

УПРАВЛЕНИЕ ФЕРМЕНТАТОРОМ АЭРОБНЫХ
МИКРООРГАНИЗМОВ

Г.И. Лапшенков, 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

Изучена работа ферментатора аэробных микроорганизмов непрерывного действия. Установлено, что процесс может иметь до четырех стационарных состояний. Исследована работа системы управления ферментатора. Выявлено влияние параметров настройки регулятора на качество переходного процесса системы.

Ключевые слова: ферментатор, моделирование, система управления, переходный процесс.

Ферментация аэробных микроорганизмов является основной стадией производства белков, витаминов, биологически активных добавок, аминокислот и других соединений. Микроорганизмы выращивают в емкостных биореакторах (ферментаторах) с мешалкой при непрерывной подаче питательной среды и воздуха и отводе ферментационной среды.

1. Математическая модель
процесса ферментации

При изучении процесса ферментации были сделаны следующие допущения: на одном субстрате выращивается одна популяция микроорганизмов; процесс происходит при идеальном перемешивании ферментационной среды в аппарате; средний возраст клеток соответствует экспоненциальному участку кривой роста культуры микроорганизмов; образуются только первичные метаболиты; экономические коэффициенты по субстрату, кислороду и метаболиту имеют постоянные значения; удельная скорость протекания процесса ограничена ингибированием по субстрату, растворенному кислороду и метаболиту.

Математическая модель динамического режима процесса ферментации при принятых допущениях представляет собой систему взаимозависимых нелинейных уравнений [1, 2]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -DX + \mu X \\ \frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - \frac{1}{Y_S} \mu X \\ \frac{dC}{dt} = K_L a(C^p - C) - \frac{1}{Y_C} \mu X \\ \frac{du}{d\tau} = -DP + \frac{1}{Y_P} \mu X, \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_S + S + S^2 / K_{IS}} \times \frac{C}{K_C + C + C^2 / K_{IC}} \cdot \frac{K_P}{K_P + P}, \quad (2)$$

где: C и C^p – текущая и равновесная концентрации кислорода в ферментационной среде, кг/кг; D – массовая скорость потока, кг/с; K_C и K_S – константы полунасыщения по кислороду и субстрату, кг/кг; K_{IC} и K_{IS} – константы ингибирования роста культуры кислородом и субстратом, кг/кг; $K_L a$ – коэффициент массопередачи, с⁻¹; K_P – константа ингибирования метаболитом, кг/кг; P – концентрация метаболита в ферментационной среде, кг/кг; S и S_0 – концентрации субстрата в ферментационной среде и в питательном потоке, кг/кг; t – время, с; X – концентрация биомассы в ферментационной среде, кг/кг; Y_C и Y_S – экономические коэффициенты по кислороду и субстрату, кг/кг; Y_P – коэффициент выхода по метаболиту, кг/кг; μ_m – максимальная удельная скорость образования биомассы, кг/(кг·с); μ – удельная скорость образования биомассы, кг/(кг·с).

Для упрощения последующих вычислений и сокращения числа параметров удобно использовать указанную математическую модель в безразмерном виде:

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

$$m = \frac{\mu}{\mu_m} = \frac{y}{1 + y + \gamma_y \cdot y^2} \cdot \frac{w}{1 + w + \gamma_w \cdot w^2} \cdot \frac{1}{1 + u}, \quad (4)$$

где: $b = \frac{Y_S K_S}{Y_P K_P}$ – коэффициент ингибирования

метаболизмом; $k = \frac{1}{\mu_m} K_L a$ – объемный коэффициент массопередачи по кислороду;

$u = \frac{P}{K_P}$ – концентрация метаболита; $w = \frac{C}{K_C}$

и $w^P = \frac{C^P}{K_C}$ – концентрации кислорода, растворенного в ферментационной среде и равно-

весная; $x = \frac{X}{Y_S K_S}$ – концентрация биомассы

микроорганизмов; $y = \frac{S}{K_S}$ и $y_0 = \frac{S_0}{K_S}$ – кон-

центрация субстрата в рабочем объеме ферментатора и питательном потоке;

$\gamma_y = \frac{K_S}{K_{IS}}$ и $\gamma_w = \frac{K_C}{K_{IC}}$ – коэффициенты инги-

бирования процесса избытком субстрата и кислорода; $\delta = \frac{1}{\mu_m} D$ – скорость разбавления;

$\varepsilon = \frac{K_C Y_C}{K_S Y_S}$ – физиологический коэффициент,

зависящий от кинетики роста и стехиометрии биореакции популяции микроорганизмов; m – безразмерная удельная скорость образования биомассы; $\tau = \mu_m t$ – безразмерное время.

