

5.2.5. Прирост биомассы и потребление кислорода в процессе очистки сточных вод

Основные факторы, определяющие скорость потребления кислорода

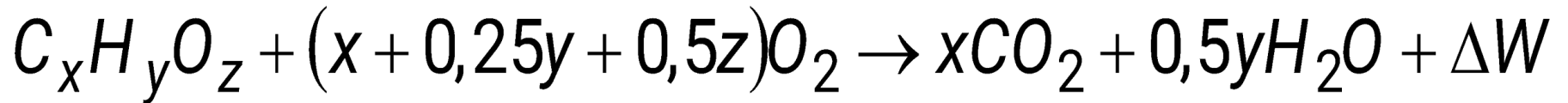
- Величина биомассы, скорость роста и физиологическая активность клеток;
- Вид и концентрация питательных веществ;
- Накопление токсичных продуктов обмена веществ;
- Количество и природа биогенных веществ;
- Содержание кислорода в сточной воде.

Процессы, обеспечивающие существование микроорганизмов

- Процессы дыхания (экзотермические процессы) – окисление органических веществ и окисление клеточного материала;
- Процессы питания (эндотермические процессы) – синтез бактериальных клеток.

Схемы химических реакций

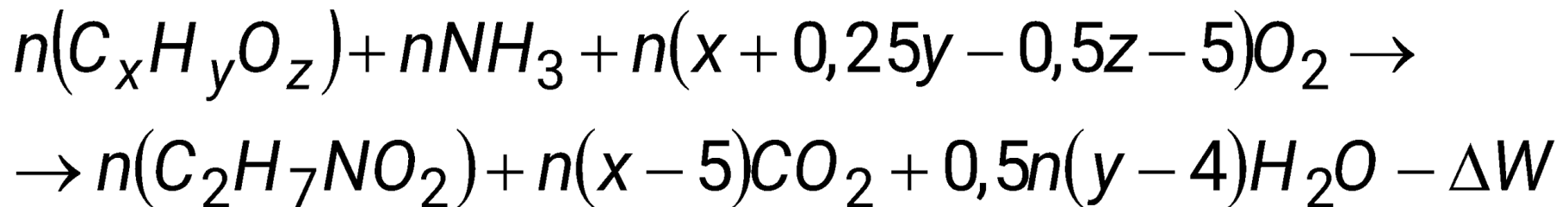
- Окисление органических веществ



Окисление клеточного материала



- Синтез бактериальных клеток



Окисление углеводов

- Углеводороды – «биологически жесткие» вещества;
- Микроорганизмы адаптируются практически к любому виду углеводов;
- Углеводороды с малым молекулярным весом окисляются быстрее, чем с большим;
- Углеводороды с разветвленной углеродной цепью окисляются хуже, чем с неразветвленной;
- Циклопарафиновые и ароматические углеводороды менее доступны микроорганизмам, чем углеводороды с прямой и разветвленной цепями;
- Некоторые углеводороды окисляются только в сочетании с другими веществами;
- Конечные продукты окисления – органические кислоты различного строения. Жирные кислоты преобразуются с образованием уксусной кислоты ($\text{C}_2\text{H}_4\text{COOH}$) при четном числе атомов углерода в исходной кислоте и с образованием уксусной и пропионовой ($\text{C}_3\text{H}_6\text{COOH}$) кислот при нечетном числе атомов углерода. Продукты окисления жирных кислот используются микроорганизмами на прирост биомассы и энергетические нужды, включаясь в дыхательные циклы;

Окисление углеводов (продолжение)

- Промежуточные продукты окисления – метилкетоны, эфиры, эпоксиды, спирты, альдегиды. Их природа зависит от строения исходного углеводорода (например: при окислении углеводов, содержащих не более 10 атомов углерода, образуются метилкетоны, а при окислении углеводов, содержащих более 10 атомов углерода, - эфиры). Альдегиды и спирты нормального строения хорошо окисляются. Вторичные спирты более устойчивы к окислению, чем первичные, и для их окисления требуется адаптированная микрофлора, третичные спирты обладают высокой устойчивостью к биохимическому окислению. Одноатомные и двухатомные фенолы и крезолы слабо устойчивы по отношению к адаптированным микроорганизмам. Хлорфенолы ведут себя аналогично фенолам. Некоторые многоатомные фенолы устойчивы к биохимическому окислению и разрушаются, в основном, химическим путем. Кроме того, увеличение длины боковых цепей затрудняет разложение фенолов.

