УДК 628.35

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-162-167

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД БУМАЖНОЙ ФАБРИКИ

OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE PAPER FACTORY'S BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT FACILITIES

Приводится анализ результатов работы сооружений биологической очистки сточных вод бумажной фабрики, использующей сырье разного вида (макулатура и целлюлоза). Определены основные эксплуатационные характеристики этих сооружений (окислительная мощность по органическим загрязнениям и эффективность очистки) при различной нагрузке на них. Разработаны рекомендации по повышению производительности и эффективности работы очистной станции.

Ключевые слова: сточные воды бумажных фабрик, биологическая очистки сточных вод, эксплуатационные характеристики очистных сооружений, окислительная мощность, нагрузка по органическим загрязнениям.

The results of the biological wastewater treatment facilities of the paper factory using raw materials of different kinds (waste paper and pulp) are analyzed. The main performance characteristics of these structures (oxidative capacity for organic pollution and cleaning efficiency) at different loads on them have been determined. Recommendations have been worked out to improve the performance and efficiency of the treatment plant.

Keywords: wastewater of paper factories, biological wastewater treatment, operational characteristics of treatment facilities, oxidative power, loads on organic pollution.

В настоящее время в России значительно возрастает потребление тарного картона, газетной бумаги и бумаги санитарно-гигиенического назначения, соответственно развивается производство этой продукции на отдельных бумажных фабриках [1]. Новые фабрики имеют, как правило, современное оборудование для внутрицеховой очистки образующихся в производстве сточных вод, которое позволяет извлекать из них значительную часть загрязнений, возвращать в оборот основную часть осветленной воды и утилизировать в производственном цикле уловленное волокно (скоп). Благодаря этому значительно снижаются расходы сбрасываемых сточных вод и нагрузки по загрязнениям на об-

щезаводские сооружения биологической очистки^{1,2} [2–8].

На бумажных фабриках в качестве сырья может использоваться целлюлоза или макулатура. В зависимости от вида сырья состав отводимых на сооружения биологической очистки сточных вод (БОСВ) существенно различается. Образующиеся при работе фабрик на макулатуре сточные воды имеют более высокое содержание органических (в том числе трудноокисляемых) веществ, чем на предприятиях, работающих на целлюлозе¹ [6, 8, 12].

¹ Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.

² Технический справочник по обработке воды: в 2-х т. / пер. с франц. 2-е изд. СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.

Состав стоков предприятий целлюлозно-бумажной отрасли определяет виды и технологические параметры работы сооружений БОСВ. В многочисленных публикациях достаточно полно освещен опыт очистки сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов с полным циклом производства^{1,2} [2–5, 10]. Информация о работе станций биологической очистки сточных вод отдельно расположенных бумажных фабрик пока не получила достаточного отражения в литературе. Имеются лишь отдельные сведения о применении для биологической очистки этих видов сточных вод аэротанков со свободно плавающим активным илом, а также биореакторов с прикрепленной биомассой [9, 11, 13]. Однако данные по производственным характеристикам работы сооружений БОСВ этих фабрик практически отсутствуют, что свидетельствует об актуальности этого вопроса. Ниже рассмотрены и проанализированы результаты работы станций биологической очистки сточных вод фабрики по производству бумаги санитарно-гигиенического назначения, работающей на целлюлозе и макулатуре.

Описание технологии биологической очистки сточных вод фабрики

Образующиеся загрязненные сточные воды фабрики подвергаются предварительной очистке на внутрицеховых локальных очистных сооружениях (ЛОС), включающих двухступенчатую флотацию, и затем направляются на общезаводскую станцию биологической очистки. Биологическая очистка сточных вод фабрики осуществляется в две ступени: первая ступень — биореактор с плавающей загрузкой (БПЗ), вторая ступень — аэротенки со вторичными отстойниками. Вместе со сточными водами в БПЗ и аэротенки подаются растворы биогенных солей (N, P) в необходимом количестве. Биореактор первой ступени загружен плавающей загрузкой из полиэтиленовых элементов в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 1,1 мм [9]. Количество этой загрузки в биореакторе составило 39 кг/м³, удельная поверхность загрузки — 125 м² на 1 м³ рабочего объема биореактора. Перемешивание загрузки со сточными водами в реакторе производится сжатым воздухом.

