

## **Тема 6б**

# ***АЭРОБНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД***

### **План лекции**

**Другие конструкции систем с активным илом**

**Очистка на биофильтрах**

**Влияние условий среды на биологическую очистку**

**Процедура технологического расчета аэробной очистки воды в аэротенке и процесса биосинтеза**

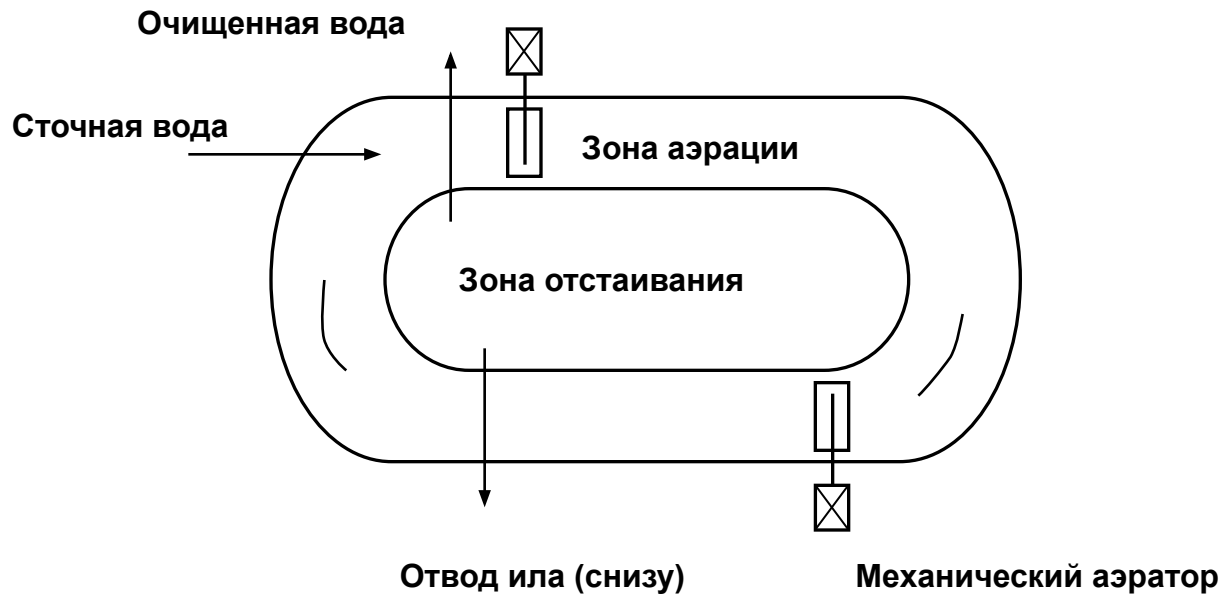
# Вопросы в экзаменационных билетах

6. Сооружения аэробной биоочистки. Окситенки, аэроакселаторы, окислительные каналы, шахтные аппараты, реакторы со взвешенным слоем. Принципы их работы.
7. Биофильтры. Основные конструкции, параметры, показатели и условия эффективной работы.
8. Сооружения аэробной биоочистки. Биодиски, биобарабаны, биотенки, биосорберы. Принципы их работы.
9. Основные показатели работы сооружений биологической очистки сточных вод. Сравнение различных методов биологической очистки по показателям работы.
10. Влияние условий среды на аэробную биологическую очистку.

**Кн. 2, т.1, с. 104-136**

# Аэробная очистка в модифицированных сооружениях с активным илом

## Циркуляционные окислительные каналы



### Преимущества:

- простота,
- возможность установки в небольших населенных пунктах, в сельской местности,
- могут работать без первичного отстойника.

## Системы, интенсифицирующие перенос кислорода в жидкость:

Важно увеличить движущую силу процесса ( $C_{ox}^* - C_{ox}$ ).

Уравнение массопереноса:

$$dO_2/dt = K_{VO_2}(C_{ox}^* - C_{ox}),$$

где  $dO_2/dt$  – скорость переноса кислорода из газовой фазы в жидкость,

$K_{VO_2}$  – объемный коэффициент массопереноса,  $C_{ox}^*$ ,  $C_{ox}$  – равновесная и текущая концентрация растворенного кислорода в жидкости.

Можно увеличить  $C_{ox}^*$ , повышая

- 1) парциальное давление кислорода в воздухе;
- 2) давление столба жидкости или газовой фазы над жидкостью.

## **Окситенки.**

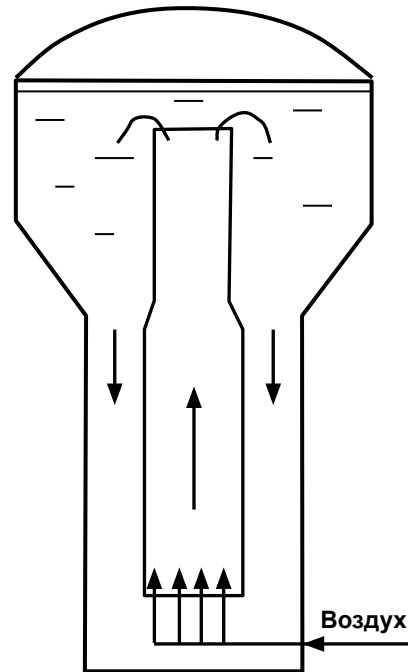
**Интенсификация биологической очистки осуществляется путем аэрации сточной воды воздухом, обогащенным кислородом, или чистым кислородом.**

**Требуются дополнительные затраты на получение кислорода, поэтому степень использования кислорода в окситенках должна быть высока, чтобы сделать процесс экономичным. Для экономии чистого кислорода процесс могут осуществлять в аппарате закрытого типа с принудительной аэрацией сточной жидкости. Образующийся  $\text{CO}_2$  и азот, содержащийся в подаваемой обогащенной кислородом смеси, периодически отдувают. Однако и в открытых резервуарах, строительство и эксплуатация которых значительно легче, эффективность использования кислорода может быть достаточно высока при рациональном подборе режима аэрации.**

**Преимущества:**

- резкое сокращение производственных площадей и объемов сооружений, что компенсирует увеличение сложности конструкции;**
- капитальные затраты уменьшаются на 30-50%;**
- решается проблема «вспухания» (избыточного роста бактерий и грибов, препятствующих оседанию ила).**

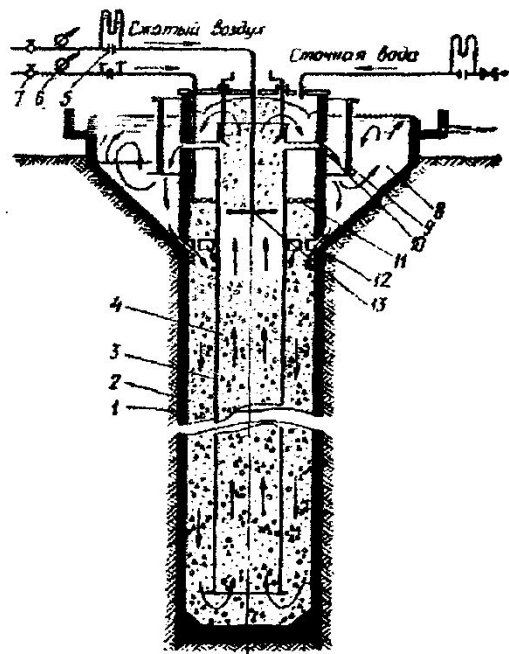
Повышение давления столба жидкости – в **башенных (колонных, шахтных) аппаратах.**



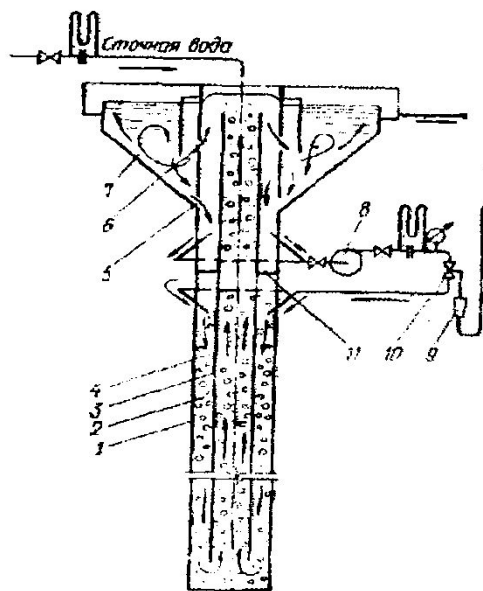
Принципиальная конструкция  
башенного реактора с эрлифтом

Башенные реакторы **компактнее** аэротенков, занимают **меньшие площади**. На них **легче смонтировать перекрытие и собирать отходящие газы** для их организованного выброса либо дополнительной очистки. В верхней части с расширением можно предусмотреть зоны вторичного отстаивания ила.

**Шахтные (колонные) аппараты** еще более компактны. Они устанавливаются на поверхности земли в виде колонны или сооружаются ниже поверхности грунта в виде шахты. Глубина шахты составляет от 12 до 150 м, диаметр от 0,5 до 10 м.



**А**



**Б**

**Шахтный аппарат.**

**А. Шахтный аэротенк с эрлифтной циркуляцией:**

1 – ствол шахты; 2 – зона аэрации; 3 – внутренняя труба; 4 – эрлифтная зона; 5 – расходомер; 6 – манометр; 7 – регулировочный вентиль; 8 – отстойник; 9 – перегородка; 10 – впускные трубы; 11 – аэраторы; 12 – иловые щели; 13 – дырчатые трубы-эрлифты.

**Б. Шахтный аэротенк с насосной циркуляцией:**

1 – ствол шахты; 2 – зона аэрации; 3 – внутренняя труба; 4 – циркуляционная зона; 5 – иловые щели; 6 – впускные окна; 7 – отстойник; 8 – насос; 9 – расходомер; 10 – эжектор; 11 – разделительная диафрагма.

В шахтном аппарате направление циркуляции жидкости задается вдуванием воздуха в секцию с восходящим потоком на относительно небольшой глубине. Начинается движение воздуха по эрлифтному принципу, и когда скорость потока достигает 1–2 м/с, воздух начинает вдуваться в сливную зону. Жидкость увлекает пузырьки воздуха вниз.

