

Научная статья
УДК 628.35

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЭРОБНЫХ И АЭРОБНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Михаил Александрович Карякин

ООО «ЭНВИРО-ХЕМИ ГмбХ», Екатеринбург, Россия

Уральский государственный лесотехнический университет,

Екатеринбург, Россия

karjakin@mail.ru

Аннотация. Детально рассмотрен вопрос обоснованного выбора технологии биологической очистки сточных вод с использованием анаэробных и аэробных методов. Приведены основные технологические параметры эксплуатации очистных сооружений. Выполнена оценка применения биологических методов для очистки сточных вод на примере пищевого предприятия с расчетом основных ключевых характеристик очистных сооружений.

Ключевые слова: очистные сооружения, анаэробные, аэробные, очистка стоков

Для цитирования: Карякин М. А. Сравнительный анализ применения анаэробных и аэробных методов для очистки сточных вод // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVI Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2025. С. 427–434.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF ANAEROBIC AND AEROBIC METHODS IN WASTEWATER TREATMENT

Mikhail A. Karyakin

ENVIRO-CHEMIE GmbH Ltd, Ekaterinburg, Russia

Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

karjakin@mail.ru

Abstract. In this article the question of reasonable choice of biological treatment technology using anaerobic and aerobic methods is considered in detail. The basic technological parameters of operation of treatment facilities are given. The application of biological methods for wastewater treatment on the example of

a food enterprise with the calculation of the main key characteristics of treatment facilities is evaluated.

Keywords: wastewater treatment plants, anaerobic, aerobic, effluent treatment

For citation: Karyakin M. A. (2025) Sravnitelnyj analiz primeneniya anaerobnyh i aerobnyh metodov dlja ochistki stochnyh vod [Comparative analysis of the application of anaerobic and aerobic methods in wastewater treatment]. Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies] : proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg : USFEU, 2025. P. 427–434. (In Russ).

Защита водных ресурсов от органических загрязнений, сбрасываемых в составе сточных вод различных техногенных источников, является одной из наиболее актуальных экологических проблем современного общества. Биологический метод очистки давно признан как эффективный, надежный способ переработки данного вида стоков. Стоит отметить, что в Советском Союзе анаэробная обработка применялась в ограниченных масштабах – в основном для очистки высококонцентрированных производственных сточных вод (отходов) с БПК_{полн} более 10–15 г/л. Процесс очистки предусматривал обработку стоков в метантенках, разработанных в СССР для сбраживания осадков сточных воде еще в 30-е годы. Использование этих сооружений для очистки менее загрязненных стоков оказалось экономически неэффективно из-за длительного времени обработки (до 20 суток) [1]. Однако разработанные за последнее время современные метанреакторы могут применяться в широком диапазоне концентраций по БПК_{полн} от 3–100 г/л, при этом время обработки составляет от 12 до 48 ч.

В целом в последнее десятилетие в России фиксируется позитивный тренд развития многих отраслей промышленности, в их число уверено входит пищевая отрасль. В первую очередь, это связано с ростом благосостояния населения, повышением внутреннего спроса, уходом с российского рынка ряда зарубежных компаний и прихода на их место отечественных производителей. Для покрытия внутреннего спроса идет строительство новых пищевых предприятий, активно осуществляется расширение и модернизация существующих технологических линий, увеличивается линейка выпускаемых товаров. При этом, на любом пищевом производстве параллельно с выпуском продукции происходит образование концентрированных сточных вод с высоким содержанием органических веществ (ХПК, БПК₅), соединений азота и фосфора, жиров, взвешенных веществ и пр. Основным источником образования стоков являются обязательные технологические процессы СІР-мойки (Cleaning In Place) основного и вспомогательного оборудования, емкостей, реакторов, производственных линий. В процессе

СIP-моек формируются сточные воды, представляющие собой смесь из кислотно-щелочных растворов, моющих и дезинфицирующих средств, потерь основной продукции, полуфабрикатов, ингредиентов и т. д.

