

## Лекции № 9, 10 Микробиология воды

### Общие сведения о микроорганизмах

**Микробиология** (от греч. *micros* — малый, *bios* — жизнь и *logos* — наука) — это наука об организмах, которые невозможно рассмотреть невооруженным глазом.

Микробиология изучает живые организмы, размер которых менее 1 мм (размеры микроорганизмов измеряются микрометрами (мкм) или нанометрами (нм)) — это вирусы, бактерии, грибы и водоросли, простейшие и некоторые многоклеточные животные.

Основная единица в систематике микроорганизмов, как и других живых организмов — вид. **Вид** объединяет микроорганизмы, имеющие общее происхождение, общие морфологические и физиологические признаки и приспособленные к существованию в определенных условиях окружающей среды. Виды объединяются в группы (таксоны) более высокого ранга — **роды**, которые, в свою очередь, группируются в **семейства**, семейства — в **порядки**, порядки — в **классы**. Высший уровень таксонометрической иерархии — **царство**.

# ЦАРСТВО-ОТДЕЛ-КЛАСС-ПОРЯДОК-СЕМЕЙСТВО-РОД-ВИД

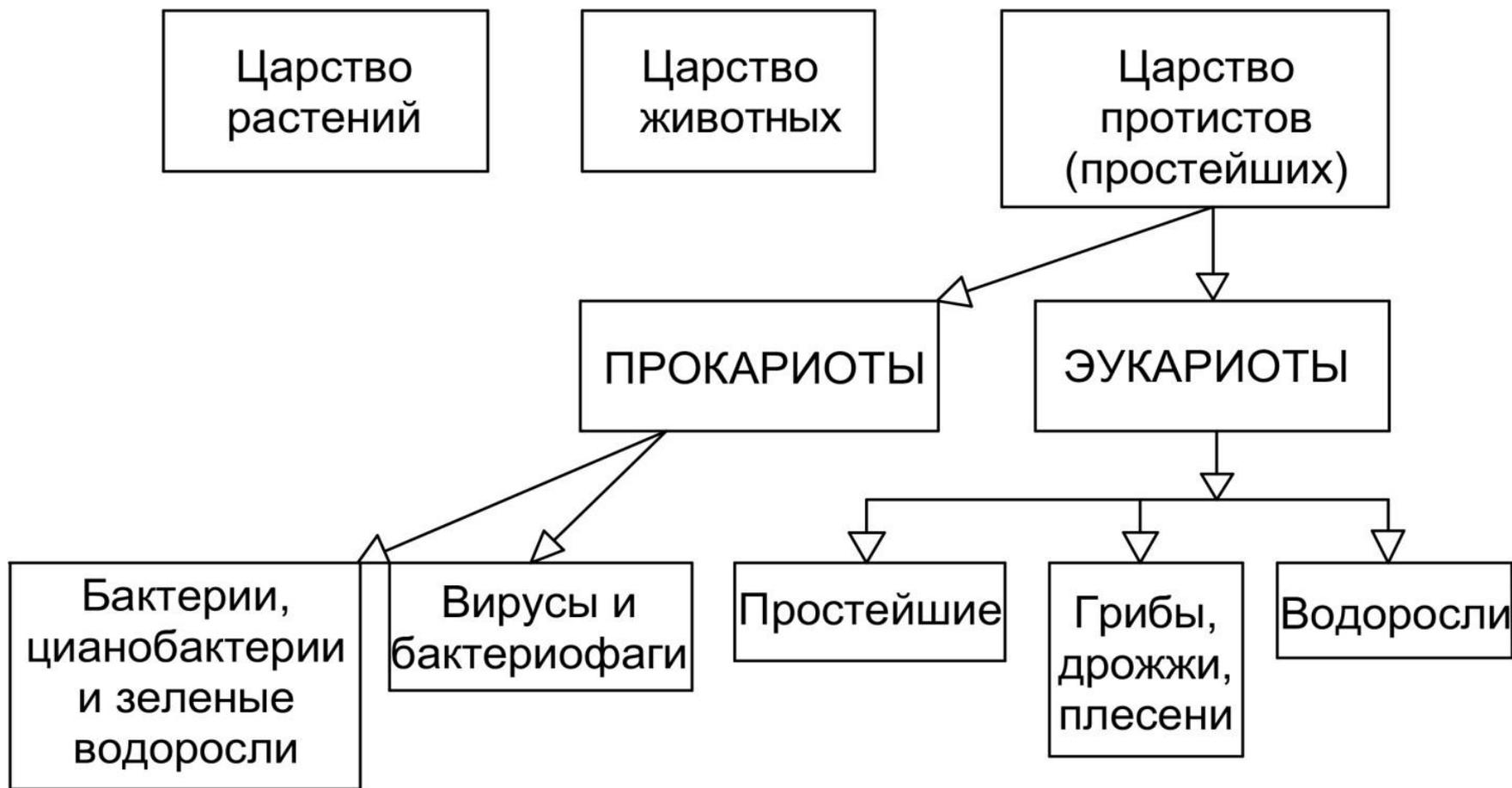


Рис. Микроорганизмы в системе живого мира

## **Основные принципы систематики микроорганизмов**

Видовое название микроорганизма складывается из двух слов: первое обозначает род и пишется с прописной буквы, второе обозначает вид, к которому принадлежит микроорганизм, и пишется со строчной буквы, например *Esherchia coli* (кишечная палочка), *Clostridium tetani* (столбнячная палочка), *Paramecium caudatum* (инфузория туфелька).

### **Группы микроорганизмов:**

I— **эукариоты, или высшие протисты**, клетки которых по своему строению сходны с клетками высших животных и растений, т.е. имеют обособленное ядро, содержащее заключенную в хромосомах наследственную информацию.

II – **прокариоты, или низшие протисты**, клетки которых не имеют четко сформированного ядра, его заменяют ядроподобные образования — нуклеоиды. К прокариотам относятся бактерии, сине-зеленые водоросли, риккетсии, микоплазмы и др. (см. рис.).

## **Наиболее часто встречаются в природных и сточных водах:**

1. **Ультрамикробы (вирусы)** – микроорганизмы, видимые только под электронным микроскопом (увеличение в 45000 раз), не имеют клеточного строения, размножаются только внутри клеток живого организма. Вызывают следующие заболевания: гепатит, энцефалит, оспа, бешенство. Они обладают большой жизнеспособностью (могут выжить в запаянной ампуле в темноте, в течение нескольких лет, перенести  $t$  до  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , спирт 50 %). Встречаются в природных и сточных водах.

Промежуточное положение между ультрамикробами и бактериями занимают **риккетсии**.

2. **Бактерии** – основной объект изучения микробиологии. Одноклеточные бактерии видимы под микроскопом. Размеры соответствуют 0,4–10 мкм.

### **Виды бактерий по внешнему виду:**

- шаровидные (кокки);
- палочкообразные (цилиндрические);
- извитые (спириллы, спирохеты).

Многоклеточные бактерии видимы невооруженным глазом, это так называемые **нитчатые бактерии** – железо- и серобактерии. От спор освобождаются стерилизацией ( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 атм., 20 минут и более).

**Железобактерии** покрыты слизистой оболочкой, состоящей из  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Бактерии, образующие споры, называются **бациллами**, а не образующие просто бактериями. Споры выдерживают воздействие температуры в  $100\text{ }^\circ\text{C}$  в течение нескольких часов, высушивание, действие ядов. Попадая в благоприятные условия, бактерия оживает.

3. **Актиномицеты (лучистые грибы)** занимают промежуточное положение между бактериями и грибами. Продукты их жизнедеятельности в условиях затрудненной аэрации вызывают появление неприятных запахов и привкусов у воды.

4. **Грибы** относятся к бесхлорофильным растениям, не нуждающимся в солнечной энергии. Грибы, развивающиеся в виде нитевидных форм (мицелий), называются **плесени**. Те, которые развиваются в виде одноклеточных элементов, называются **дрожжи**. Четкого разграничения между плесенями и дрожжами нет, т.к. при изменении внешних условий могут переходить из одной формы в другую. Так, при низких температурах, все грибы переходят в плесени, отсутствие кислорода способствует развитию дрожжевых клеток. Некоторые вещества, например сивушные масла, способствуют переходу от дрожжевых в нитевидные формы. Грибы обладают высокой ферментативной активностью, что используется в пищевой промышленности и санитарной технике.