Шахтные сооружения обладают **высокой окислительной мощностью**, пригодны для **очистки концентрированных стоков**, в них возможна **очистка воды без предварительного первичного отстаивания**. Аппараты отличаются **меньшими энергозатратами**, чем обычные аэротенки и занимают **небольшие площади**. Скорость переноса  $O_2$  в таких аппаратах достигает **1,5–3 г/л·ч**, что значительно превышает скорость переноса кислорода в обычных аэротенках. Расход электроэнергии **0,25–0,35 кВт·ч/кг  $O_2$** .

Основная **проблема шахтных аппаратов** связана с **отделением твердых частиц и микропузырьков от иловой смеси**. Попытки преодолеть эту трудность **вакуумной дегазацией, флотацией, отдувкой воздухом** не приводят к существенному улучшению седиментационных свойств ила. Поэтому наиболее целесообразным вариантом считается использование **двухстадийного процесса с шахтным аппаратом небольшого размера на первой стадии для снижения основной нагрузки по БПК и аэротенком на второй стадии с возвратом активного ила из вторичного отстойника аэротенка в шахтный аппарат**.



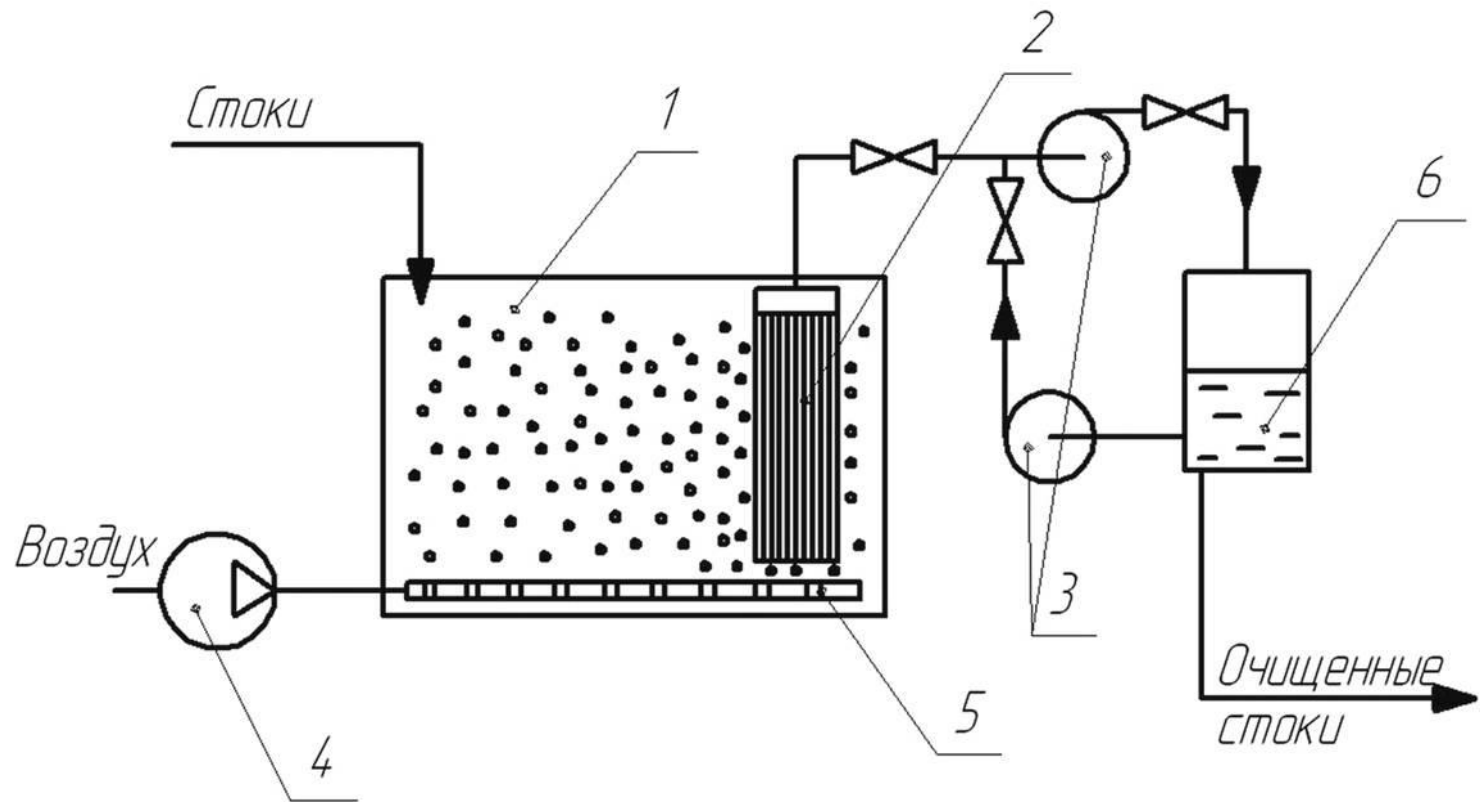
## Фильтротенки и мембранные (био)реакторы

Эффект повышения окислительной мощности достигается за счет увеличения концентрации активного ила при разделении фильтрацией.

В **фильтротенках** в качестве фильтрующих элементов используют сетчатые насадки, синтетические ткани, другие крупнопористые материалы.

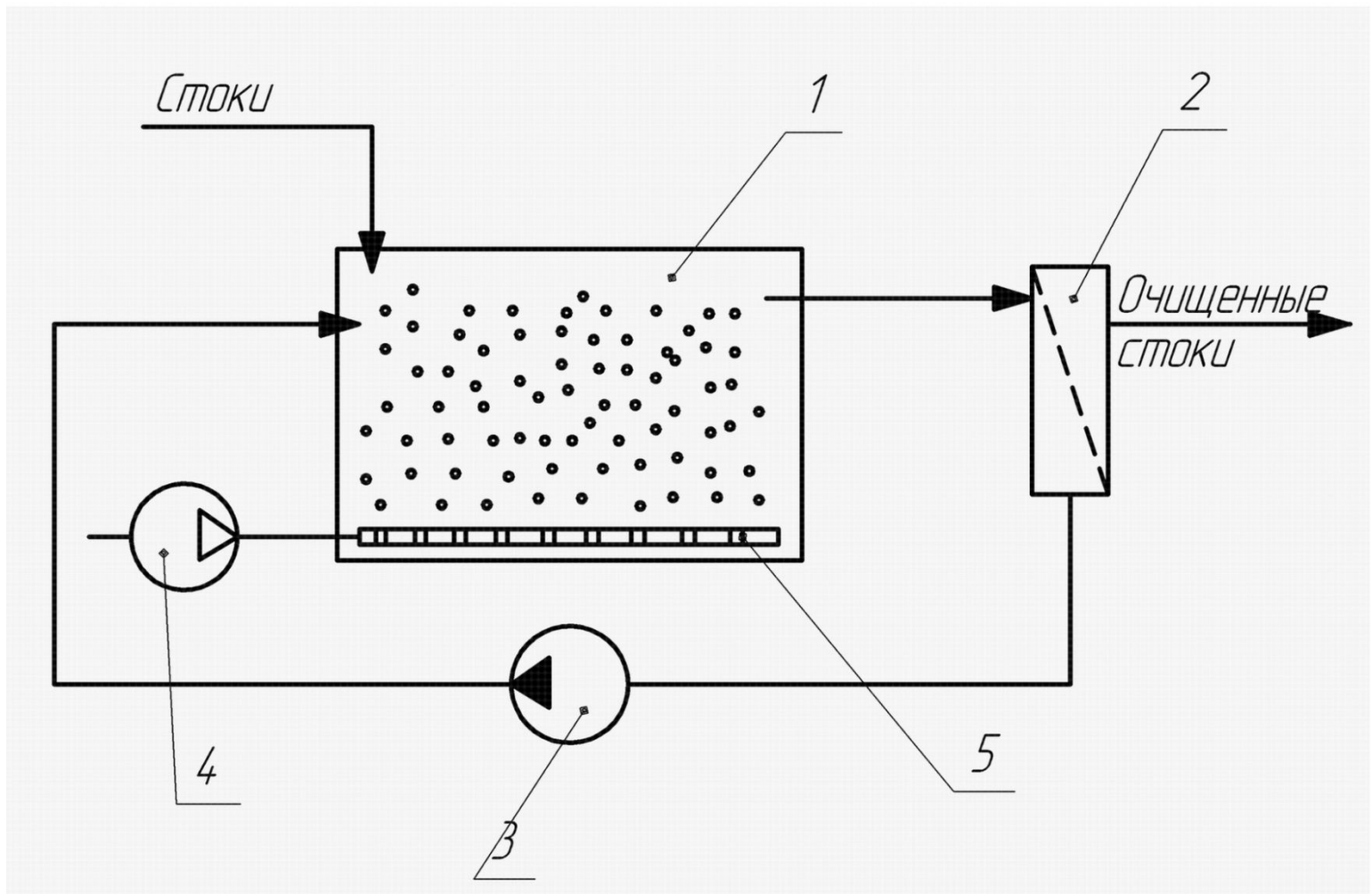
Проблема – фильтры быстро забиваются массой ила, требуется регенерация фильтра каждые 0,5–1 мин. обратной продувкой воздухом или отфильтрованной водой.

В **мембранных реакторах** фильтры изготавливают из мелкопористых полимерных, керамических или металлокерамических мембран (микрофильтрационных и ультрафильтрационных с размером пор 0,05–0,1 мкм, нанофильтрационных), имеющих существенно более высокую проницаемость и меньшую подверженность забиванию илом, чем в фильтротенках. Используют наборы **плоских** или **трубчатых** мембранных фильтров, заключенных в корпуса и размещенных в аэротенке (**погружные мембранные модули**) или **выносные мембранные модули** с насосной циркуляцией («сухие» модули). При работе погружных устройств сточные воды проходят через мембраны и откачиваются вакуумным насосом.



**Принцип действия мембранного биореактора с погружным мембранным модулем:**

1- аэротенк (биореактор); 2 - мембранный аппарат; 3 - насосы; 4 - компрессор; 5 - аэратор; 6 - ёмкость очищенной воды.



**Принцип работы мембранного биореактора с выносным мембранным модулем:**  
 1- аэротенк (биореактор); 2 – мембранный аппарат; 3 – насос; 4 – компрессор; 5 – аэратор.

Для предотвращения сорбции и налипания активного ила на наружной поверхности мембран может использоваться обратная промывка, подача сжатого воздуха, перемешивание иловой смеси при помощи лопастных мешалок, добавление порошкообразного активированного угля или плавающей загрузки – носителя прикрепленной биомассы. При совокупном действии восходящих потоков жидкости, пузырьков воздуха, обладающих подъемной силой, твердых взвешенных частиц наружные поверхности мембран остаются чистыми от твердой фазы, остающейся в аэротенке.

