

ВНУТРЕННИЕ МЕХАНИЗМЫ управления процессами биологической очистки промстоков

*Н. П. Тимофеев, канд. биол. наук
Филиал ОАО «Группа "Илим"»*

Только технические средства и инженерные методы не всегда позволяют улучшить качество очистки сточных вод. Это доказывает опыт работы очистных сооружений, основанный на современных знаниях о функционировании экосистем.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Сточные воды целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), поступающие на очистные сооружения, содержат сложную смесь различных органических и химических компонентов и являются одним из трудно биodeградируемых отходов промышленности. Качественная работа очистных сооружений (ОС) Котласского ЦБК (сейчас филиал ОАО «Группа "Илим"») тесно связана со спецификой стоков отдельных производств, поступающих в биосистему; последняя представлена схемой, состоящей из одной ступени: первичные отстойники - аэротенки - вторичные отстойники.

Загрязнённость сточных вод, как правило, обусловлена присутствием в них после делигнификации древесины, отбелики и технологической обработки целлюлозы химическими методами сложного комплекса веществ - фенолов, лигнина сульфатного (до 2009 г. и сульфитного), адсорби-

рованного органического хлора, биоцидов, синтетических поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, фурфурола, метанола, формальдегида, скипидара, смоляных кислот и окислов, щёлоков, сахаров, соединений серы - диметилсульфида, метилмеркаптана и т. д.

Уровень органических загрязнений в стоках оценивается показателем суммарного химического поглощения кислорода (ХПК), из которого лишь часть может быть окислена биологическим способом (БПК) - с помощью спорообразующих бактерий активного ила (АИ). На комбинате в целом доля биологически разлагаемых загрязнений на входе в очистную систему, соотнесённая как БПК/ХПК, характеризовалась крайне неблагоприятным соотношением - 25-28% при оптимальных 65-70%.

Длительное воздействие токсичных и часто варьирующихся по химическому составу стоков вело к смене структуры биоценоза, резкому уменьшению и исчезновению в их составе полезных бактерий и простейших, развитию

чужеродных нитчатых и серных бактерий, не осаждаемых в отстойниках. Распад и распыление осаждаемых хлопьев зооглея проявлялись в виде высокого илового индекса, повышенного выноса взвешенных веществ из системы.

Возмущения обычно могли вызывать такие техногенные факторы, как ненормативные сбросы по отдельным потокам на очистные сооружения; разовое поступление большого количества загрязняющих веществ (разброс по зольности - 10-44%, рН - 1,7-12,5, БПК - 200-300 мг/л, ХПК - 800-4700 мг/л, ЛСК - 200-350 мг/л); нестабильные параметры аэрации O_2 (0,1-3,3 мг/л) (Жмур, 2003).

Проблема очистки сточных вод была заложена ещё при проектировании комплекса ОС. В 1980-е гг. группой специали-

стов были испытаны новые технологические режимы работы оборудования, регенерации и рециркуляции АИ, использование коагулянтов для ускорения осаждения ила, стимуляторы жизнедеятельности зооглея из селекционных штаммов бактерий, проведены промышленные и лабораторные эксперименты по кислотованию и щелочению среды обитания нитчатых бактерий и т.д. Однако эти мероприятия приводили к частичным улучшениям, но в целом проблему не решали.

Ввиду большого объёма сточных вод (около 400 тыс. м³/сут) возможности вычленения отдельных стадий и ускорения биохимических процессов очистки в изолированных блоках ОС (анаэробные реакторы, технологии прикрепленной биопленки) отсутствовали.



С 2003 г. приоритет был смещён в сторону биотических факторов – на формирование новой, значительно более высокоактивной среды АИ, определяемой максимальной его концентрацией, возрастом и устойчивостью экологических связей живого вещества.

