

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАЦИИ В АППАРАТАХ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ БИОМАССЫ

Г.И. Лапишенков, профессор, М.С. Ленский, доцент,

А.А. Сумбаева, ассистент

кафедра Систем управления и автоматизации химико-технологических процессов

МИТХТ им. М.В. Ломоносова

e-mail: lenskymc@yandex.ru

Исследована работа ферментатора аэробных микроорганизмов непрерывного действия с рециркуляцией биомассы в условиях ингибирования субстратом, кислородом и метаболитом. Выявлены области его устойчивых состояний и влияние параметров процесса ферментации на работу ферментатора.

Ключевые слова ферментатор, ингибирование, аэробные микроорганизмы, статический и динамический режим.

В данной статье исследована работа ферментатора аэробных микроорганизмов непрерывного действия с рециркуляцией биомассы в условиях ингибирования субстратом, кислородом и метаболитом.

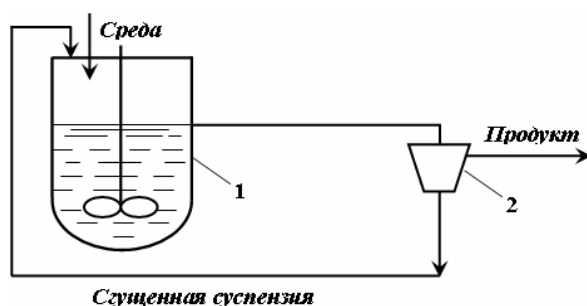


Рис. 1. Технологическая схема процесса ферментации с рециркуляцией:
1 – ферментатор; 2 – сепаратор непрерывного действия.

Ферментация аэробных микроорганизмов является основной стадией производства многих биологически активных соединений. Микроорганизмы выращивают в ферментаторах емкостного типа с мешалкой при непрерывном подводе потоков питательной среды и воздуха и отводе ферментационной среды. При этом нередко часть образовавшейся биомассы возвращают обратно, чтобы увеличить концентрацию продукта (например, при выращивании активного ила) (рис. 1).

Математическая модель ферментатора с протекающим в нем процессом с рециркуляцией биомассы в условиях ингибирования субстратом, кислородом и метаболитом представляет систему четырех нелинейных взаимосвязанных уравнений [1, 2]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -rDX + \mu X \\ \frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - \frac{1}{Y_s} \mu X \frac{1}{r} \\ \frac{dC}{dt} = K_L a(C^p - C) - \frac{1}{Y_c} \mu X \frac{1}{r} \\ \frac{du}{d\tau} = -rDP + \frac{1}{Y_p} \mu X, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S + S^2 / K_{is}} \times \\ &\times \frac{C}{K_c + C + C^2 / K_{ic}} \cdot \frac{K_p}{K_p + P} \end{aligned} \quad (2)$$

где r – степень рециркуляции; остальные обозначения и сделанные допущения см. в нашей предыдущей статье «Управление ферментатором аэробных микроорганизмов» в этом же номере «Вестника МИТХТ».

Для упрощения последующих вычислений и сокращения числа параметров используем математическую модель в безразмерном виде (все обозначения также см. в предыдущей статье).

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = -r\delta x + mx \\ \frac{dy}{d\tau} = \delta y_0 - \delta y - mx \frac{1}{r} \\ \frac{dw}{d\tau} = \varepsilon k(w^p - w) - mx \frac{1}{r} \\ \frac{du}{d\tau} = -r\delta u + bmx \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{\mu}{\mu_m} = \frac{y}{1 + y + \gamma_y \cdot y^2} \times \\ &\times \frac{w}{1 + w + \gamma_w \cdot w^2} \cdot \frac{1}{1 + u} \end{aligned} \quad (4)$$

Исследование динамического режима работы ферментатора проводилось компьютерным методом с использованием программного продукта MATLAB 6.5 – SIMULINK 4/5. Структурная схема модели, составленная с использованием SIMULINK, приведена на рис. 2.

Она включает в себя четыре инерционных элемента (интегратора), на выходе которых

формируются сигналы переменных состояния. Входы интеграторов находятся под воздействием сигналов прямых каналов, по которым поступают управляющие воздействия, и сигналов обратных связей. В расчетах задавали числовые значения параметров, входящих в систему (3–4), и фиксировали изменение выходных величин ферментатора во времени до достижения стационарного состояния.