В ходе исследований работы станции БОСВ получены данные о расходах и составе сточных

вод, сбрасываемых фабрикой при переработке целлюлозы и макулатуры, а также технологические параметры работы биореактора с плавающей загрузкой и аэротанков. Работа очистных сооружений контролировалась стандартными методами — путем инструментальных замеров технологических параметров и лабораторных анализов проб сточных вод.

Результаты и обсуждение

Фактическая производительность очистных сооружений составляла: при работе предприятия на макулатуре — 1205–2211 м³/сут и 50–110 м³/ч, а при работе предприятия на целлюлозе — 526–1600 м³/сут и 27–65 м³/ч. Удельный расход сбрасываемых на станцию сточных вод составлял: при работе фабрики на макулатуре — 9,8–16,1 м³ на 1 тонну перерабатываемого сырья (в среднем 13,7 м³/т), а при работе фабрики на целлюлозе — 12,5 м³/т (колебания составили 7,3–18,4 м³/т). Усредненные показатели качества сточных вод, поступающих на сооружения БОСВ, приведены в табл. 1.

Удельное количество сбрасываемых загрязнений по ХПК (после ЛОС) составляло в среднем 26 кг ХПК на 1 тонну перерабатываемой макулатуры (колебания составили 10,3–31,8 кг/т), а при переработке целлюлозы — 8,9 кг/т (колебания — от 2 до 15,2 кг/т). Для выравнивания нагрузки по органическим загрязнениям на очистные сооружения БОСВ на фабрике осуществлялась одновременная переработка макулатуры и целлюлозы, либо попеременное цикличное использование этих видов сырья. Как видно из табл. 1, содержание взвешенных веществ в поступающем с фабрики стоке в среднем равнялось 45,3 и 54,5 мг/л (в зависимости от вида перерабатываемого сырья), что свидетельствовало о нормальной работе локальных очистных сооружений. В табл. 2 приведены данные о работе сооружений БОСВ, в частности, среднемесячные показатели удельной нагрузки по органическим загрязнениям (в граммах ХПК на 1 м³ общего объема сооружений БОСВ в сутки), а также величины ХПК очищенной жидкости после биологической очистки.

Как видно из табл. 2, при среднемесячной величине удельной нагрузки по органическим загрязнениям сточных вод фабрики порядка 1500 г ХПК в сутки на 1 м³ объема сооружений биоло-

Таблица 1

Показатели качества поступающих сточных вод бумажной фабрики

Наименование показателя	Работа фабрики					
	на макулатуре			на целлюлозе		
	max	min	средние	max	min	средние
pH, ед. pH	7,74	6,76	7,23	7,7	6,56	7,23
Температура, °C	40	18,4	29	36	16	27
Взвешенные вещества, мг/дм ³	199	15	54,5	119	10	45,3
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1250	140	562,5	800	74	240,6
ХПК, мгО ₂ /дм ³	2852	909	1771	1840	145	553
Азот аммонийный, мг/дм ³	24,7	1,9	5,0	6,1	0,05	2,5
Фосфаты, мг/дм ³	15,3	0,2	3,0	15,5	0,04	0,75

Таблица 2

Среднемесечные данные о работе сооружений БОСВ бумажной фабрики

Дата	Удельная нагрузка по ХПК на станцию БОСВ, г/м ³ сут	ХПК очищенных сточных вод после БОСВ, мг/дм ³
2018 г. май	1443,27	130,1
июнь	1513,962	99,6
июль	1356,981	
август	1230,44	98,0
сентябрь	1162,264	90,8
октябрь	1081,761	115,3
ноябрь	1335,22	91,3
декабрь	1510,692	75,7
2019 г. январь	1729,56	135,7
февраль	1524,528	89
март	1476,918	103,4
апрель	2641,509	137

гической очистки, остаточная ХПК очищенной жидкости, как правило, не превышала 100 мг/л.

Данные о работе биореактора с подвижной загрузкой (первая ступень биологической очистки) приведены на рис. 1, где показана зависимость удельной окислительной мощности БПЗ от органической нагрузки по ХПК на биореактор. Удельная окислительная мощность БПЗ определялась как

$$\text{ОМ}_{\text{БПЗ}} = \frac{Q(X_0 - X_1)}{m_3}, \quad (1)$$

где $\text{ОМ}_{\text{БПЗ}}$ — удельная окислительная мощность БПЗ, г ХПК/сут на 1 кг загрузки; Q — расход сточных вод, м³/сут; X_0, X_1 — ХПК, соответствен-

но, исходных и очищенных сточных вод после БПЗ, г/м³; m_3 — масса подвижной загрузки в БПЗ, кг.