Окисление органических кислот

- Легко окисляются биохимическим путем;
- Жирные кислоты с длиной углеродной цепи от C_2 до C_{15} легко усваиваются микроорганизмами, а для окисления кислот с длиной углеродной цепи C_{16} и более требуется период адаптации;
- Уксусная кислота – лучший субстрат для микроорганизмов;
- Муравьиная кислота повышает скорость потребления других кислот, но сама при этом используется микроорганизмами только как источник энергии;
- Чем длиннее углеродная цепь, тем ниже скорость окисления кислоты. При этом скорость окисления не зависит от характера катиона;
- Двухосновные кислоты, за исключением янтарной ($CH_2COOH - CH_2COOH$), окисляются хуже, чем одноосновные, и способность их к усвоению микроорганизмами ухудшается от янтарной к яблочной ($CHONCOOH - CH_2COOH$) кислоте. При этом щавелевая кислота ($COCOON - CHCOON$) служит только источником энергии;

Окисление органических кислот (продолжение)

- Различия в поглощении органических кислот обусловлены проницаемостью клеточных оболочек и степенью диссоциации кислот;
- Свободная кислота оказывает токсическое действие на микроорганизмы;
- Энергетически распад органических кислот стоит на втором месте после углеводов.

Окисление углеводов и близких к ним веществ

- Наиболее легко поглощаются микроорганизмами;
- Моносахариды особенно хорошо окисляются, дисахариды обладают меньшей скоростью окисления;
- Углеводы используются микроорганизмами в качестве источников энергии, исходного материала для синтеза клеточного вещества, а также могут просто накапливаться в клетках. При использовании углеводов в качестве источников энергии осуществляется путем их трансформации в органические кислоты, которые и окисляются в дальнейшем. При накоплении углеводов в бактериальных клетках они выполняют роль регуляторов внутриклеточных обменных процессов.

Степень использования органических веществ для синтеза клеточного материала

- Углеводороды – 65...85 %;
- Спирты – 58...66 %;
- Аминокислоты – 32...68 %;
- Органические кислоты – 10...60 %;
- Углеводы – 10...30 %.

Необходимость минимизации прироста биомассы

Обусловлена следующими причинами:

- чем больший процент веществ, содержащихся в сточной воде, подвержен полному окислению, тем больше их удаляется из стока, следовательно, тем выше прирост биомассы;
- приросшая биомасса является загрязнением, которое можно удалить затратив значительные средства.

Роль ферментов в процессе биохимического окисления органических веществ

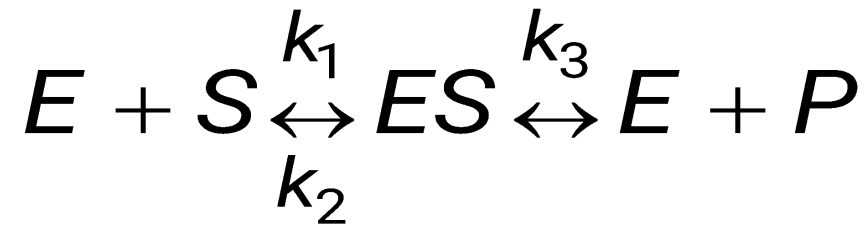
Снижение энергетического барьера, который необходимо преодолеть микроорганизмам для разрушения органических веществ. Степень снижения этого барьера зависит от степени сродства клеточных ферментов и содержащихся в воде органических веществ. В первую очередь будут потребляться те вещества, энергетический барьер у которых ниже, т.к. в этом случае затраты энергии со стороны клетки будут меньшими.

Возможные варианты изъятия веществ из СТОЧНЫХ ВОД

- Все вещества, присутствующие в сточной воде, потребляются микроорганизмами одновременно и с примерно одинаковыми скоростями. Продолжительность аэрации определяется скоростью реакции биохимического окисления и общей концентрацией веществ;
- Все вещества потребляются одновременно, но с сильно различающимися скоростями. Продолжительность очистки также еще зависит от соотношения концентраций отдельных веществ и скоростей их окисления и определяется скоростью самой медленной реакции;
- Все вещества потребляются последовательно. Продолжительность очистки определяется как сумма продолжительностей окисления каждого вещества в отдельности.