АКТИВНЫЙ ИЛ – ЖИВОЕ СУЩЕСТВО

Для решения проблемы пришлось исходить из понятий взаимодействия сообществ в среде АИ, зависимости и изменчивости их ферментативной активности от природно-климатических, внутренних биологических и внешних технологических факторов. Сегодняшние представления о биосистеме очистки базируются на следующих трёх моментах:

- ♦ целостность – внутреннее единство природных и антропогенных факторов (инженерно-технические решения не должны её разрывать);
- ♦ устойчивость – способность к самосохранению и саморегулированию лишь в пределах определённых критических величин (после преодоления пороговой величины начинается лавинообразное разрушение структуры и скачкообразный переход в неустойчивое состояние);
- ♦ ёмкость и допустимые пределы возмущений – тип, интенсивность, длительность и число нарушений во входных параметрах сбросов, разрушающих целостность и устойчивость системы.

В нынешнем понимании экосистема ОС комбината – это живое существо массой около 100 тыс. т, которое живёт и размножается по общебиологическим законам. Как объект живой природы, АИ имеет систему дыхания (аэрации), питания (требует снабжения минеральными элементами по определённой рецептуре), пищеварения (утилизация сбрасываемых цехами и производствами химических веществ), отходы своей жизнедеятельности (участок по обезвреживанию АИ).

Как живой организм, АИ может находиться в здоровом и активно функционирующем состоянии, а может быть отравлен токсичными сбросами. Или же после инфицирования нитчатými бактериями биоценоз может быть заражённым и состояние АИ – очень тяжёлым и трудноизлечимым без кардинальных вмешательств. Биоценоз очистных сооружений круглогодично находится под открытым небом, население его представлено почвенными бактериями, простейшими и животными. Биоритм функционирования живых существ зависит от природно-климатических условий Европейского Севера. Последние кардинально меняются от лета к зиме, с противоположными переходами солнечной активности весной и осенью.

В периоды сезонных изменений температуры, а также изменения структуры и состава поступающих сточных вод ранее наблюдалось резкое ухудшение флокуляционных и седиментационных свойств АИ (с увеличением илового индекса, развитием нитчатых), приводящее к снижению эффективности работы очистной системы.

ЛИМИТ-ФАКТОРЫ БИОЦЕНОЗА

В связи с необходимостью повысить экологическую безопасность предприятия были проведены промышленные эксперименты по управляемости внутренними процессами очистки промстоков. Установлено, что факторы, лимитирующие процесс минерализации загрязнителей в биореакторах-аэротенках (АЭ), комплексны, среди них условно можно выделить: технологические – гидронагрузка, число АЭ и отстойников, питание, доля регенерации и рециркуляции, объём выводимого из системы ила; биотические – температура жидкой среды, рН, концентрация активного ила и его возраст, величина и плотность хлопьев зооглея, структурный состав простейших, присутствие нитчатых

форм микроорганизмов, антагонистические или синергические взаимоотношения сообществ и т. д.

Конструкционные особенности сооружений диктуют безопасный режим, при котором возможности технологической регулировки оптимальных параметров очистки жёстко заданы одним параметром – концентрацией возвратного ила, накапливаемого во вторичных отстойниках, в пределах 4–6 (7,5) г/л. Отклонение концентрации в ту или иную сторону может привести к сверхнормативному выносу взвешенных веществ и нарушению разрешённых параметров сброса. Оперативных рычагов регулирования концентрации ила в АЭ свыше 2,5 г/л (например, до 20–30 г/л, как принято в современных системах, что позволило бы ускорить минерализацию и многократно уменьшить величину сбросов), данная система не имеет. Отсутствуют также возможности улучшения параметров очищенных стоков на выходе из системы за счет дополнительных ступеней.

Технологическим регламентом предусмотрен максимальный подъём температуры в ОС не более 35°C. Реальная же температура зависит кроме температуры самих поступающих стоков от величины притока солнечной радиации, которая поглощается водным зеркалом сооружений, а также от жизнедеятельности бактерий АИ, когда в ходе окисления органических загрязнений выделяется энергия, отводимая в жидкую среду. Поэтому в летнее время в АЭ создаётся режим термобיוза с температурой 41–43°C, при котором все виды простейших исчезают из системы. Биоценоз в этот период представлен термофильными и мезофильными штаммами бактерий, на которые и ложится основная нагрузка по биоокислению промстоков.