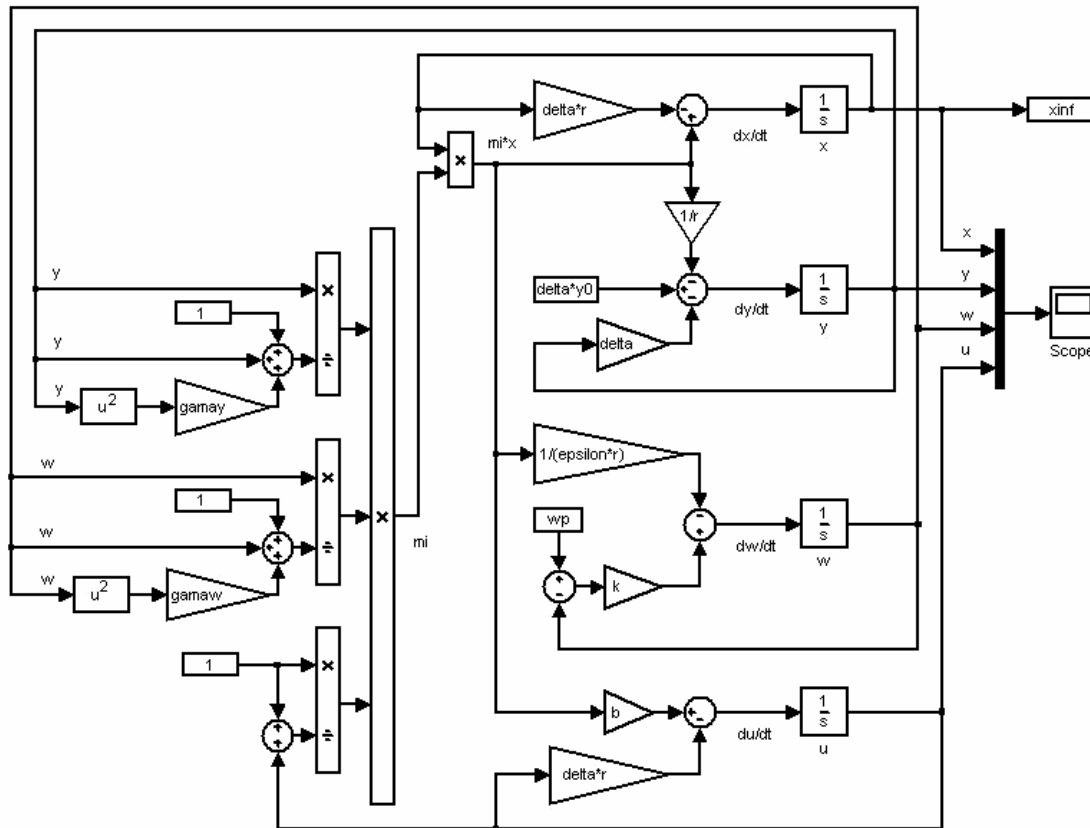


Рис. 2. Структурная схема математической модели ферментатора с рециркуляцией биомассы.

В информационном отношении процесс ферментации представляет собой нелинейную управляемую динамическую систему, переменными состояния которой являются концентрации биомассы x , субстрата y , кислорода w и метаболита u , а управляющими воздействиями – скорость разбавления δ и произведение ϵk , пропорциональное объемному коэффициенту массопередачи кислорода в ферментационную среду через границу воздух – жидкая среда.

Процесс рассчитывали при следующих числовых значениях параметров: $y_0 = 10$; $w^p = 10$; $\gamma_y = \gamma_w = 0.5$; $\epsilon k = 0.5$. При этом устойчивые стационарные состояния получали из переходного процесса системы, а неустойчивые – путем расчета по специальной программе в среде MATLAB, что позволило оптимизировать расчеты и

сократить их продолжительность.

В предыдущей работе [3] (а также см. статью «Управление ферментатором аэробных микроорганизмов») было найдено, что процесс может иметь четыре стационарных состояния; естественно, в каждый конкретный момент времени он может находиться только в одном из устойчивых стационарных состояний. Как показали исследования, в процессах с рециркуляцией биомассы наблюдается аналогичная картина. На рис. 3 приведена зависимость концентрации биомассы x от скорости протока δ при различных значениях степени рециркуляции r . Видно, что при увеличении r вид кривых зависимости $x = f(\delta)$ не изменяется, а график смещается влево. При этом уменьшаются и значения δ_B – скорости вымывания микроорганизмов (показаны вертикальными прямыми на рис. 3).