5. **Водоросли** – широкий класс организмов, которые относятся к низшим растениям, содержащим хлорофилл и имеющим примитивное строение тела, не расчлененное на стебель, листья и корни. Они бывают одноклеточной, многоклеточной и колониальной формы. Размножаются вегетативным, бесполовым и половым путем. При вегетативном размножении клетка делится пополам, при бесполовом – не несколько частей. Главное место обитания водорослей – водоемы. Их развитие связано с сезонами года, наличием питательных веществ, солевого состава воды. Например, зимой больше диатомовых водорослей, а летом – зеленых и сине-зеленых. Весной и осенью – переходное состояние.

6. **Простейшие** – одноклеточные организмы животного происхождения. Размеры большинства из них в 100 раз больше размера бактерий. Простейшие размножаются делением клеток.

В цитоплазме простейших содержатся вакуоли, выполняющие различные функции, например пищеварительная вакуоль, сократительная вакуоль (выводит продукты жизнедеятельности), дыхание осуществляется за счет кислорода, растворенного в воде.

Ряд простейших при попадании в неблагоприятные условия превращаются в цисты, имеющие плотную оболочку, тем самым приобретая устойчивость к воздействию внешних факторов.

При высыхании прудов и озер цисты разносятся ветром и поэтому встречаются повсюду: в почве, пыли, водоемах, человеческом организме, в сточных водах и т. д. Они принимают активное участие в минерализации органических веществ в естественных и искусственных условиях очистки природных и сточных вод. Нередко цисты являются источниками заболеваний человека и животных (малярия, дизентерия, кишечная амеба).

7. **Коловратки** – многоклеточные животные микроорганизмы, имеющие размеры до 2 мкм. Они имеют примитивную пищеварительную систему (ротовая полость, глотка, желудок, узкая кишка), дыхательной и кровеносной системы нет. Питаются микроорганизмами (бактерии, простейшие), частицами взвешенных органических веществ.

Коловратки – **аэробы**, они чувствительны к недостатку кислорода, предельной температурой для них является 50 °С, при неблагоприятных условиях образуют цисты. Коловратки чувствительны к изменению активной реакции среды. Они являются показательными организмами, характеризующими работу очистных сооружений в аэробных условиях.

В очистных сооружениях обитают также более сложные живые микроорганизмы: черви, ракообразные и т.п.

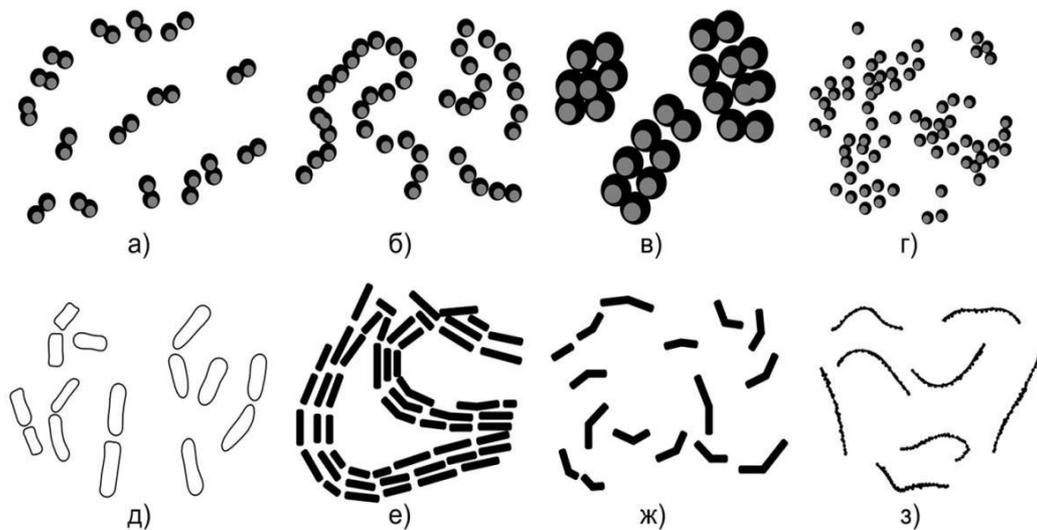


Рис. Основные виды бактерий:  
 а — диплококки; б — стрептококки; в — сарцины;  
 г — стафилококки; д — бациллы; е — вибрионы; ж — спирохеты

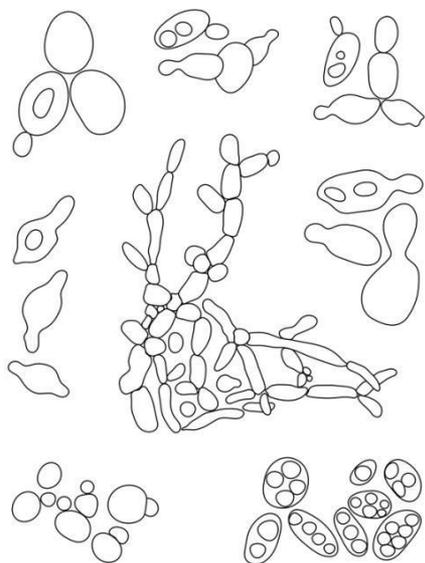


Рис. Дрожжи

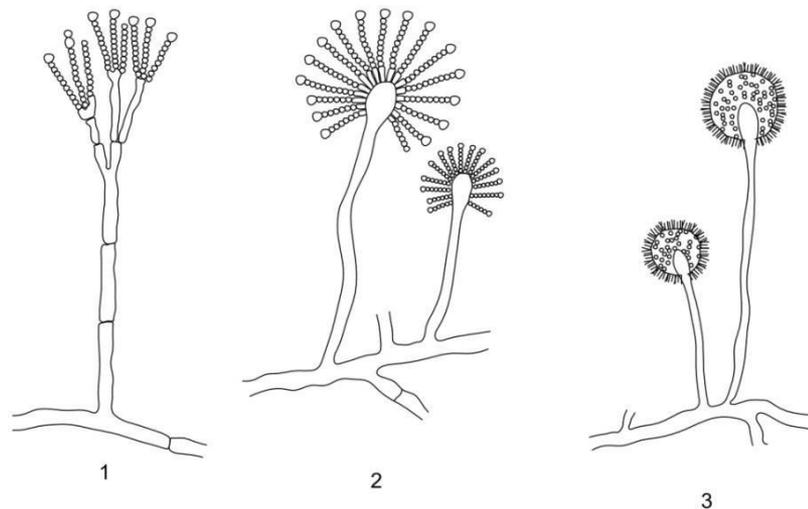


Рис. Плесневые грибы:  
 1 — Penicillium; 2 — Aspergillus; 3 — Мисор

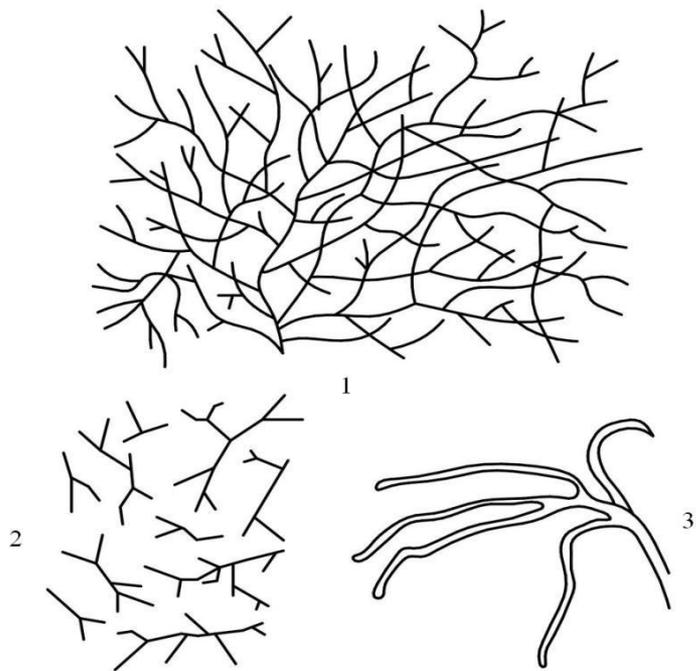


Рис. Актиномицеты:  
 1 — мицелиальная форма; 2  
 — немцелиальная форма; 3  
 — споры