**Преимущества** мембранных реакторов:

- высокая производительность;
- возможно эффективное протекание нитрификации, поскольку нитрификаторы не вымываются;
- отфильтрованный пермеат из мембранной установки не содержит твердых веществ, прозрачный и имеет высокое качество по санитарным нормам;
- компактность, что важно особенно при очистке сточных вод в городских условиях, при дефиците земельных площадей.

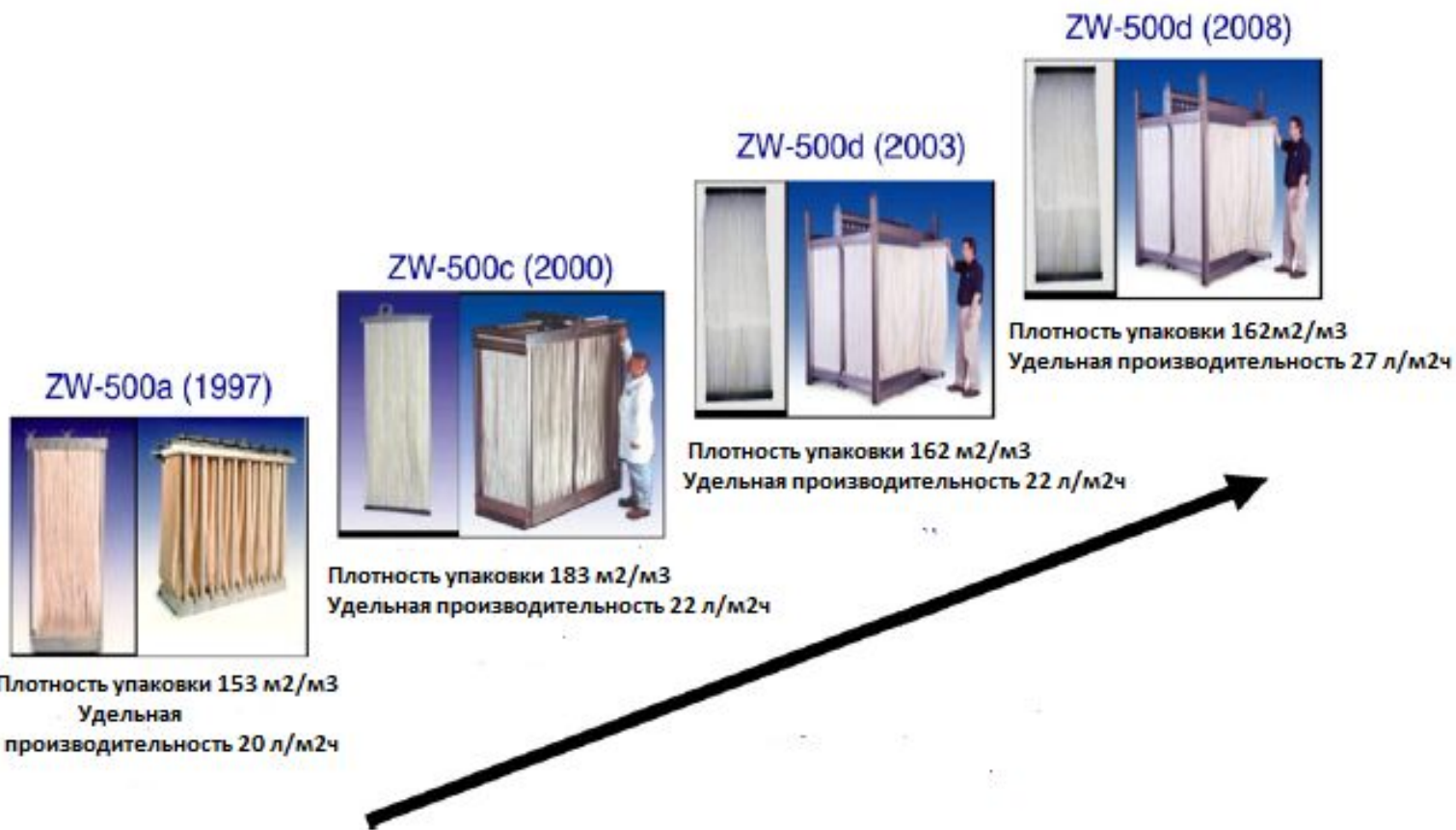
**Недостатки:**

- требуют более сложного инженерно-технического обеспечения, в ряде случаев установки префильтров для отделения крупных взвешенных частиц;
- требуют решения проблемы загрязнения и биообрастания поверхности мембран, поддержания их целостности;
- дополнительные энергозатраты на прокачку очищаемой среды через мембранные модули, очистку мембран химическими реагентами, поэтому эксплуатационные расходы высокие;
- высокие капитальные затраты на мембраны.



**Аэротенк BIOMAR® OMB с установленной «всухую» мембранной установкой для очистки инфильтрационной воды со свалок в Испании. Слева – реактор нитрификации; справа на заднем плане – мембранная установка для отделения ила.**





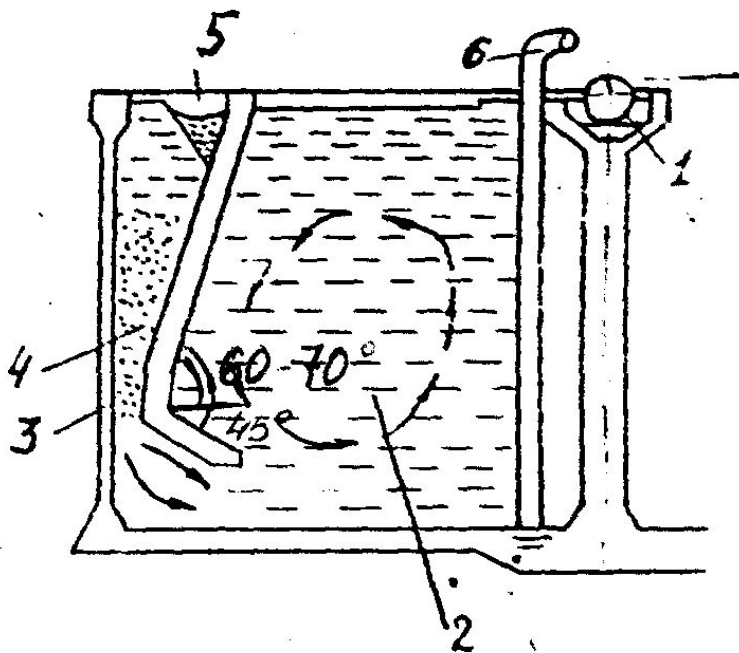
**Стандартные погружные блоки компании Zenon в период 1997-2008 гг.**

## Комбинированные сооружения

Объединяют в одном блоке процессы биоокисления и отстаивания ила.

**Аэротенки-отстойники (аэроакселераторы) и осветлители.**

**Аэротенк-отстойник** объединен со вторичным отстойником в одно сооружение. Это позволяет осуществить очистку сточных вод при относительно высоких значениях концентрации активного ила (4–5 г/л), значительно сократить площадь, занимаемую сооружением, уменьшить капитальные затраты. Объем аэротенка-отстойника примерно на 20% меньше суммарного объема обычного аэротенка и вторичного отстойника.



**Аэротенк-отстойник:**

- 1 – труба для подачи исходных сточных вод;
- 2 – аэротенк; 3 – отстойник; 4 – перегородка;
- 5 – сборный лоток очищенной жидкости;
- 6 – воздуховод

**Аэроакселераторы** имеют центральную зону аэрации и периферическую отстойную зону или центрально расположенный отстойник и периферическую зону аэрации.



**Аэротенк со встроенным вторичным отстойником**



## Аэробная очистка с биопленкой

### Биофильтры

Наиболее распространены – **перколяционные биофильтры**. В них вода поступает сверху на загрузку (перколяционный слой), а воздух снизу.

