

Тема 6а

АЭРОБНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

План лекции

Биоценозы сооружений аэробной очистки

Активный ил: свойства, состав

Биопленка

Основные биохимические процессы при аэробной очистке

Основные показатели работы очистных сооружений

Организация биоочистки в аэротенках

Вопросы в экзаменационных билетах

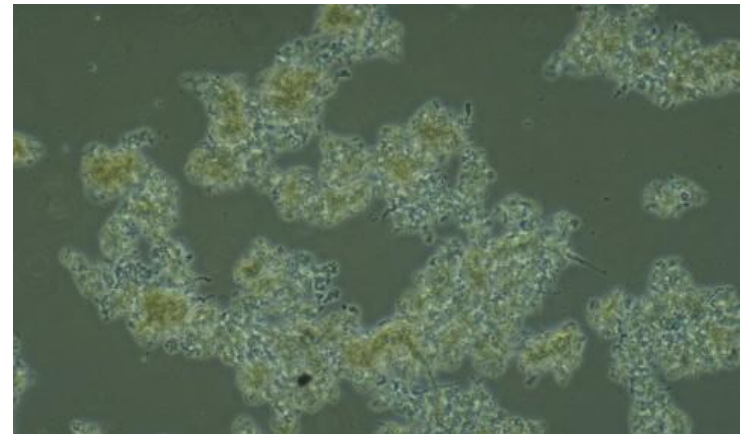
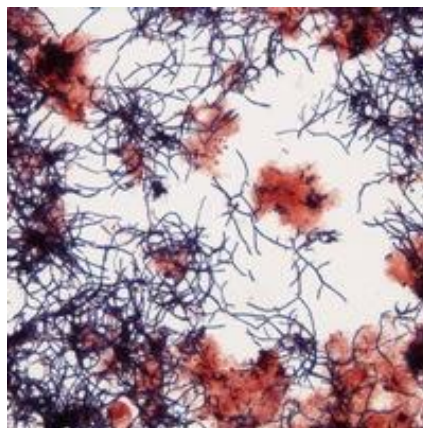
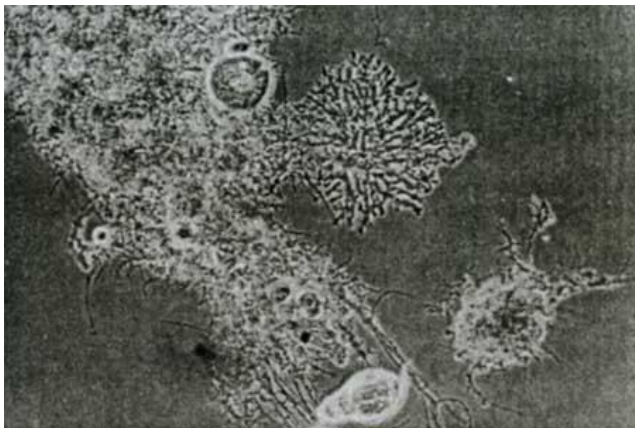
1. Биоценозы очистных сооружений. Роль различных групп организмов в сообществе активного ила.
2. Основные биохимические процессы и условия эффективного функционирования биологической очистки сточных вод в аэробных условиях.
3. Проблема "вспухания" активного ила и пенообразования и методы борьбы с этими явлениями.
4. Сооружения аэробной биоочистки. Технологические схемы, основные конструкции и их сравнительная характеристика.
5. Аэротенки. Основные конструкции, параметры, показатели и условия эффективной работы.

Кн. 2, т.1, с. 56-76, 79-104

Биоценозы сооружений аэробной очистки

Активный ил:

- хлопья размером от 0,1–0,5 до 2–3 мм и более, с плотностью в среднем 1,1–1,4 г/см³, развитой поверхностью (до 100 м²/г сухой массы) и высокой адсорбционной способностью;
- состоит из частично активных, частично отмирающих организмов (около 70%) и твердых частиц неорганической природы (около 30%); содержит полисахариды, в том числе клетчатку, полиуроновые кислоты, внеклеточные белки, образованные преимущественно бактериями. Полисахариды окружают бактериальные клетки и скрепляют частицы в хлопья, поэтому лишь небольшая часть клеток остается вне хлопьев.



Активный ил – это сообщество микроорганизмов, главным образом бактерий и простейших, сформировавшееся естественным путем, включающее местную микрофлору, адаптированную к определенному спектру загрязнений сточных вод.

В каждом очистном сооружении формируется свой, специфический биоценоз в виде активного ила.

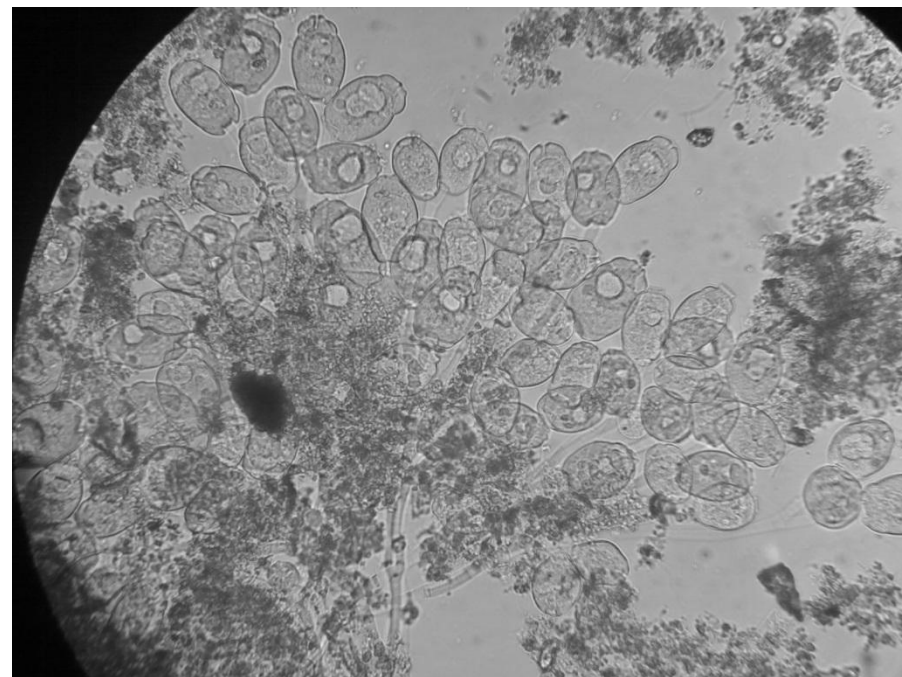
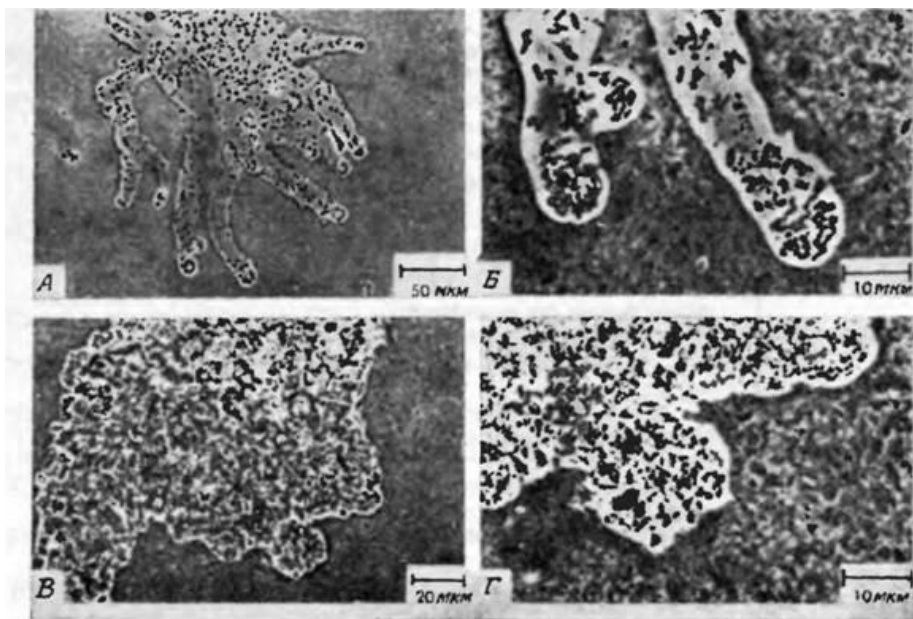
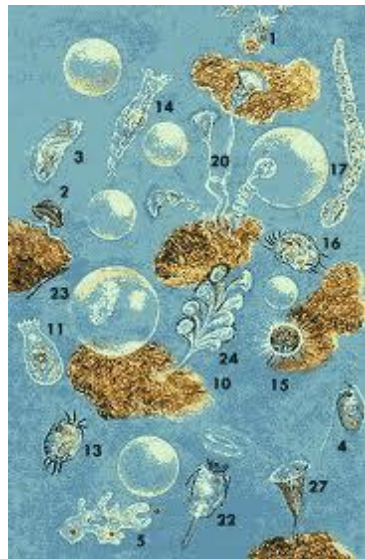
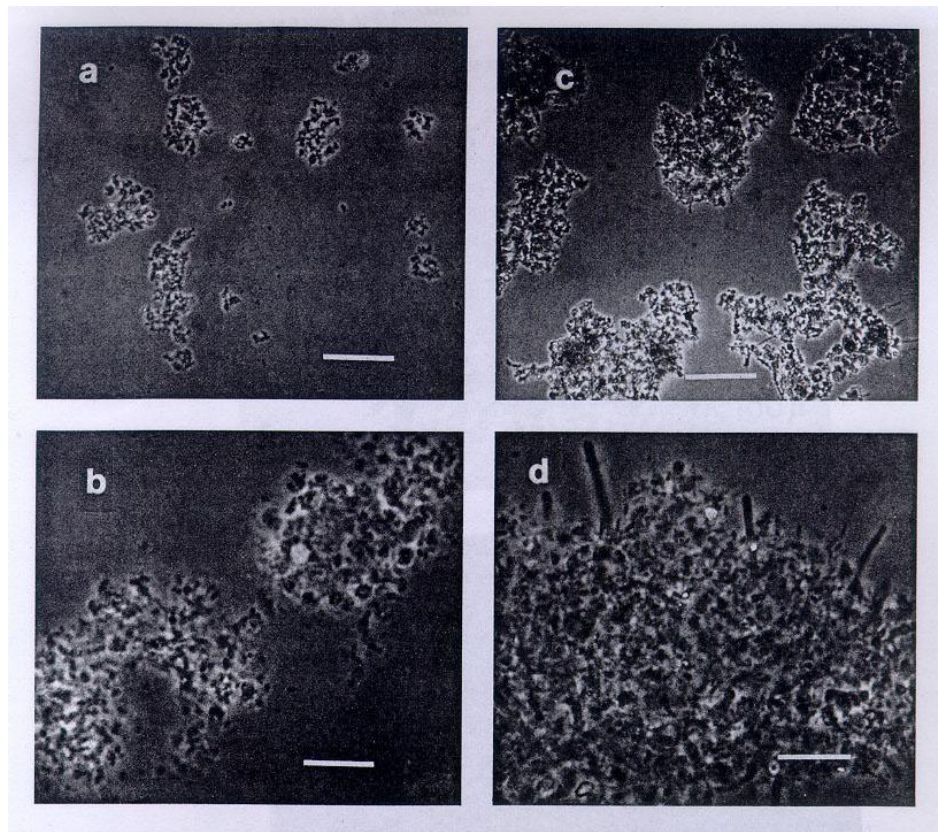


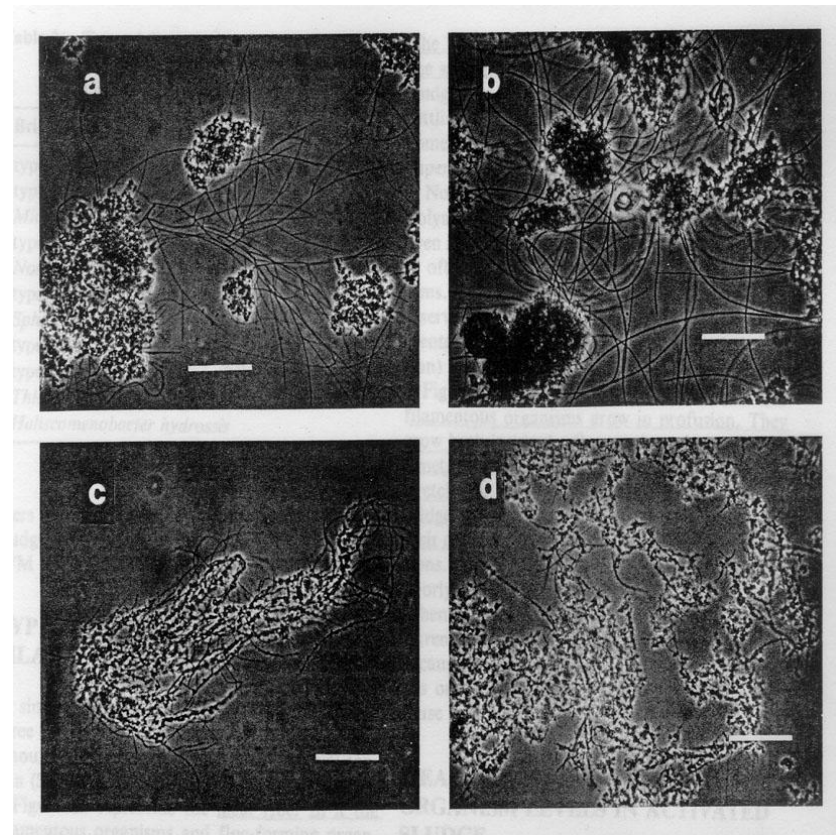
РИС. 14.11. Микрофотография некоторых микроорганизмов активного ила. [Из работы *Unz R. F., Dondero N. C., Water Research, 4, 575 (1970).*]

Для образования биоценозов систем очистки используют:

- активный ил с уже работающих очистных сооружений, состав которого сходен с составом поступающих загрязнений;**
- из сточных вод, разбавленных водой местных хозяйственно-бытовых предприятий или из реки, постепенно адаптируя ценоз к загрязнениям стоков;**
- сообщества микроорганизмов, полученных в лаборатории и потребляющих один или несколько основных компонентов загрязнений. Однако в условиях очистных сооружений лабораторный ценоз неустойчив и является лишь начальным звеном для образования рабочего активного ила.**

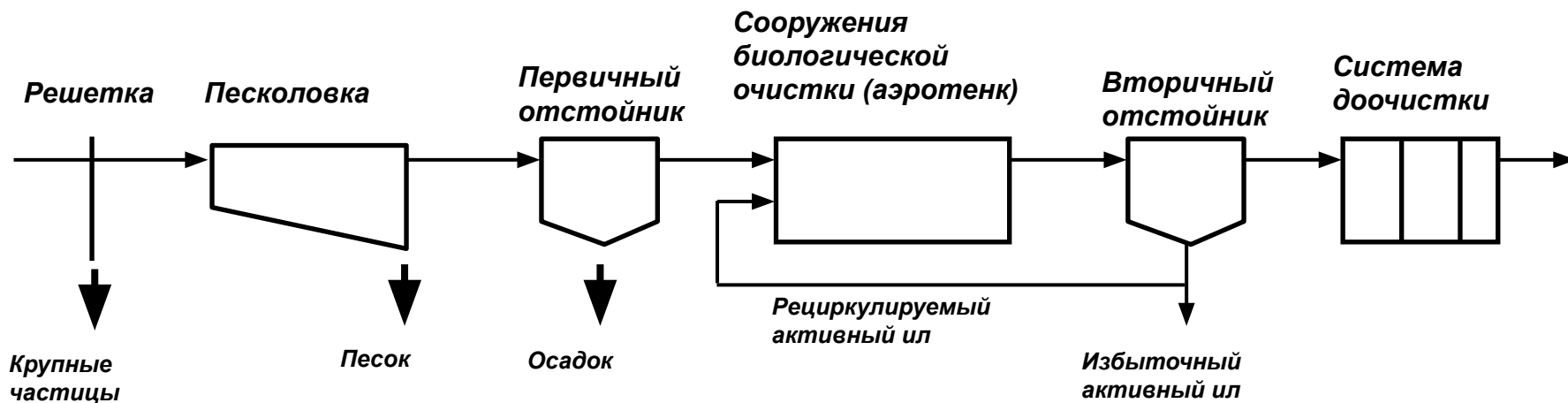


а) Зарождающиеся флоккулы; б) небольшие флоккулы;
 с) флоккулы, содержащие нитчатые организмы;
 д) флоккулы, содержащие каркасные, опорные организмы.



