважин, а также оборотная техническая вода, расход которой составляет около 80 % от общего водопотребления. Часть воды теряется в основном при ее испарении в сушильной части бумагоделательной машины (около 50 % от выхода готовой продукции). Свежая вода подвергается очистке (обезжелезиванию и фильтрованию).

Вода, использованная в технологических циклах, после очистки возвращается в оборот. Отходы производственного процесса и очистки оборотной воды поступают на гравитационный стол и далее на ленточный пресс, обезвоживаются и вывозятся в отвал. Образующаяся при обезвоживании отходов сбросная вода поступает на ЛОС. Расход, состав и концентрации загрязнений сбросных вод зависят от вида и качества перерабатываемого фабрикой сырья. В частности, при переработке макулатуры сточные воды имеют повышенное содержание нерастворенных и растворенных примесей и содержат волокна, крахмал, диспергированный термопластик и др. Соответственно при работе фабрик на разном сырье может меняться и технология локальной очистки сбросных вод. Так, при использовании в производственном процессе в качестве сырья чистой целлюлозы для локальной очистки применяют одноступенчатую флотацию, а при переработке макулатуры двухступенчатую флотацию. Напорные флотаторы работают с насыщением воздухом рециркуляци-

онного потока очищенной воды (15–25 % от общего расхода). В процессе очистки оборотной и сбросных вод применяются флокулянты и коагулянт (сернистый алюминий).

Процессы локальной физико-химической очистки сточных вод фабрики осложняются особенностями стока, в частности, резкими колебаниями расхода и состава, высокой их температурой. Высокая температура сточных вод (35–40 °С) может служить причиной снижения эффективности работы флотаторов, так как с повышением температуры снижаются растворимость воздуха в воде и интенсивность образования пузырьков воздуха во флотаторах. Для уменьшения температуры сточных вод могут применяться теплообменники с подогревом свежей воды либо градирни. Дополнительное повышение давления в напорном баке флотационной установки позволяет также увеличить объем растворенного воздуха. Из-за значительных колебаний расхода и состава сточных вод для поддержания оптимальной дозы реагентов (флокулянтов, коагулянта, биогенных добавок) возникает необходимость автоматизировать процесс их дозирования.

После локальной очистки осветленная вода направляется на общезаводскую станцию биологической очистки. Сточные воды поступают в буферную емкость, которая вначале предназначалась для усреднения расхода и состава стоков, а также выполняла функции преаэратора. Затем в ней была размещена плавающая загрузка, и емкость была переоборудована в биореактор с подвижной загрузкой (БПЗ). Из биореактора, который стал 1-й ступенью биологической очистки, сточные воды направляются в аэротенки (2-я ступень). Биореактор 1-й ступени загружен плавающей загрузкой из полиэтиленовых элементов в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 1,1 мм [9]. Вместе со сточными водами в БПЗ и аэротенки подаются растворы биогенных солей (N, P) в необходимом количестве, а также циркулирующий активный ил. После вторичных отстойников сточные воды смешиваются с раствором гипохлорита натрия и направляются в контактные резервуары. Затем вода подается на станцию доочистки, которая оборудована сорбционными напорными фильтрами с двуслойной загрузкой. Избыточный активный ил откачивается эрлифтом в илоуплотнители, откуда надильная вода отводится в аэротенки, а уплотненный осадок подвергается механическому обезвоживанию.

Методы и материалы. Для оценки эффективности очистки сточных вод на ЛОС и БОС использовались данные оперативного контроля технологических параметров, измеряемых на месте (расход сточных вод, температура, pH, концентрация активного ила, иловый индекс, расход циркулирующего ила, растворенный кислород), а также результаты лабораторных анализов среднесуточных проб сточных вод, отобранных в рабочих точках. Все анализы выполнялись по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение. Расход сточных вод, сбрасываемых на очистные сооружения, составлял при работе предприятия на целлюлозе 526–1600 м³/сут, а при работе на макулатуре – 1205–2211 м³/сут. Удельный расход сбрасываемых сточных вод в среднем при работе фабрики на целлюлозе 12,5 м³ на 1 т перерабатываемого сырья, а при работе фабрики на макулатуре – 16,1 м³/т и более. Данные о качестве сточных вод после локальной очистки при работе фабрики на целлюлозе и макулатуре приведены в таблице.