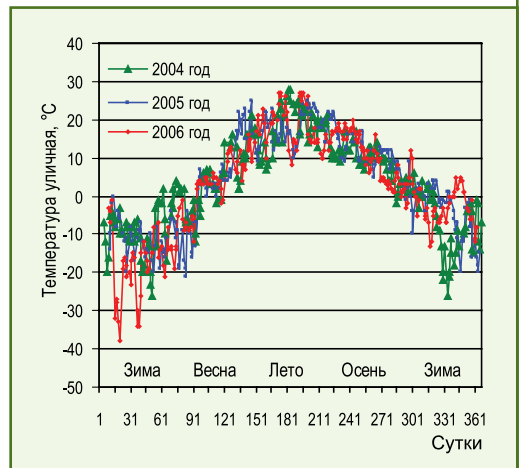
Один из основных факторов устойчивости системы – концентрация зооглейных бактерий в АЭ. Постоянные наблюдения свидетельствовали о том, что дестабили-

зация происходит через цепь: вторичные отстойники – регенераторы – аэротенки. Индикаторными признаками служили: появление большого количества бентосных амёб, сильное развитие нитчатых и сернистых бактерий. Последние образовывали разветвлённую плавучую сеть, на которую осаждался АИ и выносился из системы.

В ходе опытных работ было выявлено, что процесс очистки лимитируется недостаточной концентрацией АИ и отсутствием для него фазы покоя. Если при двух аэротенках-стабилизаторах система может выдерживать разовые нарушения – флуктуации, то с одним стабилизатором (после вывода второго в ремонт) она становится всё менее способной противостоять резким колебаниям кислотности, шламовым сбросам отдельных производств, поступлению и размножению нитчатых бактерий. Данная тенденция была особенно ярко выражена в переходные сезоны (лето – осень; зима – весна).

Было установлено, что концентрация и метаболическая активность АИ подвержены сезонной изменчивости, обусловленной температурой (рис. 1), фракционным составом ила (рис. 2) и конкурент-

Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха



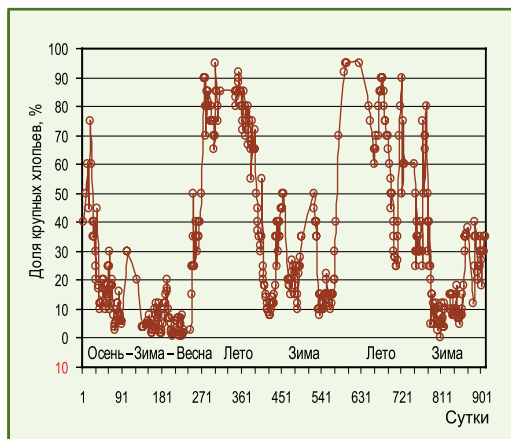
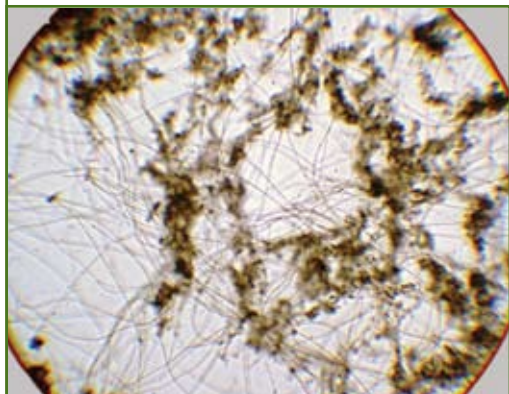


Рис. 2. Сезонная изменчивость фракционного состава ила

ними отношениями с представителями нитчатых бактерий *Sphaerotilus natans*.