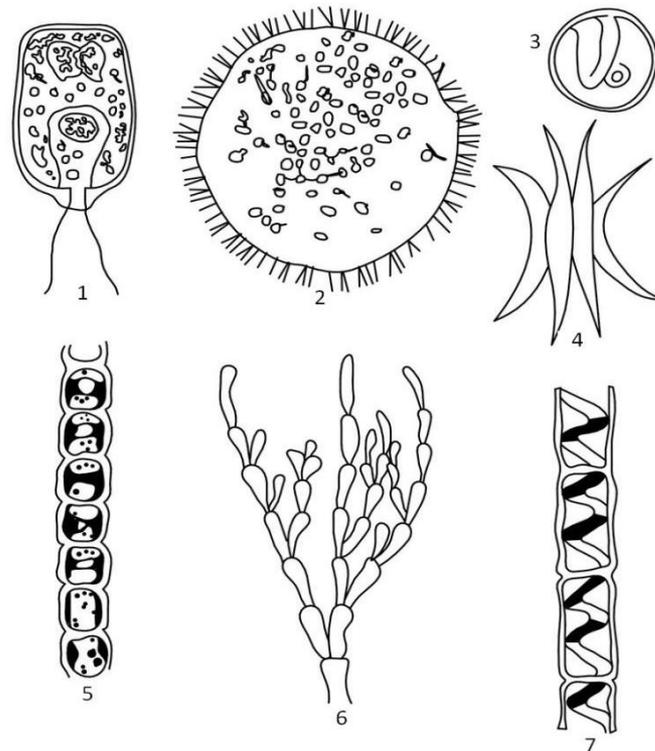


Рис. Зеленые водоросли:  
 1 – *Clamidomonas simplex*; 2 – *Volvox aureus*; 3 – *Chlorella vulgaris*;  
 4 – *Scenedesmus acuminatus*; 5 – *Ulotrix zonata*; 6 – *Cladophora glomerata*; 7 –  
*Spirogira porticaills*

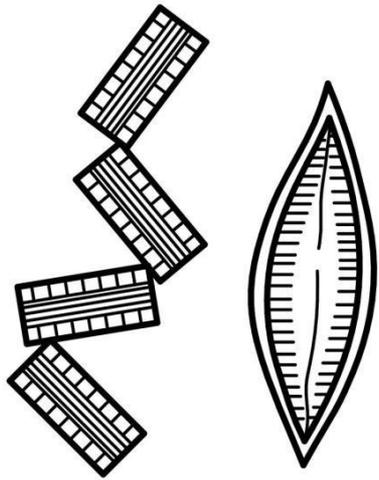


Рис. Диатомовые водоросли

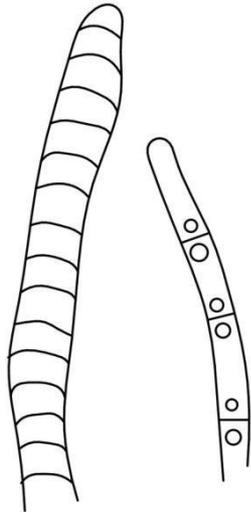


Рис. Синезеленые водоросли

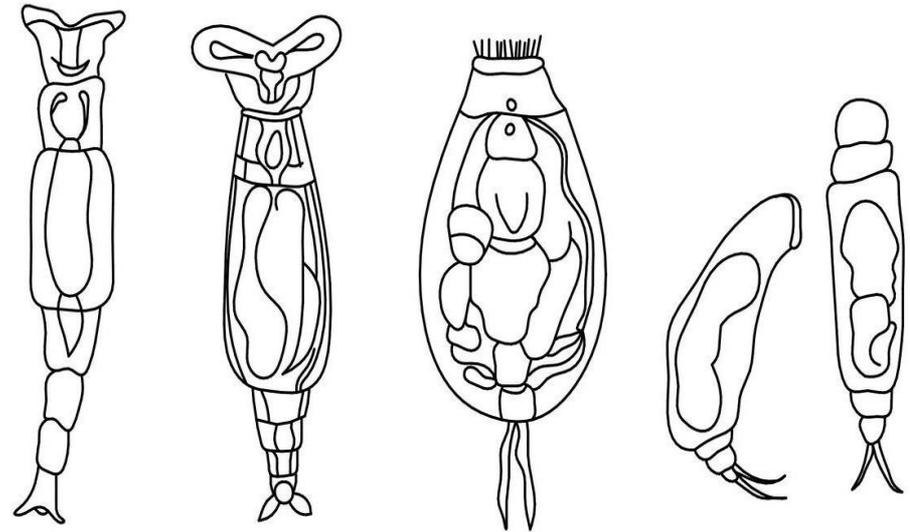


Рис. Колероватки:

а — *Philodina roseola*; б — *Callidina vorax*;  
в — *Cathypna luna*; г — *Notommata ansata*

## **Химический состав микроорганизмов**

Микроорганизмы состоят на 75–90 % из **воды**, связанной с коллоидными веществами, из одних и тех же **элементов**:

- C, N, H, O – 98 %;
- P, S, Cl, K, Mg, Na, Ca, Fe – 1,9 %;
- все остальные – 0,1 %.

Эти элементы входят в состав микроорганизмов, в основном, в виде солей  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ .

**Белки** состоят из 20 аминокислот, содержание их колеблется от 8 до 14 %. Выполняют защитные, транспортные, двигательные, сигнальные функции и являются строительным материалом.

**Жиры** – это энергетический материал, содержание его 1–4 %, иногда достигает 30 % и более.

**Углеводы** – источник энергии.

**Микроэлементы** – Mn, I, Co, Zn и другие.

## **Строение клеток микроорганизмов**

Микробная клетка покрыта оболочкой, которая сохраняет форму бактерий, обеспечивает защиту микроба от внешних воздействий, а самое главное – через оболочку происходит проникновение питательных веществ в клетку и удаление продуктов жизнедеятельности.

Содержимое микробных клеток состоит из цитоплазмы, разнообразной по своему составу включений (жиры, углеводы) и ядра (генокод).

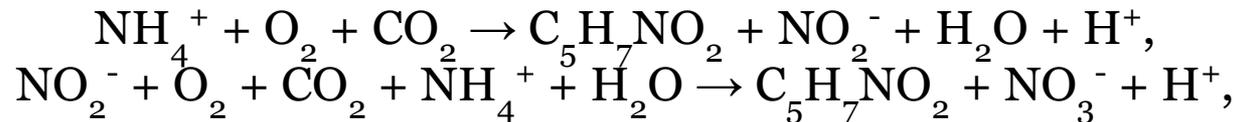
Обычно внутри бактериальной клетки концентрация растворенных веществ больше, чем во внешней среде. Эта разность создает осмотическое давление позволяющее проникать в клетку питательным веществам.

Когда микробная клетка находится в дистиллированной воде, вода проникает внутрь клетки, затем клетка погибает; если клетка находится в очень концентрированном растворе, то вода уходит из клетки, что тоже влечет за собой ее гибель (**явление плазмолиза**).

## Питание микроорганизмов

По способу питания микробы делятся на 2 группы:

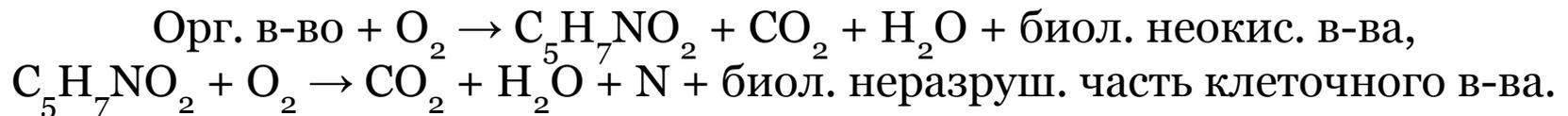
1. **Автотрофы** (аυτοζ – сам, τροφή – пища) – к ним относятся бактерии, водоросли, использующие углерод неорганических соединений (из  $\text{CO}_2$  и карбонатов) – железобактерии:



где  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  – символ органического состава клетки микроорганизма.

Питаются микроорганизмами (бактерии, простейшие), частицами взвешенных органических веществ.

2. **Гетеротрофы** – микроорганизмы, использующие для синтеза органических веществ своего организма углерод органических соединений:



## **В свою очередь они делятся на:**

- сапрофиты («сапро» - гнилой) – грибы;
- паразиты (развиваются в живых организмах) – патогенные микроорганизмы.