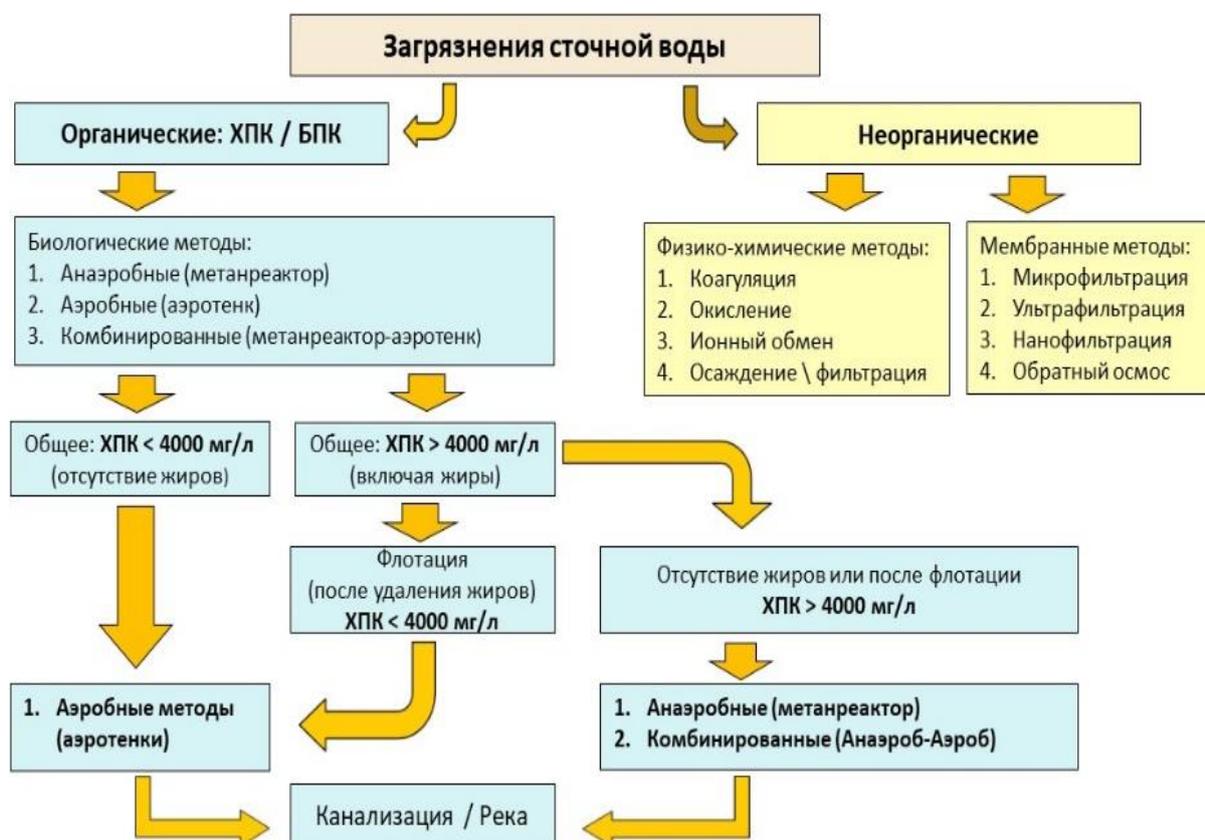
Для утилизации и переработки данных видов сточных вод в современной мировой практике, главным образом, используются очистные сооружения, основанные на применении биологических методов очистки как анаэробных, так и аэробных.

Анаэробные технологии для очистки сточных вод основаны на использовании анаэробных микроорганизмов (чаще всего используются мезофильные бактерии), в результате жизнедеятельности которых происходит разложение органических веществ с образованием биогаза (смесь метана и углекислого газа). Важным условием для протекания технологического процесса является создание для микроорганизмов анаэробных условий (без доступа кислорода) и поддержания определенных характеристик в заданном диапазоне (рН, температура, микроэлементы, скорость движения воды внутри реактора, массовая нагрузка, концентрация и размер гранул активного ила и т.д.). Анаэробный процесс протекает с использованием последовательного механизма разложения органических веществ, который состоит из четырех стадий: гидролиз, ацидогенез, ацетогенез, метаногенез.

Аэробные технологии также основаны на использовании микроорганизмов, только аэробных. Для их жизнедеятельности кислород является необходимым условием и должен присутствовать в сточной воде в требуемом количестве. В результате органические вещества удаляются с образованием воды, углекислого газа и прироста активного ила (биомассы). При необходимости удаления соединений азота организуются процессы нитрификации и денитрификации с использованием данных микроорганизмов. При этом необходимо поддержание ключевых параметров в заданном диапазоне (кислород, рН, температура, микроэлементы, концентрация активного ила, биоценоз, структура и иловый индекс, удельная массовая нагрузка и т. д.).

Упрощенная схема выбора технологии очистки представлена на рисунке. Выбор применяемой биологической технологии основывается на следующих основных показателях и принципах:

- 1) анализ сточной воды для установления фактической концентрации органических загрязняющих веществ (ХПК, БПК₅), соотношения ХПК/БПК₅, соотношения между ХПК и соединениями азота и фосфора;
- 2) требования к занимаемой площади под очистные сооружения;
- 3) себестоимость очистки 1 м³ сточной воды;
- 4) требования к качеству очистки и водоотведению;
- 5) «гибкость» технологии к изменениям характеристик сточной воды;
- 6) возможность расширения без остановки производства;
- 7) автоматизация технологического процесса.