Состав сточных вод бумажной фабрики после ЛОС

Показатель	Сырье	
	целлюлоза	макулатура
Взвешенные вещества, мг/дм ³	$\frac{42}{10-119}$	$\frac{54,5}{15-119}$
ХПК, мгО ₂ /дм ³	$\frac{355}{88,5-600}$	$\frac{1771}{909-2852}$
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	$\frac{224,4}{74-1250}$	$\frac{562,5}{140-1250}$
Азот аммонийный, мг/дм ³	$\frac{2,5}{0,8-18}$	$\frac{5,0}{1,9-24,7}$
Фосфаты, мг/дм ³	$\frac{1,6}{0,04-5,3}$	$\frac{3,0}{0,2-15,3}$
pH, ед.	$\frac{7,23}{6,56-7,7}$	$\frac{7,23}{6,76-7,74}$
Температура, °С	$\frac{27}{16-36}$	$\frac{29}{18,4-40}$

Данные таблицы характеризуют эффективность работы ЛОС и показывают состав сточных вод, подаваемых на биологическую очистку. В частности, содержание взвешенных веществ после локальной очистки стоков (в среднем) равнялось 42 мг/дм³ при работе фабрики на целлюлозе и 54,5 мг/дм³ при переработке макулатуры, что свидетельствовало об удовлетворительной работе ЛОС. Количество органических загрязнений, сбрасываемых со сточными водами после ЛОС, составляло в среднем при переработке целлюлозы – 8,9 кг ХПК на 1 т перерабатываемого сырья, при переработке макулатуры – 26 кг ХПК/т.

На рис. 1, 2 приведены основные показатели работ сооружений биологической очистки сточных вод при использовании разного сырья (целлюлозы и макулатуры). На рис. 1, а показаны результаты работы биореактора с подвижной загрузкой (1-я ступень биологической очистки) при использовании на фабрике в качестве сырья целлюлозы, а на рис. 1, б – при переработке макулатуры. Графики представляют зависимости окислительной мощности БПЗ от органической нагрузки по ХПК на него. Видна прямая зависимость между этими показателями как при работе фабрики на целлюлозе, так и при использовании макулатуры. При этом наблюдается значительный разброс экспериментальных данных (особенно, в случае использования макулатуры), что связано с колебаниями расхода и состава поступающих сточных вод, влияющих на работу биореактора. Вместе с тем очевидно, что биореактор выполнял функции усреднителя состава сточных вод, одновременно снижая (в среднем на 18–30 %) нагрузку по органическим загрязнениям на аэротенки.

Работа БПЗ изучалась в режимах с подачей в него части циркулирующего ила и без подачи ила. Ощутимых положительных результатов при подаче в биореактор циркулирующего ила из вторичных отстойников не об-

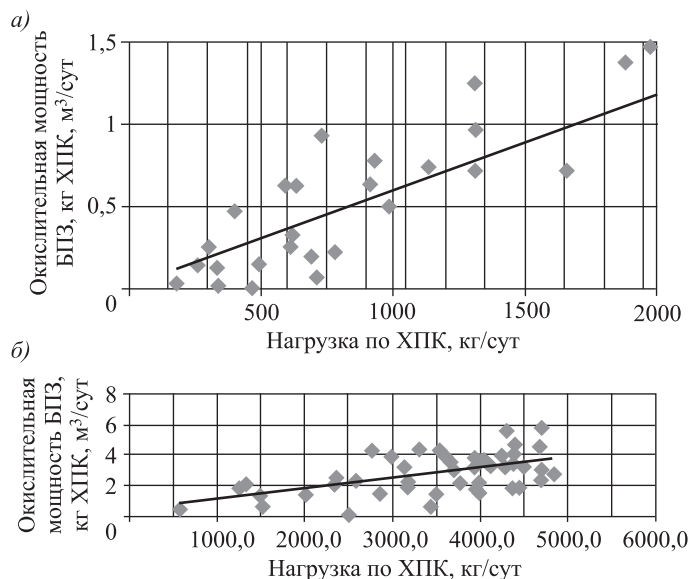


Рис. 1. Зависимость окислительной мощности БПЗ от нагрузки по ХПК при работе фабрики на целлюлозе (а) и макулатуре (б)

наружено. Объясняется это тем, что в биореакторе накапливается значительный объем собственной специфичной биомассы в виде биопленки, закрепленной на загрузке. Специально проведенными опытами было установлено, что общее количество закрепленной на загрузке биопленки в биореакторе составляло 1210 кг, и ее концентрация равнялась 4 кг/м³. Количество прирастающей и выносимой (избыточной) биомассы зависело от нагрузки на реактор и составляло от 80 до 200 мг/л. Для повышения производительности биореактора можно увеличить в нем объем подвижной загрузки, что позволит повысить концентрацию активной, закрепленной на загрузке биопленки.