Процесс ферментации представляет собой нелинейную динамическую управляемую систему, в которой переменными состояниями являются концентрация биомассы x , субстрата y и метаболита u , а управляющими воздействиями – скорость разбавления (протока) δ и произведение εk , пропорциональное объемному коэффициенту массопередачи кислорода в ферментационную среду через границу воздух – жидкая среда.

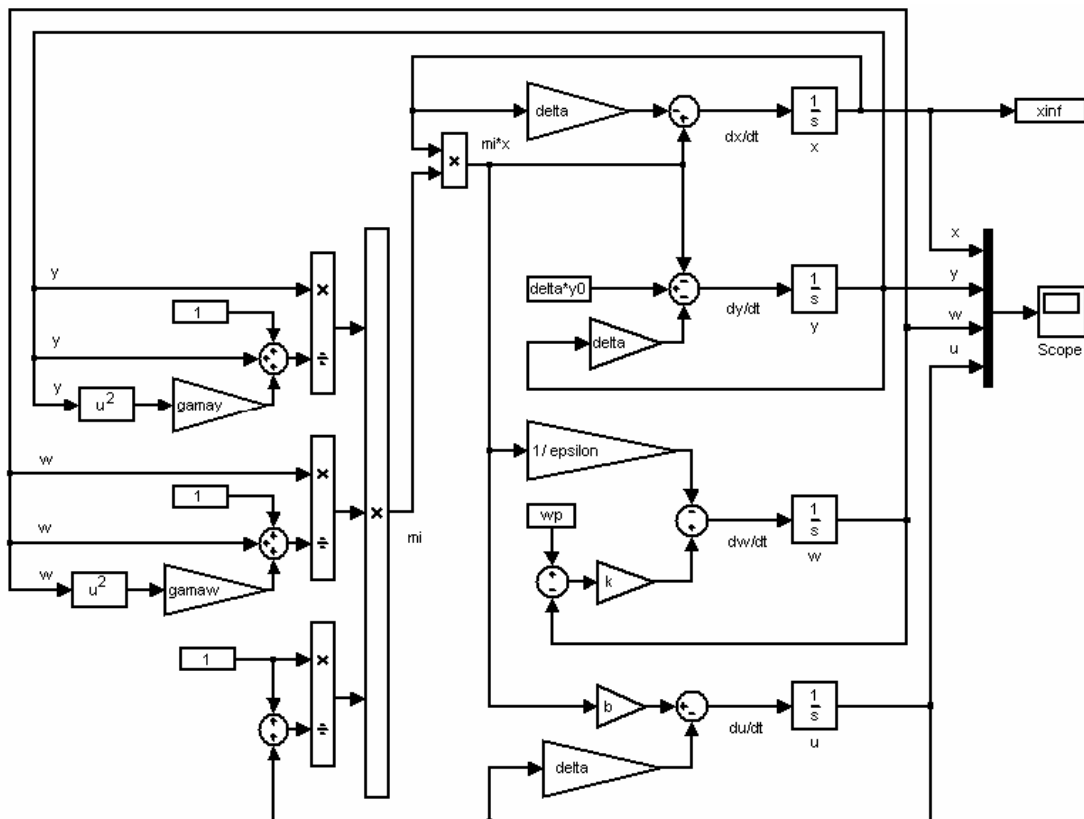


Рис. 1. Структурная схема математической модели ферментатора.

2. Режимы работы ферментатора

Динамический режим работы ферментатора изучали с использованием программного продукта MATLAB 6.5 – SIMULINK 4/5. Структурная схема модели, составленная в SIMULINK, представлена на рис. 1. В расчетах мы задавали значения параметров,

входящих в систему (3-4), и фиксировали изменение выходных величин ферментатора во времени, пока последние не достигали равновесия.

