

Влияние скорости дыхания и условий адаптаций ила на коэффициент полунасыщения по кислороду



В.И. Баженов,
доктор
технических наук,
профессор,
исполнительный
директор
ЗАО "ВИВ"

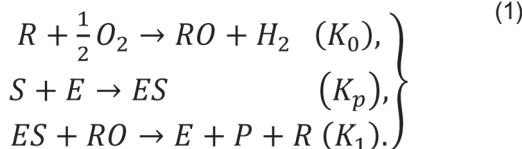


М.А. Канунникова,
инженер
ЗАО
"Водоснабжение
и водоотведение"

e-mail:
kanunnikova@
pump.ru

В биотехнологии известно, что [1] концентрация кислорода влияет на два взаимосвязанных параметра процесса: скорость кинетических реакций и скорость диффузии внутри конгломерата микроорганизмов в ферментативной среде.

Кинетически влияние кислорода на рост клеток предлагается учитывать, принимая, что ограничивающим звеном в цепи реакции с использованием кислорода, является окисление цитохромов, которые затем дают эквивалентное количество АТФ, необходимые для активирования ферментсубстратного комплекса. Упрощенная схема реакции при этом имеет вид:



где 1-я реакция – использование кислорода для окисления;

2-я реакция – образование ферментсубстратного комплекса;

3-я реакция – образования биомассы – продукта P с участием ферментсубстратного комплекса ES и активирующего реакцию RO .

K_0, K_p, K_1 – константы реакций.

Окончательно максимальная скорость реакции по данной схеме описывается выражением:

$$\mu = \mu_0 \frac{[S][O_2]}{K_W[S] + [S][O_2] + K_S[O_2]} \quad (2)$$

где

$$\mu_0 = K_0 K_1 K_p [R]_0 [E]_0$$

$$K_W = \frac{1}{K_p} \quad K_S = \frac{K_1 [E]_0}{K_0 K_p}$$

Таким образом, максимальная скорость роста μ_0 определяется константами всех трех реакций и концентрациями ферментов при окислении цитохромов $[R]_0$ и образовании ферментсубстратного комплекса $[E]_0$. Константа при субстрате K_W – константой реакции образования фермент-субстратного комплекса, а константа при кислороде K_S – всеми тремя константами реакций и фермента во 2-ой реакции.

Уравнение (2) при условии насыщения кислородом преобразуется в обычное уравнение по субстрату, а при насыщении по субстрату – в обычное уравнение Моно по кислороду:

$$\mu = \mu_m \frac{O_2}{K_C + O_2}$$

где

μ_m – максимальная скорость реакции, не лимитируемой кислородом;

C_L – концентрация кислорода на границе клетки;

K_C – коэффициент полунасыщения по кислороду.

Концентрация кислорода, при которой скорость реакции достигает μ_m , называют критической концентрацией кислорода. Эти концентрации для чистых культур приводятся в [1] и составляют от 0.15 до 0.6 мг/л. Это значит, что коэффициент полунасыщения по кислороду должен составлять от 0.035 до 0.15 мг/л. Отмечается, что для биотехнологических систем с высокой степенью перемешивания, различие в

концентрации кислорода в массе жидкости и на поверхности клетки незначительны, т. е. данные коэффициенты не учитывают влияние диффузионных процессов. Для достаточно крупных хлопков ила и скоростей перемешивания, определяемых в первую очередь не выпадением ила, влияние диффузии может быть существенным [2].

Если рассматривать клеточный агломерат (в нашем случае хлопок ила) как сферу, то влияние диффузии описывается уравнением:

$$\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dC}{dr} = \frac{1}{D_{O_2}} q_{O_2}^x \quad (3)$$

где C – текущая концентрация кислорода,
 r – текущий радиус от центра хлопка,
 $D_{(O_2)}$ – коэффициент диффузии,

$q_{O_2}^x$ – удельная скорость потребления кислорода клетками.