Согласно проекту концентрация ила в АЭ должна выдерживаться в пределах 1,5-2,0 г/л, возвратного - 4-6 г/л. В этих условиях сильным возмущающим фактором выступали нитчатые, развитие которых прогрессировало на фоне низкой концентрации и дисперсии крупного осаждаемого ила. На фоне распыленного до 7-10% ила вначале наблюдался рост численности бактериофагов в 30-50 раз, утилизирующих пылевидную фракцию, а затем, на фоне низкой концентрации

Рис. 3. Развитие нитчатых с образованием плавающей сети



зооглея, начинают доминировать нитчатые, устойчивые к ХПК и не осаждаемые во вторичных отстойниках (рис. 3). В свою очередь, нитчатые бактерии выделяли в жидкую среду антибиотические вещества, ингибирующие жизнедеятельность зооглея, поэтому после преодоления ими порогового значения система очистки была не способна на автоматический возврат в прежнюю точку.

В летний сезон, при повышении температуры, способность ила к укрупнению хлопьев и повышению концентрации резко возрастала. Под действием насыщенных энергией УФ-лучей в водном слое генерировались высокоактивные формы кислорода (супероксиданты-окислители), ведущие к ускорению ферментативных реакций; повышалась температура среды; возрастала плотность ила, позволяющая поднять концентрацию возвратного ила в несколько раз; элиминировались нитчатые. В результате система становилась устойчивой к пиковым нагрузкам.

Отличительной особенностью работы ОС в зимний период была их неустойчивость к резким отклонениям в параметрах входных стоков. Развитие нитчатых, устойчивых к ХПК и не осаждаемых во вторичных отстойниках, прогрессировало на фоне низкой концентрации и дисперсии крупных хлопьев АИ. Инфицирование и интенсивное развитие нитчатых в 200-500 раз (с 0,1-0,2 до 2,0-2,5 и далее, до 6-7 баллов по 10-балльной шкале) приводило к значительному снижению параметров очистки. Разовые однофакторные воздействия обуславливали увеличение выноса взвешенных веществ.

Падение метаболической активности АИ наблюдалось на фоне низкой температуры окружающей среды, короткого светового дня, полного отсутствия ультрафиолетового спектра освещения. При этом создавались особые условия функционирования очистной системы,

которая характеризовались следующими коррелирующими связями:

- ♦ обилие нитчатых отражается на высоком иловом индексе, достигающем 94–97% от максимально возможного (940–970 единиц против 80–120 оптимальных для зооглея);
- ♦ высокий иловый индекс – показатель неустойчивости системы, может привести к сверхнормативным выносам взвешенных веществ;
- ♦ предотвращение выноса взвешенных веществ достигалось увеличением вывода избыточного ила через участок обезвоживания (до 80–110 т против 60–65 т в сухом веществе);
- ♦ с увеличением вывода избыточного ила снижалась концентрация ила в АЭ;
- ♦ как следствие, доля нитчатых бактерий в структуре биоценоза возрастала, так как последние в силу своей неосаждаемости меньше всего выводятся из системы;
- ♦ чем меньше концентрация зооглейных бактерий, тем меньше возможностей для конкурентного вытеснения ими нитчатых. Нитевидные бактерии из-за особенностей физиологии менее требовательны к факторам жизнеобеспечения, поэтому потребление минеральных солей в АЭ снижалось, а на выходе системы концентрация азота и фосфора повышалась.

Данные проблемы были частично решены созданием сверхконцентрации ила (без использования носителей биомассы): 3,3–4,5 г/л в проточной жидкости АЭ и 8–12 (15) г/л возвратного ила после вторичных отстойников. Технологическое обеспечение оптимального режима

(он неодинаков для разных сезонов) достигалось через освобождение от отмершего ила, увеличение скорости оборота биомассы в системе (рециркуляцию) и регулирование её вывода через участок обезвоживания (степень отчуждения), повышение концентрации зооглея и увеличение длительности его жизни (возраст ила), стимулирование развития термотолерантных бактерий, формирование уплотнённого ила.