Влияние нитчатых микроорганизмов на морфологию и осаждаемость активного ила:
 а) и б) образование мостиков между флоккулами;
 с) и д) диффузионная структура флоккул

Почему образуются флокулы (хлопья) активного ила?



Типичная схема очистки сточных вод со стадией биологической очистки

Важнейшие свойства ила – способность к **хлопьеобразованию** (флокуляции и флокулообразованию) и **седиментации**. На этом основаны удаление ила из сточной воды во вторичном отстойнике и рециркуляция его в аэротенк для повышения окислительной мощности аэротенка.

Флокуляция – соединение первоначально дискретно диспергированных клеток.

Флокулообразование – отсутствие диспергирования клеток после клеточного деления.



Способность ила осаждаться характеризуется величиной **индекса ила (ИИ)** - **объем (в мл), который занимает 1 г ила (в пересчете на сухую массу ила) через 30 мин отстаивания.**

ИИ измеряют в мерном цилиндре.

Диапазоны значений осаждаемости и ИИ:

Осаждаемость	Индекс ила, мл/г
Отличная	60–79
Хорошая	80–99
Посредственная	100–119
Плохая	120–139

Хороший ил полностью осаждается за 15–20 мин, и дальнейшее его уплотнение незначительно. Плотный, хорошо осаждающийся ил имеет иловой индекс 60–79 мл/г, менее плотный 80–99 мл/г. Ил считается плохо осаждающимся при ИИ > 120–150 мл/г. Ил с ИИ < 60 мл/г характеризуется неудовлетворительным хлопьеобразованием и неразвитой поверхностью хлопьев и флокул, что также снижает его окислительную способность.

Бактерии

3 основные группы бактерий активного ила:

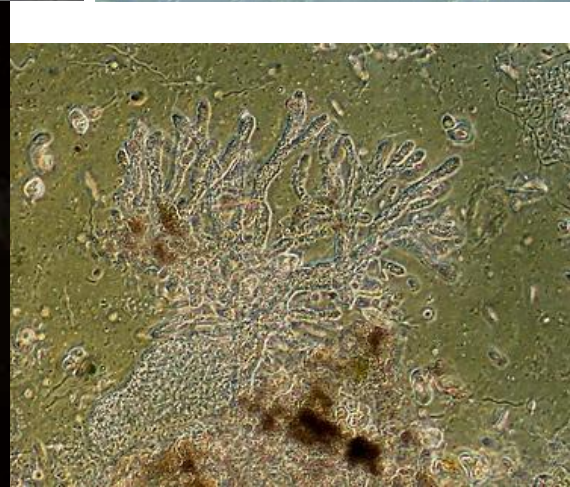
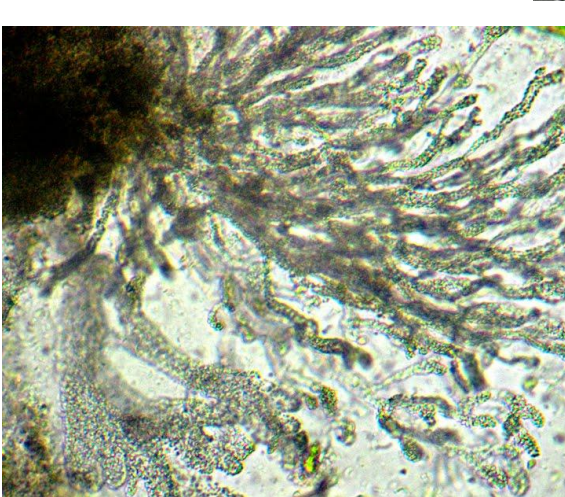
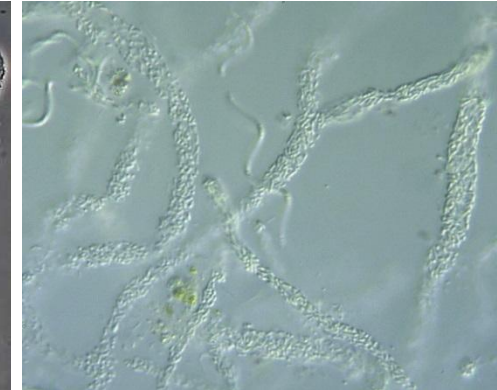
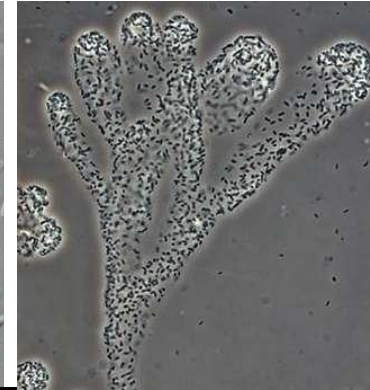
- углеродоокисляющие флокулообразующие бактерии,
- углеродоокисляющие нитчатые бактерии,
- бактерии-нитрификаторы

Флокулообразующие бактерии, окисляющие органические соединения.

Наиболее многочисленны бактерии р. *Pseudomonas* (до 80% от численности бактерий активного ила), способные окислять различные спирты, жирные кислоты, парафины, ароматические углеводороды, углеводы и другие классы соединений.

Основная роль в образовании полисахаридов в составе хлопьев активного ила и в формировании самой способности к хлопьеобразованию принадлежит покрытой капсулой грамотрицательной палочковидной бактерии *Zoogloea ramigera*, близкой к псевдомонадам. Клетки в колонии *Z. ramigera* имеют специфические оболочки и поэтому не слипаются друг с другом. В средах, бедных питательными веществами, а также в сточной воде *Z. ramigera* образует аморфные массы полисахарида, в которых находятся колонии этой бактерии в виде разветвленного деревца.

Хлопьеобразующие бактерии относятся к **r-тактикам** и имеют низкое сродство к субстрату, потребляя его с большей скоростью, когда субстрат присутствует в значительных количествах. Также у них не очень высокое сродство к кислороду и они активно растут только при достаточно высоком уровне аэрации.



Zoogloea ramigera

Основные группы микроорганизмов, обнаруживаемые в активном иле

Хлопьеобразование	Пенообразование	Вспухание активного ила
<p><i>Zoogloea ramigera</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Flavobacterium</i> <i>Micrococcus</i> <i>Alcaligenes</i> <i>Bacillus</i> <i>Achromobacter</i> <i>Corynebacterium</i> <i>Azotobacter</i> <i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrobacter</i> <i>Acinetobacter</i> <i>Comamonas</i> <i>Desulfotomaculum</i> <i>Desulfovibrio</i> <i>Thiobacterium</i> <i>Thiothrix, Beggiatoa</i> <i>Thiobacillus denitrificans</i> <i>Sarcina</i> <i>Pseudobacterium</i></p>	<p><i>Nocardia (Gordona) amarae</i> <i>Microthrix parvicella</i> <i>Rhodococcus spp.</i> <i>Skermania piniformis (Nocardia pinensis)</i> <i>Nocardia rhodochrous</i> <i>Nocardia asteroides</i> <i>Nocardia caviae</i> <i>Nocardia farcinica</i> <i>Tsukamurella paurometabolum</i> <i>Zoogloea ramigera</i> <i>Streptomyces spp.</i> <i>Acinetobacter</i> <i>Nostocoida limicola</i> Тип 1851 <i>Micromonospora</i> Тип 0675 Тип 0041 Тип 0803 Тип 0092 Тип 0581 Тип 914</p>	<p><i>Sphaerotilus natans</i> <i>Microthrix parvicella</i> <i>Hatiscomenobacter hydrossis</i> <i>Thiothrix spp., Beggiatoa</i> <i>Nocardia spp.</i> <i>Hydrogenophaga spp.</i> <i>Acidovorax spp.</i> <i>Nostocoida limicola</i> Тип 021N Тип 1701 Тип 0411 Тип 1863 Тип 0675 Тип 0041 Тип 0803 Тип 0092 Тип 0581 Тип 914</p>

Углеродооксиляющие нитчатые бактерии pp. *Sphaerotilus*, *Nocardia (Gordonia)*, *Microtrix*.

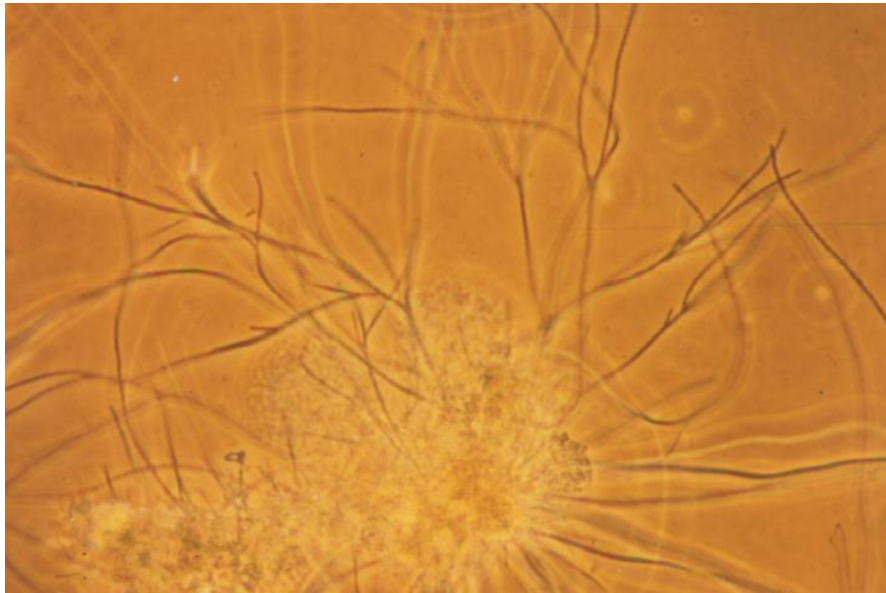
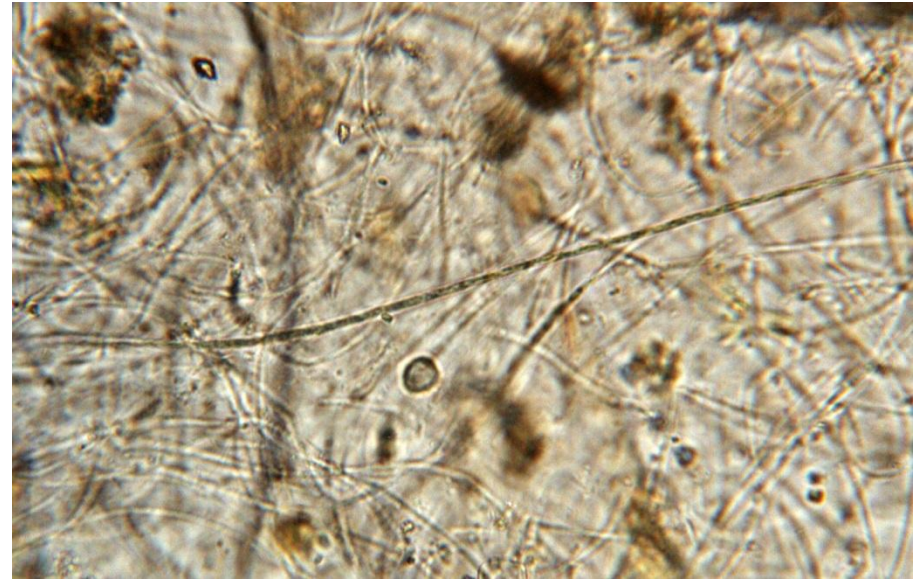
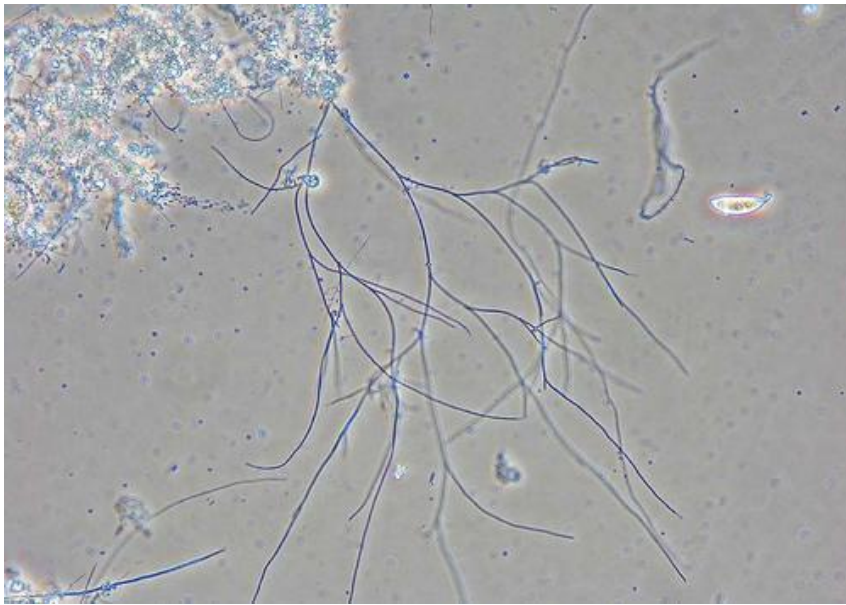
Обычно в активном иле содержится около 3% нитчатых микроорганизмов. **Нитчатые бактерии** (*Sphaerotilus natans* и др.) с одной стороны выполняют положительную роль, окисляя многочисленные органические соединения и образуя каркас, вокруг которого формируются флокулы, с другой, они являются причиной плохого осаждения ила в отстойнике и образования устойчивой пены в аэротенке. При нарушении технологических режимов очистки эти бактерии начинают интенсивно размножаться, при этом их нити не включаются в частицы активного ила. Ил **вспухает**, плохо оседает в отстойниках, не отделяется от очищенной им воды, что ухудшает очистку.

