

Н. В. Суханова, доц., канд. техн. наук;  
Ю. Е. Кожевников, инж.; К. В. Дугина, студ.  
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж)

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ И ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТБОРА БИОМАССЫ

Рассмотрим математическую модель процесса в виде [1, 2, 3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta \frac{dX}{dt} = \theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot K_4 \cdot X^{2(i)} - \theta \cdot \frac{F}{V^{(i)}} \cdot X^{(i)} + (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_1}{dt} = -\frac{\theta}{Y_{X/S1}} \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot m \cdot X^{(i)} + \\ + \theta \cdot \frac{F_1}{V^{(i)}} \cdot (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_2}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{02} + \frac{(\alpha_{m2} - \alpha_{02}) \cdot S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_2}{V^{(i)}} \cdot (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_3}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[ \alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m3} - \alpha_{03}) \cdot S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\ + \theta \cdot \frac{F_3}{V} \cdot (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\ F = F_1 + F_2 + F_3; \\ \theta \frac{dT}{dt} = T^{(i)} + T_b^{(i)} + \theta \cdot \varphi^{(i)} \cdot a_0 \cdot (X^{(i)} - X^{(i-1)}) \cdot V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{воз}} \cdot \Delta I. \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\mu_m$  - максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $K_1, K_2, K_3, K_4, Y_{X/S1}, K_5, K_6$  - коэффициенты;  $\alpha_0$  и  $\alpha_m$  - минимальное и максимальное содержание элемента в биомассе для минеральных субстратов;  $X, S_1, S_2, S_3$  - концентрации биомассы, углеводов, азота и фосфора соответственно;  $V$  - объем жидкости;  $F$  - объемная скорость подачи питательных веществ;  $F_1, F_2, F_3$  - объемные скорости подачи мелассы, сульфата аммония и диаммонийфосфата;  $S_{01}, S_{02}, S_{03}$  - концентрации сахаров, азота и фосфора в подпитке;  $m$  - скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности;  $\theta$  - время роста микроорганизмов в аппарате;  $a_0$  - коэффициент удельного тепловыделения дрожжей;  $G_{\text{воз}}$  - массовый расход воздуха;  $\Delta I$  - приращение теплосодержания воздуха;  $G_{\text{в}}^{\text{OX}}$  - массовый расход воды на охлаждение;  $C_{\text{в}}$  - удельная теплоемкость воды;  $T$  - температура культуральной среды в аппарате;  $T_{\text{в}}$  - температура воды в рубашке аппарата.

Для определения оптимального значения концентрации микроорганизмов и величины оптимального отбора биомассы, необходимо по ходу процесса культивирования определять численные значения коэффициентов модели  $\varepsilon$  и  $\beta$  ( $\frac{dX}{dt} = [\varepsilon - \beta \cdot X] \cdot X$ ). Анализ модели (1), показы-

вает, что коэффициенты  $\varepsilon$  и  $\beta$  можно выразить следующим образом [1]:

$$\varepsilon = \left( \mu - \frac{F}{V} + \frac{1}{\theta} \right), \quad \beta = K_4. \quad (2)$$

Расчет значений  $\varepsilon$  и  $\beta$  необходимо производить по ходу процесса, используя систему уравнений (1). Отбор биомассы из аппарата начинается при достижении текущей концентрации  $X$  уровня  $\frac{\varepsilon}{2\beta}$ . Для определения объема биомассы, отбираемой из аппарата, используется выражение:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X^{(i)} - K_4 \cdot X^{(i)2} - \frac{F}{V} \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta} (X^{(i)} - X^{(i-1)}).$$

При условии, что весь прирост биомассы должен быть отобран во время отбора, можно записать [1]:

$$u = \frac{dX}{dt}. \quad (3)$$

Принимая во внимание нулевые начальные условия, т. е.  $X^{(i-1)} = 0$ , объем отбираемой биомассы определяется как [1]:

$$V_{\text{от}} = \frac{F}{\frac{u}{X^{(i)}} - \mu + K_4 \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta}}. \quad (4)$$

На основе описанной выше методики была разработана АСУ отбором биомассы дрожжей из аппарата по ходу процесса культивирования [1]. Анализ результатов показывает, что использование такой системы в процессе управления дрожжевым производством позволяет снизить время культивирования на 1 час. Оптимальная концентрация  $X = 59 \text{ кг/м}^3$ , время отбора  $t'$  - начало 6 часа; время культивирования -  $t_k = 12 \text{ ч}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев В. В., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Одно решение задачи кинетики роста микроорганизмов // Проблемы химии и химической технологии: тез. докл. 2-ой региональной научной конференции. Тамбов, 1994. С.126 - 127.
2. Авцинов И. А., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов // Вестник ТГТУ, 2017. Т.23. № 3. - С.481 - 487.
3. Голубкина, Н. В. Математическая модель полупериодического процесса ферментации биомассы микроорганизмов/ Н. В. Голубкина, Л. С. Гордеев, В. В. Ануфриев, Г. И. Щепкин, С. Г. Тихомиров // Информационные технологии и системы. Технологические задачи механики сплошных сред: тез. докл. республ. конф. - Воронеж: Воронеж. гос. ун - т, 1992. - С. 50.