Процесс рассчитывали при следующих значениях параметров: $y_0 = 10$; $w^P = 10$; $\gamma_y = \gamma_w = 0.5$; $b = 0.3$. Устойчивые стационарные

состояния были получены из переходного процесса системы, а неустойчивые – путем расчетов по специальной программе в среде MATLAB, разработанной в Университете г. Пардубице аспирантом П. Шкрабанеком.

Было установлено, что процесс может иметь до четырех стационарных состояний; естественно, в каждый конкретный момент процесс может быть только в одном из устойчивых стационарных состояний. Были установлены четыре области протекания процесса с разным числом стационарных состояний в зависимости от скорости разбавления δ . Границы этих областей определяются бифуркационными значениями δ : $0 < \delta_2 < \delta_1 < \delta_B < \infty$, δ_B – скорость вымы-

вания микроорганизмов, δ_1 и δ_2 – значения δ , для которых $d\delta/dx = 0$. В интервале $0 < \delta < \delta_2$ имеется два стационарных состояния: первое, в котором наблюдается режим вымывания, является неустойчивым; второе соответствует постоянному режиму образования биомассы. В промежутке $\delta_2 - \delta_1$ имеется четыре стационарных состояния, два из которых являются устойчивыми, другие два – неустойчивыми. В промежутке $\delta_1 - \delta_B$ зафиксировано два стационарных состояния, одно из которых является устойчивым, а другое – неустойчивым. При скоростях разбавления $\delta > \delta_B$, т.е. при малом времени пребывания внутри аппарата, биомасса устойчиво вымывается из ферментатора.

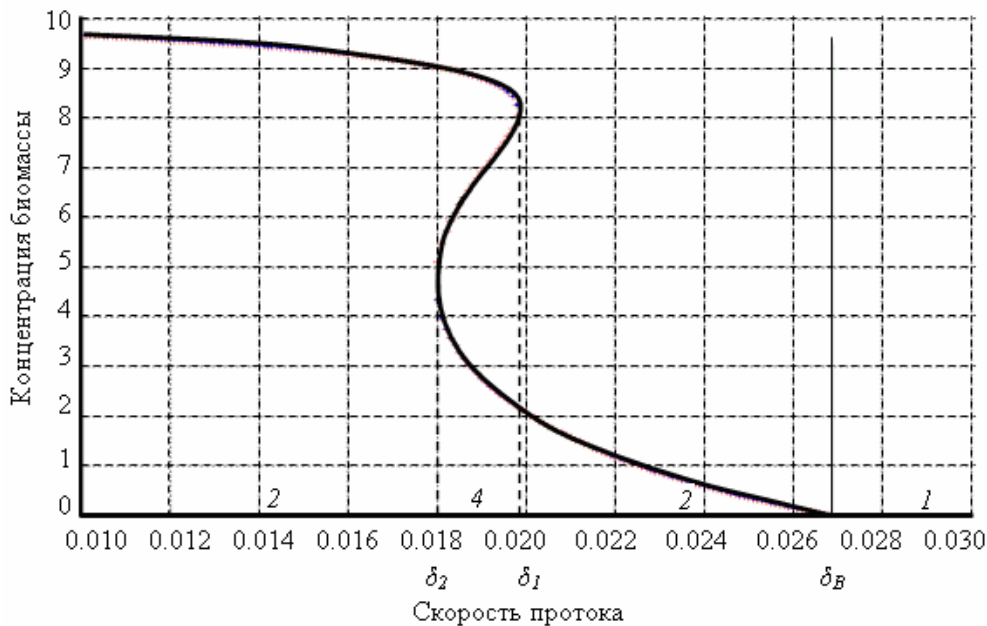


Рис. 2. Зависимость концентрации биомассы от скорости разбавления:

$$y_0 = 10; w^p = 10; \gamma_y = \gamma_w = 0.5; b = 0.3; \varepsilon k = 0.5;$$

цифры курсивом – количество стационарных состояний в каждой из 4-х областей протекания процесса.