Вспухающий ил имеет высокую окислительную способность, однако развитие нитчатых бактерий в нем нежелательно. Оптимальным для качества очистки сточной воды является биоценоз ила, в котором преобладают флокулирующие микроорганизмы, а нитчатые содержатся в небольшом количестве.

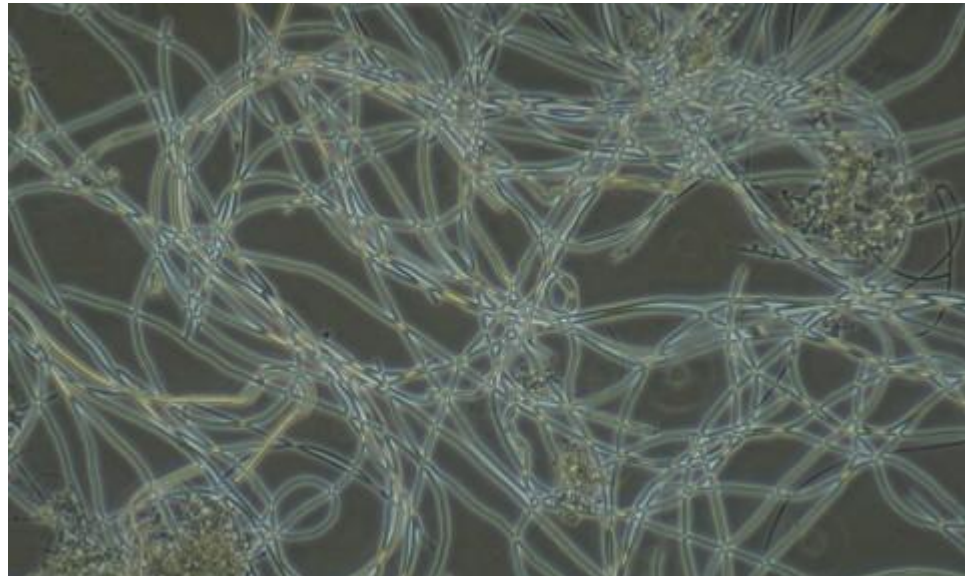
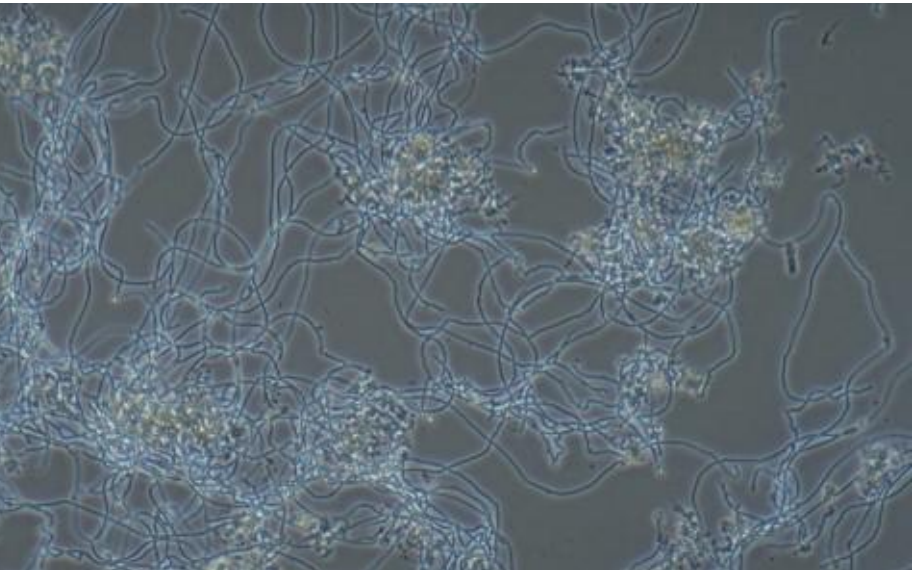
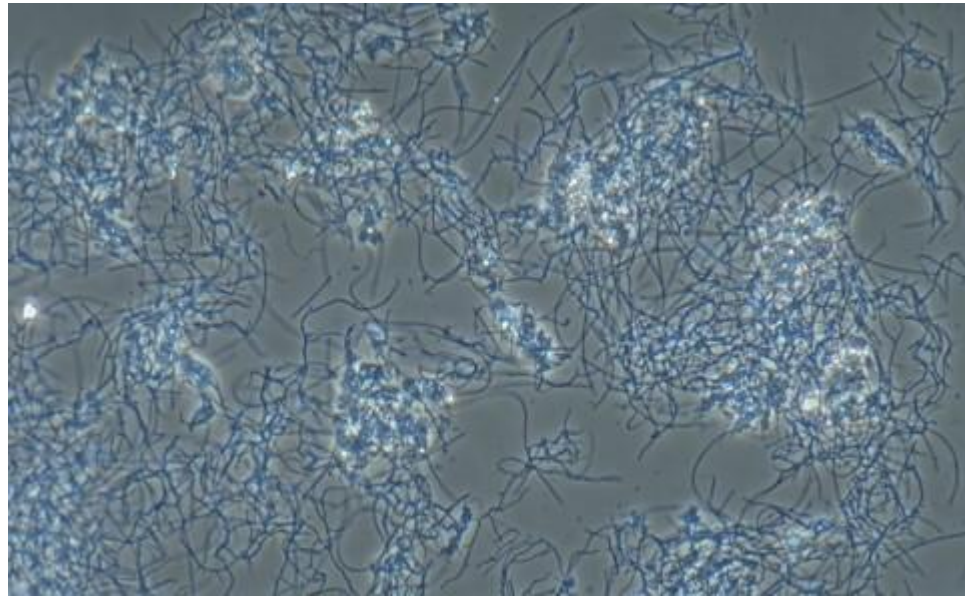
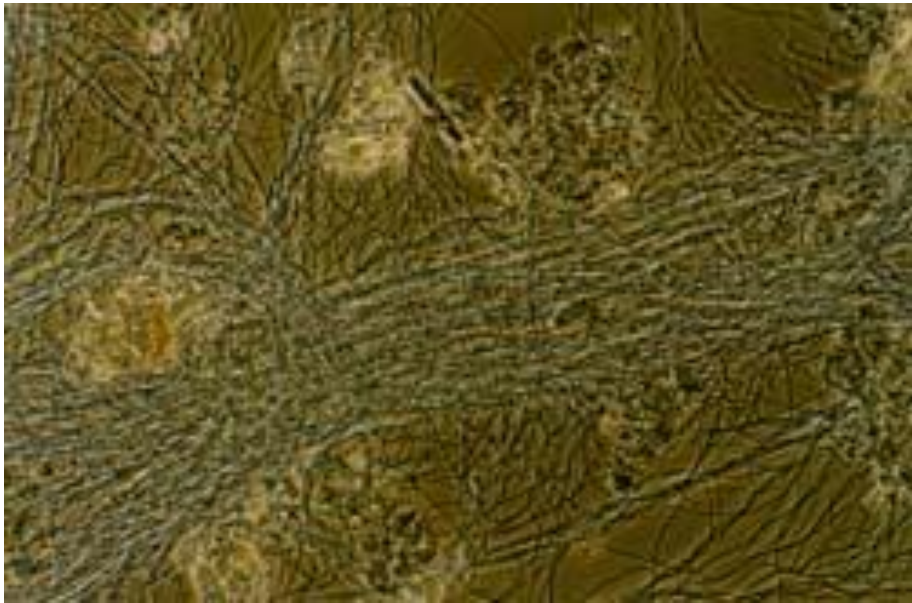
Нитеобразующие бактерии в основном относятся к **K-тактикам**. Они имеют более развитую поверхность по сравнению с хлопьеобразователями, низкую константу полунасыщения (K_s в уравнении Моно), обладают повышенной выживаемостью в условиях голодания и доминируют при низких концентрациях субстрата и растворенного кислорода.

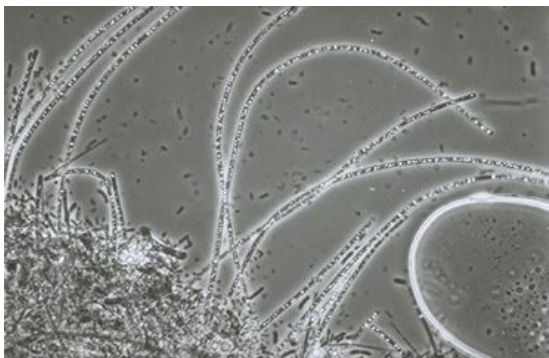
Из нитчатых **литотрофных бактерий** встречаются бесцветные серобактерии *Thiobacterium*, *Thiothrix*, *Beggiatoa*.

Микроскопические грибы (pp. *Fusarium*, *Geotrichum*, *Zoophagus insidians*, *Arthrobotrys*) также могут вызывать вспухание ила.

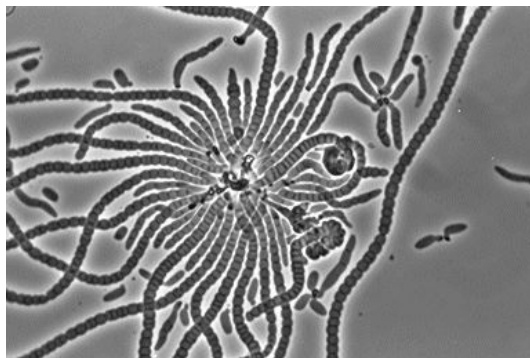


Sphaerotilus natans

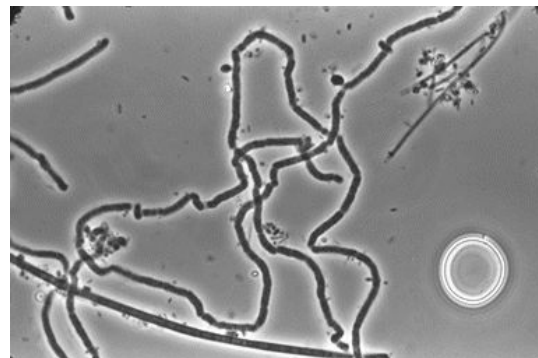




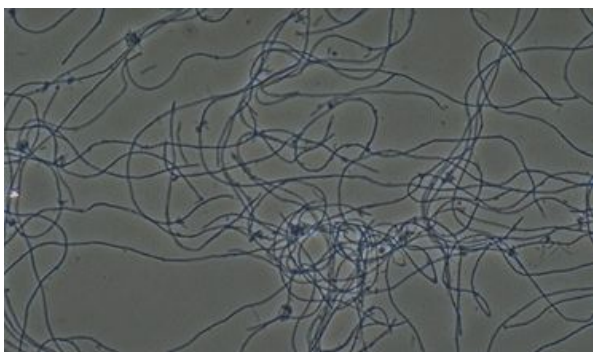
Thiotrix (гранулы серы)



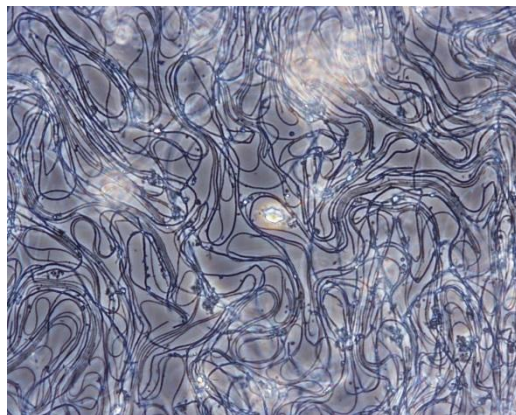
Meganema sp.



Nostocoida limicola



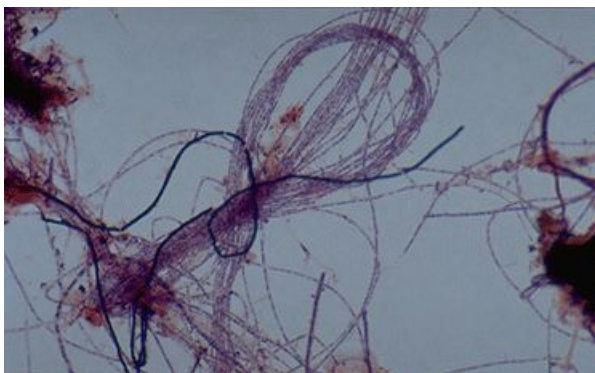
Microthrix parvicella



Microthrix parvicella



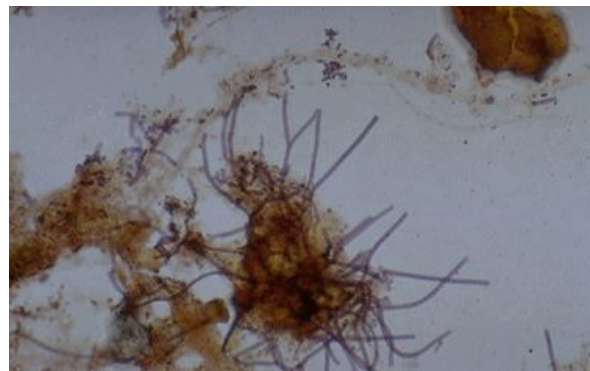
Type 021N



Type 1851 (окраска по Граму)



Type 0961



Type 0092 (окраска по Neisser)



«Вспухание» активного ила и пенообразование в аэротенках

Бактерии-нитрификаторы (пр. *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* и др.) – играют важную роль в окислении аммонийных ионов и удалении минерального азота из сточных вод. По сравнению с гетеротрофными углеродооксиляющими микроорганизмами они развиваются медленнее. **Численность нитрификаторов увеличивается с возрастом ила.** В случае необходимости окисления аммонийных ионов в сточных водах именно активность нитрификаторов часто ограничивает производительность аэротенка. **Наиболее активно нитрификация протекает после окисления органических соединений, когда создаются благоприятные условия для нитрификаторов.**

Фосфораккумулялирующие бактерии р. *Acinetobacter*. Играют важную роль в современных технологиях биологического удаления фосфора. В определенных режимах очистки, а именно с чередованием аэробных и анаэробных условий, они способны накапливать внутри клеток большое количество фосфатов (в виде полифосфатов).

Молочнокислые бактерии р. *Leuconostoc*, развивающиеся при очистке сточных вод, богатых углеводами, но с дефицитом азота. Они образуют мощную капсулу, состоящую из декстрана, что затрудняет осаждение ила во вторичном отстойнике.