Ферментативная реакция

- Схема реакции



- Концентрация комплекса «фермент – субстрат»

$$[ES] = \frac{[E][S]}{K_m + [S]}$$

$$K_m = \frac{k_2 + k_3}{k_1}$$

Ферментативная реакция (продолжение)

- Скорость образования продукта (уравнение Михаэлиса-Ментен)

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k_3[E][S]}{k_m + [S]}$$

$$dP/dt = V, k_3[S] = V_m$$

Или при

$$V = \frac{V_m[S]}{k_m + [S]}$$

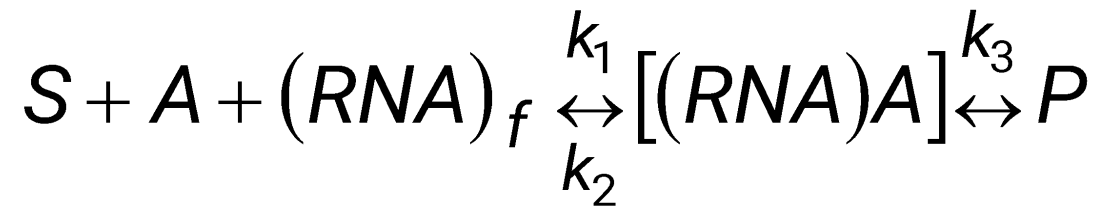
Ферментативная реакция (продолжение)

- Скорость роста биомассы (уравнение Моно)

$$\mu = \frac{\mu_m [S]}{k_m + [S]}$$

Синтез белков

- Схема реакции



Синтез белков (продолжение)

- Скорость реакции синтеза белков

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k_3(RNA)_t A}{\frac{k_2 + k_3}{k_1} + A}$$

$$(RNA)_t = (RNA)_f + [(RNA)A]$$

Условие сбалансированного роста биомассы

$$A = q[S]$$

Синтез белков (продолжение)

Следовательно:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k_3(RNA)_t[S]}{k_p + [S]}$$

$$k_p = \frac{k_2 + k_3}{k_1q}$$

Синтез белков (продолжение)

Отсюда:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\left(\frac{\Delta P}{RNA}\right)_{\max} (RNA)_t [S]}{k_p + [S]}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{RNA}\right)_{\max} = k_3$$

Синтез белков (продолжение)

Содержание РНК в первом приближении

$$R = R_0 + \frac{(R_m - R_0)\mu}{\mu_{\max}}$$

Удельное содержание белков

$$\frac{P}{a} = \pi = \text{Const}$$

Синтез белков (продолжение)

Тогда:

$$\frac{dP}{dt} = \pi \frac{da}{dt}$$

Учитывая, что:

$$\mu = \frac{1}{a} \cdot \frac{da}{dt}$$

Будем иметь:

$$\frac{\pi\mu}{R} = \frac{\left(\frac{\Delta P}{RNA} \right)_{\max} [S]}{k_p + [S]}$$

Прирост биомассы

- Условие, при котором содержание РНК в биомассе и скорость роста биомассы достигают максимума

$$[S] = \infty$$

- Предел активности РНК

$$\left(\frac{\Delta P}{RNA} \right)_{\max} = \frac{\pi \mu_{\max}}{R_m}$$

- Соотношение между приростом биомассы и количеством субстрата

$$\frac{\mu R_m}{\mu_{\max} R} = \frac{[S]}{k_p + [S]}$$

Прирост биомассы (продолжение)

- Скорость прироста биомассы

$$\mu = \frac{\mu_{\max}[S]}{k_m + [S]}$$

$$k_m = \frac{R_m k_p}{R_0}$$

Прирост биомассы (продолжение)

- Соотношение между количеством потребляемого субстрата и приростом биомассы

$$-\frac{dS}{dt} = \alpha \frac{da}{dt}$$

Учитывая, что:

$$\frac{da}{dt} = \mu a$$

Прирост биомассы (продолжение)

Получим:

$$-\frac{dS}{dt} = \alpha \frac{\mu_{\max}[S]}{k_m + [S]} a$$

или

$$-\frac{dL}{dt} = \alpha \frac{\mu_{\max}L}{k_m + L} a$$

Прирост биомассы (продолжение)

- Продолжительность аэрации

$$t = \frac{L_0 - L_t}{\alpha \mu_{\max} a} + \frac{k_m \ln\left(\frac{L_0}{L_t}\right)}{\alpha \mu_{\max} a}$$

или

$$t = \frac{L_0 - L_t}{\alpha \mu_{\max} a} + \frac{k_m 2,3 \lg\left(\frac{L_0}{L_t}\right)}{\alpha \mu_{\max} a}$$

Прирост биомассы (продолжение)

Приняв:

$$\mu_{\max} \alpha = C_1$$

$$\frac{k_m^{2,3}}{\alpha \mu_{\max}} = C_2$$

получим

$$t = \frac{L_0 - L_t}{C_1 a} + \frac{C_2}{a} \lg \left(\frac{L_0}{L_t} \right)$$