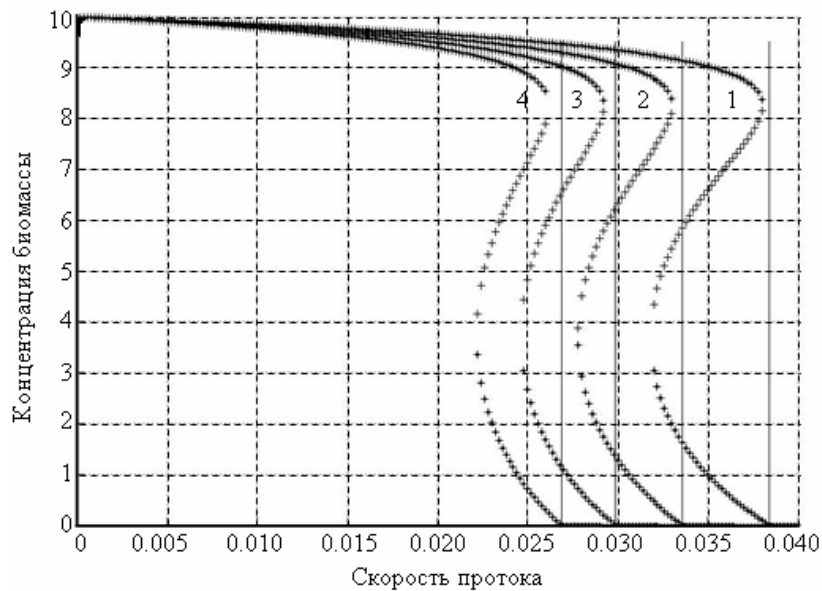


Рис. 3. Зависимость концентрации биомассы от скорости протока:

$$y_0 = 10; w^p = 10; \gamma_y = \gamma_w = 0.5; b = 0.2; \varepsilon k = 0.5;$$

$$1 - r = 0.7; 2 - r = 0.8; 3 - r = 0.9; 4 - r = 1.$$

Исследования показали, что коэффициент ингибирования метаболитом b оказывает заметное влияние на процесс ферментации. На рис. 4 показаны зависимости $x = f(\delta)$ для разных значений b . Видно, что при малом b (линия 1 на рис. 4) максимальное значение δ заметно превышает величину δ_B , а при $b > 0.2$ становится меньше δ_B . При этом сама величина δ_B остается постоянной.

На рис. 5 приведена зависимость производительности ферментатора $\pi = \delta x$ от скорости протока δ для различных значений степени рециркуляции r . При увеличении r произво-

дительность ферментатора снижается, а общий вид кривых остается неизменным.

При других значениях концентрации субстрата в питательном потоке y_0 вид рассмотренных зависимостей качественно не меняется. Концентрация биомассы x изменяется пропорционально величине y_0 .

Приведенные результаты следует учитывать при выборе диапазона управляющих воздействий, соответствующего оптимальному режиму процесса ферментации аэробных микроорганизмов, протекающего в условиях ингибирования субстратом, кислородом и метаболитом.