Целлюлозоразлагающие бактерии пр. *Cellulomonas* и *Cellulovibrio*. Разлагают целлюлозное волокно, поступающее в аэротенк вместе со сточными водами.

Железооксиляющие бактерии *Ferrobacillus* и другие, окисляющие Fe^{2+} . Развиваются при высоком содержании в воде соединений железа.

Тионовые и серобактерии рр. *Thiobacillus*, *Sulfomonas* и др., окисляющие серу и тиосоединения, а также сульфатредукторы. Развиваются в сточных водах, содержащих соединения серы. При большом количестве серосодержащих органических веществ, например белков, и недостаточной аэрации в очистных сооружениях доминируют такие серобактерии, как *Thiothrix* и *Beggiatoa*. Их массовое развитие и особенно отложение капелек серы в их клетках свидетельствует о плохой очистке.

В зонах аэротенков и в крупных хлопьях, где наблюдается дефицит кислорода, создаются условия для развития **денитрификаторов**, восстанавливающих нитраты до N_2 или N_2O , и **сульфатредукторов**, восстанавливающих сульфаты с образованием H_2S .

Дрожжи рр. *Candida*, *Torulopsis*, *Trichosporon*, *Rhodotorula* - в сточных водах, богатых углеводами, углеводородами и органическими кислотами.

Мицелиальные грибы *Cladosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Mucor*, *Trichoderma* и др. Образуют разветвленные гифы, которые затрудняют образование плотных хлопьев и осаждение ила и могут быть ответственны за его вспухание. Особенно часто во вспухающем иле встречаются грибы из р. *Fusarium*. Для предотвращения опасности обильного развития грибов и вспухания ила биологическую очистку проводят при pH 6,8–7,2, благоприятном для развития флокулообразующих бактерий.

В зимний период преобладают психрофильные формы микроорганизмов.

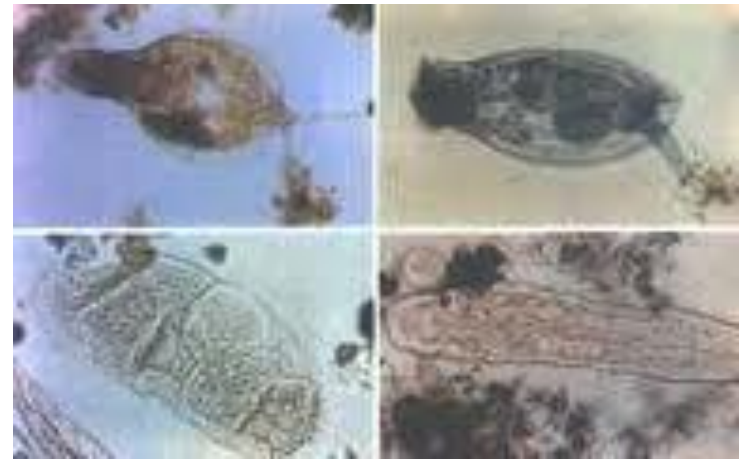
Проблем с пенообразованием и вспуханием активного ила можно избежать, если соблюдать все параметры процесса очистки сточных вод, которые благоприятны для микроорганизмов-хлопьеобразователей.

Методы, рекомендуемые для подавления роста нитчатых микроорганизмов:

- селективное подавление нитчатых бактерий, выступающих из флоков или растущих вне флоков, путем **дозированной обработки** пены или вспухшего ила **окислителями** типа хлора, озона или пероксида водорода;
- **удаление сульфидов, нейтрализация pH, добавка питательных компонентов;**
- **изменение рабочих параметров** в аэротенках за счет увеличения концентрации растворенного кислорода или уменьшения возраста активного ила, применяемого для очистки сточных вод;
- **кинетический отбор** хлопьеобразующих микроорганизмов посредством аэробных зон-селекторов;
- **метаболический отбор** хлопьеобразующих микроорганизмов посредством анаэробных и/или аноксидных зон-селекторов;
- **механическое удаление пены** с поверхности аэротенков и вторичных отстойников.
- **механическое разрушение нитчатых бактерий** активного ила с помощью обработки ила ультразвуком, высоким давлением или при помощи размалывающих тел;
- **внесение пеногасителя** в сточную воду, **внесение коагулянта** ($AlCl_3$ и др).

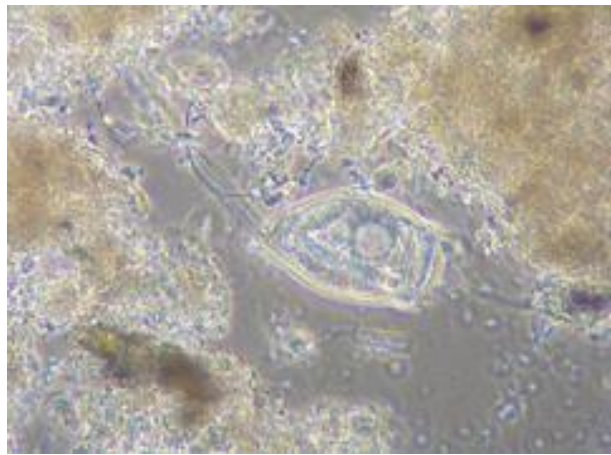
Простейшие

- регулируют видовой и возрастной состав микроорганизмов,
- снижают массу биоценоза,
- обеспечивают активную флокуляцию микроорганизмов,
- поглощая бактерии, способствуют выходу бактериальных экзоферментов, которые могут принимать участие в разложении загрязнений



4 группы простейших в биоценозах очистных сооружений:

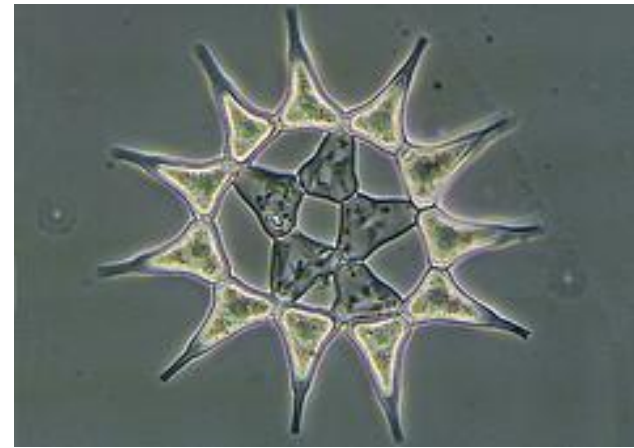
- 1) **саркодовые** (*Sarcodina*) – амёбы (*Amoeba limax*, *Amoeba diploidea*, *Amoeba proteus*), раковинные корненожки (*Arcella*, *Centropyxis*), голые корненожки *Pelomyxa* и др.;
- 2) **жгутиковые** (*Mastigophora*, *Flagellata*) – бесцветные жгутиконосцы из родов *Bodo*, *Peranema* и др.;
- 3) **реснитчатые инфузории** (*Ciliata*) – свободноплавающие (*Colpidium*, *Stylonychia*, *Oxytricha*, *Paramecium caudatum* – инфузория туфелька), брюхоресничные инфузории (*Oxytricha*, *Stylonychia*, *Euplotes*, *Aspidisca*), одиночные прикрепленные (сувойки *Vorticella*), колониальные прикрепленные (*Opercularia*, *Carchesium*, *Epistylis*);
- 4) **сосущие инфузории** (*Suctoria*) – пр. *Podophrya*, *Tokophrya*, *Acineta*.



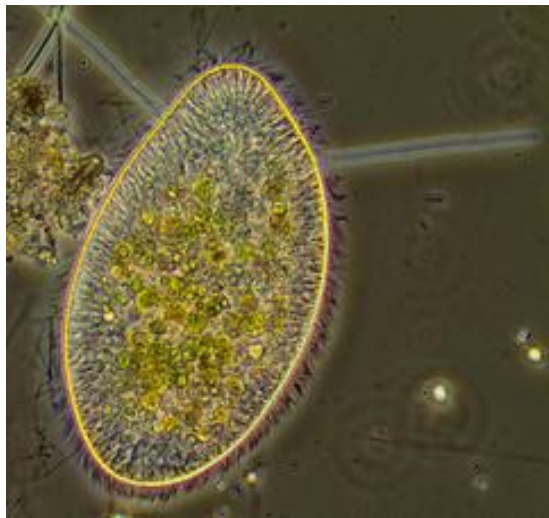
Vorticella convallaria



Epistylis sp.



Pediatrum sp.



Paramecium bursaria



Ameba desnuda



Carchesium sp.

По численности простейших, их состоянию, определяемому по внешнему виду, можно судить об условиях работы очистного сооружения и намечать меры оперативного управления процессом.

Простейшие очень чувствительны к присутствию в сточных водах **токсичных примесей**, например фенола, формальдегида, которые угнетают их развитие.

В условиях полного биологического удаления загрязнений из воды в иле, в основном, присутствуют брюхоресничные инфузории, колониальные инфузории *Carchesium*, раковинные корненожки *Arcella*, отдельные крупные амебы, сувойки *Vorticella convallaria*, отсутствуют мелкие амебы и бесцветные жгутиковые.

При **перегрузке очистных сооружений** в иле преобладают саркодовые, особенно мелкие амебы, жгутиковые и сосущие инфузории. Ил с избытком питания имеет малое разнообразие видов при количественном преобладании 2-х - 3-х из них. Появляются саркодовые, могут в больших количествах развиваться нитчатые бактерии. Вода над илом имеет опалесценцию.

При **недостатке** в сооружениях **растворенного кислорода** клетки многих простейших увеличиваются в объеме, а затем погибают. В большом количестве развиваются жгутиковые; из инфузорий преобладает *Paramecium caudatum*, выносящая к недостатку кислорода и способная развиваться даже в гниющем иле.

При **дефиците питания** наблюдается измельчение простейших, они становятся прозрачными, их пищеварительные вакуоли исчезают, инфузории инцистируются.

Представители **микрофауны**:

- коловратки *Rotatoria (Rotifera)* родов *Philodina*, *Cathypna (Lecane)*, *Monostyla*, *Notommata*,
- круглые черви *Nematoda*,
- малощетинковые кольчатые черви р. *Aelosoma*.

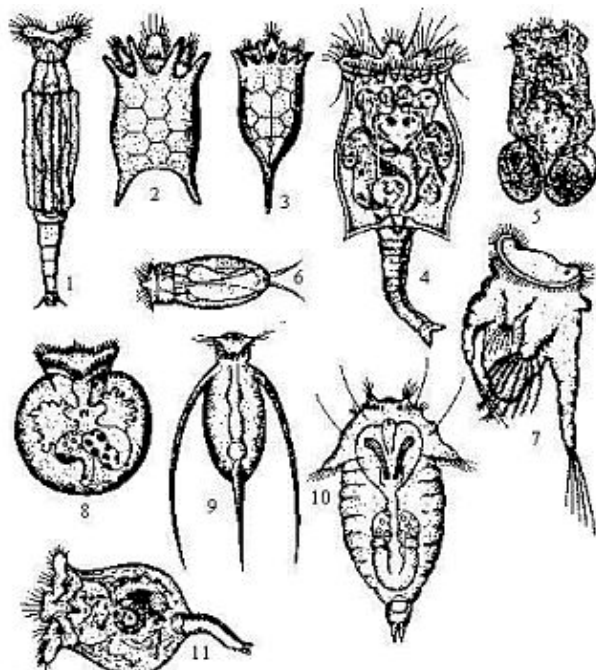
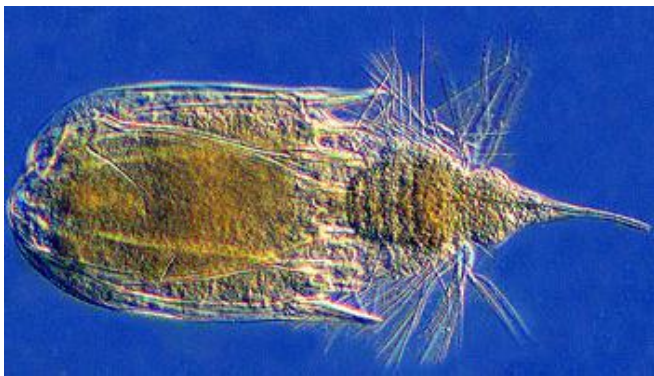
Размер их 0,04–2,5 мм.

Коловратки питаются бактериями, взвешенными веществами, а также простейшими. Они весьма чувствительны к изменению внешних условий, поэтому их высокая численность и активность указывают на хорошую работу очистных сооружений.

Отсутствие коловраток в иле свидетельствует о неудовлетворительной очистке. Появление раздутых, измененных особей, внезапная гибель их обусловлена резким нарушением режима очистки. При понижении концентрации растворенного кислорода коловратки теряют подвижность, вытягиваются и постепенно отмирают.

Интенсивное развитие **круглых червей** *Nematoda* свидетельствует о застойных зонах в аэротенке.

Наличие **кольчатых червей** р. *Aelosoma* в активном иле – показатель устойчивости нитрификации.



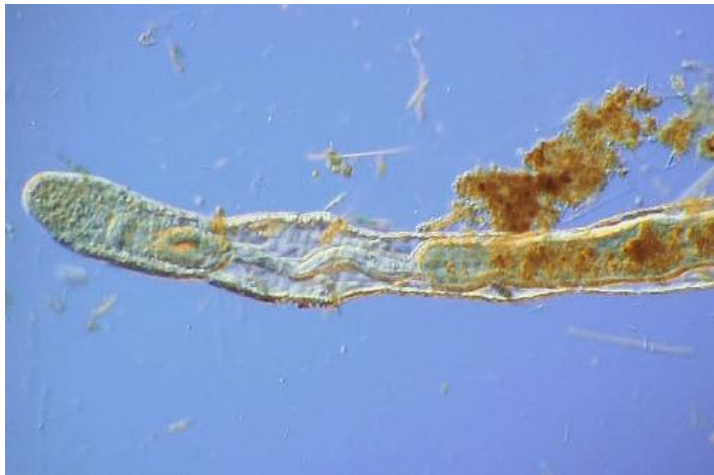
Колувратки: 1) Philocina 2,3) Keratella 4) Brachionus
 5) Brachionus plicatilis 6) Cephalodella 7) Pedalion
 8) Pterodina 9) Filina 10) Synchaeta 11) Brachionus rubens



Коловратки



Круглые черви



Кольчатый червь *Aelosoma*

Биопленка

Образуется в результате адгезии микроорганизмов, прежде всего бактерий, на твердой поверхности при контакте со сточной водой.

Сообщества биопленки образуют сложную **многоярусную структуру**, с высокой **пространственной гетерогенностью** и разнообразием потенциальных экологических ниш.

В экосистеме с биопленкой наблюдается пространственное разделение экологических ниш, в которых каждый организм выполняет свою определенную функцию, вместе же они способны практически полностью извлечь из сточной воды все органические примеси.