Таким образом, уравнение (3) устанавливает взаимосвязь для наиболее простого случая между тремя основными величинами, используемыми при описании влияния диффузии на критическую концентрацию кислорода – радиусом частицы, коэффициентом диффузии кислорода и скоростью потребления кислорода. Использование в данном уравнении зависимости Моно для описания удельной скорости потребления кислорода клетками приводит

к появлению коэффициента $K_{O_2}^S$ – коэффициента полунасыщения по кислороду, относящегося к концентрации кислорода в ядре жидкости, который связан с коэффициентом полунасыщения по кислороду K_C на границе "клетка – жидкость" зависимостью:

$$K_{O_2}^S = K_C (1 + 0.016 P_m) \quad (4)$$

$$\text{где, } P_m = \frac{q_{O_2}^{max} p R^2}{D_{O_2} K_C}$$

здесь P_m – парциальное давление кислорода на радиусе R .

Уравнение (4) показывает, что влияние диффузии на коэффициент полунасыщения по кислороду прямо пропорционально максимально возможной скорости дыхания и радиусу, на котором влияет диффузия (в данном случае радиусу хлопка). Очевидно, что этим можно объяснить значительное различие коэффициентов полунасыщения по кислороду для чистых культур (от 0.035 до 0.15 мг/л), используемых в современных моделях: для ASM1 – K_C составляет 0.4 мг/л, а для ASM2d – 0.5 мг/л.

Более подробно влияние диффузии описывается в [2]. Всю жидкость условно можно разделить на два слоя:

– ядро жидкости, где преобладает турбулентная диффузия и концентрации практически постоянны;

– область быстрого изменения концентраций – непосредственно вблизи частицы, где преобладает молекулярная диффузия. Чем выше интенсивность перемешивания, тем тоньше слой δ – область быстрого изменения концентраций.

На рис.1 представлена картина по уравнению (4). Клетка микроорганизма расположена внутри хлопка радиусом R . Вокруг хлопка существует некоторый диффузионный слой δ , который определяет максимальный радиус диффузии R_{max} .

На границе клетки существует коэффици-

ент полунасыщения по кислороду K_c (определяется ферментативной кинетикой из уравнения 2, а при определении коэффициента полунасыщения по кислороду в самой

жидкости на расстоянии более R_{max} , он равен $K_{O_2}^S$ и зависит от коэффициента диффузии D_e .



K_c – коэффициент полунасыщения по кислороду;
 R_c – текущий радиус хлопка;
 δ – текущая толщина диффузионного слоя;
 D_e – коэффициент диффузии;
 R_{max} – максимальный радиус диффузии;
 $K_{O_2}^S$ – коэффициент полунасыщения по кислороду на расстоянии R_{max} .

Однако предполагается, что значение коэффициента диффузии внутри хлопка ниже (от 4 – 70 % в соответствии с [2]) значения коэффициента диффузии в диффузионном слое D_e (слой δ на рис.1).

В силу более низких коэффициентов диффузии внутри хлопка вероятно возникновение ситуации, когда на определенном радиусе $r_0 < R$ концентрация субстрата становится равной 0 (в зависимости от диаметра хлопка и скорости диффузии), при этом поток субстрата к центру частицы становится равным 0 и скорость реакции становится тоже равным нулю 0. Влияние такого диффузионного ограничения на скорость реакции в этом случае описывается уравнением:

$$\omega = \left(1 - \frac{r_0^3}{R^3}\right) \frac{\mu_m}{Y} X \quad (5)$$

где
 μ_m – максимальная скорость роста микроорганизма;
 Y – коэффициент прироста;
 X – концентрация микроорганизмов в хлопке.

$1 - \frac{r_0^3}{R^3}$ – величина степени полноты дыхания

Величина степени полноты дыхания является поправочным коэффициентом к описанию максимально возможной скорости реакции и показывает, какая часть хлопка не участвует в реакции.

