

Адаптация активного ила с анаммокс к пониженным температурам иловой смеси в биореакторе

И. А. Гульшин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Аннотация: В статье представлены результаты оценки способности активного ила, насыщенного анаммокс-бактериями, адаптироваться под мезофильные и более низкие температурные режимы эксплуатации. В качестве основных температурных режимов выбраны температуры 30, 25, 15 и 13 °С. Система продемонстрировала стабильную работу при температурах до 15 °С с наибольшей степенью очистки по аммонийному азоту – 0,33 мг/дм³. При этом концентрация нитритов с учетом принудительной нитритации достигала 0,07 мг/дм³. Дополнительное повышение эффективности работы системы требует внесения конструктивных изменений в принятую технологическую схему работы биореактора, однако, внедрение системы внутренней рециркуляции прикрепленной биомассы (с загрузкой) внутри анаммокс-отделения рассматривается, как обязательный элемент системы, обеспечивающий стабильность работы.

Ключевые слова: нитрификация, денитрификация, активный ил, аэротенк, анаммокс, биологическая очистка, хозяйственно-бытовая сточная вода, низкокислородный метод очистки, энергосбережение, ресурсосбережение, экология.

Введение

Возможность использования энергоэффективных процессов в очистке сточных вод остается одной из существенных задач наряду с повышением качества очищенной воды [1, 2]. Существует множество путей к сокращению энергетических затрат на биологические процессы очистки сточных вод, однако, при их рассмотрении нельзя забывать о серьезном ограничивающем условии – стабильности качества очистки сточных вод при изменении условий работы биологической системы [3, 4].

В случае очистки хозяйственно-бытовых сточных вод основными показателями, определяющими качество очистки, в большинстве случаев, представляются интегральные показатели органических загрязнений (БПК, ХПК), биогенные элементы (азот и фосфор) и взвешенные вещества. И если стандартная полная биологическая очистка еще в первой половине двадцатого века могла обеспечить высококачественное удаление

органических загрязнений и взвешенных веществ, то современные требования по практически полному удалению биогенных элементов делают необходимым разрабатывать и использовать сложные биологические системы с гораздо более высоким риском потери стабильности во время эксплуатации.

В последние 15 лет в качестве одной из наиболее перспективных технологий биологической очистки сточных вод исследуются анаммокс-процессы [5, 6]. Анаммокс – анаэробное (аноксидное) окисление аммония, реализуемое планктономицетами, при котором в качестве акцептора электронов выступает нитрит. Различные вариации технологий на основе анаммокс процесса внедрены на двух-трех десятках объектов по всему миру, однако в абсолютном большинстве случаев они используются для очистки возвратных стоков, образующихся после обработки осадка и избыточного активного ила [7, 8]. В основном это связано с требованиями к качеству очищаемой воды (соотношению аммонийного азота, нитритов и остальных компонентов), а также к температурному режиму очистки. Наиболее благоприятные температуры для анаммокс процесса соответствуют мезофильному режиму – 25-40 °С. Возвратные сточные воды, отводимые из метантенка, обычно обладают повышенной температурой относительно потока основных сточных вод, что позволяет эффективно встраивать анаммокс-реакторы в схему очистки возвратных стоков.

Несмотря на повышенную эффективность применения анаммокс-процессов для очистки именно возвратных стоков с экстремально высокими концентрациями азота, в мире проводятся исследования по внедрению этих технологий для очистки и основного потока хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих на станцию. Как уже было отмечено выше, основной проблемой при этом является довольно низкое среднее значение

температуры поступающих сточных вод, что непосредственно сказывается на скорости процессов.

В рамках выполнения комплексного исследования, направленного на разработку эффективной технологии очистки городских сточных вод с использованием низкокислородного анаммокс-процесса, была изучена способность адаптации активного ила, насыщенного анаммокс, к работе в низкокислородных условиях.

Материалы и методы

Исследование выполнялось на базе лабораторного биореактора с восходящим потоком иловой смеси. Биореактор реализует собой технологическую схему с неполной нитрификацией (нитритацией) и последующей анаммокс-реакцией. Нитритация происходит в свободном объеме при концентрациях растворенного кислорода на уровне 0,5-0,7 мг/дм³ в течение 1,5 часов, после чего иловая смесь направляется в отделение установки с закрепленной и плавающей загрузкой. В данном отделении растворенный кислород может находиться только в составе поступающей иловой смеси, дополнительной аэрации не производится. Внутри анаммокс-отделения поддерживается внутренняя рециркуляция иловой смеси и плавающей загрузки для предотвращения возникновения и развития процессов гниения органических загрязнений. Продолжительность гидравлического удержания в этом отделении составляет 4 часа. После анаммокс-отделения свободноплавающая иловая смесь (плавающая загрузка с анаммокс за пределы анаммокс отделения не выходит) попадает в зону со свободной аэрацией для глубокой доочистки воды от органических загрязнений и возможных остатков нитритов/аммонийного азота без превышения допустимых концентраций нитратов в очищенной сточной воде.