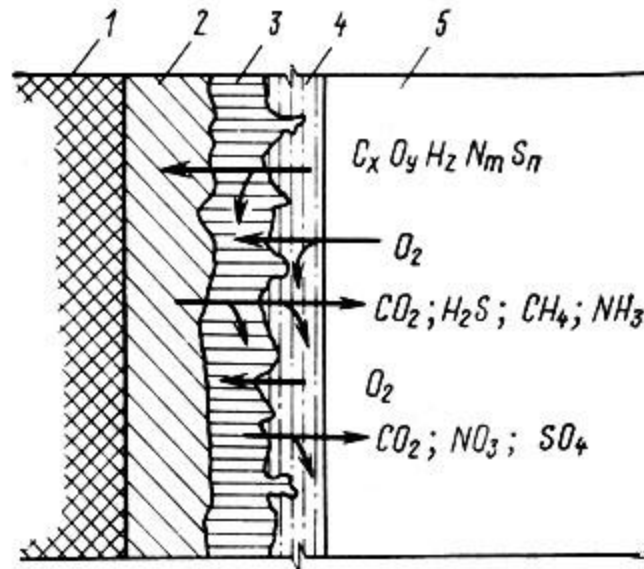
В биореакторе (**биофильтре**) биопленка образуется на поверхности твердого носителя – **загрузки**. Бактерии, не способные прикрепляться к нагрузке и отмершие, вымываются из реактора. Со временем формируется зрелая биопленка, в которой отмирание и вымывание микроорганизмов компенсируются процессами роста.

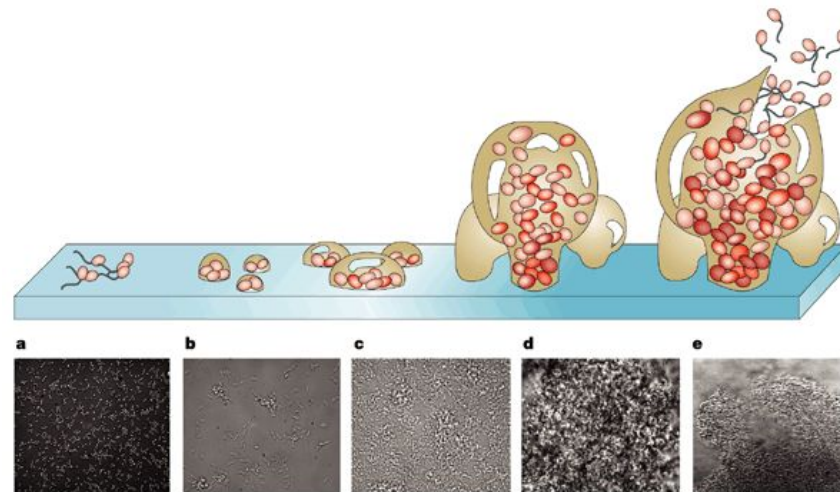
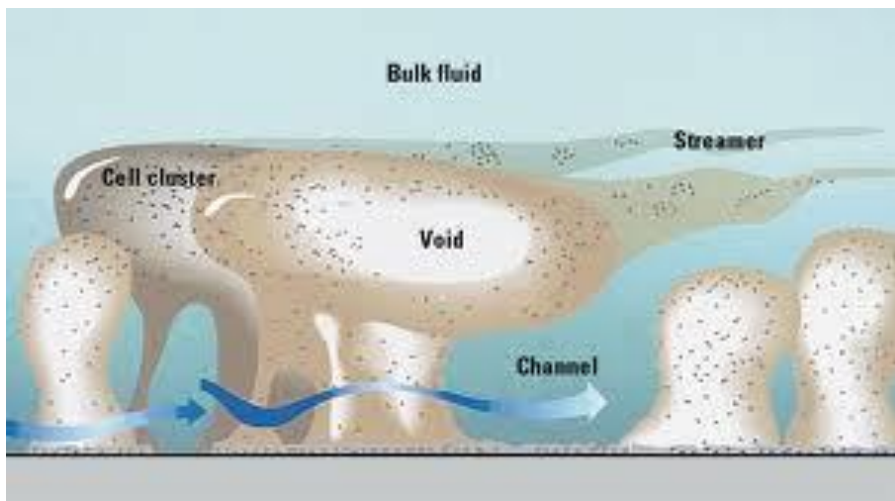
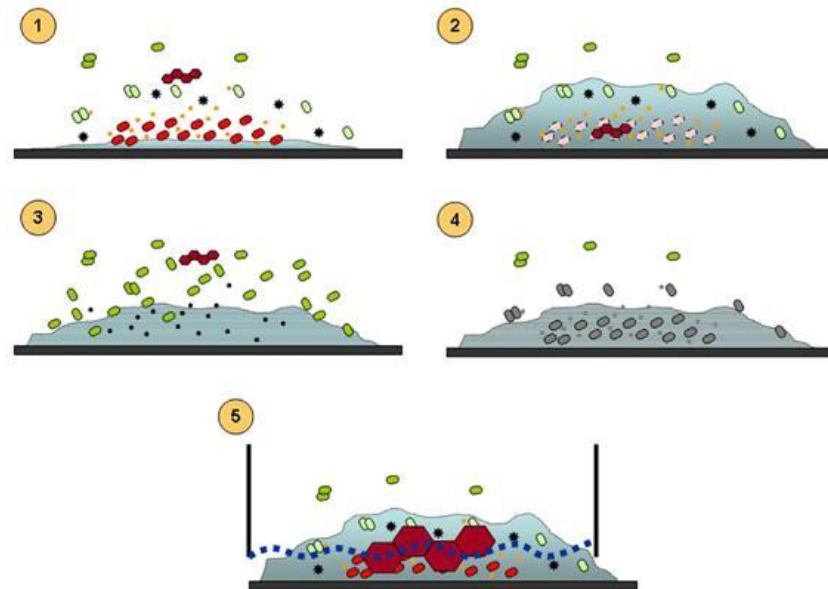
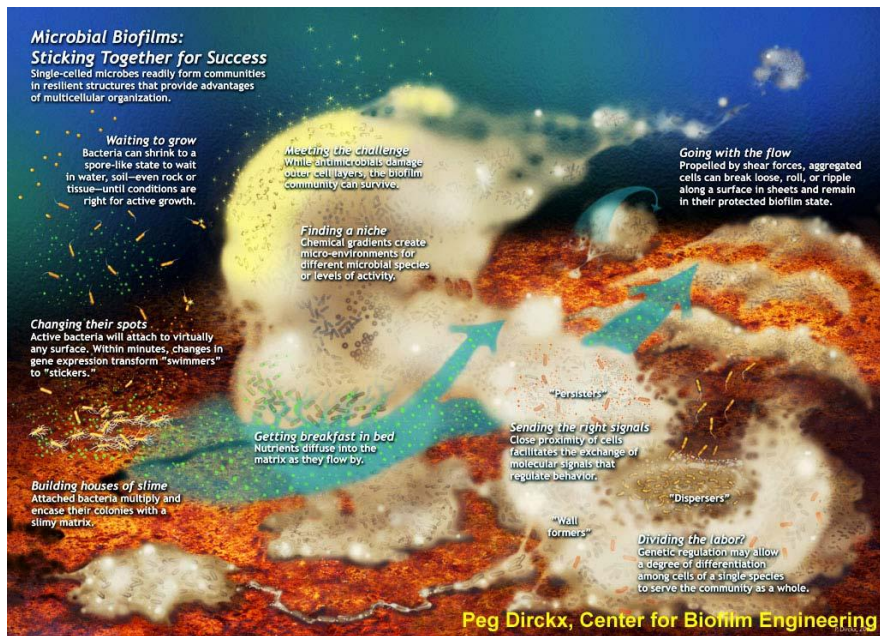
По **консистенции** биопленка биофильтров, предназначенных для очистки сточной воды, представляет собой слизистые обрастания материала загрузки толщиной не более 3 мм. Общая масса биопленки может составлять 10–100 кг асв/м³ загрузки, типично – 40–60 кг асв/м³.

Биопленка **по биологическим и химическим компонентам** сходна с активным илом. Внеклеточные полимеры, синтезируемые бактериями и входящие в состав биопленок, состоят главным образом из полисахаридов, белков, гликопротеинов и полиуроновых кислот. Они составляют 50–80% массы органического вещества пленок и определяют их механические и физические свойства, близкие к свойствам пористых полимерных гелей.

В биопленке

- с очищаемой жидкостью **контактирует** только ее **поверхностный слой**;
- наблюдается **сложная морфология**: пустоты, каналы, каверны, поры и филаменты с клетками, агрегированными в кластеры и слои;
- **у поверхности**, контактирующей с жидкостью или газом, находятся **наиболее активные клетки микроорганизмов** и наиболее интенсивно протекают биохимические процессы окисления;
- типичная **глубина проникновения** кислорода в активных биопленках составляет около 100 мкм;
- **внутренние слои**, обращенные к носителю, испытывают **дефицит кислорода**, в них развиваются **аноксигенные** (аноксичные) и **анаэробные процессы**, возможны дефицит питательных субстратов, **выделение газов** (азота, метана) в результате протекания процессов **денитрификации** и **метаногенерации**;
- выделение газов, отмирание и распад голодающих бактерий во внутреннем слое биопленки могут приводить к **ослаблению адгезии** и **вымыванию биопленки**.





Nature Reviews | Drug Discovery

Схема образования и структура биопленки

Microbial Biofilms: Sticking Together for Success

Single-celled microbes readily form communities in resilient structures that provide advantages of multicellular organization.

Waiting to grow

Bacteria can shrink to a spore-like state to wait in water, soil—even rock or tissue—until conditions are right for active growth.

Meeting the challenge

While antimicrobials damage outer cell layers, the biofilm community can survive.

Going with the flow

Propelled by shear forces, aggregated cells can break loose, roll, or ripple along a surface in sheets and remain in their protected biofilm state.

Finding a niche

Chemical gradients create micro-environments for different microbial species or levels of activity.

Changing their spots

Active bacteria will attach to virtually any surface. Within minutes, changes in gene expression transform "swimmers" to "stickers."

Getting breakfast in bed

Nutrients diffuse into the matrix as they flow by.

Building houses of slime

Attached bacteria multiply and encase their colonies with a slimy matrix.

"Persisters"

Sending the right signals

Close proximity of cells facilitates the exchange of molecular signals that regulate behavior.

"Dispersers"

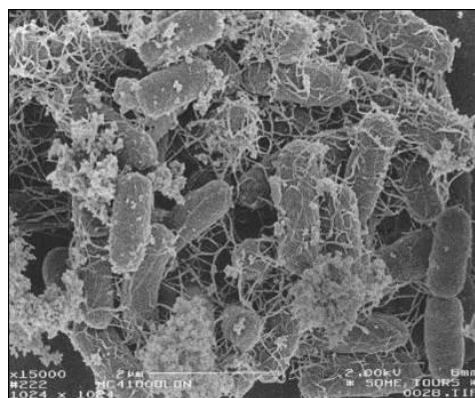
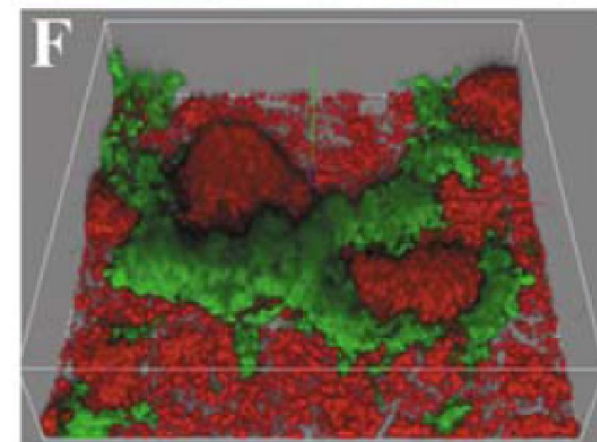
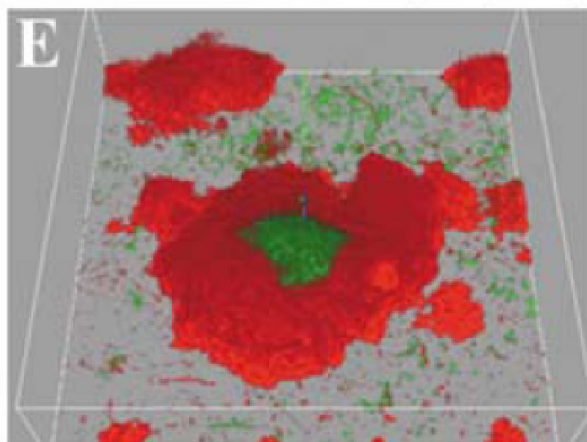
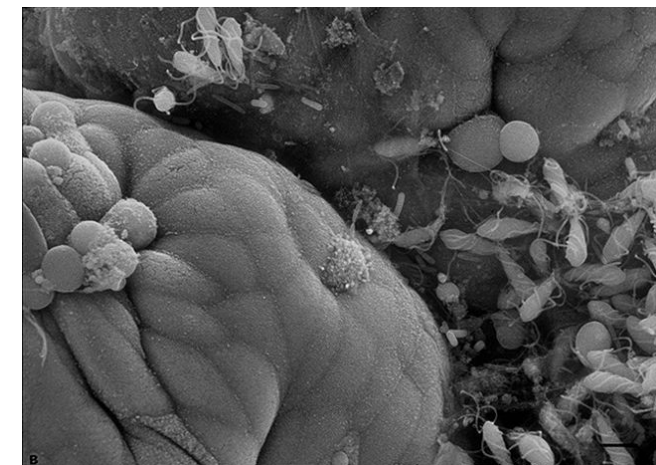
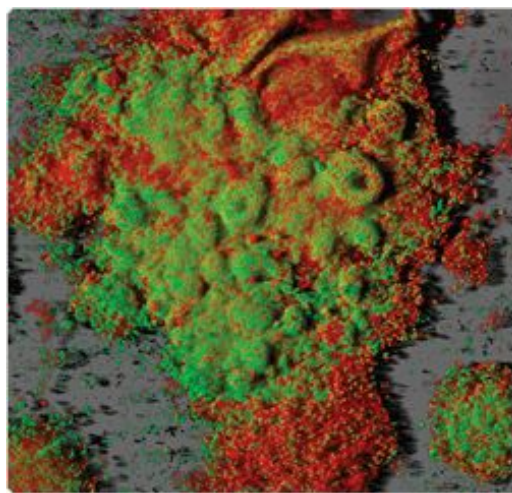
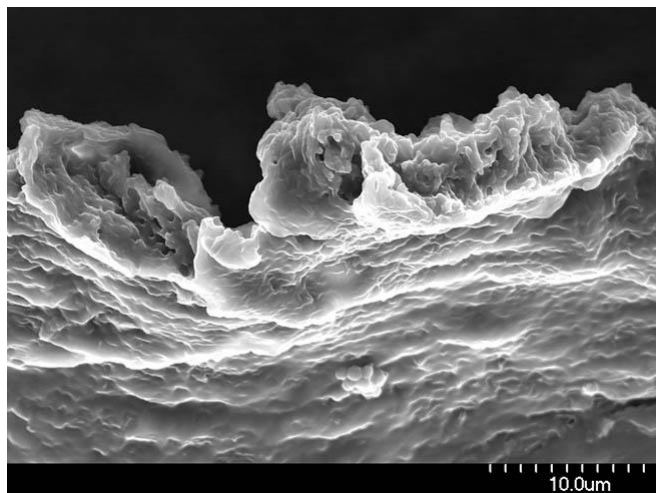
"Wall formers"

Dividing the labor?