Упрощенная схема выбора технологии очистки сточных вод

Рекомендуется применение анаэробных технологий для очистки сточных вод пищевых предприятий при высоком содержании растворенных органических веществ с концентрацией ХПК более 4000 мг/л. При более низких значениях ХПК чаще всего используются аэробные стадии очистки. Важно отметить, что на очистных сооружениях пищевых производств для достижения нормативов сброса в водоем рыбохозяйственного значения аэробный этап присутствует всегда. Он используется либо в качестве доочистки (например, после анаэробного реактора), либо является основной стадией при изначально более низких значениях ХПК в сточной воде.

Для удобства сравнения анаэробных и аэробных технологий в табл. 1 представлены их основные характеристики и ключевые технологические особенности.

В результате внимательного изучения данных табл. 1 можно отметить, что каждая из технологий имеет как существенные преимущества, так и недостатки. Именно поэтому нельзя однозначно установить, какая из технологий лучше или хуже. В определенных условиях преимущество на стороне анаэробных технических решений, в других случаях используются только аэробные технологии, а где-то требуется их взаимная комбинация.

Таблица 1

Критерии сравнения технологий биологической очистки сточных вод

№	Критерии сравнения	Анаэробные технологии	Аэробные технологии
1	Основные удаляемые загрязнители	ХПК, БПК ₅ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ²⁻	ХПК, БПК ₅ , NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ²⁻ Частично PO ₄ ²⁻
2	Степень удаления ХПК, БПК	70...90 %	95...99 %
3	Образование отходов	50...80 г/кг БПК ₅	500...800 г/кг БПК ₅
4	Соотношение БПК ₅ : N : P	1000...600 : 5 : 1	80...100 : 5 : 1
5	Тип активного ила	Гранулированный	Хлопьеобразный (SVI <100)
6	Негативное влияние серы	Более 10 мг/л S на 1000 мг/л ХПК	Трансформация серы в сульфаты
7	Образование энергии	0,5 м ³ биогаза / 1 кг, удаленного ХПК Состав: 60...85 % CH ₄ , 15...35 % CO ₂	Образования энергии нет
8	Потребление электроэнергии	0,5...1,0 кВт/м ³ сточных вод	2,5 — 4,0 кВт/м ³ сточных вод
9	Удельная нагрузка	0,1...0,3 кг БПК/кг активного ила 7...20 кг ХПК/м ³ реактора	0,05...0,2 кг БПК ₅ /кг активного ила 0,6...1,5 кг ХПК/м ³ реактора
10	Рабочая температура	+33...+36 °C Требуется подогрев стоков	+10...+36 °C
11	Рабочее значение по ХПК	ХПК > 4000 мг/л Соотношение ХПК/БПК ₅ < 2.	Ограничений нет. Соотношение ХПК/БПК ₅ < 2
12	pH диапазон	6,5...8,5	6,5...8,5
13	Класс опасности отхода (акт. ил)	IV (возможен переход в V)	IV (возможен переход в V)
14	Рабочая концентрация ила	30...50 г/л	3...10 г/л
15	Время адаптации активного ила	30...60 дней	14...30 дней
16	Концентрация кислорода	Не требуется	1,54 мг О/л
17	Риск неприятного запаха	Низкий (закрытая емкость)	Средний (открытая емкость)
18	Уровень автоматизации	Высокий	Высокий

Основным преимуществом анаэробного реактора является его компактность, низкое потребление энергии и образование отходов, возможность использования биогаза в качестве топлива. При этом недостатком является необходимость подогрева воды, потребность в доочистке обработанных сточных вод по ряду показателей.

Аэробный реактор или аэротенк, наоборот, обладает преимуществом по уровню качества очистки, но основным недостатком служат высокие эксплуатационные затраты, которые связаны с энергопотреблением, образованием отходов и потреблением реагентов. К тому же аэробные решения требуют в несколько раз больших размеров занимаемой площади по сравнению с анаэробными.

В России в настоящий момент практически отсутствуют отечественные производители анаэробных систем, которые обладают необходимыми знаниями и достаточным опытом внедрения на промышленных предприятиях. Необходимость воспитания, обучения, повышения квалификации специалистов, разработка российских передовых систем анаэробной очистки является одной из первостепенных экологических задач.

В качестве примера для обоснованного выбора технологий биологической очистки рассмотрим предприятие пищевой промышленности со сбросом в водоем рыбохозяйственного назначения сточных вод с расходом 1500 м³/сут и следующим составом:

взвешенные вещества 1000 мг/л;
ХПК 6000 мг/л;
БПК₅ 4000 мг/л;
общий азот 100 мг/л;
общий фосфор 20 мг/л;
температура стоков 25 °С;
рН 5 – 10.

Под данный состав и производительность попадает большинство предприятий индустрии напитков, переработки фруктов, глубокой переработки зерна, сырзаводов.