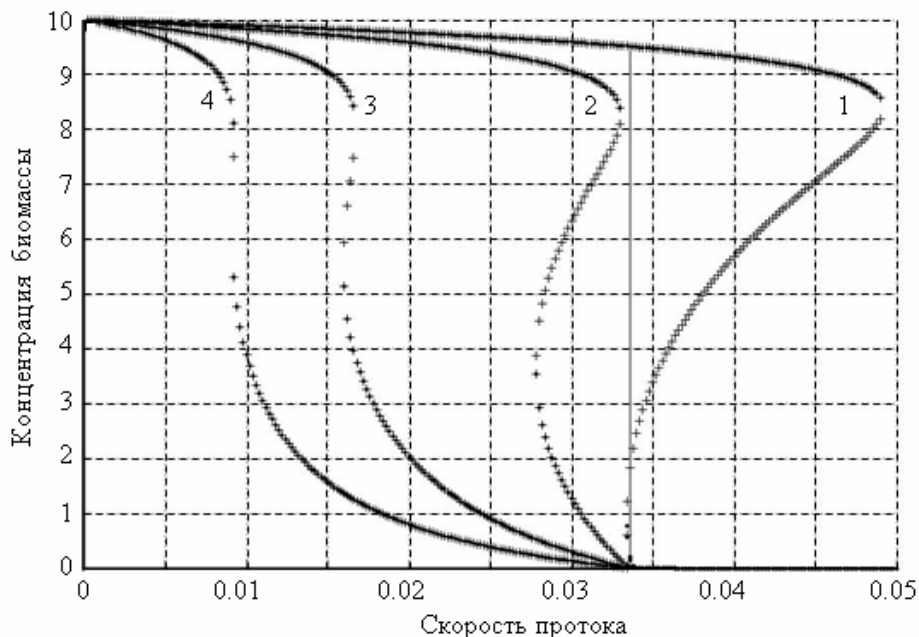


Рис. 4. Зависимость концентрации биомассы от скорости протока:

$$y_0 = 10; w^p = 10; \gamma_y = \gamma_w = 0.5; \varepsilon k = 0.5; r = 0.8;$$

$$1 - b = 0.1; 2 - b = 0.2; 3 - b = 0.5; 4 - b = 1.$$

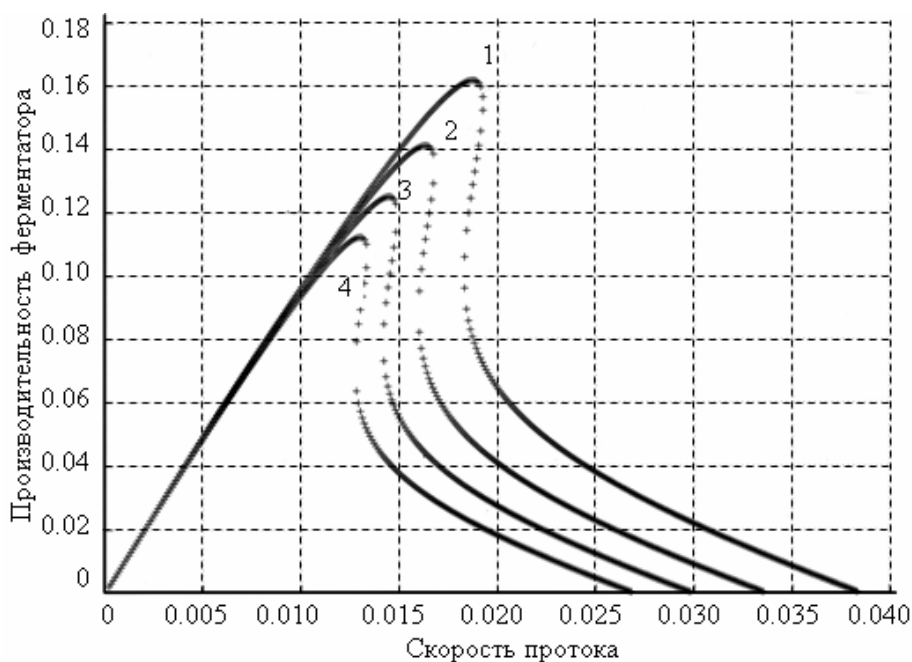


Рис. 5. Зависимость производительности ферментатора от скорости протока:

$$y_0 = 10; w^p = 10; \gamma_y = \gamma_w = 0.5; b = 0.5; \varepsilon k = 0.5;$$

$$1 - r = 0.7; 2 - r = 0.8; 3 - r = 0.9; 4 - r = 1.$$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ryder, D. N. Model for the growth of aerobic microorganisms under oxygen limiting conditions / D. N. Ryder, C. G. Sinclair // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1972. – Vol. 14, № 5. – P. 787–798.
2. Романовский, Ю. М. Математическое моделирование в биофизике. Введение в теоретическую биофизику. Изд. 2 / Ю. М. Романовский, Н. Д. Степанова, Д. С. Чернавский. – М. : Наука, 2004. – 472 с.
3. Лапшенков, Г. И. Влияние управлений при полистационарности процесса ферментации аэробных микроорганизмов / Г. И. Лапшенков, М. С. Ленский, А. А. Сумбаева // *Сб. трудов XIX МТК «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-19)»*, т. 1, Воронеж, 30 мая – 1 июня 2006. – Воронеж, 2006. – С. 97.