Genetic regulation may allow a degree of differentiation among cells of a single species to serve the community as a whole.

Peg Dirckx, Center for Biofilm Engineering

Схема образования и структура биопленки

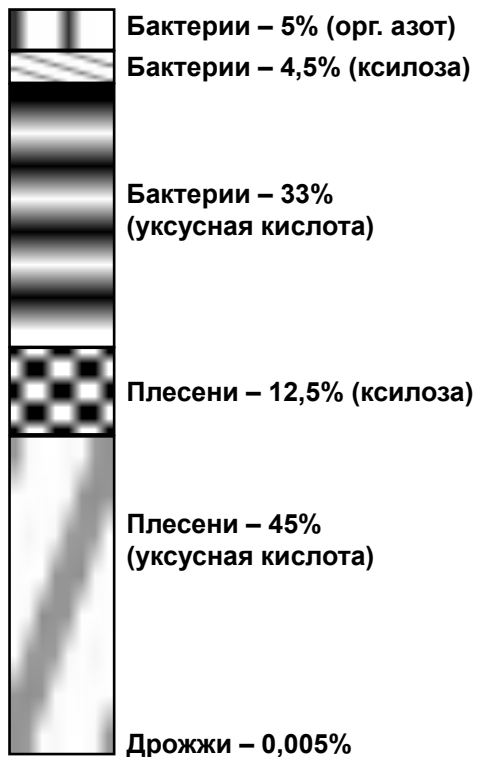


В перколяционных биофильтрах загрязненная жидкость стекает вертикально, фильтруясь через материал загрузки.

В верхних горизонтах биофильтра концентрация питательных веществ выше, чем в нижних. Здесь в первую очередь потребляются легко усваиваемые компоненты загрязнений, протекает аммонификация, наиболее интенсивно прирастает биопленка, окисляются органические вещества сточной воды, однако наблюдается и наибольший дефицит кислорода. В пленке находятся преимущественно организмы, обитающие в наиболее загрязненной воде и устойчивые к дефициту кислорода: *Paramecium putrinum*, *P. caudatum*, *Colpidium colpoda* и др. Их появление в сточной воде на выходе из биофильтра, наряду с возрастанием численности бактерий и концентрации ионов NH_4^+ – признак плохой работы очистного сооружения.

По мере прохождения сточной воды через биофильтр меняется соотношение органических загрязнений воды. Снижается содержание трудноусваиваемых загрязнений, развивается нитрификация, меняется видовой состав организмов. В нижней части биофильтров содержание загрязнений низкое, а кислорода – высокое, скапливаются организмы, которые потребляют биологическую пленку, оторвавшуюся от поверхности носителя. Преобладают организмы, предпочитающие менее загрязненные зоны воды, из простейших – брюхоресничные инфузории и сувойки.

Состав организмов в биологической пленке разнообразнее, чем в активном иле; наряду с бактериями в ней находятся актиномицеты, грибы, простейшие, водоросли, коловратки, черви (круглые, малощетинковые), членистоногие: мелкие мошки (рр. *Psichoda* и *Podura*) и личинки комаров (р. *Chironomida*).



5-15 см

От поверхности фильтра



40-50 см

Распределение микрофлоры в биофильтре при очистке сточных вод гидролизного производства

Водоросли и цианобактерии могут развиваться на освещенных участках биопленки. Из водорослей чаще всего встречаются представители семейства *Chlorophyceae* и вольвоксовые (*Volvox aureus*).

Протококковые водоросли наиболее универсальны для работы очистных сооружений. Могут от автотрофного питания переходить к гетеротрофному и усваивать различные источники углерода и азота.

Водоросли, потребляя CO_2 и выделяя O_2 , являются **симбионтами** по отношению к бактериям. В процессе фотосинтеза водоросли могут полностью обеспечить потребность бактерий ила или биопленки в O_2 . В условиях же искусственного освещения этот режим энергетически невыгоден.

Водоросли могут полностью **утилизировать фосфор**. Используя их, можно осуществить глубокое удаление биогенных элементов (обычно в биопрудах). Ил из водорослей и бактерий называется **альгобактериальным илом**, а сооружения, где он используется – **симбиотенками** и **симбиофильтрами**. Симбиотенки и симбиофильтры представляют собой обычные очистные сооружения с дополнительным освещением рабочего пространства. Их рационально использовать на последних ступенях очистки. Однако **процесс очистки нестабильный**. Кроме того, если водоросли фиксируют больше CO_2 , чем выделяется его в ходе дыхания бактерий и водорослей, то происходит загрязнение сточных вод веществами, синтезируемыми водорослями и выделяемыми в окружающую среду. Для стабилизации режима очистки водоросли можно выращивать в отдельном аппарате и передавать их в симбиотенки или симбиофильтры.

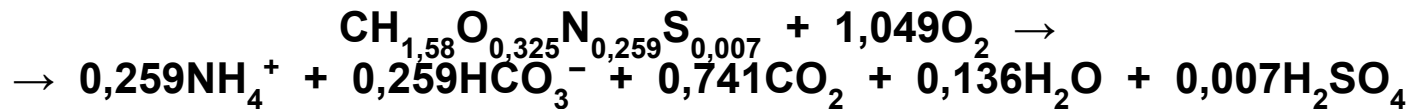
Основные биохимические процессы при аэробной очистке

- окисление органического углерода,
- нитрификация.

В результате образуется биомасса ила типичного **состава** (по основным элементам), г/кг асв:

C – 400–600, H – 50–80, O – 250–350, N – 80–120, P – 10–25, S – 5–15, Fe – 5–15.

Полную минерализацию (без образования биомассы) белковых компонентов условного состава $\text{CH}_{1,58}\text{O}_{0,325}\text{N}_{0,259}\text{S}_{0,007}$ можно описать уравнением:

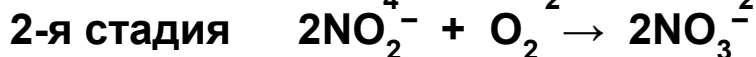
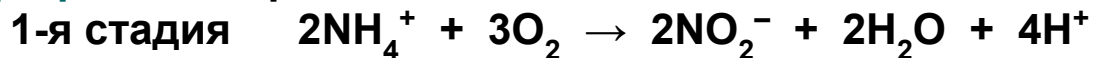


Для полного окисления:

- 1 г белка вышеприведенного состава требуется кислорода – 1,48 г,
- 1 г углеводов – 1,07 г,
- 1 г жиров – 2,9 г.

На стадии окисления органических соединений образуется NH_4^+ , который может вовлекаться в процессы нитрификации.

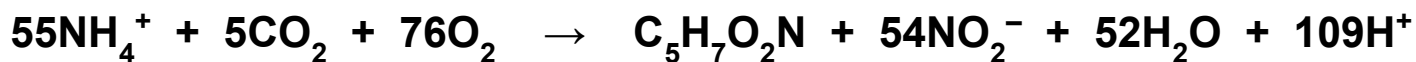
Нитрификация протекает в 2 стадии:



Совокупные реакции

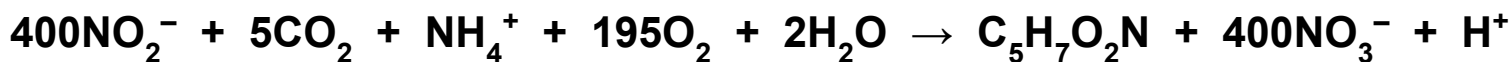
для первой фазы:

Nitrosomonas



для второй фазы:

Nitrobacter



При окислении аммонийных ионов выход биомассы *Nitrosomonas* составляет около 0,147 мг на 1 мг окисленного азота, а *Nitrobacter* – 0,02 мг/мг азота. Около 2% азота включается в клеточную массу, остальное количество переходит в нитратный азот.

Расход кислорода на нитрификацию: на первую стадию – 3,16 мг/мг азота; на вторую стадию – 1,1 мг/мг N; общее потребление кислорода – 4,26 мг/мг N.

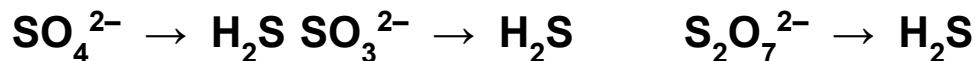
Нитрификация сопровождается образованием ионов водорода. Степень снижения pH зависит от щелочности среды, обуславливающей выделение или связывание CO_2 , буферной емкости воды и окисленного количества аммония.

Окисление NH_4^+ нитрификаторами является скоростью лимитирующей стадией в совокупном процессе очистки в сооружениях, работающих на полную биологическую очистку. Нитрификация начинается после использования гетеротрофными микроорганизмами органического вещества и роста концентрации растворенного кислорода в среде, поэтому появление нитратов в среде свидетельствует о глубокой биологической очистке и является показателем санитарной оценки процесса очистки. Скорость нитрификации может быть увеличена при использовании отдельно стадий окисления углерода и нитрификации.

В застойных зонах сооружения, в которых аэрирование затруднено, могут развиваться анаэробные процессы, в первую очередь **денитрификация:**

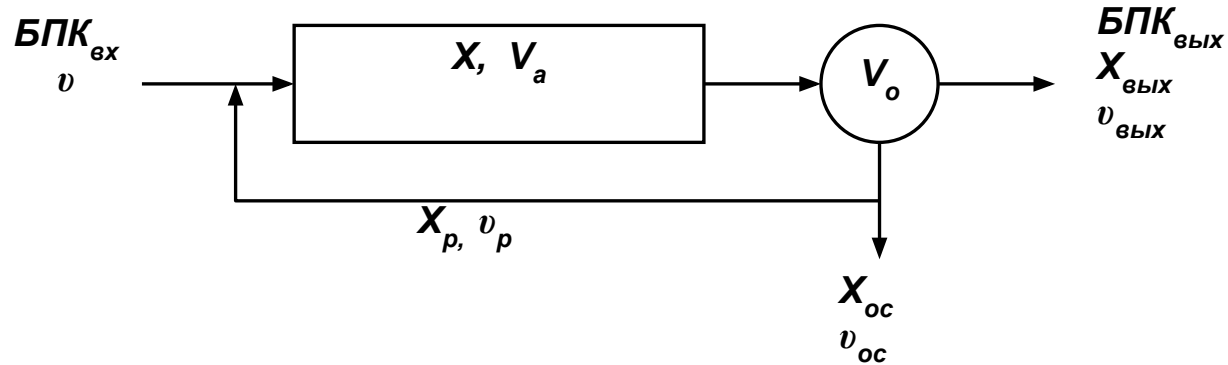


и **сульфатредукция:**



С одной стороны, денитрификация затрудняет нормальную эксплуатацию вторичных отстойников аэротенков, поскольку частички активного ила насыщаются пузырьками газообразного N_2 и хуже отделяются от жидкости во вторичном отстойнике, нарушая нормальный режим работы отстойников. С другой стороны, денитрификация является полезным процессом; ее используют для удаления азота из воды. Источником энергии для денитрификации в таких случаях являются либо органические соединения сточных вод, либо специально добавляемые органические субстраты.

Показатели работы очистных сооружений



1. Степень очистки по загрязнениям:

$$\frac{(S_{\text{вх}} - S_{\text{вых}})}{S_{\text{вх}}},$$

где $S_{\text{вх}}$, $S_{\text{вых}}$ – концентрация загрязнений на входе и выходе из очистных сооружений.

2. Нагрузка по органическому веществу на ил, B_X – количество поданных загрязнений (в единицах БПК, взвешенных веществ, в кг) на 1 кг беззольного вещества ила в сутки:

$$B_X = \frac{\text{БПК}_{\text{вх}} \cdot v}{V_a \cdot X} = \frac{\text{БПК}_{\text{вх}}}{X \cdot \tau}$$

или на 1 м³ сооружения в сутки, B_V :

$$B_V = \frac{\text{БПК}_{\text{вх}} \cdot v}{V_a} = \frac{\text{БПК}_{\text{вх}}}{\tau}$$

где v – расход сточной воды м³/сут; V_a – объем очистного биореактора, м³; τ – время пребывания в аппарате, сут; X – беззольное вещество ила, кг/м³.

3. Окислительная мощность, N_x – количество окисленных загрязнений на 1 кг беззольного вещества ила в сутки:

$$N_x = \frac{(БПК_{вх} - БПК_{вых}) \cdot v}{V_a X} = \frac{\Delta БПК}{X \cdot \tau}$$

или на 1 м³ сооружения в сутки, на 1 м³ загрузочного материала, на 1 м² площади поверхности (в биофильтрах):

$$N_v = \frac{\Delta БПК \cdot v}{V_a} = \frac{\Delta БПК}{\tau}$$

4. Нагрузка по воде, Q , м³/м³.сут или м³/м² поверхности загрузочного материала в сутки:

$$Q = \frac{v}{V_a}$$

5. Время пребывания (время удерживания, время нахождения) **воды** в сооружении, сут:

$$\tau = \frac{V_a}{v}$$

6. Прирост ила, $F_{X_{изб}}$ – количество ила, покидающего очистные сооружения в единицу времени:

$$F_{X_{изб}} = v_{oc} \cdot X_{oc} + v_{вых} \cdot X_{вых}$$

где $v_{oc} \cdot X_{oc}$ – количество удаляемого избыточного ила в виде осадка вторичного отстойника, кг/сут; v_{oc} – расход удаляемого осадка, м³/сут; X_{oc} – концентрация ила в осадке, кг/м³; $v_{вых}$ и $X_{вых}$ – расход выходного стока, м³/сут и концентрация ила в выходном стоке в осветленной воде, кг/м³.

Оценить величину прироста ила можно, зная выход биомассы ила на единицу потребленного БПК или ХПК, $Y_{X/БПК}$, $Y_{X/ХПК}$:

$$F_{X_{изб}} = v \cdot Y_{X/БПК} \cdot \Delta БПК$$

$$F_{X_{изб}} = v \cdot Y_{X/ХПК} \cdot \Delta ХПК$$

Типично $Y_{X/ХПК}$ 0,2–0,6 кг биомассы (по сухому веществу) на 1 кг ХПК.