При обмене веществ (питании клеток) питательные вещества проникают через мембрану, а в случае простейших и колониальных – через пищевую вакуоль.

Катализаторами этих биохимических реакций являются ферменты – биокатализаторы, влияющие только на узконаправленные процессы:

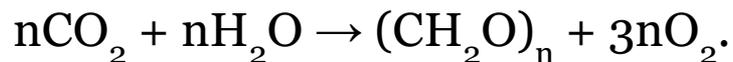
- **оксидоредуктазы** – ферменты, ускоряющие ОВР;
- **гидролазы** – реакции с водой;
- **изомеразы** – реакции изомеризации.

**Экзоферменты** – ферменты, выделяемые клеткой для расщепления сложных органических соединений до прохождения через мембрану, т.е. пищеварение начинается до проникновения внутрь клетки.

В основе жизнедеятельности микроорганизмов лежит конструктивный (построение новых клеток) и энергетический обмен. Необходимую энергию клетки получают при биохимических превращениях химических веществ с высокой потенциальной энергией.

## Энергетические процессы микроорганизмов

1. **Фотосинтез.** В мире микроорганизмов энергию света используют водоросли, некоторые бактерии и простейшие. Фотосинтез водорослей сопровождается выделением кислорода, донором водорода в данном случае служит вода



Фотосинтез бактерий (фоторедукция) не сопровождается выделением  $\text{O}_2$  и донором водорода является не вода, а другие вещества



2. **Хемосинтез.** Некоторые микроорганизмы используют энергию, выделяющуюся при окислении неорганических соединений.

В природных и сточных водах наиболее распространены следующие группы микроорганизмов:

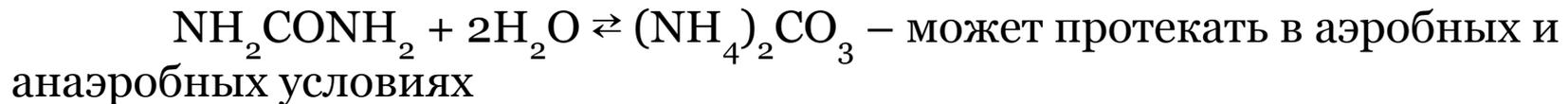
а) **Нитрирующие бактерии**, получающие энергию за счет окисления  $\text{NH}_3$  в  $\text{HNO}_2$  и  $\text{HNO}_3$ :



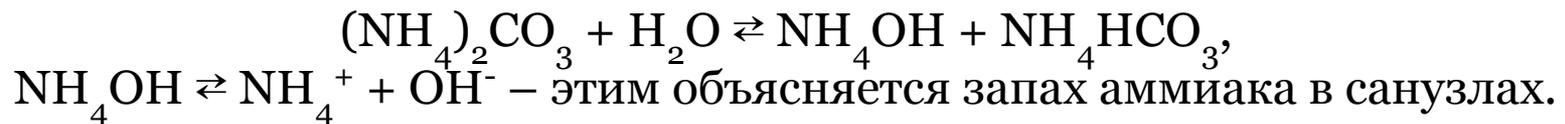
В природе существуют микроорганизмы, вызывающие процесс **денитрификации** – это анаэробный процесс



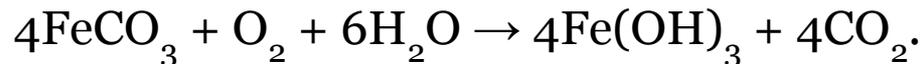
Под влиянием микроорганизмов в канализационной сети происходит гидролиз мочевины, являющейся продуктом белкового обмена веществ в животном организме



Далее:



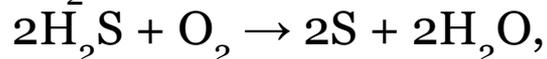
б) **Железобактерии** получают энергию в результате окисления солей железа



Нитчатые железобактерии развиваются в водопроводных трубах, вызывая их закупорку.

в) **Бесцветные серобактерии** используют энергию окисления  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{S}$ . Микроорганизмы, принимающие участие в превращении соединений серы, подразделяются на окисляющие соединения серы и восстанавливающие их.

- **Окислению** подвергаются  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{S}$  (в присутствии органических веществ):

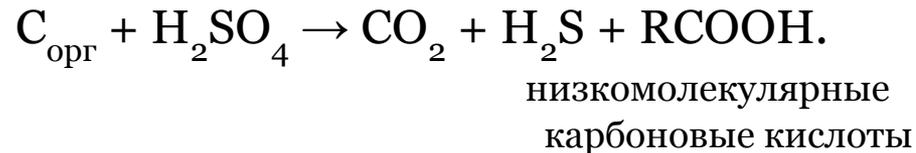


Серобактерии – постоянные обитатели очистных сооружений, их способность откладывать  $\text{S}$  внутри клеток при достаточном количестве  $\text{H}_2\text{S}$  позволяет использовать их в качестве индикатора качества очистки сточных вод. При плохой очистке создаются анаэробные условия, сохраняется  $\text{H}_2\text{S}$ , клетки серобактерий заполняются серой, при хорошей очистке сера в клетках окисляется.

- Микробиологическое **восстановление** сульфатов – основной путь образования  $\text{H}_2\text{S}$  в природе, осуществляется сульфатвосстанавливающими бактериями.

Сульфатвосстанавливающие бактерии встречаются преимущественно в местах, где происходит анаэробный процесс распада органических веществ (в частях канализационных сооружений, не омываемых сточной жидкостью).

Есть бактерии, приспособленные к использованию жирных кислот, оксикислот, спиртов и т.д.



В присутствии денитрифицирующих серобактерий  $\text{NO}_3^- + \text{S} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$ .

Сульфатвосстанавливающие бактерии участвуют в образовании лечебной грязи, серных месторождений и сульфидных руд, но являются причиной замора рыбы в водоемах и коррозии трубопроводов в анаэробных условиях.

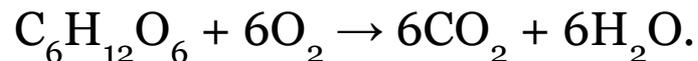
## Дыхание микроорганизмов

В микробиологии под термином «дыхание» подразумевается биологическое окисление, сопровождающееся выделением энергии.

**По способу дыхания микробы делятся на:**

- аэробные;
- анаэробные;

Факультативные (живут в аэробных и анаэробных условиях. Аэробные микроорганизмы живут в присутствии свободного кислорода, конечными продуктами жизнедеятельности являются  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$



За этим скрыта сложная цепь ферментативных превращений, одинаковая для животных, растений и микроорганизмов.

Дыхание **анаэробов** идет без участия молекулярного кислорода. Они получают энергию за счет расщепления сложной органической молекулы на более простые вещества (а не  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), при этом выделяется энергия



**Брожением** называется процесс анаэробного разложения углеводов и близких им веществ на продукты, не подвергающиеся разложению системой ферментов без участия молекулярного кислорода.

# Факторы внешней среды, влияющие на развитие микроорганизмов



1. **Факторы роста** – это вещества, которые не могут синтезироваться микроорганизмами в достаточном количестве, поэтому они получают их в готовом виде. Эти недостающие вещества могут быть как азотсодержащими веществами, так и S- и P-соединениями. При их недостатке микроорганизмы погибают, в этом случае их называют **ауксотрофными** по этому соединению. Микроорганизмы, не нуждающиеся в этом веществе, называются **прототрофными**.

2. **Влажность**. При отсутствии влаги жизнь микроорганизмов невозможна, т. к. их жизнедеятельность протекает в присутствии воды. Но некоторые виды микробов, так называемые ксерофильные, могут жить и при незначительной влажности.

### 3. **Температура.**

Микробы развиваются при определенных температурах:

- психрофильные – при низких температурах (-8 ... +10 °С);
- мезофильные – при средних температурах (+25 ... +40 °С);
- термофильные – при высоких температурах (+40 ... +65 °С).

Некоторые микробы развиваются до +70 °С, до абсолютного 0 °С. Все погибают при 120 °С, 2 атмосферах в течение 20 ...30 минут.

4. **Механические факторы.** Выдерживают давление до 20 тыс. атмосфер в течение 45 минут. Для них губительны ультразвук, техническое растирание, сотрясение.

5. **Лучистая энергия.** УФ-излучение для микроорганизмов губительно.

