

**МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Том 43, в. 5

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

КИЕВ — 1981

10. Macura J., Kunc F. Continuous flow method in soil microbiology. 2. Observation on glucose metabolism.—*Folia microbiol.*, 1961, 6, N 6, p. 398—407.
11. Macura J., Kunc F. Continuous flow method in soil microbiology.—*Folia microbiol.*, 1965, 10, p. 115—124, N 2, p. 125—135.
12. Lasik J., Koflakova L. Formation and decomposition of bacterial polysaccharides in the rhizosphere.—*Folia microbiol.*, 1971, 16, N 6, p. 512.
13. Wurst M., Vančura V., Kalachova L. Analysis of the polysaccharides of some soil bacteria by gas chromatography.—*J. Chromatogr.*, 1974, 91, p. 469—474.
14. Koníček J., Lasik J., Wurst M. Production and characteristics of the exocellular polysaccharide in mutant strains of *Xanthomonas fuscans*.—*Folia microbiol.*, 1977, 22, N 1, p. 12—18.
15. Washko M. E., Rise E. W. Determination of glucose by an improved enzymatic procedure.—*Clin. Chem.*, 1961, 7, p. 542—544.
16. Экспериментальная микробиология /Под ред. Св. Быдарова. София: Медицина и физкультура, 1965. 486 с.

Институт микробиологии ЧСАН, Прага
Институт микробиологии и вирусологии АН УССР

Поступила в редакцию
10.06.1981

УДК 663.18.001.57

КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ В АППАРАТАХ
С ПЕРЕМЕННЫМ РАБОЧИМ ОБЪЕМОМ

В. Г. Трегуб

Рассмотрены кинетические модели накопления биомассы в аппаратах периодического и непрерывного действия с переменным объемом культуральной среды. Получены формулы для расчета удельной скорости роста при периодическом и непрерывном культивировании в аппаратах с переменным рабочим объемом, а также уравнение, позволяющее рассчитывать кинетику накопления биомассы в этих условиях при известном значении удельной скорости роста. Применимость полученных соотношений иллюстрирована обработкой экспериментальных данных.

В ряде микробиологических производств процесс роста микроорганизмов протекает в аппаратах периодического действия (АПД) с притоком питательных веществ и, следовательно, с переменным объемом культуральной среды. Переменный объем культуральной среды может возникнуть и при непрерывном культивировании в случае нарушения баланса между притоком и отбором. Рассмотрим особенность применения уравнений, описывающих кинетику накопления биомассы в аппаратах периодического и непрерывного действия, в случае переменного объема культуральной среды.

Обычно при постоянстве рабочего объема АПД для описания кинетики накопления биомассы используется следующее уравнение:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X, \quad (1)$$

где X — концентрация биомассы, кг/м³; μ — удельная скорость роста, 1/ч.

Для определения μ предложено ряд уравнений [1], большинство из которых предусматривает изменение μ в процессе периодического или непрерывного культивирования в зависимости от концентрации биомассы, в том числе и активной [2].

Определение μ с помощью уравнения (1) при периодическом культивировании в аппаратах с переменным рабочим объемом приводит к ошибочным результатам, так как в этом случае не учитывается изменение концентрации биомассы за счет разбавления питательной среды. Экспериментальные данные, полученные при выращивании дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в аппаратах товарной стадии на Боратинском и Московском [3] дрожжевых заводах, показали (см. таблицу), что комплекс dX/Xdt , соответствующий в уравнении (1) μ , может принимать и отрицательные значения при росте биомассы и относительно больших значениях коэффициента разбавления.

Уравнение (1) можно рассматривать как частный случай уравнения

$$\frac{d(XV)}{dt} = \mu(XV), \quad (2)$$

где V — объем культуральной среды, м³.

Действительно, при постоянном объеме культуральной среды уравнение (2) переходит в уравнение (1). В случае переменного рабочего объема аппарата уравнение (2) после дифференцирования левой части примет вид:

$$X \frac{dV}{d\tau} + V \frac{dX}{d\tau} = \mu XV, \quad (3)$$

откуда

$$\mu = \frac{dX}{X d\tau} + \frac{dV}{V d\tau}. \quad (4)$$

Экспериментальные и расчетные данные по кинетике накопления биомассы микроорганизмов