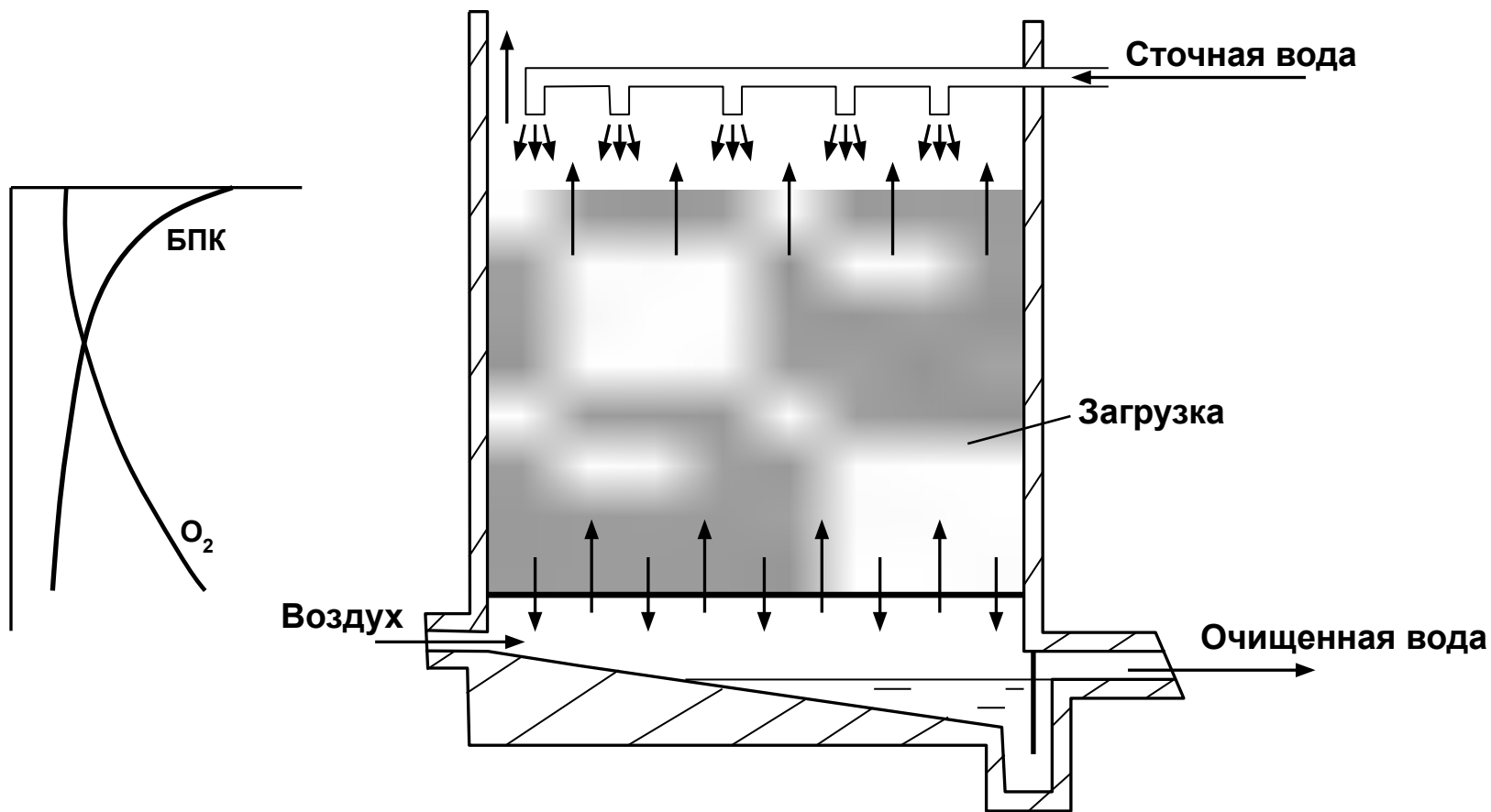


Схема перколяционного биофильтра с принудительной аэрацией

Перколяционные биофильтры, в отличие от аэротенков, эксплуатируются без возврата оторвавшихся частиц микробной пленки, которые осаждаются в отдельном остойнике и отводятся на иловые площадки. Кроме того, возврат воды с большим содержанием взвешенных частиц в голову биофильтра может привести к его быстрой **кольматации (заиливанию)**.

### **Требования к загрузке:**

- материал загрузки (за исключением пластмасс) при плотности до  $1000 \text{ кг/м}^3$  в естественном состоянии должен выдерживать нагрузку не менее  $0,1 \text{ МПа}$ , не менее 10 циклов испытаний на морозостойкость, кипячение в течение 1 ч в 5%-ном растворе  $\text{HCl}$ , не менее чем пятикратную пропитку насыщенным раствором сульфата натрия;
- не должен получать заметных повреждений или уменьшаться более чем на 10% первоначальной массы загрузки;
- загрузка по высоте должна быть одинаковой крупности и только для нижнего поддерживающего слоя высотой  $0,2 \text{ м}$  следует применять более крупную загрузку;
- невысокая стоимость и удельные затраты на изготовление и монтаж биофильтра.

Наиболее важные характеристики загрузки: **удельная поверхность** ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) и **пористость** (в % по объему). Удельная поверхность большинства видов загрузки лежит в диапазоне  $50\text{--}200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

В капельных биофильтрах при удельной поверхности щебеночной насадки  $80 \text{ м}^2/\text{м}^3$  на поверхности образуется 10-40 кг прикрепившейся биомассы на  $1 \text{ м}^3$  насадки.

**Загрузка: объемная и плоскостная.**

**Объемная загрузка** из минеральных материалов: гранит, гравий, щебень прочных горных пород, кокс, а также пористые материалы (шлак, пемза) плотностью 500–1500 кг/м<sup>3</sup> и пористостью 40–50%.

С объемной загрузкой различают **капельные, высоконагружаемые и башенные фильтры.**

**Показатели работы биофильтров с объемной загрузкой при очистке городских стоков.**

Биофильтр	Диаметр частиц загрузки, $d_{загр.}$ , мм	Высота, м	Нагрузка			БПК <sub>п</sub> на входе
			удельная по воде м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ·сут.	суммарная по воде м <sup>3</sup> /сут.	г БПК <sub>п</sub> / м <sup>3</sup> ·сут.	
капельный	20–40	1–3	0,5–2	до 1000	50–400	<200–300
высоконагружаемый	40–70	2–4	10–30	30–50 тыс.	300–1000	<200–400
башенный	60–100	8–16	30–50	30–50 тыс.	800–1500	<300–500

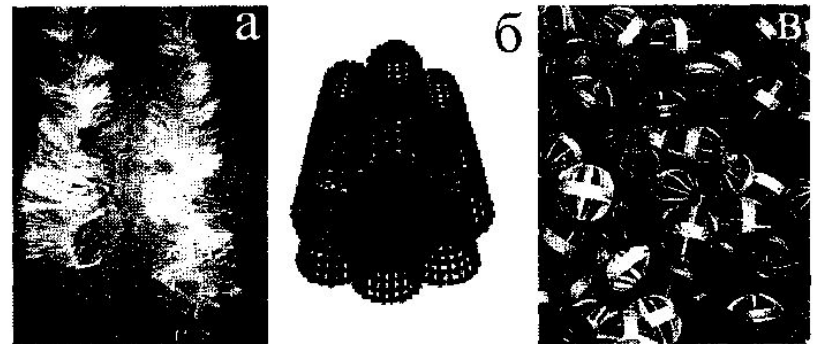
**Плоскостная загрузка:** жесткая засыпная, жесткая блочная, мягкая.

**Жесткая засыпная** – в виде колец, обрезков труб и т.п.

**Жесткая блочная** – в виде решеток или блоков, собранных из чередующихся плоских и гофрированных листов.

**Мягкая** – из металлических сеток, пластмассовых пленок или синтетических тканей (нейлон, капрон), которые крепят на специальных каркасах или укладывают в виде рулонов.

## Примеры плоскостных загрузок перколяционных биофильтров.



а – ершовая загрузка (искусственные водоросли); б – загрузка в виде полых перфорированных трубок; в – подвижная плавающая загрузка.

## Достоинства перколяционных фильтров:

- простота,
- надежность,
- малые эксплуатационные затраты,
- меньшая энергоемкость по сравнению с аэротенками,
- образование **небольших** по сравнению с аэротенком **излишков биомассы**,
- практически **полное удаление всех органических примесей**,
- возможность **длительного использования установки (30–50 лет)**,
- на их работе **меньше сказывается дефицит азота и фосфора** в очищаемой среде, поскольку большинство клеток микроорганизмов находится в иммобилизованном состоянии,
- развитие процессов нитрификации-денитрификации и **удаление из системы избыточного азота**,
- **более устойчивы**, чем аэротенки, **к пониженным температурам и залповым сбросам**, поскольку иммобилизованные микроорганизмы сохраняют свою активность в течение более длительного времени и при более высоких концентрациях токсичного загрязнения по сравнению со свободными клетками.

### Недостатки перколяционных биофильтров:

- биохимическое окисление при высокой концентрации загрязнений в стоках в перколяционном фильтре лимитируется ограничениями диффузии в массопереносе кислорода из воздуха к биопленке, поэтому **окислительная мощность** перколяционных биофильтров существенно **меньше**, чем аэротенков;
- избыточный рост микроорганизмов биопленки и **заиливание биофильтра**;
- **предельно допустимая концентрация загрязнений в сточной воде, подаваемой на биофильтр** с объемной загрузкой, не должна превышать для капельных биофильтров 200–300 мг БПК<sub>п</sub>/л, для башенных 300–500 мг БПК<sub>п</sub>/л;
- подаваемые на биофильтры стоки должны быть **очищены от взвешенных частиц** флокуляцией, седиментацией в первичных **отстойниках**;
- **необходимо** равномерно орошать поверхность биофильтра сточными водами; для уменьшения неравномерности смачивания жидкость подают периодически с небольшими интервалами и распределяют равномерно по всей поверхности фильтра;
- при **противотоке сточной воды и воздуха** наиболее интенсивно развивающиеся микроорганизмы верхней части загрузки и потребляющие легкоусваиваемые субстраты контактируют с воздухом, обедненным по O<sub>2</sub> и насыщенным CO<sub>2</sub>. Этот недостаток отсутствует у закрытых биофильтров, в которых исходная вода и воздух подаются сверху вниз. Однако такие биофильтры с прямотоком имеют более сложную конструкцию по сравнению с фильтром с противоточным движением потоков;
- наличие **неприятного запаха** гниющей биопленки и размножения большого количества мошек и мух, поэтому биофильтры монтируются вдали от жилых зданий. При правильных условиях эксплуатации предотвращается заиливание и гниение, дурной запах и массовое размножение мух.

Они рентабельны при обработке сравнительно небольших количеств сточных вод, так как требуют больших площадей.

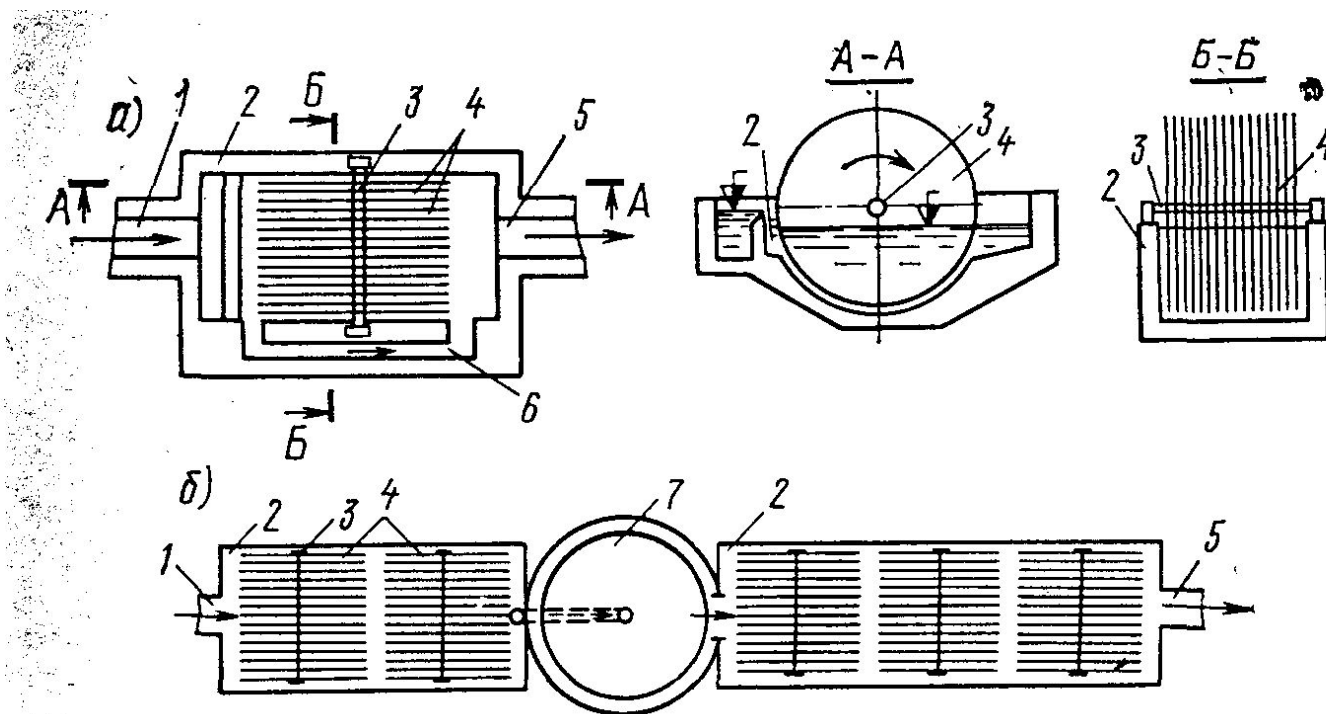
Значительный урон работе биофильтра наносится **длительными** (более 2 сут.) **перерывами** в орошении сточной водой. Длительные перерывы приводят к **высыханию биопленки** на поверхности загрузки и отмиранию микрофлоры поверхностного слоя. При возобновлении орошения начинается процесс восстановления биопленки, завершающийся лишь через 15–30 сут. Почти такое же время продолжается созревание биофильтра в пусковой период.