6. **Активная реакция среды.** Микроорганизмы очень чувствительны к изменениям рН среды, так как эти изменения тесно связаны с изменениями активности ферментов. Наиболее благоприятным условием является рН  $\approx$  7. Кислая среда является более губительной.

### **Санитарная микробиология воды**

Санитарно-бактериологической оценке качества воды подвергают:

- воды централизованного водоснабжения и водопроводных сетей;
- воды колодцев и родников;
- открытых водоемов (рек, озер);
- сточные воды;
- воды плавательных бассейнов;
- минеральные воды.

Санитарно-бактериологическая оценка качества воды включает определение двух показателей:

- общего числа бактерий (микробное число),
- коли-титр (или коли-индекс).

Определение общего числа бактерий (**микробное число**) заключается в следующем: подсчитывается число колоний микроорганизмов, вырастающих в течение 24 ч при температуре 37 °С, при посеве 1 мл исследуемой воды в стандартную питательную среду. Этот показатель определяет степень бактериального загрязнения воды (но не учитывает все виды населяющих бактерий, не растущих в данной питательной среде, анаэробы). Таким образом, **для определения загрязнения воды подсчитывается количество микроорганизмов при  $t=37$  °С (температура жизнедеятельности живых организмов), а для оценки самоочищения водоемов тот же анализ проводят при  $t=22$  °С (температура водоемов в летнее время)**. Для оценки микрофлоры водоемов в целом также проводят прямой микроскопический подсчет микроорганизмов. Но этот метод нельзя использовать для оценки работы очистных сооружений, т.к. при этом в расчет входят и мертвые микроорганизмы.

Для определения наличия патогенных микробов (которых великое множество) проводят анализы на бактерии *Coli* (*кишечная палочка*). Результат определения количества палочек в воде выражают двояко:

- **коли-титр** – объем воды в мл, в котором содержится одна кишечная палочка;

- **коли-индекс** – число кишечных палочек, содержащихся в 1 л исследуемой воды

$$\text{коли-индекс} = 1000 / \text{коли-титр.}$$

Способность гидробионтов жить в воде с определенной степенью загрязнения органическими соединениями называется **сапробностью**.

**Все воды по степени загрязнения делятся на 4 категории (зоны):**

1. **Зона сильного загрязнения (полисапробные)** – в том случае, когда в 1 мл воды число бактерий достигает 1000000. Здесь, в богатой органикой воде, протекают реакции гниения анаэробного типа.
2. **Зона средней загрязненности (мезосапробные)** – в том случае, когда в 1 мл воды число бактерий достигает 100000. В данном случае протекают реакции минерализации с преобладанием окислительных процессов.
3. **Зона чистой воды (олигосапробные)** считается в том случае, когда в 1 мл воды число бактерий от 1000 до 10000. В данной зоне преобладают реакции окисления  $\text{NO}_2^-$  до  $\text{NO}_3^-$ .

## **По месту обитания в водоеме различают два вида биоценоза:**

- **бентос** (совокупность организмов, заселяющих дно и подводные предметы),

- **планктон** (растительные и животные организмы, находящиеся во взвешенном состоянии).

## **Виды взаимоотношений микроорганизмов:**

1. **Метаболизм** – одни микроорганизмы в результате жизнедеятельности создают благоприятные условия для других. Например, деятельность нитрирующих бактерий влечет за собой преобразование по типу



2. **Антагонизм** – микроорганизмы в результате своей жизнедеятельности мешают или вредят другим организмам. Например, плесневые бактерии вырабатывают антибиотики, губительные для паразитов.

3. **Симбиоз** – сообщество микроорганизмов, существующих по принципу обоюдной пользы. Например, бобовые и азотфиксирующие бактерии.

# **Биохимические методы очистки сточных вод**

## **1. Аэробные процессы очистки сточных вод**

Биологическая очистка сточных вод может производиться как в естественных, так и искусственных условиях.

**Почвенная очистка** сточных вод производится на полях фильтрации и полях орошения, основное отличие которых заключается в том, что на первых происходит только очистка сточных вод, а на вторых — и выращивание сельскохозяйственных и технических культур.

**Сущность метода почвенной очистки состоит в фильтрации сточных вод, содержащих органические вещества, через слой почвы.** При этом под воздействием физических, химических и биологических факторов сточная жидкость освобождается от загрязняющих веществ.

Активный фильтрующий слой образуется на поверхности почвы в течение 1—2 недель (в зависимости от климатических условий) в результате задержки взвешенных и коллоидных веществ, содержащихся в сточной жидкости, и заселения этого слоя огромным количеством аэробных микроорганизмов.

В этом слое почвы толщиной 20—40 см накапливаются взвешенные, коллоидные и растворенные вещества, а также микроорганизмы и яйца гельминтов.

Толщина активного слоя почвы может достигать 1,5—2 м, но самые активные процессы протекают в верхнем слое почвы. На глубине 40 см суммарная поверхность микроорганизмов биологической пленки достигает 48 000 м<sup>2</sup>.

Основные обитатели биологической пленки, образовавшейся на поверхности частичек почвы, — бактерии, осуществляющие процесс биохимического окисления органических веществ. Кроме того, в почве активно развиваются простейшие, грибы, коловратки, личинки насекомых и другие организмы.

Почвенные микроорганизмы, функционирующие в стабильных условиях, практически полностью освобождают сточные воды от патогенных форм. На полях орошения эффект очистки сточных вод повышается за счет изъятия биогенных элементов сельскохозяйственными культурами.

***Общий эффект почвенной очистки по БПК<sub>5</sub> составляет 93-95%, по взвешенным веществам — до 99,65%, а патогенные микроорганизмы и гельминты уничтожаются практически полностью.***

**Биологические пруды** — это естественные или искусственные водоемы глубиной около 1 м и площадью от 0,5 до 1,5 га.

Биологические пруды бывают одиночными и серийными, состоящими из последовательной цепочки биологических прудов, количество которых может достигать 4—5. Сточная жидкость, перетекая из одного пруда в последующие, подвергается более глубокой и стабильной очистке. **Биологические пруды служат, как правило, для глубокой очистки предварительно очищенных сточных вод.**

Биоценоз этих прудов представлен в основном бактериями, простейшими, коловратками и низшими ракообразными, обитающими в  $\alpha$ - и  $\beta$ -мезосапробных условиях водоема. Большую роль в процессе очистки играют водоросли (протококковые, вольвоксовые, эвгленовые), изымающие биогенные элементы и снабжающие биопруды дополнительным кислородом.

В некоторых биопрудах имеется высшая водная растительность (камыш, рогоз, уруть, водный гиацинт и т.п.), которая также активно извлекает из очищаемой воды биогенные элементы и токсичные примеси (соли тяжелых металлов, фенолы, нефтепродукты и т.д.). Кроме того, на стеблях высшей водной растительности появляются биообрастания, увеличивающие общее количество активной биомассы.

Высшая водная растительность и некоторые водоросли выделяют природные фитонциды, пагубно влияющие на патогенные организмы. В донном иле биологических прудов активно развиваются личинки насекомых, например, численность мотыля может достигать 90 000 на 1 м<sup>2</sup>. В сутки каждая особь мотыля может перерабатывать иловую массу, в 4-6 раз превышающую массу собственного тела.

Для удаления из биологического пруда обильно развивающихся в нем водорослей и растений в них запускаются рыбы (каarp, сазан, толстолобик и др.) и утки, для которых ряска является основным кормом. **Общий эффект очистки сточных вод в биопрудах по БПК<sub>5</sub> может достигать 98%.**

На искусственно созданных очистных сооружениях сточных вод после отделения основной массы взвешенных веществ на сооружениях механической очистки происходит биохимическая очистка воды в аэробных или анаэробных условиях. При этом органические загрязнения, присутствующие в сточной жидкости в форме коллоидов, истинных растворов или мельчайшей взвеси, сначала сорбируются на активной биомассе в течение очень короткого времени (несколько секунд или минут), а затем подвергаются биохимическому разложению, что может длиться несколько часов.

На современных сооружениях биохимической очистки существуют два вида активной биомассы — активный ил и биологическая пленка.