Данные о работе аэротенков станции приведены на рис. 2 в виде зависимостей скорости снижения органических загрязнений по ХПК от нагрузки на аэротенки при работе фабрики на целлюлозе и макулатуре. Нагрузка на аэротенки в первом случае не превышала 1700 кг/сут, а во втором – достигала 4000 кг/сут.

Скорость процесса изъятия загрязнений в аэротенках (в расчете на 1 г активного ила по сухому веществу) находилась в прямой зависимости от величины нагрузки при работе фабрики как на целлюлозе, так и на макулатуре. Эта зависимость одинаково хорошо коррелируется независимо от вида перерабатываемого сырья. Концентрация активного ила в аэротенках составляла при работе фабрики на целлюлозе 1,8–3,2 г/л, при переработке макулатуры достигала 5 г/л и более, благодаря чему повышалась производительность этих сооружений. Следует отметить, что при высоких нагрузках на аэротенки возрастала величина илового индекса (до 250–360 мл/г), что требовало совершенствования процесса илоотделения.

Анализ данных работы БОС позволил установить зависимость между величиной ХПК очищенных сточных вод после БОС от нагрузки на нее по орга-

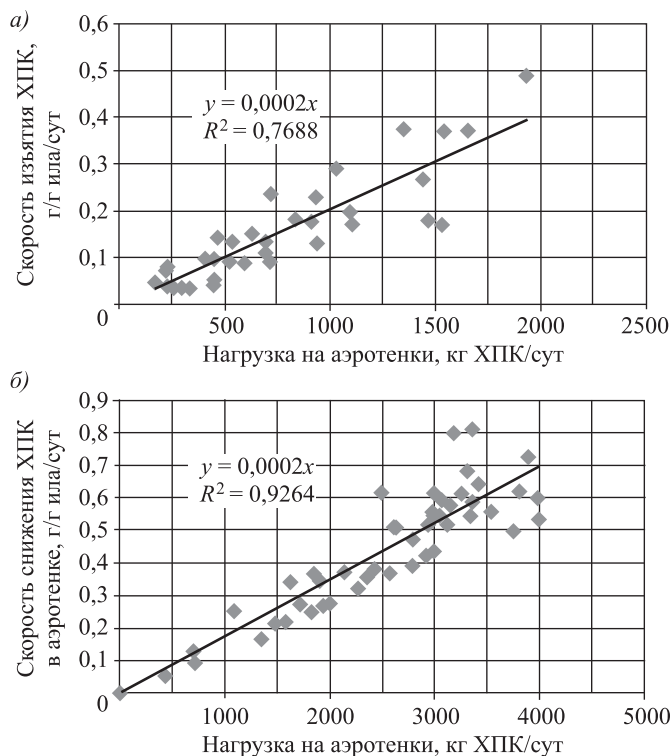


Рис. 2. Зависимость скорости снижения концентрации органических загрязнений в аэротенках от нагрузки по ХПК при работе фабрики на целлюлозе (а) и макулатуре (б)

ническим загрязнением при работе фабрики как на целлюлозе, так и на макулатуре. В частности, для того чтобы получить эффект очистки сточных вод на БОС до остаточной величины ХПК 100 мг/л, нагрузка на БОС должна составлять не более 2800 кг/сут, а ориентировочная производительность фабрики – не более 315 т переработанной целлюлозы или 108 т макулатуры.

Заключение. Расходы, состав и концентрации загрязнений сточных вод бумажной фабрики зависят от вида и качества перерабатываемого сырья. При переработке макулатуры сточные воды имеют повышенное содержание нерастворенных и растворенных примесей. Соответственно при работе фабрик на макулатуре используется двухступенчатая флотация с применением флокулянтов и коагулянтов, а при переработке целлюлозы возможна одноступенчатая флотация.

Значительные колебания расхода и состава сточных вод фабрики, высокая их температура осложняют процессы локальной и биологической их очистки. Повышенная температура сточных вод (35–40 °С) может служить причиной снижения эффективности работы флотаторов и требует применения теплообменников или градирен.