Влияние второго управляющего воздействия εk на процесс является неоднозначным. Стационарные зависимости $x = f(\delta)$, соответствующие различным значениям управляющего воздействия εk , полностью повторяют друг друга, но при этом области с различным количеством стационарных состояний трансформируются. С ростом управления εk значения δ_1 и δ_2 уменьшаются, но таким образом, что область режима процесса с 4-мя стационарными состояниями постепенно уменьшается.

Зависимость $x = f(\varepsilon k)$ при скорости разбавления $\delta_2 < \delta < \delta_1$ носит складкообразный характер (рис. 3). Мы зафиксировали три области протекания процесса с различным количеством стационарных состояний, границы которых определяются бифуркационными значениями $(\varepsilon k)_1$ и $(\varepsilon k)_2$, при которых $d(\varepsilon k)/dx = 0$. При переходе через

значения $(\varepsilon k)_1$ или $(\varepsilon k)_2$ процесс претерпевает катастрофу типа «сборки» и количество стационарных состояний изменяется на два.

Это необходимо принимать во внимание при эксплуатации ферментатора. Если установить управляющее воздействие εk выше, чем бифуркационное значение $(\varepsilon k)_1$, пока процесс находится во втором устойчивом стационарном состоянии, тогда процесс переходит в четвертое стационарное состояние с низкой производительностью. Чтобы вернуть его обратно во второе стационарное состояние с высокой производительностью, необходимо уменьшить управление εk до значения меньшего, чем бифуркационное значение $(\varepsilon k)_2$.

При других значениях концентрации субстрата в питательном потоке y_0 тип исследованных зависимостей меняется незначительно. Концентрация биомассы x изменяется пропорционально величине y_0 .

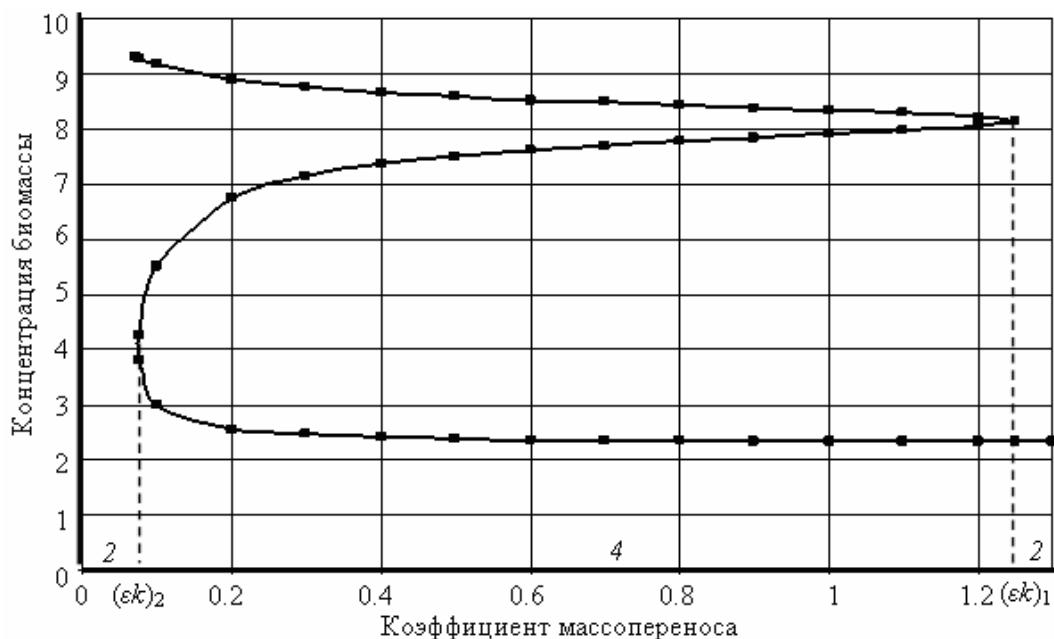


Рис. 3. Зависимость концентрации биомассы от коэффициента массопереноса:

$$y_0 = 10; w^p = 10; \gamma_y = \gamma_w = 0.5; b = 0.3; \delta = 0.0195.$$

цифры курсивом – количество стационарных состояний в каждой из 3-х областей протекания процесса.