**Аэротенки** — это основные сооружения для искусственной очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. Классический аэротенк представляет собой железобетонный резервуар с рабочей глубиной 4-6 м, разделенный не доходящими до противоположного конца сооружения стенками на 2—4 коридора. По днищу каждого коридора размещается аэрационная система из фильтросных пластин или дырчатых труб, в которую подается воздух для снабжения активного ила кислородом, поддержания его во взвешенном состоянии и равномерного распределения по всему объему очищаемой сточной жидкости. **Обычно в аэротенке концентрация растворенного кислорода поддерживается на уровне 2-4 мг/дм<sup>3</sup>. Критическая концентрация кислорода — 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.**

**Активный ил** — это сложная экосистема, включающая большое количество представителей микрофлоры и микрофауны. Он представляет собой частицы (**хлопки**), населенные различными группами микроорганизмов — аэробов и факультативных анаэробов.

Каждый хлопкок активного ила представляет собой структурированную коллоидную систему, обладающую высокой сорбционной способностью, в нем обитают разнообразные микроорганизмы воды и почвы, образующие сложный биоценоз.

Основная часть активного ила — это гетеротрофные бактерии, которые в процессе очистки воды образуют слизистые скопления — **зоогели**, характерные для хорошо сформированного активного ила. В зоогелях преобладают кокковые и палочковидные формы.

Количество бактерий в процессе очистки увеличивается пропорционально количеству изъятых загрязнений, определяемого БПК.

Кроме бактерий в активном иле присутствуют грибы — в основном плесневые многоклеточные; одноклеточные и дрожжи.

Из простейших в активном иле обитают жгутиковые; саркодовые — в основном голые и раковинные корненожки; инфузории (кругоресничные, равноресничные, спиралересничные и сосущие) — главные индикаторные микроорганизмы активного ила аэротенка; коловратки; малошетиновые черви (олигохеты); иногда встречаются водные клещи.

Представители микрофауны и простейших питаются в основном бактериями, что стабилизирует процесс биохимической очистки и делает его более полным.

При стабильной работе аэротенка, когда соблюдается кислородный режим, отсутствуют токсичные примеси (нефтепродукты, соли тяжелых металлов, ПАВ, ядохимикаты и другие вещества, оказывающие угнетающее воздействие на биоценоз активного ила), в активном иле преобладают брюхожесничные инфузории.

Наименее чувствительны к отрицательным воздействиям равноресничные инфузории. При дефиците питательных веществ (**голодающий ил**) размеры инфузорий уменьшаются, и они начинают инцистироваться. В активном иле, перегруженном органическими примесями, развиваются сосущие инфузории.

В активном иле в период завершения окисления органических веществ и протекания процесса нитрификации в большом количестве развиваются прикрепленные инфузории, раковинные и крупные голые амебы. Довольно часто встречаются коловратки. Водные клещи и рачки (циклопы) развиваются в голодающем иле.

Способность отдельных групп микрофауны развиваться при определенных условиях используется для проведения гидробиологического анализа.

При **хорошей работе аэротенка** (достаточное количество кислорода, отсутствие токсичных примесей и т.д.) в его активном иле, очищающем хозяйственно-бытовые сточные воды, встречаются кольчатые и круглые черви, щетинковые, коловратки, мушки и ее куколки, а также водные клещи.

При **плохой работе аэротенка** в активном иле присутствуют индикаторные микроорганизмы.

В процессе очистки сточных вод в аэротенке (изменения качества очищаемой сточной жидкости — от места ее впуска в аэротенк до места выпуска) изменяется биоценоз активного ила.

Три последовательных трофических уровня, соответствующих основным фазам роста ила:

1. **фаза логарифмического роста ила** (300 мг БПК на 1 г ила); доминируют гетеротрофные бактерии и сапрозойные простейшие;
2. **фаза замедленного роста ила с переходом в стационарную** (100-300 мг БПК на 1 г ила); доминируют голозойные свободноплавающие инфузории и коловратки, питающиеся бактериями и сапрозойными простейшими;
3. **фаза отмирания ила** (менее 100 мг БПК на 1 г ила); доминируют прикрепленные инфузории, коловратки и черви, питающиеся голозойными инфузориями и иловыми частицами, количество бактерий при этом значительно уменьшается.

Способность активного ила к осаждению характеризуется **иловым индексом**, который определяется по объему ила, образующегося после 30-ти минутного отстаивания жидкости, содержащей 3 мг/дм<sup>3</sup> ила.

**Иловый индекс** – соотношение между объемом (мл) ила и массой сухого вещества, содержащегося в 1 г ила.

**При хорошей работе аэротенка иловый индекс составляет 100–120 мл/г.**

**Повышение илового индекса до 150-200 мл/г свидетельствует о нарушении работы аэротенка.**

После очистки смесь сточной жидкости и активного ила поступает во вторичный отстойник, где происходит осаждение активного ила. Часть активного ила поступает на сооружения обработки осадка, другая часть (от 30 до 70 %) — в регенератор.

Регенерация происходит в одном из коридоров аэротенка и заключается в усиленной аэрации ила для завершения окисления сорбированных органических веществ, восстановления активности ила и его омоложения.

**Биологические фильтры** — это резервуары, расположенные на поверхности земли и заполненные инертным нетоксичным загрузочным материалом, на котором развивается биологическая пленка.

Раньше в качестве загрузочного материала применялся гравий или щебень различной крупности, но с середины XX в. стали использоваться так называемые плоскостные загрузочные материалы, изготовленные в основном из пластмасс. Внедрение плоскостных загрузочных материалов позволило увеличить удельную поверхность биообращения с 40-50 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> до 100-250 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, увеличить высоту слоя загрузочного материала до 6-8 м.

При орошении поверхности загрузочного материала сточной жидкостью, которая стекает по поверхности загрузочного материала, на этой поверхности образуется биологическая пленка. Воздух, необходимый для микроорганизмов биопленки, поступает через вентиляционные окна, расположенные в нижней части корпуса биофильтра, за счет естественной аэрации.

**Биологическая пленка** содержит все микроорганизмы, наблюдаемые в аэротенках. Кроме того, в биофильтрах присутствуют водоросли, в основном диатомовые: типично эпифитные (развивающиеся на других растениях) и донные формы.

Широко представлены в биопленке зеленые водоросли, в основном вольвоксовые, протококковые и улотриксковые. Более разнообразен в биопленке состав простейших, насекомых и их личинок, червей.

Высокая производительность биофильтров с плоскостным загрузочным материалом объясняется, в частности, высоким содержанием активной биомассы на единицу объема сооружения.

Для биофильтров с объемной загрузкой количество биопленки в 25—50 раз больше, чем в таком же объеме аэротенка. Еще больше активной биомассы на единицу объема содержится в биофильтре с плоскостным загрузочным материалом. Средняя влажность биопленки биофильтра— 82,5 %, плотность по сухому веществу — 1,4 т/м<sup>3</sup> (плотность по сухому веществу биопленки совпадает с теоретически вычисленной: поскольку средняя плотность бактериальной клетки в естественном состоянии — 1,08 г/см<sup>3</sup>, а среднее содержание влаги — 80 % (от 70 до 90 %), то плотность бактериальной клетки по сухому веществу в среднем, равна 1,4 т/м<sup>3</sup>). Отсюда количество биомассы по сухому веществу на 1 м<sup>2</sup> поверхности загрузочного материала при толщине биопленки 1 мм будет равна 0,245 кг. Толщина биопленки в биофильтре может достигать 3 и даже 3,8 мм.

Таким образом, на загрузочном материале с удельной поверхностью  $220 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при толщине биопленки всего 1 мм развивается биомасса, доза которой по сухому веществу составляет  $53,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Необходимо также отметить, что биоценоз биопленки биофильтров всегда разнообразнее, чем биоценоз активного ила, что способствует более полному изъятию многокомпонентного субстрата загрязнений из сточных вод.

С увеличением толщины биопленки происходит увеличение ее производительности на единицу поверхности биообрастания по изъятию загрязнений из сточных вод. **Максимального значения —  $375 \text{ мг ХПК}/\text{час}$  — величина изъятия загрязнений достигает при толщине биопленки  $0,2 \text{ мм}$  и далее остается постоянной.** Учитывая, что толщина биопленки в биофильтрах с плоскостной загрузкой во всех известных случаях не менее  $0,5 \text{ мм}$ , можно сделать вывод, что **биофильтры работают в стабильном режиме, с максимальной производительностью по изъятию загрязнений.**

Исследователи отмечают лучшие седиментационные качества биопленки из биофильтра с плоскостным загрузочным материалом по сравнению с объемным, и значительно лучшие, по сравнению с активным илом аэротенков.