Полученные данные и зависимости окислительной мощности сооружений БОС от нагрузки позволяют планировать эффективность их работы. Для повышения производительности сооружений биологической очистки рекомендуется увеличить объем подвижной загрузки в нем, а также применить меры для снижения илового индекса и повышения рабочей дозы ила в аэротенках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каган А.* Растущий рынок тисью // *Лесная индустрия*. 2019. № 5. С. 42–45.
2. *Аким Э.Л., Смирнов А.М.* Состояние и перспектива применения методов напорной флотации в целлюлозно-бумажной промышленности // *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 2002. № 4. С. 20–22.
3. *Евлевич М.А.* Очистка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности. М., 1970. 148 с.
4. *Копылов В.А.* Очистка сточных вод и уплотнение осадков целлюлозно-бумажного производства // *Лесная промышленность*. М., 1983. 173 с.
5. *Самохин В.Н.* (ред.) Канализация населенных мест и промышленных предприятий: Справ. проектировщика. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.
6. *Смирнов А.М.* Локальная очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий методом напорной флотации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 16 с.
7. *Феофанов Ю.А.* Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 203 с.
8. *Яковлев С.В., Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Калищун В.И.* Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.
9. *Bernd Rauch.* Mutag BioChip, бионоситель для биологической очистки сточных вод // *Экология на предприятии*. 2014. № 5. С. 5–8.
10. *David Ir., Keow C.* Wastewater treatment for the recycled pulp // *JURUTERA*, 2005. No. 5. P. 29–30.

Феофанов Юрий Александрович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: ufeofanov@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 28.07.2021

Feofanov Yuriy Alexandrovich, DSc, Professor; E-mail: ufeofanov@rambler.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

WASTEWATER TREATMENT OF A PAPER MILL, WORKING ON VARIOUS RAW MATERIALS

The article gives a comparative analysis of the results of the work of the facilities of the local physicochemical and complete biological treatment of wastewater of the paper factory, in the processing of different types of raw materials: cellulose and waste paper. Data on the efficiency of local and complete biological wastewater treatment stations, including a bioreactor with a moving bed (1st stage) and aeration tanks (2nd stage), are determined and analyzed. Dependencies on the determination of oxidative power and the rate of removal of organic contaminants for bioreactor and aeration tanks are obtained. Proposals for improving the efficiency of treatment facilities are given.

Key words: wastewater of paper mills, physicochemical wastewater treatment, biological wastewater treatment, bioreactor with a moving bed, aeration tank.

REFERENCES

1. *Kagan A.* Rastushchiy rynek tiss'yu [Growing market of the tissue]. *Lesnaya industriya* [Forest industry]. 2019. No. 5. Pp. 42–45. (in Russian)

2. *Akim E.L., Smirnov A.M.* Sostoyaniye i perspektiva primeneniya metoda napornoy flotatsii v tsellyulozno-bymazhnoy promyshlennosti [The state and perspective of pressure flotation in the pulp and paper industry]. Tsellyuloza. Bumaga. Karton [Cellulose. Paper. Cardboard]. 2002. No. 4. Pp. 20–22. (in Russian)
 3. *Evilevich M.A.* Ochistka stochnykh vod tsellyulozno-bymazhnoy promyshlennosti [Wastewater treatment of the pulp and paper industry]. Moscow, 1970. 148 p. (in Russian)
 4. *Kopylov V.A.* Ochistka stochnykh vod i uplotneniye osadkov tsellyulozno-bymazhnogo proizvodstva [Wastewater treatment and thickening of pulp and paper sediments]. Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry]. Moscow, 1983. 173 p. (in Russian)
 5. *Samokhin V.N.* (ed.) Kanalizatsiya naseleennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy: Spravochnik proektirovshchika [Sewerage systems in populated areas and at industrial enterprises. Designer's handbook]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 639 p. (in Russian)
 6. *Smirnov A.M.* Lokal'naya ochistka stochnykh vod tsellyulozno-bymazhnykh predpriyatiy metodom napornoy flotatsii: Autoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Local wastewater treatment of pulp and paper enterprises by pressure flotation: Extended abstract of candidate's thesis]. St. Petersburg, 2004. 16 p. (in Russian)
 7. *Feofanov Yu.A.* Bioreaktory s nepodvizhnoy i podvizhnoy zagryzkoy dlya ochistki vody [Bioreactors with fixed and mobile loads for water treatment]. St. Petersburg, SPbGASY, 2012. 203 p. (in Russian)
 8. *Yakovlev S.V., Karelin Ya.A., Laskov Yu.M., Kalitsun V.I.* Vodootvedeniye i ochistka stochnykh vod [Wastewater disposal and treatment]. Moscow, Stroyizdat, 1996. 591 p. (in Russian)
 9. *Bernd Rauch.* Mutag BioChip, bionositel' dlya biologicheskoy ochistki stochnykh vod [Mutag BioChip, biocarrier for biological wastewater treatment]. Ekologiya na predpriyatii [Ecology at the plant]. 2014. No. 5. Pp. 5–8. (in Russian)
 10. *David Ir., Keow C.* Wastewater treatment for the recycled pulp. JURUTERA, 2005. No. 5. Pp. 29–30.
-