Удельная окислительная мощность БПЗ определялась в расчете на 1 кг массы плавающей загрузки, учитывая, что процесс окисления органических загрязнений в биореакторе осуществлялся, в основном, закрепленной на этой загрузке биопленкой² [13]. БПЗ работал без рециркуляции активного ила. Количество прирастающей биомассы, фиксируемое по разности массы взвешенных веществ на входе и выходе биореактора, составляло (в среднем за весь период наблюдений) 98,3 мг/л. Вынос представлял собой, в основном, малоактивную, отторгаемую от загрузки биопленку, которая мало влияла на окислительную мощность реактора [13]. На рис. 1 видно, что окислительная мощность БПЗ за период исследований колебалась от 20 до 120 г/сут на 1 кг загрузки в зависимости от величины нагрузки по ХПК на биореактор. Эта зависимость выражается линейным уравнением

$$\text{ОМ}_{\text{БПЗ}} = 0,021N_{\text{БПЗ}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{БПЗ}}$ — нагрузка по ХПК на биореактор, кг/сут.

Следует отметить значительный разброс экспериментальных данных (см. рис. 1) и слабую корреляцию уравнения (2) с этими данными ($R^2 = 0,193$), что объясняется влиянием ряда других факторов на работу БПЗ (колебания расхода и состава поступающих сточных вод, эффективность локальной очистки, дозировка биогенных солей и др.). Необходимо учитывать, что биореактор первой ступени играл роль усреднителя состава сточных вод, одновременно снижая на-

Рис. 1. Зависимость удельной окислительной мощности БПЗ от нагрузки по ХПК на биореактор

грузку по органическим загрязнениям и облегчая работу аэротенков.

Данные о работе аэротенков станции приведены на рис. 2, график которого показывает взаимосвязь удельной окислительной мощности аэротенков по ХПК от нагрузки. Удельная окислительная мощность аэротенков определялась как суточное количество снятых загрязнений по ХПК в аэротенках в расчете на 1 м³ их объема¹ [4, 13].

Зависимость удельной окислительной мощности аэротенков по ХПК от нагрузки по органическим загрязнениям описывалась уравнением

$$ОМ_{аэр} = 0,0006N_{аэр}. \quad (3)$$

Как видно из данных, представленных на рис. 2, линейная зависимость между указанными параметрами работы аэротенков более четко выражена, чем для биореактора первой ступени. Тем не менее корреляция уравнения (3) с экспериментальными данными недостаточно высока ($R^2 = 0,615$) из-за колебаний других параметров

Рис. 2. Зависимость удельной окислительной мощности аэротенков по ХПК от нагрузки

работы аэротенков. В частности, за период наблюдений концентрация активного ила составляла 1,8–3,8 г/л (до 5 г/л), иловый индекс — 200–360 мл/г, степень циркуляции активного ила — 200–400 %.

Для улучшения работы сооружений БОСВ фабрики предложены следующие мероприятия:

- перевести работу фабрики на один вид сырья, что позволит избежать резких колебаний расходов и состава сбрасываемых сточных вод;
- осуществлять работу сооружений БОСВ в пределах рекомендованных выше нагрузок по органическим загрязнениям;
- наладить оперативное управление дозированием применяемых реагентов (коагулянта на ЛОС и биогенных добавок на станции БОСВ) в зависимости от расхода и состава поступающих сточных вод;
- для повышения эффективности работы БПЗ можно применить: частичную рециркуляцию активного ила через биореактор, а также увеличить объем подвижной загрузки в нем;
- наладить работу илоотделителей и применить другие меры для снижения илового индекса и повышения рабочей дозы ила в аэротенках;
- для получения нормируемых показателей очищенных сточных вод наладить работу осветлительно-сорбционных фильтров доочистки на станции БОСВ.

Библиографический список

1. Коган А. Растущий рынок тиссю // Лесная индустрия. 2019. № 5 (133). С. 42–45.
2. Копылов В. А. Очистка сточных вод и уплотнение осадков целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная промышленность, 1983. 173 с.
3. Евилевич М. А. Очистка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности. М.: ВНИПИЭИлеспрома, 1970. 148 с.
4. Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Калицин В. И. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.
5. Treatment of Pulp and Paper Mill Wastes / Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. Second Edition, edited by Lawrence K. Wang Zorex Corporation, Newtonville, New York and Lenox Institute of Technology, Lenox, Massachusetts, USA, 2006, pp. 495–542.
6. Аким Э. Л., Смирнов А. М. Состояние и перспективы применения методов напорной флотации

в целлюлозно-бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон, 2002. № 4. С. 20–22.