3. Работа системы управления ферментатора

В производственных условиях и под воздействием возмущений уменьшение производительности процесса по биомассе довольно распространено. Динамика такого

перехода при ступенчатом увеличении δ от 0.015 до 0.025 в момент времени t_l показана на рис. 4. Как правило, оператор-технолог не может вернуть процесс в первоначальное состояние, и ферментатор продолжает работу с пониженной продуктивностью.

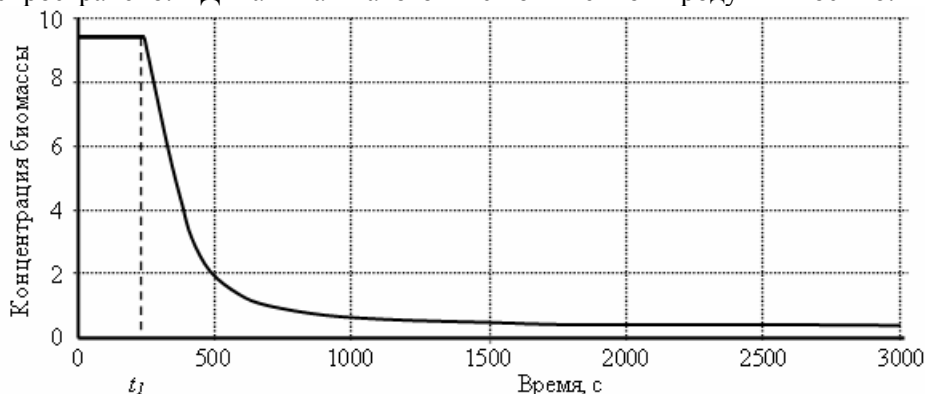


Рис. 4. Изменение концентрации биомассы при ступенчатом возмущении по δ в момент времени t_l .

В таких ситуациях система управления ферментатором позволяет решить проблему. Согласно расчетам, использование автоматического регулятора с управляющим воздействием по δ позволяет справиться с различными возмущающими воздействиями и предотвратить снижение концентрации биомассы x . В расчетах был использован пропорционально-интегральный регулятор; коэффициент усиления регулятора k_p варьировали в пределах от 0.1 до 20, а время интегрирования $T_{ин}$ – от 3 до 50 с. Некоторые результаты приведены на рис. 5–8. Все

переходные процессы системы управления были получены при ступенчатом увеличении δ от 0.015 до 0.025 в момент времени $t_l = 10$ с.

Было установлено, что переходный процесс в системе управления носит колебательный характер. При увеличении k_p динамическая ошибка регулирования немного снижается, а частота колебаний увеличивается. С уменьшением $T_{ин}$ время регулирования и динамическая ошибка регулирования изменяются незначительно, но при малых значениях $T_{ин}$ в системе возникают расходящиеся колебания, что делает ее неустойчивой.

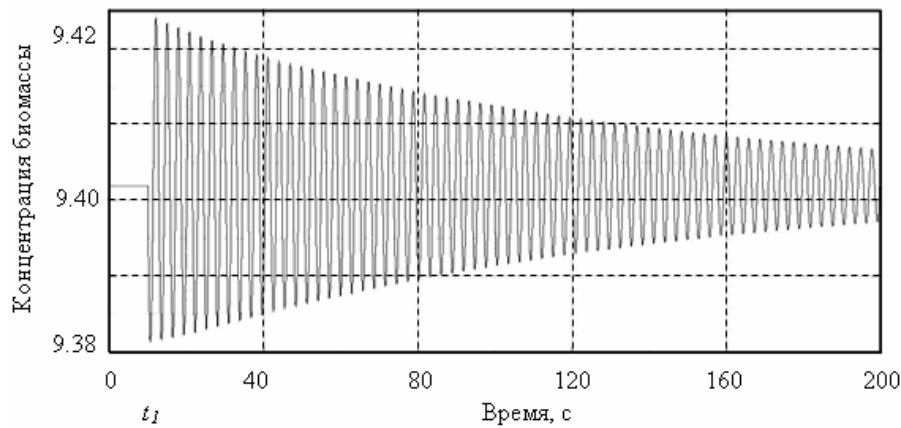


Рис. 5. Переходный процесс в системе управления при $k_p = 0.5$; $1/T_n = 0.05$.