**Компостирование** — это экзотермический процесс биологического окисления, в котором органический субстрат подвергается аэробной биодegradации смешанной популяцией микроорганизмов в условиях повышенной температуры и влажности. В процессе биодegradации органический субстрат претерпевает физические и химические превращения с образованием стабильного гумифицированного конечного продукта. Этот продукт представляет ценность для сельского хозяйства и как органическое удобрение, и как средство, улучшающее структуру почвы.

Компостированию подлежат органические отходы бытового мусора, сельскохозяйственные отходы, активный ил, навоз и т.п.

Важными параметрами процесса являются соотношение углерода и азота и мультидисперсность субстрата, необходимая для нормальной аэрации. Навоз, сырой активный ил и многие растительные отходы имеют низкое отношение углерода к азоту, высокую влажность и плохо поддаются аэрации. Их необходимо смешивать с твердым материалом, сорбирующим влагу, который обеспечит необходимый углерод и нужную для аэрации структуру смеси. Лучший вариант такой добавки — солома, могут быть использованы также щепки, мусор, листья, опилки и даже измельченные автомобильные покрышки.

Процесс компостирования представляет собой сложное взаимодействие между органическими отходами, микроорганизмами, влагой и кислородом. В отходах обычно существует своя смешанная эндогенная микрофлора. Микробная активность возрастает, когда содержание влаги и концентрация кислорода возрастает до необходимого уровня.

Кроме кислорода и воды для роста и размножения микроорганизмов необходимы источники углерода, азота, фосфора, калия и определенные микроэлементы. Эти потребности часто покрываются веществами, содержащимися в отходах, но иногда некоторые элементы приходится добавлять.

Часть энергии, вырабатываемой при биологическом окислении углеродсодержащих компонентов, расходуется в метаболических процессах, другая часть выделяется в виде тепла.

Температура внутри компостной кучи может достигать 70 °С.

Конечный продукт (компост) содержит наиболее стабильные органические соединения, продукты распада, биомассу мертвых микроорганизмов, некоторое количество живых и продукты химического взаимодействия этих компонентов.

## Основные группы микроорганизмов, принимающих участие в процессе компостирования

Микрофлора	Бактерии	Множество форм — кокки, палочки, нитчатые. Некоторые формы спорулируют. Размеры 1-8 мкм
	Актиномицеты	Образуют тонкий разветвленный мицелий. Растут предпочтительно при повышенной температуре и пониженной влажности. Диаметр гиф 0,5-2 мкм
	Грибы, дрожжи	Образуют мицелий (дрожжи — псевдомицелий) и спорулируют. Множество видов. Наибольшее значение имеют термофилы. Размеры 3-50 мкм
	Водоросли	Предпочитают влажные условия. Размеры 10-100 мкм
	Вирусы	Живут на организмах-хозяевах бактериях или актиномицетах. Размер 0,1 мкм
Микрофауна	Простейшие	Перемещаются с помощью жгутиков или ресничек, некоторые питаются бактериями. Размеры 5-80 мкм
Макрофлора	Высшие грибы	Растут на кучах компоста, образуя плодовые тела. Диаметр шляпки плодового тела около 25 мм
Макрофауна	Двупароногие, многоножки	Двупароногие, в основном, растительноядные. Многоножки — хищники. Длина двупароногих 20-40 мм, многоножек — 3С мм
	Клещи,	Множество видов. Одни хищные, другие — растительноядные. Размеры 0,1-2 мм
	Черви, муравьи, термиты, пауки и жуки	Навозный червь ( <i>Eisenia foetida</i> ) весьма важен для компостирования навоза. Размер 30-100 мм

В процессе компостирования принимает участие более 2000 видов бактерий и не менее 50 видов грибов. Эти виды можно подразделить на группы по температурным интервалам процесса, в которой каждая из них активна: для психрофилов предпочтительна температура ниже 20 °С, для мезофилов — от 20 до 40 °С и для термофилов свыше 40 °С. Как правило, на последней стадии компостирования преобладают мезофиллы.

### **Органические отходы промышленного, сельскохозяйственного или коммунального происхождения**

<i>Фракция</i>	<i>Содержание, %</i>
Водорастворимые соединения (сахара, крахмал, аминокислоты, аммонийные соли)	2-30
Соединения, растворимые в эфире и спирте (жиры, масла, воски)	1-15
Белок	5-40
Гемицеллюлоза	10-30
Целлюлоза	15-60
Лигнин	5-30
Зола	5-25

Разложение органических отходов в процессе компостирования — сложный динамический процесс, в котором постоянно изменяются температура и состав питательных веществ.

## Технологические параметры процесса компостирования органических отходов

Параметр	Требования
Отношение C/N в субстрате	От 25/1 до 30/1
Размер частиц субстрата	12,5 мм для систем с перемешиванием и принудительной аэрацией, 50 мм — для компостных куч с естественной аэрацией
Влажность	50-60%, большие значения возможны при использовании наполнителей
Свободный объем (пористость)	Около 30%
Аэрация	0,6-1,8 м <sup>3</sup> воздуха в сутки на 1 кг летучей части твердых веществ, или поддержание концентрации O <sub>2</sub> в пределах 10-18%
Температура	55 °С
Перемешивание	Без перемешивания, при периодическом переворачивании в простых системах. Короткие периоды энергичного перемешивания в механизированных системах
Размеры компостной кучи	Любая длина, высота до 1,5 м и ширина до 2,5 м для куч и компостных рядов с естественной аэрацией. В случае принудительной аэрации размеры кучи произвольные, но должны исключить перегрев компоста

## **Соотношения C/N для отдельных возможных компонентов компостной кучи**

<i>Компонент</i>	<i>Соотношение C/N</i>
Моча	0,8
Высушенная кровь	3
Нечистоты, фекалии, сырой активный ил	8
Костная мука	8
Навоз	14
Отходы пивоварения	15
Водяной гиацинт	16
Трава, сорняки	20
Твердые отбросы	35
Листья	60
Пшеничная солома	80
Рисовая солома	100
Сырые древесные опилки	500
Бумага	80

**Аэробная стабилизация осадков** — процесс окисления избыточного активного ила или его смеси с осадком первичных отстойников в сооружениях аналогичных аэротенкам. При этом окисляются как сорбированные на активном иле загрязнения, так и сами микроорганизмы — в основном за счет автолиза, т.е. саморастворения и распада тканей организма под влиянием фермента, находящегося в этом же организме.

Процесс аэробной стабилизации протекает в одну стадию:



с последующим окислением  $\text{NH}_3$  до  $\text{No}_2$ .

Процесс от 2-5 сут. для уплотненного активного ила до 8-12 сут. для смеси уплотненного активного ила и осадка. Температурный режим от 10 до 42 °С. При температуре менее 8 °С процесс прекращается.

Средний распад органических веществ в процессе стабилизации составляет 10—50 %, при этом жиры распадаются на 65-75 %, белки на 20-30 %, а углеводы практически не распадаются. Снижение патогенных микроорганизмов составляет 70-90 %, но яйца гельминтов не погибают.

В процессе аэробной стабилизации выделяется большое количество тепла, что позволяет поднимать температуру в стабилизаторе до 50-60 °С и проводить процесс в термофильном режиме. Термофильный режим позволяет проводить процесс аэробной стабилизации глубже и в более короткие сроки. Однако при термофильном режиме за счет плохой растворимости кислорода в воде приходится применять механические аэраторы. В результате аэробной стабилизации получается осадок, мало подверженный гниению, подготовленный к дальнейшей утилизации.

## **Анаэробные процессы очистки сточных вод**

Анаэробные методы применяются как сооружения малой канализации, в том числе индивидуальные; для предварительной очистки концентрированных по органическим загрязнениям сточных вод некоторых производств; для обработки осадков из первичных отстойников и избыточного активного ила аэротенков.

В сельской местности, для индивидуальных домов, коттеджей, санаториев для удаления из сточных вод взвешенных веществ и их частичного разложения используются септики и двухъярусные отстойники.

**Септик** (гнилостный отстойник) представляет собой резервуар, объем которого рассчитан на пребывание сточной жидкости в течение 1-4 суток. Септик может быть одно- или многокамерным. Выпавший в септике осадок подвергается анаэробному разложению в течение 6-12 месяцев, уплотняясь и обеззараживаясь.