7. Возраст ила – T, сут.

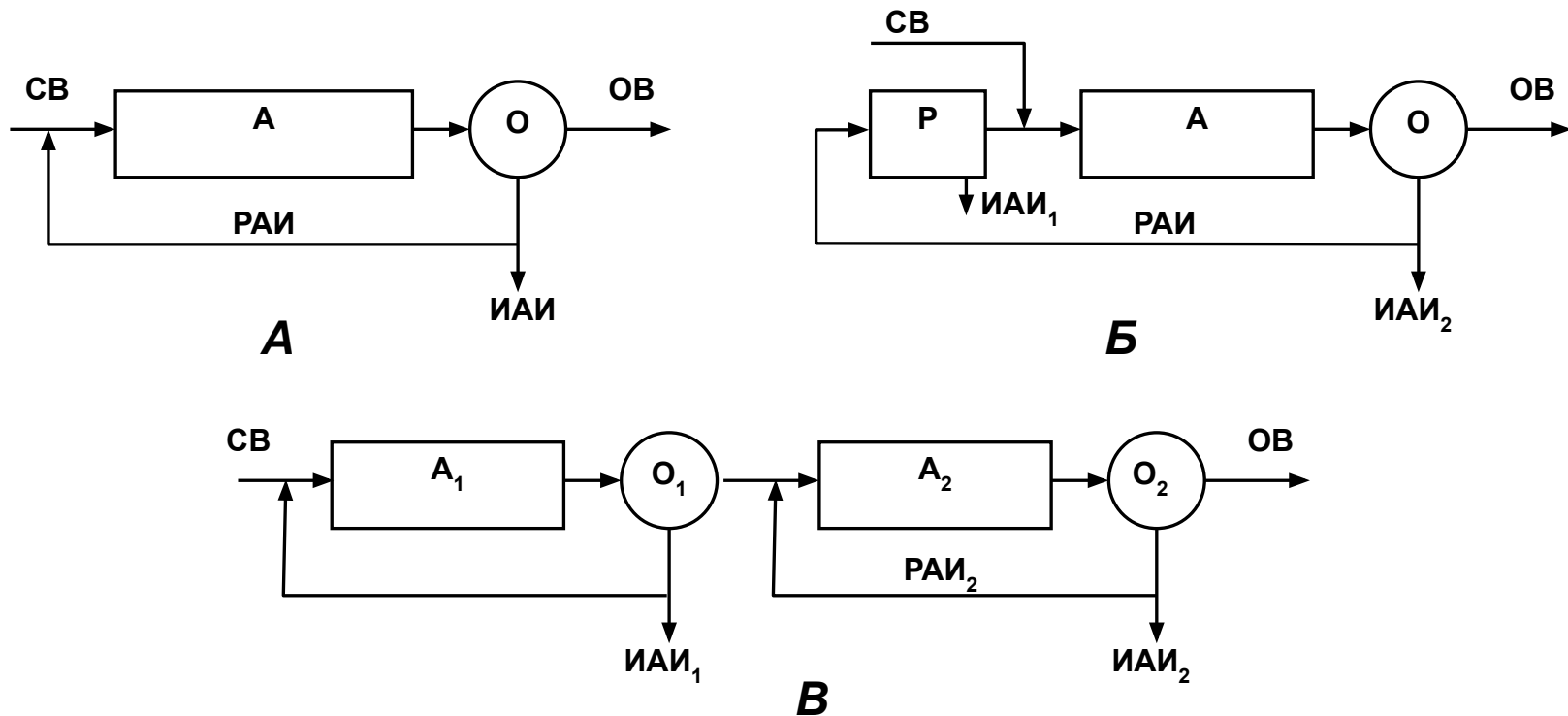
$$T = \frac{X \cdot V}{(v_{oc} \cdot X_{oc} + v_{вых} \cdot X_{вых})}$$

где $V = V_a + V_o$ – объем аэротенка и вторичного отстойника, м³.

Возраст ила T важно контролировать для обеспечения необходимого уровня образования $F_{X_{изб}}$ и протекания биохимических процессов, например, нитрификации, окисления биостойких загрязнений. С увеличением возраста ила количество избыточного ила на единицу потребленного БПК или ХПК уменьшается, а скорость нитрификации возрастает. T можно варьировать, изменяя соотношение между количеством рециркулируемого (возвратного) ила $F_{X_p} = v_p \cdot X_p$ и удаляемого из системы избыточного ила $F_{X_{изб}}$.

Организация очистки в аэротенках





Схемы очистки сточной воды с использованием аэротенков:

а – одноступенчатая очистка в аэротенке;

б – очистка в аэротенке с регенератором;

в – двухступенчатая схема очистки.

Обозначения: А – аэротенк, О – отстойник, СВ – сточная вода, ОВ – очищенная вода, ИАИ – избыточный активный ил, РАИ – рециркулируемый активный ил

Одноступенчатый аэротенк с вторичным отстойником традиционной конструкции:

- максимальная концентрация активного ила 1,5–2 г/л;
- имеет невысокую окислительную мощность, т.к. низкая рабочая концентрация ила;
- неустойчив к резким изменениям нагрузки.

Аэротенк с регенератором:

- средняя концентрация активного ила и окислительная мощность более высокая;
- избыточный ил, отводимый из регенератора, глубоко минерализован, не загнивает на воздухе, легко отдает влагу;
- более высокая устойчивость к резким изменениям нагрузки и условий очистки в аэротенке; улучшение седиментационных свойств активного ила;
- снижение капитальных и эксплуатационных затрат.

Двухступенчатая и многоступенчатая схемы

- высокая окислительная мощность первой ступени;
- лучшая адаптация ила к различному спектру загрязнений на каждой из ступеней, при этом аэротенк первой ступени может работать как аэротенк-смеситель, а аэротенк второй ступени как аэротенк-вытеснитель, который позволяет лучше очистить сточные воды от оставшихся трудноокисляемых загрязнений;
- суммарное уменьшение объема аэротенков на 15–25% по сравнению с одноступенчатой схемой;
- ил со второй ступени сильно минерализован и нуждается только в обезвоживании;
- ил с первой ступени также может быть утилизирован;
- более эффективны при очистке сточных вод, характеризующихся резкими изменениями концентрации загрязнений, с высоким содержанием легкоразлагаемых, а также токсичных и трудноразлагаемых веществ;
- необходим промежуточный вторичный отстойник, что увеличивает общий объем сооружения и повышает гидравлические потери напора и энергозатраты при прохождении жидкости по сооружениям и перекачивании циркулирующего активного ила.

Классификация аэротенков

По гидродинамическому режиму потока сточных вод и способу смешения активного ила с очищаемой водой:

- вытеснители,
- смесители,
- аэротенки с рассредоточенным впуском сточной жидкости (промежуточного типа).

По нагрузкам на активный ил различают:

- высоконагружаемые,
- обычные,
- низконагружаемые аэротенки.

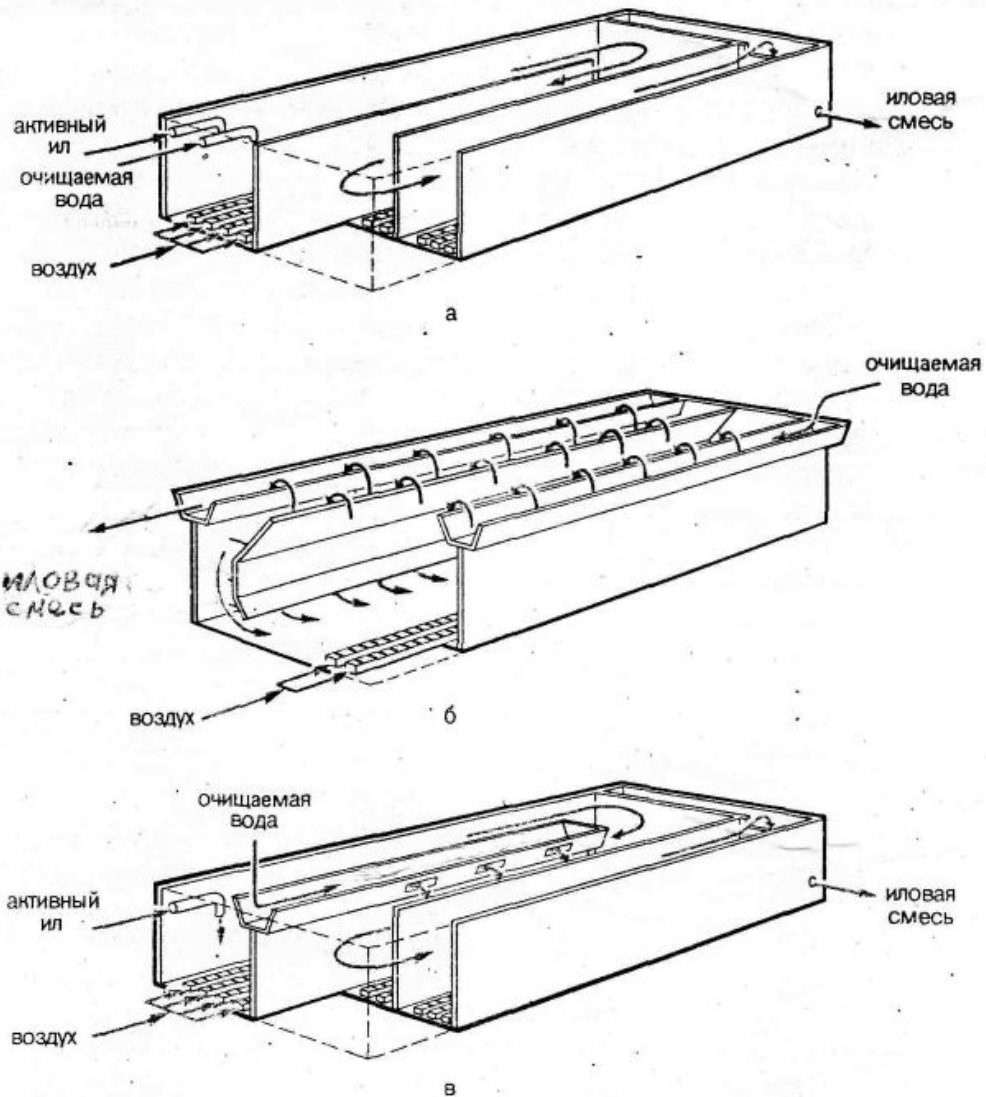
Аэротенки с отдельно стоящим регенератором и с совмещенным регенератором.

По типу систем аэрации:

- с пневматическими,
- механическими,
- гидродинамическими,
- пневмомеханическими аэраторами.

По конструктивным признакам:

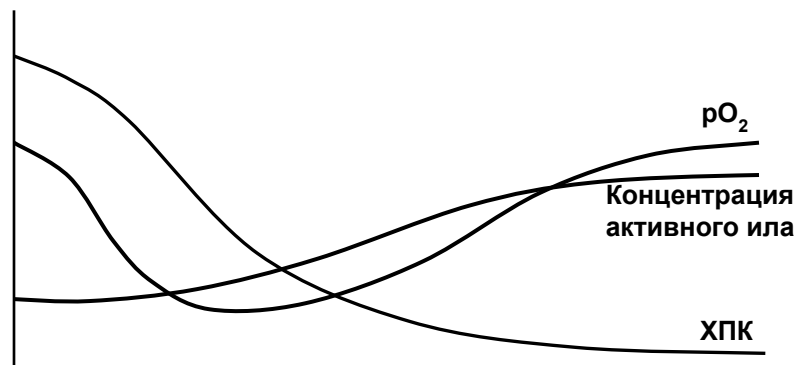
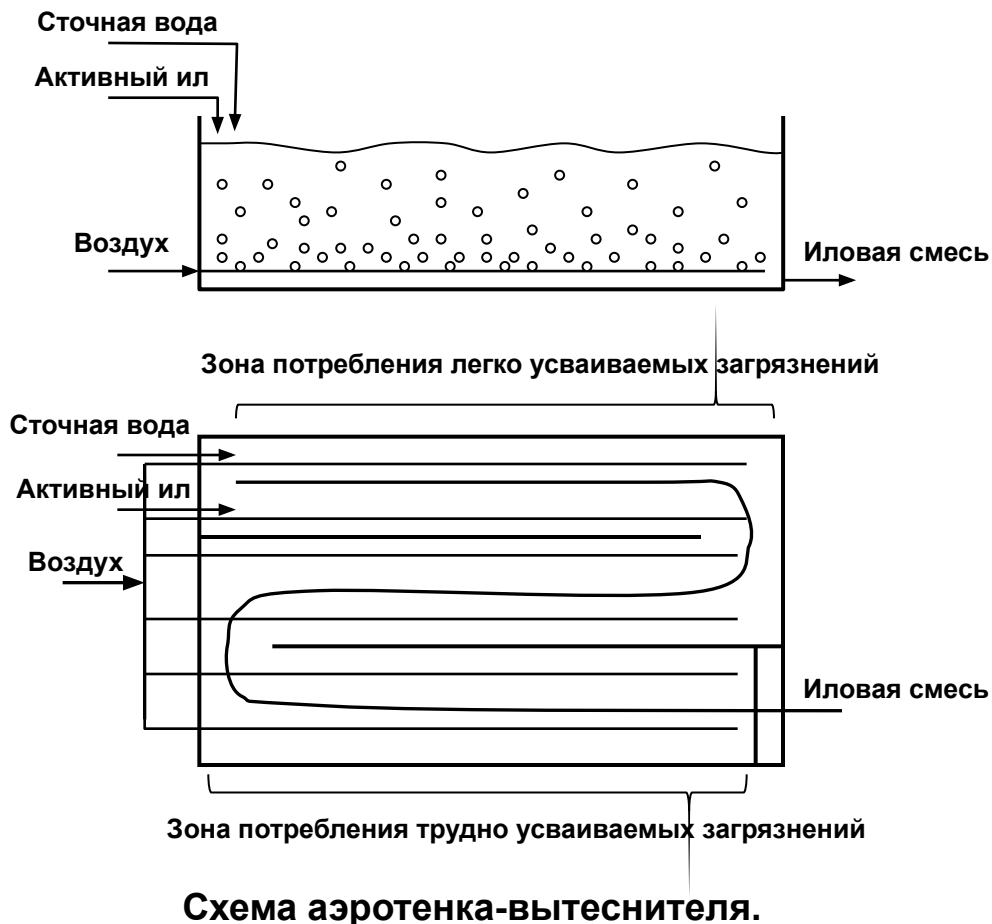
прямоугольные, круглые, комбинированные, противоточные, шахтные, фильтротенки, флототенки и др.



Схемы аэротенков:

а — вытеснения; б — смешения; в — с рассредоточенной подачей сточной воды и с регенератором активного ила

В аэротенке-вытеснителе жидкость и рециркулируемый активный ил подаются в начало аэротенка и отводятся в конце сооружения.



