

## Низкокислородный метод очистки сточных вод с гранулированным активным илом

*И. А. Гульшин*

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»*

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности гранулообразования активного ила, работающего по модифицированной технологии DEAMOX с нитрификацией, неполной денитрификацией и анаммокс. Обратная денитрификация и анаммокс реализуются в одном объеме биореактора в аноксидно-анаэробных условиях при вертикальном потоке иловой смеси. Анаммокс-биомасса в основном развивалась на неподвижном загрузочном материале, при этом гетеротрофный денитрифицирующий активный ил показал способность к гранулообразованию до 20 мм условного диаметра. В статье рассмотрено влияние различных температурных режимов на размеры и стабильность гранул.

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

### Введение

Методы биологической очистки сточных вод от биогенных элементов в большинстве случаев основаны на процессах нитрификации и денитрификации, позволяющих осуществить биохимическое превращение аммонийного азота, поступающего со сточными водами на очистку, до газообразного азота в аноксидных и аэробных условиях. Длительное развитие данных методов привело к настоящему времени к появлению множества различных направлений и технологий, в той или иной степени повышающих качество очистки сточных вод или энергоэффективность процессов при рассмотрении жизненного цикла объекта инфраструктуры [1, 2]. Одно из таких направлений – грануляция аэробного активного ила с поддержанием процесса одновременной нитрификации и денитрификации в толще гранул из-за возникающих градиентов растворенного кислорода.

Множество исследований уже было посвящено поиску решений, направленных на повышение стабильности процесса гранулообразования. Аэробные гранулы, возникающие в аэрационных реакторах очистки сточных

---

вод переменного действия, во многих случаях показывают достаточно низкую стабильность во времени и склонны к разрушению структуры. Поскольку гранулированный активный ил не только обладает собственными неоспоримыми преимуществами, но и является базовой технологией для реализации множества современных технологий (например, большого количества разновидностей анаммокс-технологий), то основные вопросы поддержания работоспособности базовой технологической системы представляются критически важными для исследования.

В настоящее время в НИУ МГСУ проводится эксперимент, направленный на исследование работы биореактора с гранулированным активным илом, совмещающий в себе поддержание выраженных аэробных и анаэробных зон для обеспечения работы модификации процесса DEAMOX. Эксперимент направлен на изучение основных технологических параметров, способствующих поддержанию стабильного качества очистки сточных вод от соединений азота и длительного сохранения структуры гранул активного ила.

### **Материалы и методы**

Эксперимент выполняется в модели биореактора с восходящим потоком жидкости, представленным ранее [3]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она предполагает последовательную неполную нитритацию поступающей сточной воды и анаэробное окисление в DEAMOX-биореакторе. Поскольку эксперимент предполагает очистку сточных вод, содержащих достаточное количество органических загрязнений, то решено было отказаться от деления потоков для обеспечения частичной денитрификации.