Отсутствие нитратов и растворенного  $O_2$  свидетельствует о перегрузке биофильтров и необходимости их **очистки**. Для этого рыхлят поверхность, промывают загрузку водой, хлорируют большими дозами хлора. Иногда необходимо осуществить **перезагрузку** биофильтра. Все работы по перезагрузке и промывке материала-носителя проводят в теплое время года, так как в это время происходит быстрое «созревание» фильтра. Пуск биофильтра осуществляют при температуре сточной воды более 10 °С.

При перегрузке фильтра по загрязнениям поступающие сточные воды разбавляют очищенной водой (рециркуляцией части воды).

# Погружные фильтры, биодиски, биобарабаны (биологические контакторы)

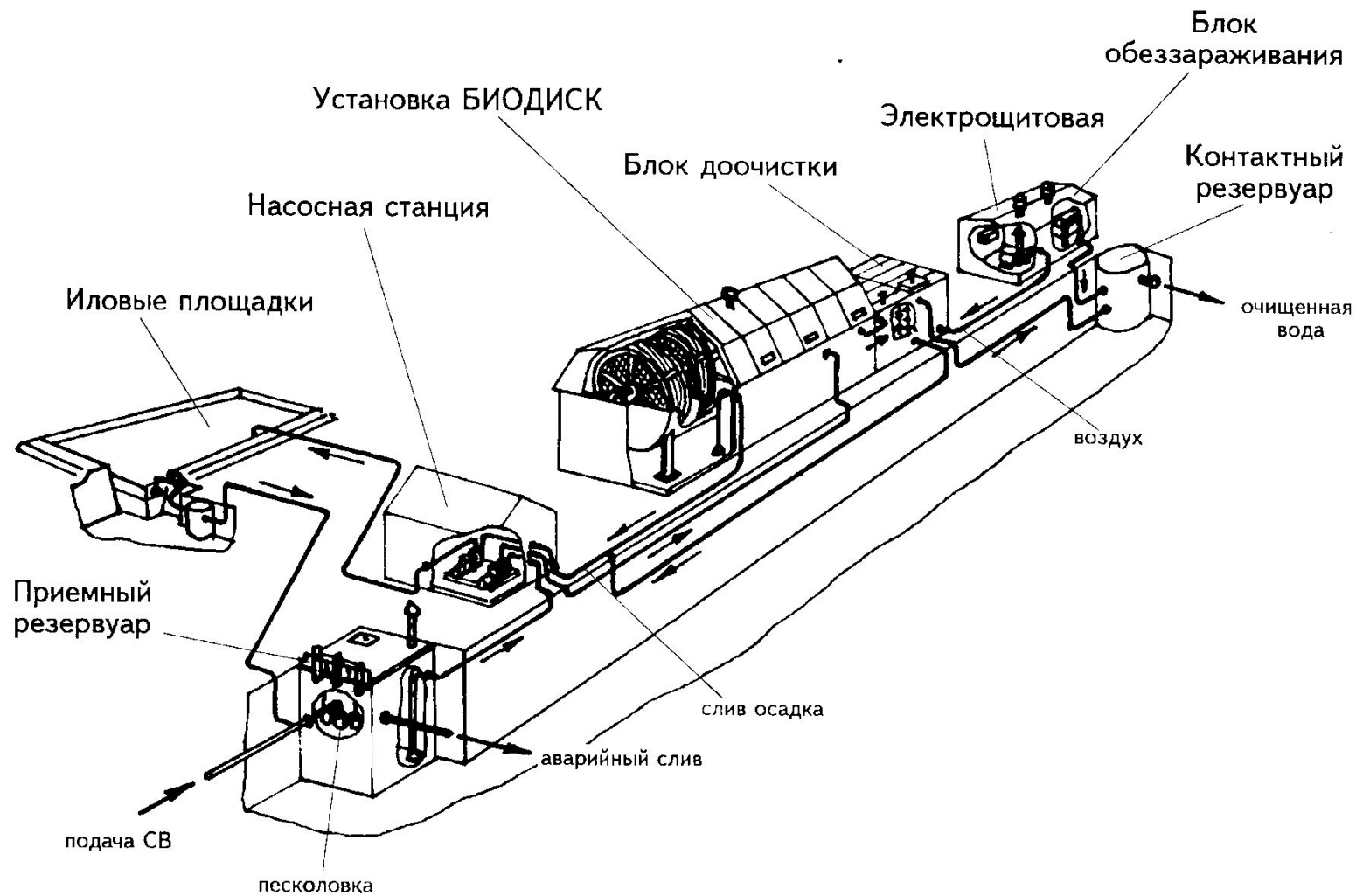
## Биофильтры с вращающимися дисками - биодиски



### Схема биодисков:

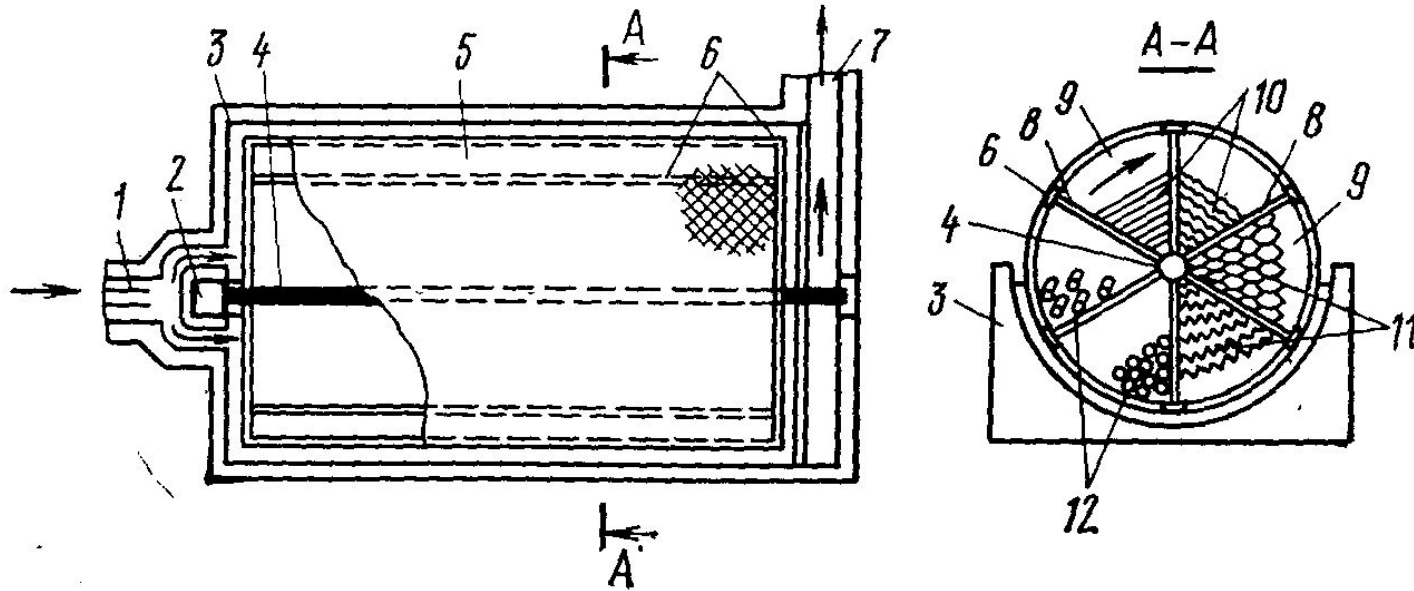
а – одноступенчатый погружной; б – пятиступенчатый погружной с промежуточным отстойником; 1 – подводящий лоток; 2 – резервуар; 3 – вал; 4 – диски; 5 – отводящий лоток; 6 – перепускной канал; 7 – отстойник