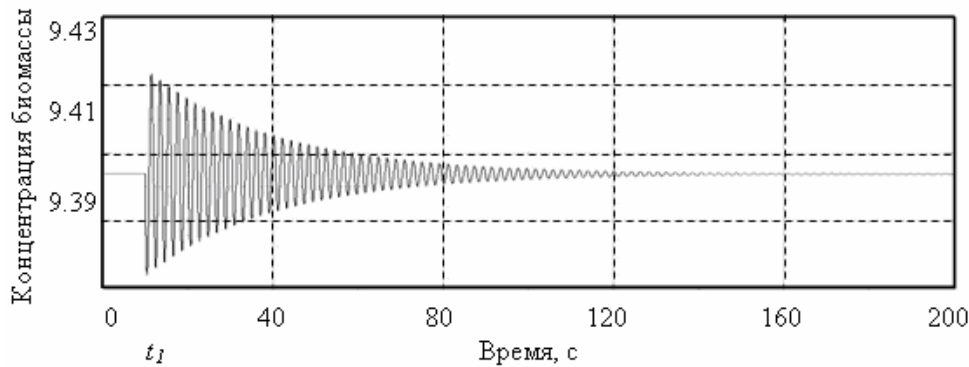


Рис. 6. Переходный процесс в системе управления при $k_p = 1.0$; $1/T_n = 0.05$.

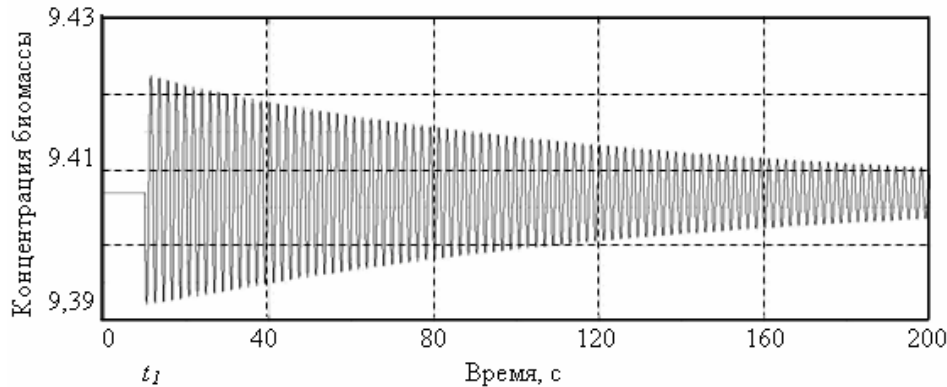


Рис. 7. Переходный процесс в системе управления при $k_p = 1.0$; $1/T_n = 0.1$.

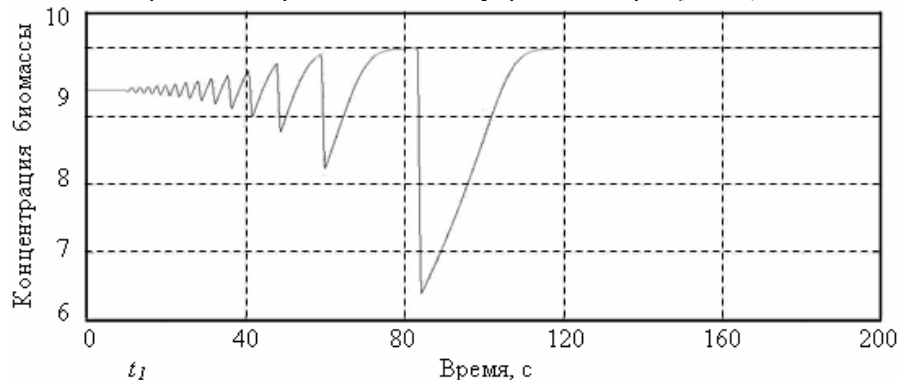


Рис. 8. Переходный процесс в системе управления при $k_p = 1.0$; $1/T_n = 0.3$.

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.