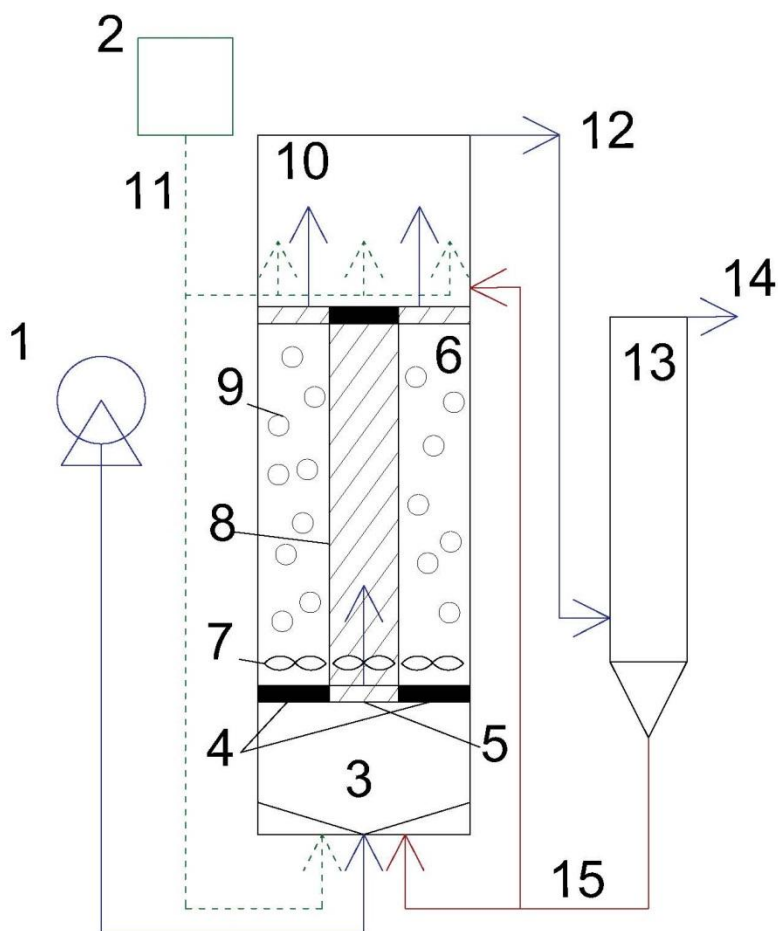


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Модельная сточная вода поступает в зону свободной аэрации, нитрификатор (3) при помощи подающего насоса (1). Воздух в нитрификатор подается с помощью воздуходувки (2) через систему воздухопроводов (11). Нитрификация происходит в свободном объеме при концентрациях растворенного кислорода на уровне 1,0-1,5 мг/дм<sup>3</sup> в течение 1,5 часов. При этом задача получения исключительно нитрита не ставится, предполагается возможность образования нитратов. Это позволяет снизить требования к специальному контролю зоны нитрификации. После нитрификатора вода поступает в анаммокс-отделение через пористый материал с зонами различной проницаемости (4 и 5). В данном отсеке реализуется процесс частичной денитрификации, преобразующий большую часть нитратов

обратно в нитриты. Прикрепленная и плавающая загрузка обеспечивает существование денитрифицирующей гетеротрофной и анаммокс биомассы.

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 (10) для глубокой доочистки воды от органических загрязнений и возможных остатков нитритов/аммонийного азота без превышения допустимых концентраций нитратов в очищенной сточной воде. Обработанная сточная вода (12) поступает во вторичный отстойник (13) с изменяемым объемом для осаждения активного ила. Осажденный активный ил (15) подается в аэрируемые отсеки, а очищенная сточная вода (14) удаляется из установки.

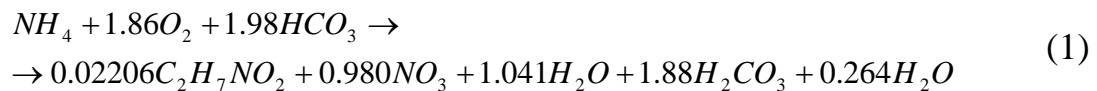
Работа установки моделирует работу реактора, построенного на принципах DEAMOX с обратной (неполной денитрификацией). Данная технология основывается на процессах частичной денитрификации и анаммокс, что позволяет удалять соединения азота из различных типов сточных вод (включая городские сточные воды с умеренным содержанием азота и органических загрязнений) без необходимости жесткого контроля и подавления гетеротрофных денитрифицирующих микроорганизмов [4, 5]. В данной технологии предусматривается удаление образующихся из нитратов в процессе частичной денитрификации нитритов совместно с аммонийным азотом по анаммокс-процессу. Наличие достаточного количества органических загрязнений в поступающих сточных водах позволяет отказаться от подачи внешнего источника органического субстрата, как то требуется при очистке возвратных потоков [6]. В то же время данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с прочими технологиями, основанными на применении анаммокс [7]:

---

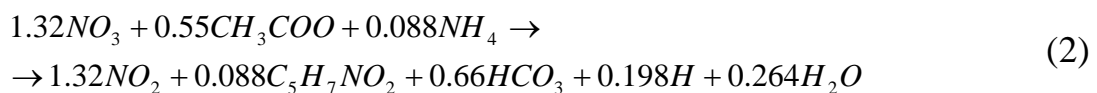
1. Стабильное образование требуемого количества нитритов для осуществления анаммокс-процесса без необходимости жесткого контроля работы реактора частичной нитрификации;
2. Повышенное гранулообразование анаммокс-биомассы в условиях работы реактора частичной денитрификации;
3. Повышенная эффективность удаления азота в связи с исключением образования избыточных нитратов [8].

Таким образом, удаление азота происходит по следующим формулам:

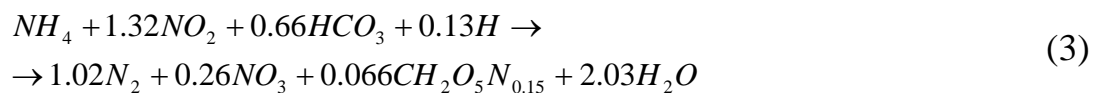
#### 1. Нитрификация



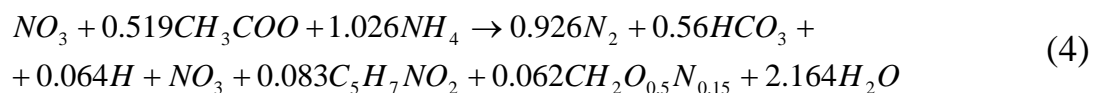
#### 2. Частичная денитрификация



#### 3. Анаммокс



#### 4. DEAMOX



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 <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	150 ± 5	мг N/дм <sup>3</sup>
[N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ]	0,5 ± 0,5	мг N/дм <sup>3</sup>
[N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	0,5 ± 0,5	мг N/дм <sup>3</sup>
ХПК	150 ± 25	мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Взвешенные в-ва	10 ± 5	мг/дм <sup>3</sup>

В процессе нитрификации концентрация аммонийного азота снижалась до 35-45 мг/дм<sup>3</sup>, при этом значение концентрации нитратов достигало 62,5 мг/дм<sup>3</sup>.