Вход СВ

Выход СВ

Изменение показателей очистки в аэротенке-вытеснителе.

Аэротенки вытеснения:

- более высокая скорость окисления, чем в аэротенках-смесителях,
- более высокая степень удаления загрязнений,
- ил более минерализованный, легче осаждается.

Недостатки:

- неустойчивость работы при залповом поступлении токсичных загрязнений,
- для устранения ингибирования загрязнениями сточную воду на входе в аэротенк необходимо разбавлять ($XPK_{вх.} 200-400 \text{ мг/л}$), что уменьшает окислительные возможности аэротенка, или сооружать перед аэротенками бассейны-усреднители, чтобы избежать губительного действия резких колебаний состава стоков на активный ил.

В аэротенке-смесителе жидкость подается по всей длине аэротенка; органические загрязнения и растворенный кислород распределяются равномерно. Рост микроорганизмов активного ила в такой системе подобен росту в биореакторе в хеостатных условиях.

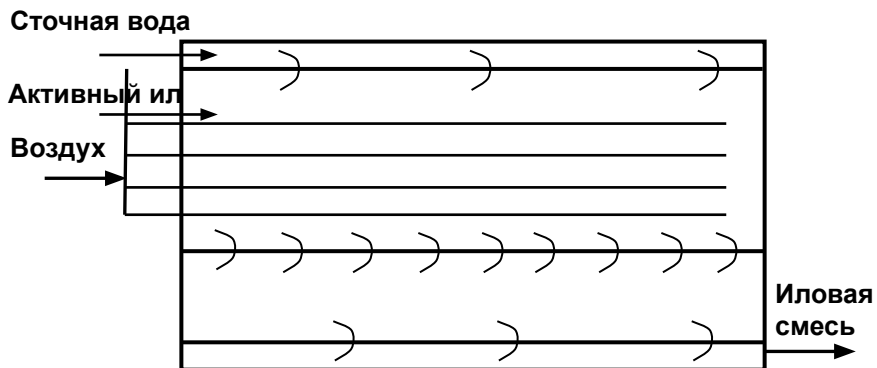
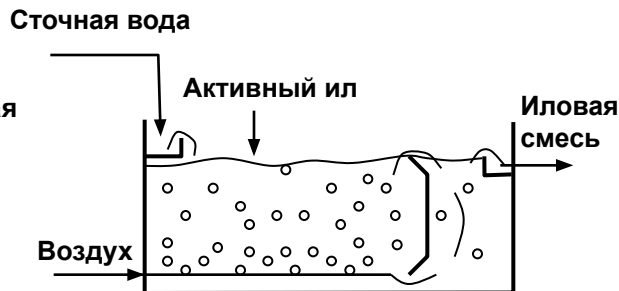
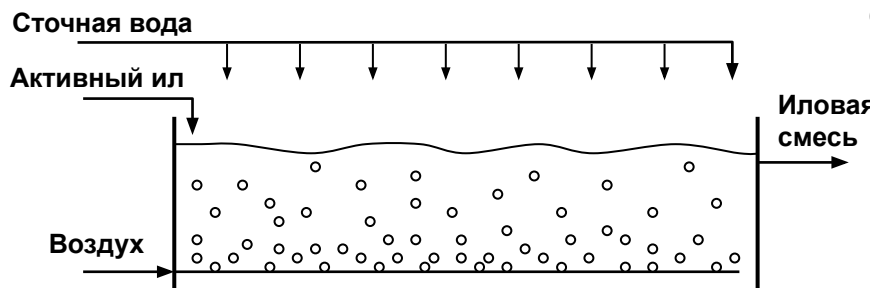
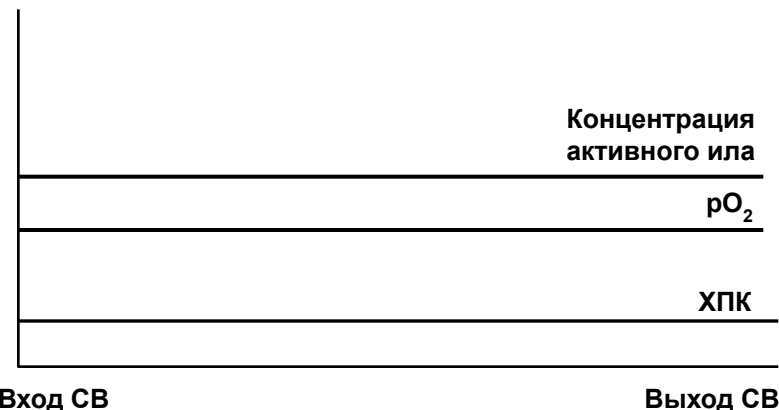


Схема аэротенка-смесителя.



Изменение показателей очистки в аэротенке-смесителе.

Аэротенки смешения:

- возможна подача более загрязненных сточных вод,
- устойчивее к залповым выбросам и токсичным компонентам стоков, чем вытеснители.

Недостатки

- сравнительно низкая скорость окисления,
- ил обладает худшей способностью к оседанию и менее минерализован.

В аэротенке с рассредоточенным впуском сточной жидкости (при сосредоточенной подаче активного ила) концентрация ила на входе равна его содержанию в возвратном иле и постепенно уменьшается по мере приближения к выходу из сооружения.

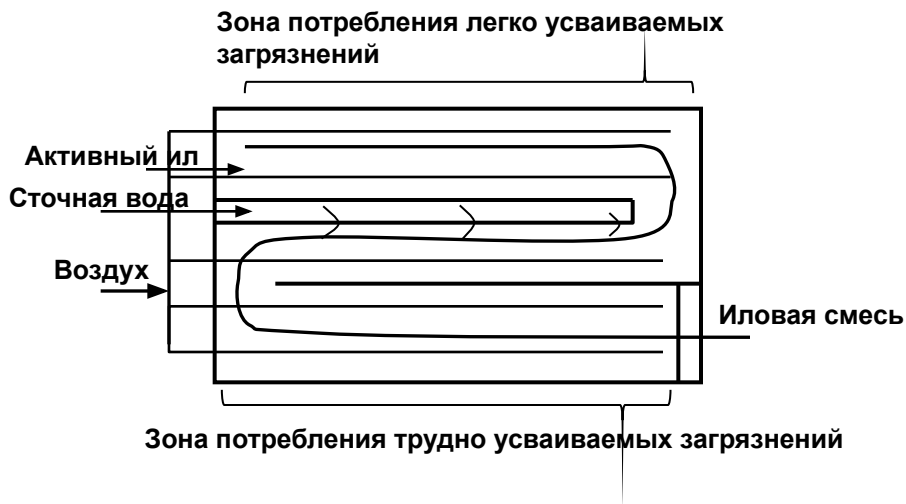
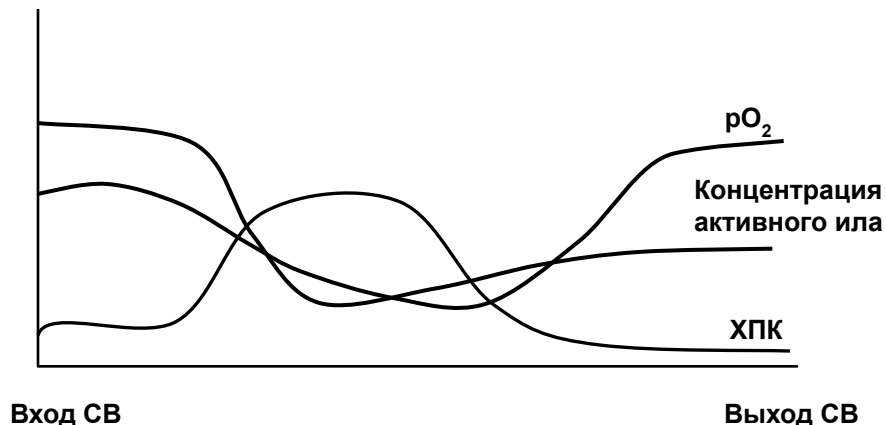


Схема аэротенка с рассредоточенной подачей сточной воды и регенератором активного ила.



Изменение показателей очистки в аэротенке с рассредоточенной подачей сточной воды и регенератором активного ила.

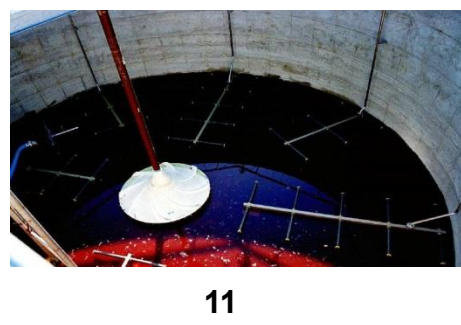
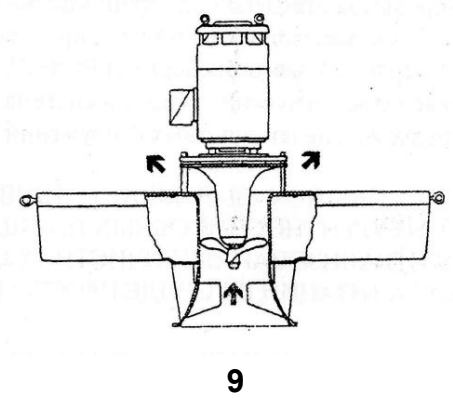
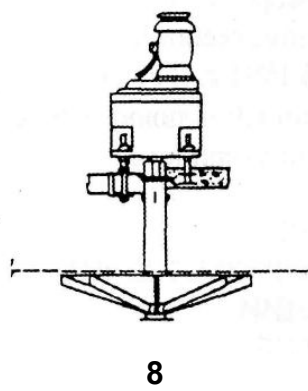
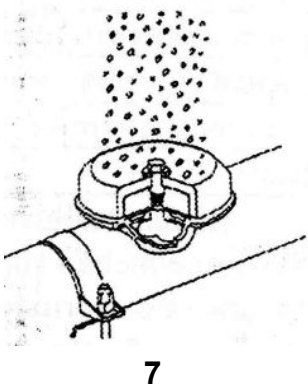
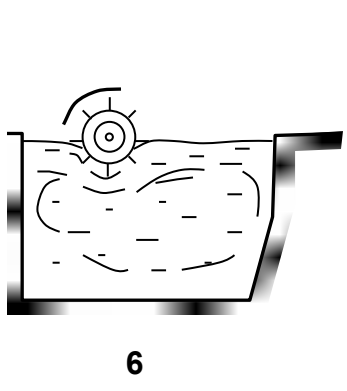
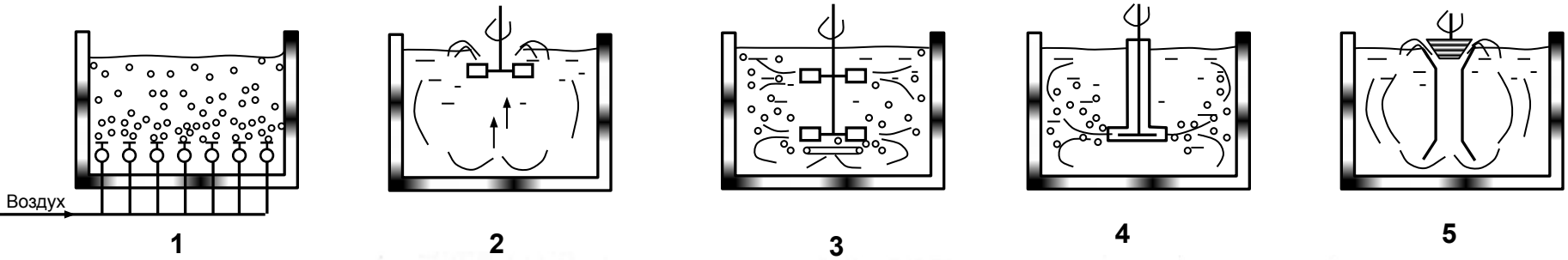
Аэротенки с рассредоточенным впуском сточной жидкости:

- средняя концентрация активного ила более высокая, чем в смесителе и вытеснителе,
- как и вытеснители, неустойчивы к залповым выбросам.

Высоконагружаемые аэротенки часто используют на первой ступени двухступенчатой очистки сточных вод, а также если предполагается утилизация избыточного активного ила (как кормовой добавки, сырья для получения активированного угля и т. д.).

Низконагружаемые аэротенки (аэротенки с продленной аэрацией) используют для очистки малых количеств сточных вод (до 1000 м³/сут.). Преимущество таких режимов в незначительном приросте ила, его лучшей стабилизации и более легком отделении.

Чем выше нагрузка на очистные сооружения, тем ниже степень очистки.



Аэраторы различных систем:

1 – пневматическая аэрация с колпачковыми диспергаторами; 2 – аэрация с турбиной; 3 – глубинная пневмомеханическая аэрация с подачей воздуха под лопасти ротора; 4 – глубинная аэрация с самовсасыванием; 5 – аэрация с открытой турбиной системы «Симплекс»; 6 – аэрация с поверхностным аэратором системы Кессенера; 7 – колпачковый диффузор; 8 – поверхностный аэратор – импеллер; 9 – поверхностный аэратор – пропеллер; 10 – фото погружной мешалки пропеллерного типа; 11 – фото погружной мешалки с гиперболическим профилем



Аэрация мембранными диффузорами в аэротенке



Поверхностная аэрация сооружения биологической очистки с активным илом (Китай)



**Мелкопузырчатая аэрация в аэротенке:
слева – этап строительства; справа – аэраторы, поднятые из аэротенка для осмотра**



Типичные показатели очистки в аэротенках

Рабочие концентрации активного ила	1–4 г/л по СВ
Содержание ила в возвратном потоке	5–15 г/л
Время пребывания	3–6 ч – высоконагружаемые 6–24 ч – стандартные 24–72 ч – низконагружаемые
Возраст ила, сут	≤1,0 – высоконагружаемые 1–5 – стандартные 5–20 – низконагружаемые
Интенсивность аэрации	0,5–2,0 м ³ /мин.м ² площади аэротенка
Высота столба жидкости	4–6 м
Содержание растворенного кислорода	≥2–3 мг/л в начале аэротенка ≥4–5 мг/л в конце аэротенка
Максимально возможное содержание загрязнений на входе, по ХПК, мг/л	до 400–500 (для вытеснителей) до 2000–2500 (для смесителей)
Окислительная мощность	до 300 г БПК ₅ /м ³ ч (высоконагружаемый) 10–50 г БПК ₅ /м ³ ч (стандартный)
Снижение ХПК	50–90% от исходной
Снижение БПК	80–96% от исходной
Соотношение БПК : N : P	в пределах 100 : 3–7 : 0,8–1,5
Соотношение ХПК : N : P	в пределах 100 : 2–6 : 0,6–1,2
Концентрация N-NH ₄ ^{вых.}	2–3 мг/л
Выход ила	0,4–0,5 кг/кг удаляемой БПК
Энергоемкость	0,5–2 кВтч/кг удаленной БПК ₅