В конце 2008 г. на 50%-ный режим регенерации были переведены дополнительно три АЭ. Произошла пространственная изоляция части нитчатых в отдельных частях сооружений. Другая часть из застойных зон была выведена методом последовательного опорожнения ёмкостей ОС.

Следующим этапом стало конкурентное вытеснение нитчатых из системы зооглейными бактериями. Чем выше долевое участие крупных хлопьев, тем меньше становится нитчатых в результате конкурентных взаимоотношений со споровыми формами бактерий (см. таблицу).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ

В феврале 2009 г. в аэротенках в результате торможения развития нитчатых произошли положительные качественные изменения зимнего сезона – концентрация возвратного ила возросла с 3,4 до 4,5 и затем до 5,6 г/л. Ил стал на 60–80% структурированным в крупные и макрохлопья. Доля нитчатых уменьшилась до 3,0–3,2 балла. В результате иловый

Конкурентное вытеснение нитчатых зооглеем в зависимости от времени взаимодействия, %

| Показатели | 1-й вариант | | | | 2-й вариант | | 3-й вариант | | |
|------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| | 1-е сутки | 4-е сутки | 7-е сутки | 16-е сутки | 1-е сутки | 4-е сутки | 1-е сутки | 4-е сутки | 7-е сутки |
| Крупные хлопья зооглея | 5 | 10–15 | 20 | 90–95 | 40–45 | 60 | 7 | 10 | 15 |
| Нитчатые | 25–30 | 20 | 10 | 0,5–1,0 | 20 | 10 | 25–30 | 25 | 20 |

индекс снизился, что является свидетельством потенциальной устойчивости экосистемы.

Улучшение качества АИ с февраля 2009 г. также можно связать с регулировочными работами по устранению перепадов в работе вторичных отстойников и аэротенков; с применением увеличенных доз коагулянтов на участке обезвоживания ила; со сниженным поступлением ХПК со сточными водами в результате прекращения выработки с января вязкой целлюлозы сульфитным способом.

К концу февраля показатели очистки характеризовались стабильными изменениями в благоприятную сторону. Из системы исчезли нитчатые бактерии, и это привело к значительному снижению илового индекса. Вынос взвешенных веществ оставался в пределах нормативных величин.

В дальнейшем концентрация ила быстрыми темпами возросла и составила 5,7–6,4 (8,5) и 2,8–3,5 (4,0) г/л соответственно в регенераторе и аэротенках. Агрегация АИ в крупные хлопья постепенно увеличилась до 90%. В составе биоценоза появились прикреплённые инфузории

и их колониальные формы (рис. 4), а также хищные виды. Нитчатые в регенераторе единичны; в аэротенках – 0,1 балла, иногда встречаются пучковые их формы – до 30–50 шт./мл. Динамика осаднения зооглея во вторичных отстойниках скоростная, иловый индекс составляет около 70–80 мг/л. Надыловая вода после оседания зооглея светлая.

Эффективность работы очистных сооружений в зимний период стала высокой и приблизилась к показателям летнего сезона. Степень утилизации БПК₅ (доля, изъятая из стоков по фильтрованной пробе) возросла до 97–98% при проектном значении 92,5%.

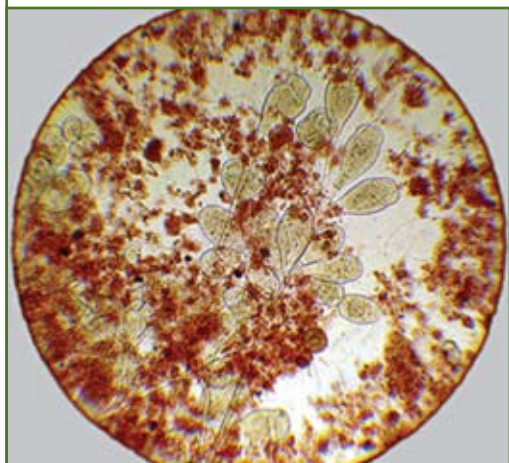
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основываясь на 40-летнем опыте работы Котласского ЦБК и исходя из современных понятий функционирования экосистем, следует ориентироваться на работу очистных сооружений при повышенных концентрациях АИ – не менее 6,5 г/л. В связи с ожидаемым снижением эффекта очистки, связанного с изменениями температуры, остановом и пуском основных производств комбината после капремонта, необходимо создание буферного объёма АИ, способного гасить неблагоприятные изменения.