Время т, ч	Объем среды V, м ³	Отбор (Q _{ст}), м ³ /ч	Биомасса (M _X), кг	Отбор био- массы, кг/ч	Концентра- ция (X), кг/м ³	$\frac{dV}{V d\tau}$, 1/ч	$\frac{dX}{X d\tau} + D$, 1/ч	μ, 1/ч	
								экспери- менталь- ное	теорети- ческое
0	99,785		827,759		8,29				
1	116,416		976,377		8,39	0,154	0,012	0,165	0,166
2	118,791		1220,426		10,27	0,020	0,202	0,223	0,222
3	118,791		1270,886		10,7	0	0,041	0,04	0,041
4	125,919		1482,226		11,77	0,058	0,095	0,154	0,153
5	161,556		1735,157		10,74	0,248	-0,092	0,157	0,156
6	171,06		2166,360		12,66	0,057	0,164	0,222	0,221
7	173,435		2463,099		14,2	0,014	0,115	0,128	0,129
8	168,684	78,5	2313,558	1076,654	13,71	-0,028	0,424	0,388	0,396
9	171,06	33,36	2242,962	437,421	13,11	0,014	0,151	0,161	0,165
10	171,06	78,5	2295,323	1053,229	13,42	0	0,482	0,487	0,482
11	171,06	66,73	2240,701	874,065	13,1	0	0,366	0,361	0,366
0			1050						
1	27		1080		40	—	0,028	—	—
2	28		1204		43	0,036	0,072	0,109	0,108
3	33		1518		46	0,164	0,067	0,232	0,231
4	38		1634		43	0,141	-0,067	0,074	0,074
5	43		1806		42	0,123	-0,023	0,1	0,1
6	50		2000		40	0,15	-0,049	0,102	0,101
7	57		2280		40	0,131	0	0,131	0,131
8	64		2432		38	0,116	-0,051	0,064	0,065
9	70		3010		43	0,089	0,124	0,213	0,213

Формула (4) дает возможность рассчитать значение μ при обработке опытных данных по периодическому культивированию в аппаратах с переменным рабочим объемом.

Если использовать очевидное соотношение $dV/d\tau = Q_{пр}$, то уравнение (3) можно представить в виде, аналогичном уравнению материального баланса хемостата,

$$\frac{dX}{d\tau} = X \left(\mu - \frac{Q_{пр}}{V} \right), \quad (5)$$

где $Q_{пр}$ — приток в аппарат питательной среды, м³/ч.

Уравнение (5) позволяет решить задачу расчета кинетики накопления биомассы в АПД и, как будет показано ниже, в аппаратах непрерывного действия с переменными рабочими объемами с помощью соотношений, полученных для μ в аппарате периодического действия с постоянным объемом культуральной среды.

Известно, что изменение концентрации биомассы при непрерывном культивировании в аппаратах с постоянным рабочим объемом в нестационарном режиме, обусловленном нарушением равенства $\mu = D$, описывается уравнением

$$\frac{dX}{d\tau} = (\mu - D) X, \quad (6)$$

где D — коэффициент скорости разбавления, $1/\text{ч}$. Однако возможна и другая причина нестационарности — $Q_{\text{пр}} \neq Q_{\text{ст}}$, где $Q_{\text{ст}}$ — сток культуральной среды из аппарата, $\text{м}^3/\text{ч}$. Определение в этих условиях μ по экспериментальным данным с помощью уравнения (6) приводит к тем же ошибкам, что и определение μ по уравнению (1) при периодическом культивировании.

Уравнение (2) для случая непрерывного культивирования при отсутствии подсева примет вид:

$$\frac{d(XV)}{d\tau} = \mu(XV) - Q_{\text{ст}}X. \quad (7)$$

Уравнение (7) при постоянном рабочем объеме аппарата легко приводится к уравнению (6), а при переменном рабочем объеме после дифференцирования левой части уравнения (7) получим

$$X \frac{dV}{d\tau} + V \frac{dX}{d\tau} = \mu XV - Q_{\text{ст}}X, \quad (8)$$

откуда

$$\mu = \frac{dX}{X d\tau} + \frac{dV}{V d\tau} + \frac{Q_{\text{ст}}}{V}. \quad (9)$$

Формула (9) дает возможность рассчитать значение μ при обработке опытных данных по непрерывному культивированию в аппаратах с переменным объемом рабочей среды. Отметим, что формула (9) применима в наиболее общем случае, когда $D \neq 0$, $M \neq D$ и $Q_{\text{ст}} \neq Q_{\text{пр}}$. При $Q_{\text{ст}} = 0$ и $dV = 0$ формула (9) может быть приведена к виду уравнения (1), при $dV = 0$ и, следовательно, $Q_{\text{ст}} = Q_{\text{пр}}$ — к виду уравнения (6), а при $Q_{\text{ст}} = 0$ — к виду уравнения (4).

Если использовать очевидное соотношение $dV/d\tau = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{ст}}$, то уравнение (8) примет вид уравнения (5).

Возможен и другой вывод формул (4) и (9), предложенный В. Н. Ивановым. При переменном рабочем объеме культиватора изменение концентрации биомассы можно представить как сумму двух составляющих, одна из которых учитывает эффект разбавления $(dX)_v$, другая — эффект роста биомассы $(dX)_\mu$.

Так как

$$(dX)_v = X \frac{V}{V + dV} - X = - \frac{XdV}{V + dV} \approx - X \frac{dV}{V},$$

то при периодическом культивировании

$$dX = (dX)_\mu + (dX)_v = \mu X d\tau - X \frac{dV}{V},$$

откуда

$$\mu = \frac{dX}{X d\tau} + \frac{dV}{V d\tau}.$$