Недостатком септика является образование на поверхности очищаемой сточной жидкости толстой корки, состоящей из флотированных на поверхность газами брожения иловых частичек. Образование корки приводит к насыщению сточной жидкости продуктами распада органических загрязнений, что затрудняет ее дальнейшую очистку.

В отличие от септика двухъярусные отстойники (**эмшеры**) имеют отдельные зоны осаждения и сбраживания осадка, что препятствует повторному загрязнению сточных вод.

Для очистки содержащей сильную концентрацию органических загрязнений сточной жидкости от птицеферм и животноводческих комплексов используются анаэробные лагуны — глубокие земляные канавы. В септиках и двухъярусных отстойниках процесс сбраживания осадка проходит в психрофильных температурных условиях (до + 20 °С).

Основным сооружением для проведения анаэробных биохимических процессов очистки содержащих сильную концентрацию органических загрязнений отходов являются метантенки.

**Метантенки** — закрытые герметичные резервуары глубиной 3—5 м, снабженные устройствами для впуска несброженного осадка, его перемешивания и подогрева и выгрузки сброженного осадка. Метантенки работают в режиме мезофильного (30-35 °С) и термофильного (50—55 °С) брожения. Ежедневно в метантанк подается от 3 до 11% несброженного осадка и столько же удаляется.

В процессе брожения образуется газ, состоящий на 70—75 % из метана и на 20—25 % из углекислого газа (диоксида углерода), который отводится в емкость для хранения — газгольдер. Сброженный осадок подается на иловые площадки для естественной сушки или в цех механического обезвоживания.

Процесс сбраживания осадков называют метановым, так как метан — один из конечных продуктов брожения.

Метанобразующие бактерии играют важную роль в круговороте веществ и энергии в природе, ассимилируя двуокись углерода, окись углерода и водород и образуя из них углеводород, метан и свое клеточное вещество.

***Раньше процесс анаэробного сбраживания разделялся на две фазы:***

***1) стадия кислого брожения***, которая осуществлялась кислотообразующими бактериями;

***2) стадия щелочного или собственно метанового брожения***, которая осуществлялась метанобразующими бактериями.

## **Современные исследователи разделяют процесс метанового брожения на четыре взаимосвязанные стадии:**

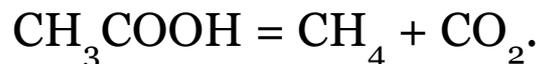
- 1. стадия ферментативного гидролиза** — гидролиз нерастворенных сложных органических соединений с образованием более простых растворенных веществ. Процесс происходит с участием факультативных анаэробов при рН среды 6,5—7,5;
- 2. стадия кислотообразования** — выделение летучих жирных кислот, аминокислот и спиртов. Процесс проходит с участием гетерогенных бактерий;
- 3. ацетатогенная стадия** — превращение летучих жирных кислот, аминокислот и спиртов в уксусную кислоту. Процесс проходит с участием двух групп ацетогенных бактерий: первая группа (ацетатогены) образует ацетаты с выделением водорода из продуктов предшествующих стадий, вторая (ацетогены, использующие водород) образует ацетаты, но и использует образовавшийся водород для восстановления диоксида углерода:



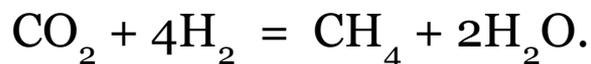
4. **метаногенная стадия** — образование метана строгими анаэробами.

Этот процесс проходит двумя путями, которые осуществляют две разных группы метаногенов.

Первый путь, в результате которого образуется 72 % метана, — расщепление ацетата:

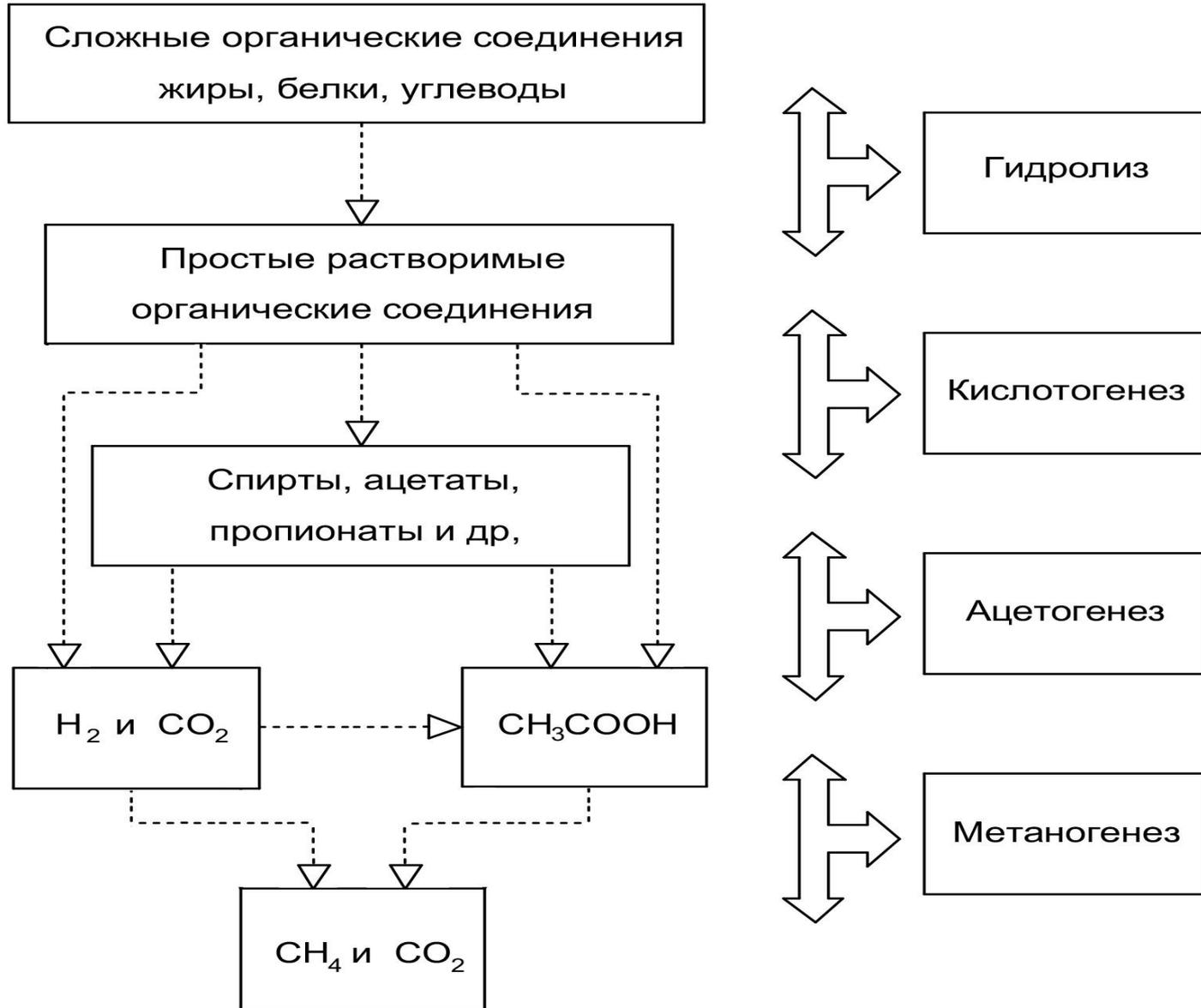


Второй путь, в результате которого образуется 28 % метана, — восстановление диоксида углерода:



При выборе температурного режима работы метантенка следует учитывать, что при термофильном процессе повышается производительность сооружения, уничтожаются яйца гельминтов и практически все патогенные микроорганизмы, однако последующая обработки осадка (его обезвоживание) более трудоемка, чем при мезофильном сбразивании.

## Схема метанового брожения



## Вопросы по лекции

*В день лекции до 20:00 свои листочки с решениями загрузить в личный кабинет. Листы подписать (Фамилия И.О., группа).*

*Задание № 1.* Дайте определения: автотрофы, гетеротрофы, бентос, планктон, коли-титр, коли-индекс.

*Задание № 2.* Перечислите основные виды взаимоотношений микроорганизмов.

*Задание № 3.* Приведите примеры микроорганизмов, обитающих в природных и сточных водах.

*Задание № 4.* Приведите примеры основных групп микроорганизмов, принимающих участие в процессе компостирования.

*Задание № 5.* Перечислите и поясните основные стадии процесса метанового брожения.