Для описания задачи влияния диффузии снаружи и внутри хлопка ила выделим 4 области пространства (рис.2):

I – область с постоянной концентрацией субстрата L_c ;

II – область со сферической толщиной δ , для которой концентрация субстрата меньше, чем в жидкости, но больше, чем на поверхности хлопка L_n (область диффузии в приграничном слое);

III – область, в которой субстрат потребляется с максимальной скоростью и концентрация меньше, чем на поверхности хлопка, но больше, чем критическая концентрация субстрата L_k , при которой скорость потребления зависит от концентрации (концентрации насыщения);

IV – область, в которой скорость потребления субстрата пропорциональна его концентрации и концентрация изменяется от концентрации насыщения до 0.

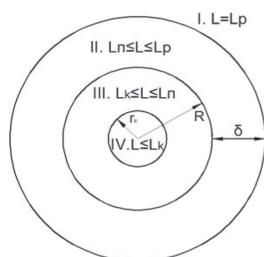


Рис.2. Характерные области в распределении субстрата внутри и снаружи частицы ила.

Наибольший интерес представляет собой область IV (рис.2), в которой скорость дыхания (скорость процесса потребления субстрата) зависит от концентраций. Эта ситуация принципиально отлична от ситуации, принятой в ур-нии (4) (скорость постоянная и нелимитируется концентрацией субстрата). Эту зону можно описать в общем виде выражением:

$$L_{IV} = \frac{B_1 e^{\chi r} + B_2 e^{-\chi r}}{r} \quad (6)$$

где B_1 и B_2 – константы интегрирования.

Т.е. изменение концентрации субстрата L_{IV} зависит только от величин χ и r . Рассмотрим более подробно величину χr :

$$\chi r = \sqrt{\frac{p_c \mu_m}{Y D_i L_k}} r \quad (7)$$

Учитывая, что $\frac{p_c \mu_m}{Y} = V_m$

– максимальная скорость потребления субстрата; $L_k = 2K_c$ (критическая концентрация приблизительно равна двум коэффициентам полунасыщения на границе "клетка – жидкость"). Запишем, что

$$\chi r = \sqrt{\frac{V_m}{D_i 2K_c}} r \quad (8)$$

Сравним полученную величину (8) со значением

$$P_m = \frac{q_{O_2}^{max} p R^2}{D_{O_2} K_c} \quad \text{уравнения (4).}$$

Можем видеть, что $P_m = p R^2 \chi^2$

$$\text{где } \chi^2 = \frac{q_{O_2}^{max}}{D_{O_2} K_c}$$

Таким образом, как для уравнения (4), так и системы выражений (6,7) зависимость коэффициента полунасыщения $K_{O_2}^S$ принципиально определяется одними и теми же параметрами и при постоянстве радиуса и коэффициента диффузии D является функцией скорости потребления субстрата.

Выводы

Коэффициент полунасыщения по кислороду с учетом ферментативной кинетики и диффузии зависит от:

- коэффициента полунасыщения на границе "клетка – жидкость", определяемого ферментативной кинетикой и зависящего от видового состава ила, т.е. определяемый условиями адаптации;

- размеров хлопка ила и величины диффузионного слоя, определяемого условиями перемешивания в среде и, возможно, частично адаптацией. Известно, что седиментационные свойства ила зависят от концентрации кислорода;

- коэффициентов диффузии в приграничном слое и внутри хлопка, в первую очередь зависящих от свойств среды и хлопка;

- максимальной скорости дыхания, зависящей от наличия субстратов и адаптации ила.

Литература

В.В.Кафаров, А.Ю.Винаров, Л.С.Гордеев. "Моделирование биохимических реакторов"/М., Лесная пром-сть, 1979.
 В.А. Вавилин, В.Б. Васильев. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979.

РЕЗИОМЕ/SUMMARY

В статье изложены теоретические аспекты влияния диффузионных процессов на транспорт кислорода и коэффициент полунасыщения по кислороду. Показано, что коэффициент полунасыщения, вследствие влияния диффузионных процессов, зависит от величины скорости дыхания ила.

In this article describe theoretical aspect influence of diffusion on oxygen transport in the flock and oxygen half saturation coefficient. Shown, that as a result of diffusion process the value of oxygen half saturation coefficient describes as a function of oxygen uptake rate.