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. Для оценки эффективности работы системы регулярно выполнялось определение следующих показателей: биохимического потребления кислорода, химического потребления кислорода, аммонийного азота, азота нитратов, нитритов и фосфора фосфатов. Кроме того выполнялся мониторинг концентрации растворенного кислорода в отдельных зонах биореактора и дозы ила. Температура иловой смеси поддерживалась при помощи охлаждающей и нагревательной систем. Как и в рамках предыдущих опытов, работа системы исследовалась при различных эксплуатационных температурах: 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. Степень насыщения анаммокс инокулирующего активного ила составляла 25-30%.

### Результаты

В результате эксперимента удалось установить стабильное гранулообразование денитрифицирующего активного ила в связи с равномерным вертикальным потоком иловой смеси через отсек денитрификатора. Размеры гранул составили до 25 мм условного диаметра (рис. 2). В условиях полного отсутствия растворенного кислорода гранулы денитрифицирующего активного ила показали эффективную работу при

---

наличии анаммокс-биомассы. Анаммокс-биомасса в основном размещена на загрузочном материале в прикрепленной форме.

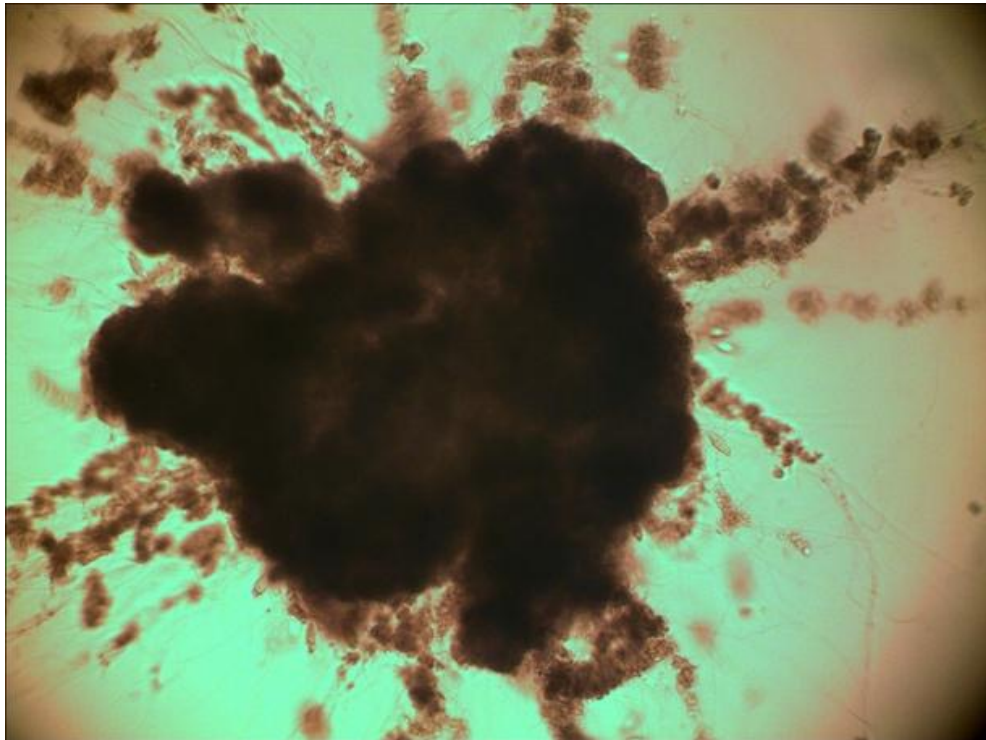


Рис. 2. Гранула активного ила из анаммокс-отделения экспериментальной установки.

В условиях дефицита органического субстрата и наличия достаточного количества аммонийного азота в поступающей в анаммокс-отсек сточной воде наблюдался процесс неполной денитрификации с восстановлением нитратов до нитритов.

Образующихся нитритов достаточно для запуска процесса анаммокс, однако, эффективность очистки в данном случае оказалась немного более сниженной в сравнении с технологической схемой с предварительной нитритацией.

Результаты работы системы представлены в таблице № 2. Важно отметить, что отбор проб осуществлялся после отсека аэробной доочистки, расположенного после анаммокс-зоны, таким образом, значения показателей отражают работу всей системы с доочисткой.