В качестве поступающей сточной воды (субстрата) использовалась модельная жидкость с характеристиками, указанными в таблице 1.

Таблица № 1

Состав модельной жидкости

Параметр	Значение	Ед. измерения
[N-NH ₄ ⁺]	35 ± 5	мг N/дм ³
[N-NO ₂ ⁻]	0,5 ± 0,5	мг N/дм ³
[N-NO ₃ ⁻]	0,5 ± 0,5	мг N/дм ³
ХПК	100 ± 25	мг O ₂ /дм ³
БПК ₅ /ХПК	0.9 – 1	-
Взвешенные в-ва	10 ± 5	мг/дм ³

В процессе нитритации состав жидкости менялся, концентрации аммонийного азота и нитритов на входе в анаммокс-отделение должны были находиться на уровне 15 и 19 мг/дм³ соответственно. Если этого не происходило и нитритов было недостаточно, то дополнительно добавлялся раствор нитрита натрия. В общем случае отношение аммонийного азота и нитритов на входе в анаммокс-отделение поддерживалось на уровне 1,23.

Для проведения количественных химических анализов отбор проб производился из специально обозначенных контрольных точек установок, а также из бака с рабочей модельной жидкостью и из отводящего лотка. В перечень регулярно выполняемых анализов входили следующие показатели: БПК_n (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97), ХПК (ПНД Ф 14.1:2:4.190-03), фосфат-ионы (ПНД Ф 14.1:2.248-07), нитрат-ионы (ПНД Ф 14.1:2:4.4-95), нитрит-ионы (НДП 10.1:2:3.91-06), аммоний-ионы (ПНД Ф 14.1.1-95), взвешенные вещества (ПНД Ф 14.1:2.110-97), водородный показатель (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97). Отдельно, в соответствии с графиком испытаний проводились дополнительные анализы: сульфат-ионы (ПНД Ф 14.1:2.159-2000), хлориды (ГОСТ 4245-72), органический азот (методом Кьельдаля, НДП 10.1:2:3.24-04). Респирометрические опыты выполнялись с использованием автоматического комплекса OxiTop Control 12. Все используемые средства измерений на протяжении исследования были

метрологически обеспечены. Испытательное оборудование, необходимое для проведения анализов, было аттестовано.

Концентрация растворенного кислорода измерялась онлайн с использованием электрода, и его концентрация в иловой смеси на входе в анаммокс-отделение всегда равнялась $0,1 \text{ мг/дм}^3$. Температура измерялась и поддерживалась при помощи охлаждающей системы и электронагревателя. Охлаждающая система состояла из трубы, оплетенной вокруг колонны реактора с рециркулирующей жидкостью с температурой около -3 градусов по Цельсию. Были исследованы три разные эксплуатационные температуры: 25, 15 и 13 градусов Цельсия. Скорость подъема жидкости (V_b) в свободных отделениях находилась в диапазоне от 0,3 до 1,0 м/ч со средним значением $0,7 \pm 0,2$ м/ч для гарантии стабильных диаметров гранул. Скорость потока иловой смеси зависела от расхода поступающих сточных вод.

Активный ил для исследования был отобран с действующей экспериментальной установки, расположенной на Люберецких очистных сооружениях. Согласно предварительному анализу, степень насыщения анаммокс-культурой составила около 35%.

Результаты

Эксперимент был поделен на четыре этапа в зависимости от температуры рабочей среды в реакторе.

Первый этап выполнялся при характерной для анаммокс температуре – $30 \text{ }^\circ\text{C}$, при которой происходила адаптация активного ила к новому технологическому режиму самого реактора. Данный этап занял 15 дней. Далее в течении 60 дней реализовывалось еще 3 этапа (по 20 дней на каждый этап) – постепенное снижение температуры – 25, 15 и $13 \text{ }^\circ\text{C}$.

В качестве основного критерия оценки использовалась концентрация общего минерального азота ($\text{N-NH}_4 + \text{N-NO}_2 + \text{N-NO}_3$) относительно нагрузки на активный ил по азоту. В силу средней продолжительности

эксперимента (менее 100 суток) процентное содержание анаммокс-бактерий в иле было принято постоянным, что дополнительно было подтверждено при помощи анализа в конце эксперимента. Результаты анализов представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Результаты работы системы

День эксперимента	Температура, °С	Нагрузка, мгN/г	N-NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	N-NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	N-NO ₃ ⁻ , мг/дм ³
0	30	19,44	2,11	0,9	15,0
5		22,50	2,05	1,2	17,1
10		19,47	1,91	0,3	12,0
15		18,10	0,75	0,1	8,4
20	25	21,05	0,51	0,1	8,5
25		22,78	0,33	0,07	6,6
30		19,44	0,41	0,08	7,9
35		18,95	0,38	0,1	9,0
40		17,14	0,51	0,15	10,1
45	15	18,50	0,37	0,12	11,2
50		18,10	0,52	0,09	10,5
55		21,05	0,61	0,08	11,3
60		21,58	0,63	0,08	11,2
65	13	22,78	1,55	0,22	15,6
70		20,11	1,82	0,35	16,7
75		20,59	2,14	0,45	18,8
80		21,67	2,15	0,40	19,1