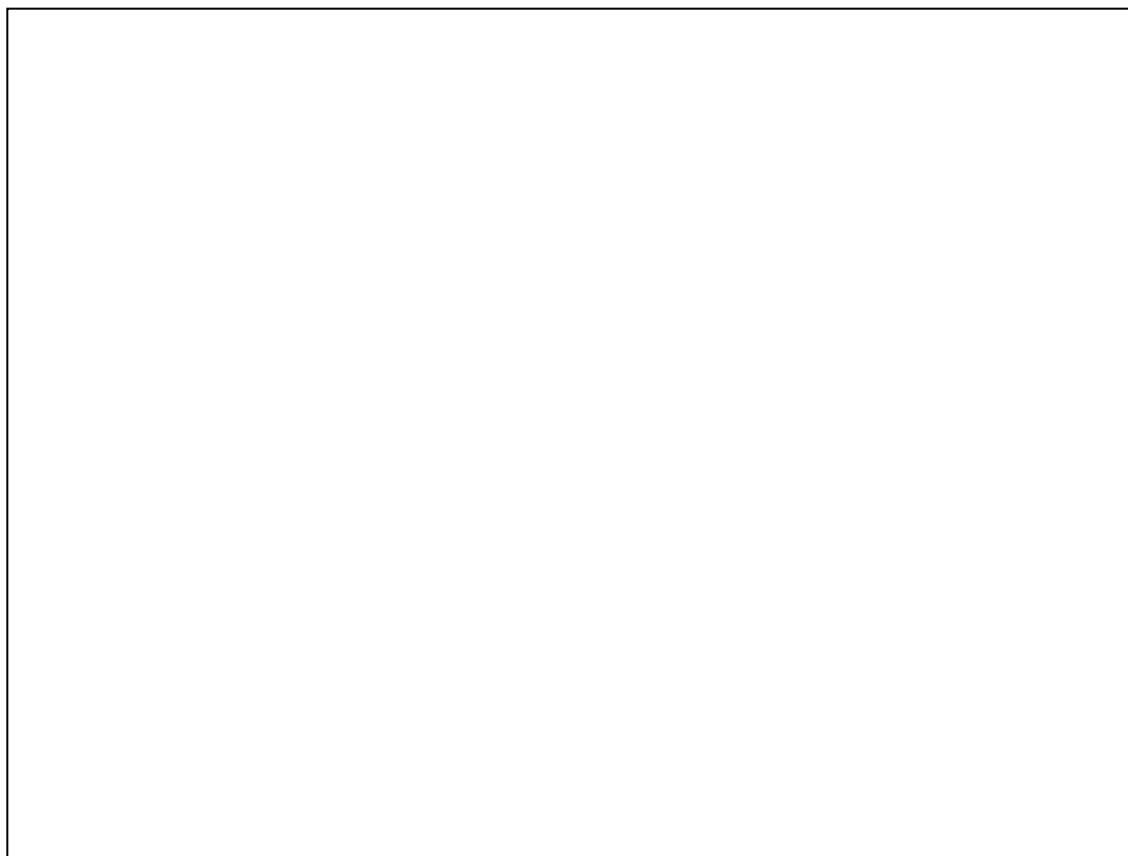
**Установка «Биодиск» для очистки сточных вод**

## Биобарабаны



### Односекционный погружной барабанный биофильтр:

1 – подводящий лоток; 2 – электродвигатель с редуктором; 3 – резервуар; 4 – вал; 5 – барабан из металлической сетки; 6 – каркас жесткости; 7 – отводящий лоток; 8 – перегородки; 9 – секторы барабана; 10 – загрузочные плоские и гофрированные листы; 11 – загрузочные блоки; 12 – засыпной материал (пластмассовые шарики, обрезки труб и др.)



**Погружной барабанный биофильтр с пластиковыми валами и носителями биомассы с поверхностью, покрытой материалом, способствующим обрастанию биопленкой**

## Достоинства биодисков и биобарабанов:

- высокая скорость биохимического окисления на единицу поверхности биопленки;
- возможность регулирования толщины биопленки;
- минимальные энергетические затраты, связанные только с преодолением трения в подшипниках дисков, дебалансированных весом сточной жидкости, задержанной биопленкой, выросшей на дисках. Энергоемкость такой системы в 3–3,5 раз ниже аэротенков (не более 0,3 кВт·ч на 1 кг снятой БПК<sub>5</sub>);
- простота в эксплуатации;
- не требуют больших перепадов высот при движении воды (как в других биофильтрах), а при наличии перепада 0,5–0,7 м пакет дисков может вращаться за счет энергии падающей струи воды;
- мало чувствительны к колебаниям расхода и концентрации сточных вод;
- могут продолжительно работать без притока сточной воды и отмирания биоценоза, что особенно важно для сооружений малой производительности;
- менее чувствительны, чем аэротенки, к токсичным веществам;
- меньше образуют избыточной биомассы и осадка;
- кратковременные залповые поступления сточных вод лишь незначительно ухудшают качество очистки. Пропускная способность этих биофильтров снижается только при длительных перегрузках сооружений.

## Недостатки биодисков и биобарабанов:

существенно **меньшая**, чем у аэротенков, **окислительная мощность**, так как удельное количество биомассы, приходящееся на единичный объем сооружения, у дисковых биофильтров значительно меньше;

**нитрификация и денитрификация** на дисковых биофильтрах **происходят менее интенсивно** по сравнению с аэротенками, поэтому биодиски не обеспечивают требуемый уровень удаления азота;

- в них **технически невозможно регулировать** и поддерживать необходимое **количество растворенного кислорода**;

- при длительной эксплуатации погружных систем возможно **заиливание** слизистой массой междискового пространства или загрузки биобарабанов и вследствие этого падение эффективности очистки, появление гнилостного запаха;

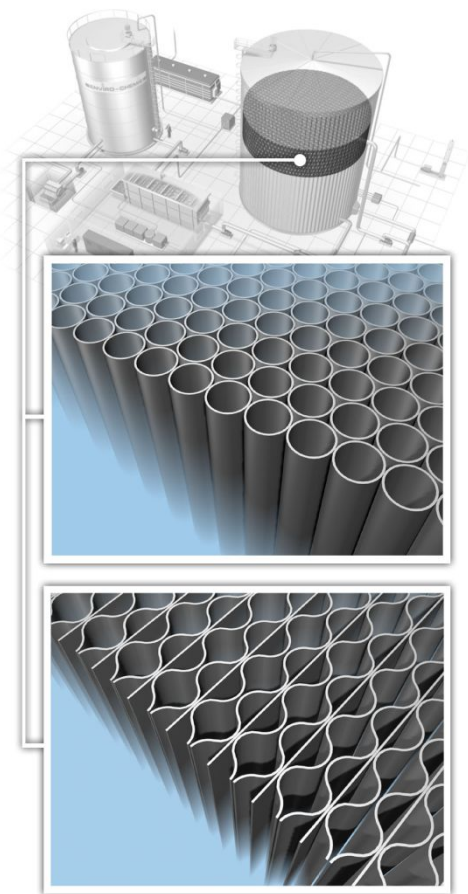
- **высокая материалоемкость**, поэтому они наиболее часто используются лишь при локальной очистке стоков отдельных небольших объектов (больницы, кемпинги, сельскохозяйственные фермы) с расходом до 500–1000 м<sup>3</sup>/сут., а также в качестве дополнительной стадии очистки после аэротенка на промышленных очистных сооружениях небольшой мощности.

## **Комбинированные сооружения (очистка с помощью биопленки и активного ила)**

- Биотенки
- Биосорберы
- Системы с подвижной загрузкой, с расширенным слоем, с псевдоожиженным слоем

**Биотенки** – сооружения с вторичным отстойником с аэрацией жидкости, с активным илом и загрузкой из различных материалов, на поверхности которой развивается биопленка. Жидкость с илом циркулирует в зазорах между загрузкой. Очистка сточных вод в этих сооружениях происходит как в свободном объеме, так и на поверхности загрузочного материала.

**Схема коридорного биотенка:**  
1 – трубопровод сточных вод; 2 – воздуховод; 3 – загрузка над аэратором; 4 – аэратор; 5 – основная загрузка; 6 – направляющие



**А**



**Б**

**Погружные носители для биотенков:**

**а – внутреннее устройство погружных носителей биомассы из пластика;**

**б – погружные носители, обросшие биомассой**

## **Загрузка биотенка для доочистки сточных вод**



Биотенки применяют для очистки сточных вод с **высокой концентрацией органических веществ** или при необходимости использования медленно растущих микроорганизмов, которые не могут накапливаться в режиме глубокой очистки воды от органических загрязнений и соединений азота. Они **эффективны при резких колебаниях состава поступающих сточных вод**, для удаления **взвешенных органических веществ**, при очистке сточных вод, склонных к образованию **вспухающего активного ила** с высоким иловым индексом, например, сточных вод молокоперерабатывающих предприятий, лучше **переносят перерывы** в подаче воды или залповые выбросы.

#### **Недостатки биотенков:**

- потенциальная возможность **образования анаэробных зон** внутри биопленки из-за массообменных ограничений и, как следствие, **нестабильность работы** сооружения, а также сложность эксплуатации;
- **отмершую биопленку невозможно удалить из биотенка без его опорожнения и промывки загрузки**. Извлечение же загрузки из сооружения с целью промывки – операция крайне трудоемкая и создающая вокруг сооружений антисанитарную обстановку;
- **сложно изменить концентрацию ила в биотенке**, что ограничивает возможности регулирования качества очистки в этом сооружении по сравнению с аэротенком.

**Биосорбер** – сочетание адсорбции загрязнений на поверхности загрузки, например, на основе активных углей, и биоочистки.

При очистке загрязнения-токсиканты адсорбируются сорбентом, и в системе, с одной стороны, **уменьшается ингибирующее действие токсичных веществ на биоценоз**, а с другой, при низких концентрациях субстратов в сточной воде в слое, граничащем с поверхностью сорбента, **повышаются локальные концентрации и ускоряется разложение субстрата**.

**Недостатки биоадсорберов со слоем адсорбента:**

- обрастание сорбента биопленкой микроорганизмов и закупоривание микропор;
- сравнительно короткий срок службы сорбента;
- необходимость утилизации или обезвреживания сорбента вместе с избыточным активным илом – в биосорбционных очистных установках на 1 г порошкообразного активного угля приходится 2,5–3,0 г биомассы активного ила;
- изнашивание и вынос части сорбента с выходящим потоком сточных вод (при внесении сорбента в поток сточных вод);
- необходимость наличия, как и в классическом аэротенке, вторичного отстойника (при внесении сорбента в поток сточных вод).