В целях формирования высококачественного уплотнённого ила, состоящего из крупных быстрооседающих хлопьев зооглея, изъятие объёмов избыточного ила можно осуществлять с запаздыванием во времени после его прироста. Качественный показатель, измеряемый концентрацией зооглея в регенераторе, должен составить в осенний сезон 7,0–7,5 г/л. При этом в начальной точке (вторичные отстойники) количество его может быть большим примерно на 1 ед. – около 8,0–8,5 г/л.

В переходные сезоны нельзя снижать уровень минерального питания, и в первую очередь нельзя допускать азотного

Рис. 4. Колониальные формы простейших на фоне зооглея (окрашено красным) и отсутствия нитчатых



голодания, чтобы обеспечить непрерывность прироста АИ, необходимого для поддержания оптимальной концентрации. Выход за пределы нижнего уровня концентрации чреват запуском неуправляемых дестабилизационных процессов, а необоснованного увеличения объемов рыхлого ила – началом повышенного выноса взвешенных веществ. В неясных (неопределённых) ситуациях приоритет должен оставаться за повышенной концентрацией ила, уплотнённой структурой зооглея и выходом в режим термобиоза (с функционированием при повышенной температуре).

Необходимо иметь буферные ёмкости для исключения прямого попадания и негативного влияния аварийных и залповых сбросов загрязняющих веществ на биоценоз. Тех-

нологические режимы должны быть направлены на улучшение функционирования АИ – поддержание стабильных нагрузок, постоянной температуры, исключение аварийных и залповых сбросов.

Ведение контроля за параметрами биоочистки должно основываться на автоматических приборах контроля состава поступающих стоков и качества АИ, функционирующих в реальном режиме времени. Это позволит принимать упреждающие меры по исключению попадания и негативного воздействия на население биоценоза высококонцентрированных загрязнителей, а также оперативно проследить изменения целостности и биохимических характеристик АИ, прогнозировать разрушение его структуры, предотвращать переход в неустойчивое состояние.



Аналитический Центр контроля качества воды ЗАО «РОСА»

- **АНАЛИЗЫ ВОДЫ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**
- **МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ**
- **АТТЕСТОВАННЫЕ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**
- **ШКОЛЫ-СЕМИНАРЫ ДЛЯ РУКОВОДЯЩЕГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ**

| | |
|--|---|
| Микробиологические методы анализа воды. Обеспечение качества (с практическими занятиями на рабочих местах в лаборатории). | 2 – 5 февраля 2010 13 – 16 апреля 2010 9 – 12 ноября 2010 |
| Контроль качества в аналитической лаборатории. Подходы к организации, требования, процедуры. | 16 – 19 февраля 2010 25 – 28 мая 2010 |
| Компетентный лаборант в современной лаборатории. | 2 – 5 марта 2010 7 – 10 декабря 2010 |
| Система менеджмента аналитической лаборатории. Выполнение требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006. | 16 – 19 марта 2010 |
| Практическое использование спектральных методов анализа для определения металлов в объектах окружающей среды (с практическими занятиями на рабочих местах в лаборатории). | 20 – 23 апреля 2010 |
| Хроматографические методы определения органических загрязнителей в объектах окружающей среды: вода, почва, осадки сточных вод и др. (с практическими занятиями на рабочих местах в лаборатории). | 11 – 14 мая 2010 |
| Внутренний аудит в аналитической лаборатории. Практика проведения. | 5 – 8 октября 2010 |
| Определение интегральных (обобщенных) показателей качества воды. | 19 – 22 октября 2010 |
| Организация работы лаборатории по контролю качества воды. | 23 – 26 ноября 2010 |