Таблица № 2

## Результаты работы системы

День эксперимента	Температура, °С	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>
0	30	21,1	0,15	51,1
5		11,5	0,08	19,3
10		8,4	0,05	8,5,0
15		8,8	0,01	8,4
20	25	0,56	0,01	6,2
25		1,15	0,02	8,9
30		0,99	0,05	6,6
35		1,24	0,08	5,4
40		0,75	0,05	7,2
45	15	3,15	0,07	15,5
50		2,84	0,07	16,6
55		3,32	0,06	19,1
60		3,15	0,08	17,1
65	13	12,1	0,01	36,7
70		9,8	0,05	38,9
75		7,6	0,03	25,1
80		13,5	0,09	42,0

Поскольку в технологическую схему была включена требовательная к температуре нитрификация, а также тонкий процесс неполной денитрификации, влияние температуры на эффективность очистки оказалась выше, чем при нитритации, кроме того, температура сточных вод непосредственно влияла на процесс гранулообразования и сохранение их стабильной структуры, что отражено в таблице № 3.

Таблица № 3

## Размеры гранул активного ила в зависимости от температуры среды

Температура, °С	Средний условный диаметр гранул, мм
30	17,5
25	18,8
15	10,0
13	6,0

Средние размеры гранул активного ила определялись по их условному диаметру при помощи лазерного анализатора размера частиц с приставкой



для работы с жидкими средами [9-10]. Наибольшее значение размеров гранул было достигнуто при повышенном температурном режиме после выхода установки в стабильный режим работы.

### **Заключение**

При эксплуатации технологических схем очистки хозяйственно-бытовых сточных вод с анаммокс-биомассой одной из существенных задач является удержание активного ила в объеме реактора. Исследуемая схема с нитрификацией и неполной денитрификацией предполагает одновременное протекание процессов денитрификации и анаммокс в едином объеме. В классических анаммокс-технологиях данное решение приводит к повышенной конкуренции гетеротрофных денитрифицирующих и анаммокс микроорганизмов с сильным подавлением последних. В случае с реализацией неполной денитрификации это становится менее критичным мешающим фактором, но возникнет вопрос совместного размещения различной биомассы, что предлагается решать грануляцией денитрифицирующего ила. Выявлена необходимость поддержания температуры на уровне 20-25 °С, для поддержания стабильности биогранул. Данные значения могут быть использованы для дальнейшей разработки технологии глубокой биологической очистки сточных вод с неполной денитрификацией и анаммокс.

*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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347).

2. Miao Y., Peng Y., Zhang L., Li B., Li X., Wu L., Wang S. Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: effect of influent C/N ratios //Chemical Engineering Journal. – 2018. – Vol. 334. – pp. 664-672.

3. Гульшин И. А. Адаптация активного ила с анаммокс к пониженным температурам иловой смеси в биореакторе //Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n43y2020/6367](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n43y2020/6367).

4. Reino C., Carrera J. Low-strength wastewater treatment in an anammox UASB reactor: effect of the liquid upflow velocity //Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 313. pp. 217-225.

5. Du R., Caob S., Lia B., Zhanga H., Lia X., Zhanga Q., Penga Y. Step-feeding organic carbon enhances high-strength nitrate and ammonia removal via DEAMOX process //Chemical Engineering Journal. – 2019. – Vol. 360. – pp. 501-510.

6. Du R., Cao S., Li B., Niu M., Wang S., Peng Y. Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters //Water Research. – 2017. – Vol. 108. – pp. 46-56.

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. – Vol. 142. – №. 8. – С. 2187-2196.

9. Akaboci T. R. V., Gich F., Rusalleda M., Balaguer M. D., Colprim J. Assessment of operational conditions towards mainstream partial nitrification-

---



anammox stability at moderate to low temperature: reactor performance and bacterial community //Chemical Engineering Journal. – 2018. – Vol. 350. – pp. 192-200.

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. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347).
2. Miao Y., Peng Y., Zhang L., Li B., Li X., Wu L., Wang S. Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 334. pp. 664-672.
3. Gulshin I. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n43y2020/6367](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n43y2020/6367).
4. Reino C., Carrera J. Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 313. pp. 217-225.
5. Du R., Caob S., Lia B., Zhanga H., Lia X., Zhanga Q., Penga Y. Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 360. pp. 501-510.
6. Du R., Cao S., Li B., Niu M., Wang S., Peng Y. Water Research. 2017. Vol. 108. pp. 46-56.
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. Vol. 142. №. 8. pp. 2187-2196.
9. Akaboci T. R. V., Gich F., Rusalleda M., Balaguer M. D., Colprim J. Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 350. pp. 192-200.
10. Gogina E. S., Gulshin I. A. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnik. 2017. № 12. pp. 26-33.