## **Реактор с псевдооживленной насадкой** (реактор флюидного типа, от англ. *fluidized-bed reactor, fluid-bed reactor, FBR*)

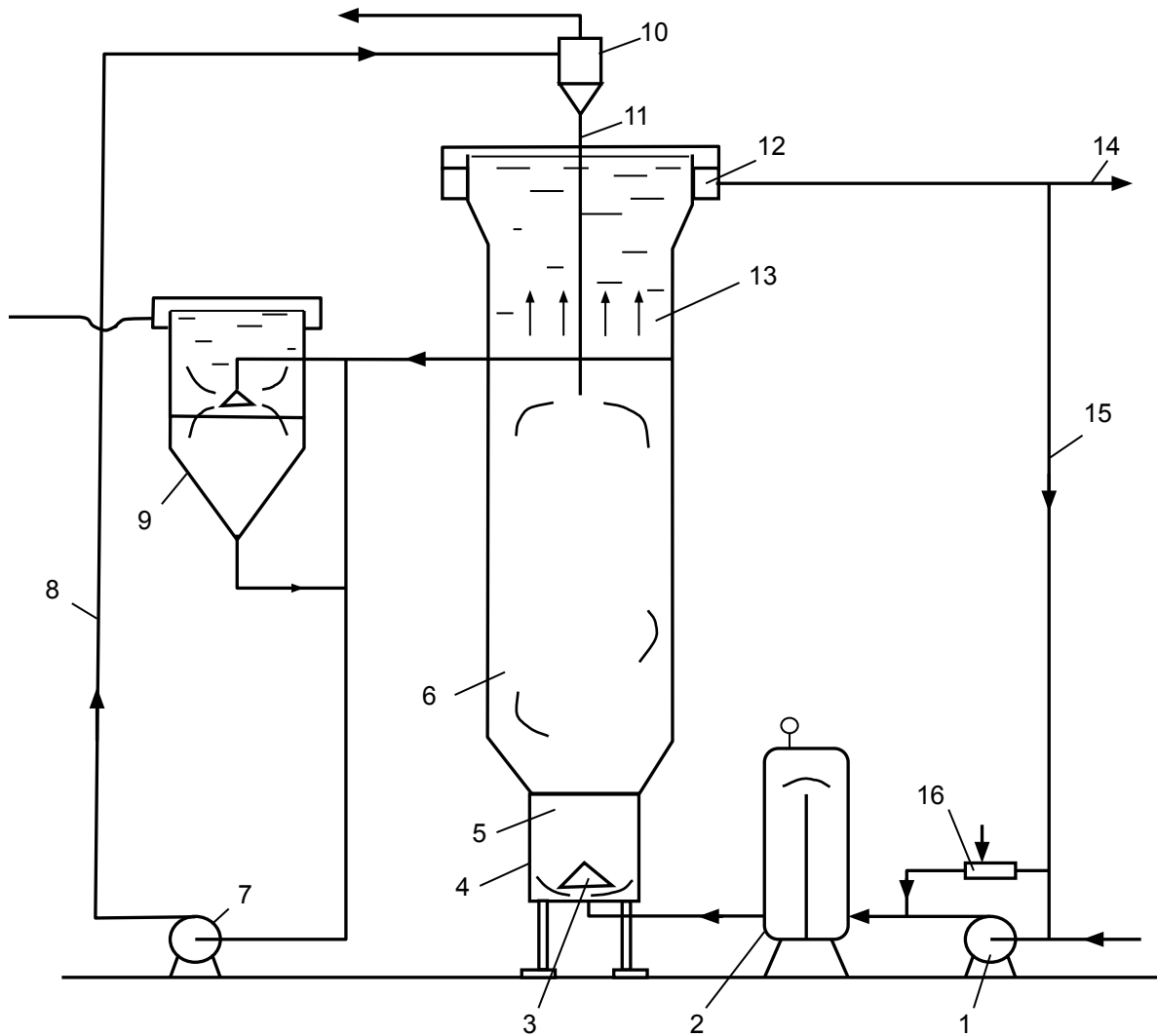
Биологическая очистка протекает во взвешенном слое носителя с прикрепленными к нему микроорганизмами. Частицы носителя с микроорганизмами более тяжелые, чем флоккулы активного ила или частицы биопленки, быстрее оседают и легче удерживаются в реакторе.

В FB-реакторе процесс очистки резко ускоряется за счет обеспечения большой удельной поверхности носителя (в 30–200 раз выше по сравнению с загрузкой перколяционных или дисковых биофильтров), на котором закрепляются микроорганизмы, и обеспечения высоких массообменных характеристик для снабжения процесса кислородом.

Носитель: песок, стеклянная дробь, активный уголь, антрацитовая крошка, дробленый керамзит, различные пластмассы. Реактор аэрируется обычно прокачиванием его содержимого через выносной контур, в который подается воздух или кислород. В ряде случаев воздух или кислород подаются непосредственно в реактор.

### **Недостатки реакторов с псевдооживленной насадкой:**

- сложное инженерное обеспечение;
- высокие энергозатраты на создание псевдооживленного слоя;
- вынос и истирание частиц загрузки.



**Схема установки ВНИИ ВОДГЕО с псевдооживленным слоем песчаной загрузки:**

**1 – подающий насос; 2 – сатуратор; 3 – отражающий конус; 4 – реактор; 5 – чистый песок; 6 – зона взвешенного песка с прикрепленными микроорганизмами; 7 – песковый насос; 8 – пульпопровод; 9 – илоуплотнитель; 10 – напорный гидроциклон; 11 – насадка; 12 – водосливной лоток; 13 – зона осветления; 14 – сброс очищенной воды; 15 – рециркуляционный трубопровод; 16 – эжектор**

## Влияние условий среды на биологическую очистку

### Температура.

Большинство очистных сооружений аэробного типа работают под открытым небом. Температура в них не регулируется и изменяется циклически в зависимости от времени года и климатических условий – от 2–5 °С в зимний период до 25–35 °С летом.

Снижение температуры от 20 до 6 °С приводит к падению скорости очистки в 2 раза, при этом нитрификация замедляется более существенно, снижается флокулирующая способность микроорганизмов, что приводит к вымыванию активного ила из систем вторичных отстойников. Поскольку удельная скорость роста нитрификаторов ниже, чем гетеротрофов, в первую очередь из системы вымываются нитрификаторы. Поэтому в зимнее время повышают концентрацию активного ила, его возраст, увеличивая долю рециркулируемого ила, и повышают время пребывания сточных вод в системе очистки.

Изменение температуры от 20 до 37 °С повышает скорость очистки в 2–3 раза, в биоценозе преимущественно развиваются мезофильные и термофильные формы микроорганизмов, возрастает полнота очистки. Однако при повышении температуры снижается растворимость кислорода в воде, и требуется более интенсивная аэрация для обеспечения микроорганизмов кислородом. Резкие изменения даже в пределах от 25 до 35 °С сказываются на процессе очистки отрицательно.

### pH.

Так как в ценозах активного ила присутствуют, в основном, бактерии, то pH в воде очистных сооружений должен быть близким к нейтральным значениям (от 5,5 до 8,5). Как правило, pH не регулируется, поскольку объемы очищаемой воды велики. Вода благодаря наличию бикарбонатных ионов имеет достаточную буферную емкость, а микроорганизмы способны к авторегулированию pH. В очистных сооружениях рекомендуется смешивать сточные воды с различным значением pH, чтобы pH был близок к нейтральному значению. При pH ниже 5 и выше 9 эффективность биологической очистки, как правило, резко снижается.

**pO<sub>2</sub>.**

При снижении содержания растворенного кислорода в воде ниже предельного уровня скорости роста ила и окисления загрязнений падают, накапливаются продукты жизнедеятельности микроорганизмов. Низкое содержание O<sub>2</sub> неблагоприятно влияет на флокуляцию и седиментацию активного ила, приводит к накоплению нитчатых бактерий. При концентрации растворенного кислорода <0,5 мг/л очистка ухудшается. При концентрации >1–2 мг/л скорость потребления кислорода микроорганизмами активного ила не меняется существенно и, в принципе, нет необходимости поддерживать его концентрацию выше этого значения. Однако из-за диффузионных ограничений в переносе кислорода в крупные флокулы активного ила концентрация растворенного кислорода должна поддерживаться на уровне 2–5 мг/л. Для полной нитрификации концентрация растворенного кислорода должна быть >2 мг/л. Поддержание концентрации растворенного кислорода >6 мг/л способствует повышенному пенообразованию и приводит к перерасходу электроэнергии на аэрацию.

### **Перемешивание.**

Перемешивание сточной воды и активного ила в аэротенке обеспечивает поддержание активного ила во взвешенном состоянии и создает благоприятные условия для массопереноса компонентов питания и O<sub>2</sub>.

Интенсификация перемешивания до определенных пределов приводит к разрушению слишком крупных хлопьев активного ила, что способствует увеличению поверхности контакта микроорганизмов со средой, однако уменьшение размеров хлопьев не сказывается отрицательно на скорости осаждения ила.

Для аэротенков минимальная скорость водной суспензии, при которой не наблюдается заиливание днища, составляет около 0,022 м/с. Для обеспечения незаиливания необходимы значения удельной мощности аэрации около 10 Вт/м<sup>3</sup>.

## Биогенные элементы.

Недостаток N и P снижает эффективность процесса очистки и приводит к накоплению нитчатых форм бактерий.

Необходимое количество азота и фосфора можно рассчитать теоретически (в зависимости от органического субстрата).

Соотношение  $\text{БПК}_n : \text{N} : \text{P}$  находится в пределах  $100 : 3-7 : 0,8-1,5$ .

Ионы  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , как правило, присутствуют в сточных водах в достаточном количестве. При нехватке биогенных элементов промышленные стоки смешивают с бытовыми, содержащими N и P в избытке, или в очищаемую сточную воду добавляют водорастворимые соли:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$ , аммофос, суперфосфат, а также  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и т. д. Соли не должны образовывать между собой нерастворимые в воде соединения и резко менять значение pH.

**Концентрации биогенных элементов**, необходимые для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов активного ила при значении  $\text{БПК}_n$  до 500 мг/л:

**фосфор** – 2–4 мг/л,

**аммонийный азот** – 15–25 мг/л,

**калий** – 5–8 мг/л.

Общая концентрация растворенных в стоках солей не должна превышать 10 г/л.

Для биофильтров и биотенков дефицит N и P меньше сказывается на степени очистки, поскольку большинство клеток находится в иммобилизованном покоящемся состоянии, но могут иметь высокую гидролитическую и окислительную активность ферментов и, таким образом, способность разлагать субстрат при дефиците N и P.

### **Концентрация активного ила.**

Повышение концентрации ( $X$ ) микроорганизмов может в несколько раз увеличить окислительную мощность аэротенков, но зависимость  $N_x = f(X)$  гиперболическая, с насыщением в области  $X \sim 15\text{--}20 \text{ кг/м}^3$  (для городских сточных вод). Однако концентрация активного ила не может быть слишком высокой, так как при  $X > 3\text{--}4 \text{ кг/м}^3$  разделение ила во вторичных отстойниках менее эффективное, наблюдается повышенный вынос ила, превышающий допустимые значения. При повышении  $X$  увеличивается время пребывания ила в системе аэротенк – вторичный отстойник и ухудшаются условия его существования: сокращается количество питательных веществ на единицу биомассы, затрудняется массоперенос питательных веществ и кислорода, накапливаются продукты обмена, уменьшается удельная скорость роста, сокращается прирост ила, ил стареет, в нем растет число мертвых клеток, он теряет активность.