По результатам адаптации видно, что при одинаковых нагрузках активный ил приспособивался к работе системы при средне-низких температурах. Анаммокс-бактерии сохраняли стабильную работоспособность в прикрепленном состоянии. Работа АОБ (нитрифицирующих) бактерий сохранялась в стабильном состоянии с обеспечением глубокой доочистке в последней контактной зоне биореактора. При температурах менее 15 °С эффективность работы системы значительно снижалась. Показатели очищенной воды, даже с учетом глубокой доочистки в контактной зоне, требуют дополнительной корректировки.

Заключение

Низкокислородные технологии очистки городских сточных вод являются перспективным решением, но требующем внимательной оценки стабильности для каждого конкретного случая [9, 10]. Исследование работы анаммокс-процессов в условиях разработанной технологической схемы продемонстрировало стабильную эффективность при температурах до 15 °С. Для работы системы при меньших температурах, характерных для некоторых регионов России, необходимо внести конструктивные изменения в технологический режим, что будет учтено на следующем этапе исследования.

Работа выполнена на оборудовании Головного регионального центра коллективного пользования научным оборудованием и установками (ГР ЦКП НИУ МГСУ).

Литература

1. Волков С. А., Макиша Е. В. Формирование списков правил для верификации информационных моделей строительных объектов. Часть 1 // Инженерный вестник Дона. 2018. №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347.
 2. Волков С. А., Макиша Е. В. Формирование списков правил для верификации информационных моделей строительных объектов. Часть 2 // Инженерный вестник Дона. 2018. №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394.
 3. Reino C., Suárez-Ojeda M. E., Pérez J., Carrera J. Stable long-term operation of an upflow anammox sludge bed reactor at mainstream conditions //Water research. 2018. Vol. 128. pp. 331-340.
 4. Reino C., Carrera J. Low-strength wastewater treatment in an anammox UASB reactor: effect of the liquid upflow velocity //Chemical Engineering Journal. 2017. T. 313. pp. 217-225.
-

5. Lauren M., Weissbrodt D. G., Szivák I., Robin O., Nielsen J. L., Morgenroth E., Joss A. Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater //Water research. 2015. Vol. 80. pp. 325-336.
6. Gilbert E. M., Agrawal S., Karst S. M., Horn H., Nielsen P. H., Lackner S. Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater //Environmental science & technology. 2014. Vol. 48. №. 15. pp. 8784-8792.
7. Hendrickx T. L. G., Kampman C., Zeeman G., Temmink H., Hu Z., Kartal B., Buisman C. J. N. High specific activity for anammox bacteria enriched from activated sludge at 10 C //Bioresource technology. 2014. Vol. 163. pp. 214-221.
8. Van de Graaf A. A., de Bruijn P., Robertson L. A., Jetten M. S., Kuenen J. G. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor //Microbiology. – 1996. – Т. 142. – №. 8. – С. 2187-2196.
9. Gulshin I. The settling behavior of an activated sludge with simultaneous nitrification and denitrification // Matec Web of Conferences. 2017. № 106. P. 07002
10. Гогина Е. С., Гульшин И. А. Удаление азота в модели циркуляционного окислительного канала при пониженном содержании органики в сточных водах // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 12. С. 26-33.

References

1. Volkov S. A., Makisha E. V. Inzenernyj vestnik Dona 2018. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347.
 2. Volkov S. A., Makisha E. V. Inzenernyj vestnik Dona. 2018. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5394.
 3. Reino C., Suárez-Ojeda M. E., Pérez J., Carrera J. Water research. 2018. Vol. 128. pp. 331-340.
 4. Reino C., Carrera J. Chemical Engineering Journal. 2017. Т. 313. pp. 217-225.
-



5. Laureni M., Weissbrodt D. G., Szivák I., Robin O., Nielsen J. L., Morgenroth E., Joss A. *Water research*. 2015. Vol. 80. pp. 325-336.
6. Gilbert E. M., Agrawal S., Karst S. M., Horn H., Nielsen P. H., Lackner S. *Environmental science & technology*. 2014. Vol. 48. №. 15. pp. 8784-8792.
7. Hendrickx T. L. G., Kampman C., Zeeman G., Temmink H., Hu Z., Kartal B., Buisman C. J. N. *Bioresource technology*. 2014. Vol. 163. pp. 214-221.
8. Van de Graaf A. A., de Bruijn P., Robertson L. A., Jetten M. S., Kuenen J. G. *Microbiology*. 1996. T. 142. №. 8. C. 2187-2196.
9. Gulshin I. *Matec Web of Conferences*. 2017. № 106. P. 07002.
10. Gogina E. S., Gulshin I. A. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*. 2017. № 12. pp. 26-33.