Принципиальная технология очистных сооружений будет состоять из следующих основных этапов очистки:

- механическая обработка;
- усреднение стоков;
- биологическая стадия;
- этап доочистки (песчаная и угольная фильтрация);
- УФ-дезинфекция.

Для очистки промышленных стоков с высокой концентрацией органических загрязнений наиболее экономична анаэробная очистка. Однако содержание загрязнений в стоках, прошедших только анаэробную стадию, можно понизить только до 150...500 мг/л ХПК, при этом в воде остаются и накапливаются соединения аммонийного азота и фосфора. Такое качество очищенной воды может удовлетворять только нормативным требованиям сброса в сети канализации. В случае сброса в водоемы сточные воды должны подвергаться более глубокой обработке с применением аэробной стадии доочистки [2].

Достичь требуемых нормативных значений очистки сточных вод возможно при применении следующих вариантов исполнения очистных сооружений: анаэробно-аэробной и аэробной технологий. Нами выполнена сравнительная оценка. Для удобства результаты технологического и экономического сравнения вариантов реализации очистных сооружений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение вариантов исполнения очистных сооружений на основе различных методов биологической очистки

№	Критерии сравнения	Очистные сооружения на основе анаэробно-аэробной технологии	Очистные сооружения на основе аэробной технологии
1	Достижение норм сброса	100 %	100 %
2	Уровень автоматизации	Высокий	Высокий
3	Потребность в персонале	5 человек (штат)	5 человек (штат)
4	Потребление пара (технология)	0,5...0,9 т/ч	Не требуется
5	Электропотребление	90 кВт*ч	250 кВт*ч
6	Образование отходов (20 % СВ)	11 т/сут	18 т/сут
7	Образование энергии (биогаз)	4200 м ³ /сут. Тепловая энергия 6,5 кВт/м ³	Образования энергии нет
8	Потребление флокулянта	20 кг/сут	33 кг/сут
9	Потребление щелочи / кислоты	В зависимости от рН стоков	В зависимости от рН стоков
10	Потребление воды	50 м ³ /сут	80 м ³ /сут
11	Общий объем емкостей (м ³)	4200 м ³ (400 м ²)	1200 м ³ (450 м ²)
12	Оценка инвестиций	320 млн руб	400 млн руб
13	Себестоимость очистки 1 м ³	24 руб. (с биогазом)	60 руб.
14	Эксплуатационные затраты	23 млн руб/год	32 млн руб/год

В результате проведенного сравнительного анализа нами показано, что комбинированная биологическая схема существенно снижает энергозатраты, количество образующихся отходов, размер занимаемой площади. Такой технологический подход позволяет обеспечить высокую производительность и стабильность работы очистных сооружений, эффективно противостоит залповым сбросам, позволяет генерировать дополнительные энергоресурсы, которые могут быть использованы на основном производстве [3].

Данное сравнение наглядно демонстрирует необходимость применения комбинированного биологического метода очистки, когда преимущества одной технологии – анаэробной, дополняются сильной стороной другой – аэробной. А недостатки каждой технологии при совместной комбинации значительно нивелируются. Именно такой технологический симбиоз

биологических методов очистки всё чаще находит свое применение и активно используется ведущими предприятиями пищевой отрасли, что позволяет повысить конкурентные качества выпускаемой продукции с экономической и экологической точек зрения.

Список источников

1. Калюжный С. В., Данилович Д. А., Ножевникова А. Н. Анаэробная биологическая очистка сточных вод. (Итоги науки и техники ВИНТИ, серия «Биотехнология»). М., 1991. Т. 29. С. 156.

2. Прикладная экобиотехнология : учебное пособие / под ред. А. Е. Кузнецова, Н. Б. Градовой, М. Энгельхарт, Т. Вайссера [и др.]. 2-е изд. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. Т. 1. 629 с.

3. Прикладная экобиотехнология : учебное пособие / под ред. А. Е. Кузнецова, Н. Б. Градовой, М. Энгельхарт, Т. Вайссера [и др.]. 2-е изд. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. Т. 2. 485 с.

References

1. Kalyuzhny S. V., Danilovich D. A., Nozhevnikova A. N. Anaerobic biological treatment of sewage. M. : VINITI, 1991. (Results of science and technology. Biotechnology ; vol. 29).

2. Applied ecobiotechnology : textbook / edited by A. E. Kuznetsov, N. B. Gradova, M. Engelhart, T. Weisser [et al.]. 2nd ed. M. BINOM. Laboratory of Knowledge, 2012. Vol. 1. 629 p.

3. Applied ecobiotechnology : textbook / edited by A. E. Kuznetsov, N. B. Gradova, M. Engelhart, T. Weisser [et al.]. 2nd ed. M. BINOM. Laboratory of Knowledge, 2012. Vol. 2. 485 p.