### **Возраст ила.**

Удельная скорость роста нитрификаторов существенно ниже удельной скорости роста гетеротрофов, поэтому увеличение возраста ила приводит к повышению численности нитрификаторов в активном иле и скорости нитрификации. Однако применение для биологической очистки «старого» активного ила приводит к слизиобразованию, вздуванию и замедлению скорости его осаждения. Во многих случаях для очистки оптимален активный ил двух-, трехсуточного возраста. В случае проведения очистки с удалением азота и фосфора возраст ила должен обычно составлять 6–10 сут.

### **Нагрузка по органическому веществу и гидравлическая нагрузка (по сточным водам).**

Чем выше нагрузка, тем ниже степень очистки. Значительное колебание расхода сточной воды в течение суток неблагоприятно влияет на степень очистки.

При эксплуатации биофильтра малая гидравлическая нагрузка вызывает скопление биопленки в теле биофильтра, неравномерное смачивание частиц загрузки биофильтра.

Высокая гидравлическая нагрузка приводит к значительному выносу биопленки.

Повысить качество очистки при увеличении нагрузки можно путем рециркуляции активного ила, увеличения интенсивности аэрации, а для биофильтров также путем рециркуляции очищаемой сточной воды (в режиме неполного смачивания поверхности носителя) или использования режима двойного фильтрования.



## **Запуск и основные контролируемые параметры процессов аэробной очистки**

### **Пуск аэротенка.**

При введении аэротенка в эксплуатацию или возобновлении его работы после перерыва в него вносят затравку микроорганизмов активного ила, взятую из других очистных сооружений с близким спектром загрязнений, либо из отстойников, либо из других источников (речной ил, лабораторный консорциум и др.). Сточную воду перекачивают в аэротенк, ил аэрируют до появления в нем нитратов и растворенного  $O_2$ , затем возобновляют подачу сточной воды. Нагрузку постепенно увеличивают, доводя ее до расчетной. Пуск аэротенка обычно проводят в теплый период года.

### **Основные контролируемые параметры при эксплуатации аэротенка:**

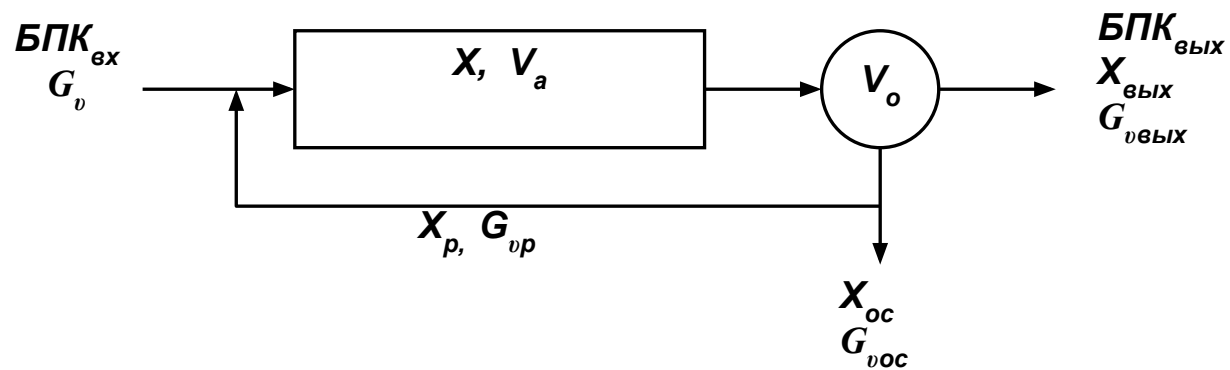
- расход поступающей сточной воды,
- расходы иловой смеси и воздуха,
- содержание активного ила в аэротенке,
- содержание растворенного кислорода в аэротенке, pH;
- ХПК, БПК,
- количество взвешенных твердых частиц и азота во входном потоке, в рабочей смеси и выходном потоке.

Во вторичных отстойниках контролируют заданный уровень ила, работу илососов.

### **Основные контролируемые параметры при эксплуатации биофильтра:**

- количество поступающей воды,
- качество поступающей и очищаемой воды по ХПК, БПК и взвешенным веществам,
- количество поданного воздуха,
- температура воды и воздуха,
- равномерность распределения сточной жидкости по поверхности загрузки.

## Показатели работы очистных сооружений



## Расчет биологической очистки

Исходные данные:

объем стоков  $G_V$  (м<sup>3</sup>/год, м<sup>3</sup>/сут), ПДК (мг/л), выход активного ила  $Y$  (кг/кг), состав сухого вещества субстрата (стоков) и активного ила

↓  
Определение объема аэротенка или анаэробного реактора  $V_A$

$$V_{\text{очистн. сооруж.}} = f(G_V, Q, t_{\text{пребывания}}, T - \text{возраст ила})$$

Например, для проточного хемостатного режима без рецикла ила

$$V = \frac{G_V}{Q} \rightarrow Q = \frac{G_V}{V} \quad Q = \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_S + S} \quad S = \frac{Q \cdot K_S}{\mu_{\max} - Q}$$

В данном случае  $S = \text{ПДК}$

Необходимо предусмотреть резерв мощности (колебания потока сточных вод 0,5-8 потока стока в сухой сезон – для атмосферных вод)

## Расчет материального баланса:

- определение выхода избыточного ила, расходов на минеральные соли, определение расходного коэффициента по кислороду на аэрацию  $\alpha_{O_2/S}$ ; определение выхода и состава биогаза (для анаэробных реакторов), расходов титрующих реагентов на поддержание pH.



## Массообменный расчет:

определение требуемого коэффициента массопереноса по кислороду  $K_{VO_2}$  на аэрацию; расчет или подбор системы аэрации; расчет затрат электроэнергии на аэрацию (руб./м<sup>3</sup> стока).

$$\frac{dO_2}{d\tau} = \alpha_X^{O_2} \frac{dX}{d\tau} = \alpha_X^{O_2} \mu X = \alpha_S^{O_2} \frac{dS}{d\tau} \quad \frac{\Delta O_2}{\Delta \tau} = \frac{\Delta БПК}{\tau_{\text{пребыв. сточн. воды}}}$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = K_{VO_2} (C_{ox}^* - C_{ox}) \quad K_{VO_2} = \frac{dO_2 / d\tau}{C_{ox}^* - C_{ox}}$$

**Подбор системы аэрации** с требуемым  $K_{vo_2}$  либо по таблицам, либо расчетным путем по критериальным уравнениям.

**Определение затрат электроэнергии** на аэрацию либо по таблицам (кВтч/кг  $O_2$  перенесенного), либо расчетным путем по критериальным уравнениям.

## **Теплообменный расчет и тепловой баланс:**

- определение теплоты жизнедеятельности, тепла перемешивания; температуры аэротенка, не замерзнет ли содержимое аэротенка зимой; расчет расхода биогаза на подогрев анаэробного реактора и отпускаемого на сторону.



**Определение эколого-экономического ущерба.**

**Подбор вспомогательного оборудования.**

**Оценка капитальных затрат на основные сооружения и вспомогательное оборудование.**

**Определение суммарных затрат на 1 м<sup>3</sup> очищаемой сточной воды.**



**Оптимизация технологии, затрат и эколого-экономической эффективности**

## Расчет ферментационного процесса

### Исходные данные:

объем отхода  $G_V$  (м<sup>3</sup>/год), время ферментации  $t_\phi$  (ч), выход продукта (биомассы)  $Y$  (кг/кг), содержание и состав сухого вещества субстрата (отхода), состав биомассы



Определение **объема** ферментера  $V_\phi$

$$V_{\text{ферментера}} = f(D), f(t_{\text{ферментации}})$$

Например, для проточного хемостатного режима без рецикла ила

$$V = \frac{G_V}{D} \quad \rightarrow \quad D = \frac{G_V}{V} \quad D = \mu = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_S + S} \quad S = \frac{D \cdot K_S}{\mu_{\max} - D}$$

Необходимо предусмотреть резерв по объему с учетом степени заполнения ферментера, количества рабочих дней, цикла ферментации (время выгрузку, мойку, загрузку, стерилизацию)

## Расчет материального баланса:

- определение расходов на органический субстрат, минеральные соли, титрующие реагенты, расходного коэффициента по кислороду на аэрацию  $\alpha_x^{O_2}$ .
- определение затрат на субстрат, минеральные соли, титрующие реагенты на единицу продукции.

## Массообменный расчет:

определение требуемого коэффициента массопереноса по кислороду  $K_{V_{O_2}}$  на аэрацию; расчет или подбор системы аэрации; расчет затрат электроэнергии на аэрацию (руб./м<sup>3</sup> стока).

$$\frac{dO_2}{d\tau} = \alpha_X^{O_2} \frac{dX}{d\tau} = \alpha_X^{O_2} \mu X = \alpha_S^{O_2} \frac{dS}{d\tau}$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = K_{V_{O_2}} (C_{ox}^* - C_{ox}) \quad K_{V_{O_2}} = \frac{dO_2 / d\tau}{C_{ox}^* - C_{ox}}$$

**Подбор системы аэрации** с требуемым  $K_{V_{O_2}}$  либо по таблицам, либо расчетным путем по критериальным уравнениям (для периодических процессов определить аэрацию по максимальному требуемому  $K_{V_{O_2}}$  в момент максимального потребления кислорода, чтобы не было лимитирования роста на всех стадиях роста и биосинтеза).

**Определение затрат электроэнергии** (в среднем за процесс) на аэрацию либо по таблицам (кВтч/кг  $O_2$  перенесенного), либо расчетным путем по критериальным уравнениям.

## **Теплообменный расчет и тепловой баланс:**

- определение теплоты жизнедеятельности, тепла перемешивания; расчет теплообменника; расчет затрат на охлаждение; расчет расхода пара на стерилизацию.



## **Подбор вспомогательного оборудования.**

**Оценка капитальных затрат на основные сооружения (биореактор) и вспомогательное оборудование.**

## **Определение суммарных затрат на единицу продукции.**



**Оптимизация технологии, экономических затрат и эколого-экономической эффективности**