7. Смирнов А. М. Локальная очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий методом напорной флотации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: 2004. 16 с.

8. Смирнов А. В. Современные методы очистки сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий. URL: <http://myproject.msk.ru/ru/my-project/stati/sovremennye-metody-ochistki-stochnyh-vod-cellyulozno-bumazhnyh-p-redpriyatij/> (дата обращения: 19.03.2020).

9. Bernd Rauch. Mutag BioChip™, бионоситель для биологической очистки сточных вод // Экология на предприятии. 2014. № 5 (35).

10. Smook G. A. (Ed.) Handbook for Pulp and Paper Technologists, 2nd Ed.; Angus Wilde: Vancouver, Canada, 1992. 419 p.

11. Интенсивно и быстро // Pulp and Paper Industry. 2018. № 3 (7). С. 90–97.

12. David Ir., Keow C. Wastewater Treatment for the Recycled Pulp // JURUTERA, May 2005. Pp. 29–30.

13. Феофанов Ю. А. Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 203 с.

References

1. Kogan A. *Rastushchiy rynek tiss'yu* [Growing market of tissue]. *Lesnaya industriya – Forest industry*, 2019, no. 5 (133), pp. 42–45.
2. Kopylov V. A. *Ochistka stochnykh vod i uplotnenie osadkov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Wastewater treatment and compaction of pulp and paper production sediments]. Moscow, *Lesnaya promyshlennost'* Publ., 1983, 173 p.
3. Evilevich M. A. *Ochistka stochnykh vod tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Wastewater treatment of the pulp and paper industry]. Moscow, *VNIPIEIsproma* Publ., 1970, 148 p.
4. Yakovlev S. V., Karelin Ya. A., Laskov Yu. M., Kalitsun V. I. *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* [Sewerage and sewage treatment]. Moscow, *Stroyizdat* Publ., 1996, 591 p.
5. *Treatment of pulp and paper mill wastes. Handbook of industrial and hazardous wastes treatment*. Second Edition, edited by Lawrence K. Wang Zorex Corporation, Newtonville, New York and Lenox Institute of Technology, Lenox, Massachusetts, USA, 2006, pp. 495–542.
6. Akim E. L., Smirnov A. M. *Sostoyanie i perspektiva primeneniya metodov napornoy flotatsii v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [The state and perspective of application of pressure head flotation methods in pulp and

paper industry]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton – Cellulose. Paper. Carton*, 2002, no. 4, pp. 20–22.

7. Smirnov A.M. . *Lokal'naya ochistka stochnykh vod tsellyulozno-bumazhnykh predpriyatiy metodom napornoy flotatsii*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Local treatment of waste water pulp and paper mills a method of pressure head flotation. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2004, 16 p.

8. Smirnov A. V. *Sovremennye metody ochistki stochnykh vod tsellyulozno-bumazhnykh predpriyatiy* [Modern methods of wastewater treatment of pulp and paper enterprises]. Available at: <http://myproject.msk.ru/ru/my-project/stati/sovremennye-metody-ochistki-stochnykh-vod-cellyulozno-bumazhnykh-p-redpriyatij/> (accessed: 19.03.2020).

9. Bernd Rauch. *Mutag BioChip™, bionositel' dlya biologicheskoy ochistki stochnykh vod* [Mutag BioChip™, a bio-carrier for biological wastewater treatment]. *Ekologiya na predpriyatii – Environment at the enterprise*, 2014, no. 5 (35).

10. Smook G. A. (Ed.) *Handbook for pulp and paper technologists*, 2nd Ed.; Angus Wilde, Vancouver, Canada, 1992, 419 p.

11. Intensivno i bistro [Intensively and fast]. *Pulp and Paper Industry*, 2018, no. 3 (7), pp. 90–97.

12. David Ir., Keow C. Wastewater treatment for the recycled pulp. *JURUTERA*, May 2005, pp. 29–30.

13. Feofanov Yu. A. *Bioreaktory s nepodvizhnoy i podvizhnoy zagruzkoy dlya ochistki vody* [Bioreactors with fixed and mobile loading for water treatment]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, 203 p.