

МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

И. А. Авцинов, Ю. Е. Кожевников, Н. В. Суханова

*Кафедра «Информационные и управляющие системы»,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий», г. Воронеж, Россия; Suhanovanv1971@mail.ru*

Ключевые слова: аэробный периодический процесс; гидродинамика; многофакторные кинетические зависимости; объемная скорость подачи мелассы, сульфата аммония, диаммонийфосфата; теплопередача; удельная теплоемкость.

Аннотация: Рассмотрен блочный принцип построения кинетической модели периодического процесса культивирования дрожжей. Математическая модель аэробного процесса выращивания дрожжей представлена в виде системы дифференциальных уравнений материального баланса, описывающих динамику изменения основных наблюдаемых параметров: концентрации биомассы, сахаров, азота, фосфора и объема культуральной среды. В целях определения подходящей кинетической зависимости проведена идентификация различных вариантов трехсубстратных зависимостей. На основе анализа структуры потоков в аппарате исследуемая система отнесена к смещению на микроуровне со степенью сегрегации, равной нулю. Уравнение теплового баланса записано для изотермического процесса в аппарате идеального перемешивания с ограничением теплосъема. Полученная математическая модель процесса выращивания микроорганизмов представлена трехуровневой структурой, учитывающей наряду с кинетикой роста биомассы явления гидродинамики и теплопередачи в аппарате.

Математическую модель проще составлять по отдельным участкам, используя блочный принцип. При создании математического описания процесса выращивания дрожжей представим модель как некую совокупную структуру, состоящую из следующих блоков: кинетического, гидравлического и энергетического, что фактически полностью характеризует исследуемый технологический процесс. Огромное значение в процессе выращивания микроорганизмов имеет концепция сбалансированного питания [1]. Важна не только доза вносимых источников азота, фосфора и углерода, но и их пропорции, при которых обеспечивается максимальная продуктивность аппарата.

Одним из основных факторов, влияющих на скорость роста микроорганизмов, является температурный режим и скорость перемешивания культуральной среды. В частности, для хлебопекарных дрожжей температурным оптимумом является 29...30 °С. В диапазоне температур 20...36 °С удельная скорость роста возрастает прямо пропорционально повышению температуры. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению выхода дрожжей.

Перемешивание культуральной среды в дрожжевом производстве осуществляется путем подачи воздуха на аэрацию, что обеспечивает непрерывное снабжение клеток кислородом, удаление CO₂ из среды и поддержание клеток во взве-

шенном состоянии. Подача воздуха в аппарат должна находиться в соответствии с подачей сахара и ожидаемой скоростью размножения дрожжей.

Предложен способ построения укрупненной математической модели процесса выращивания микроорганизмов, учитывающей:

1) влияние концентрации трех основных элементов: сахара, азота, фосфора и их соотношения на скорость накопления биомассы (создание кинетического модуля);

2) гидродинамическую обстановку в аппарате;

3) условие теплообмена при накоплении биомассы.

В целях повышения эффективности ведения технологического процесса все чаще возникают задачи, связанные с непосредственным вмешательством в процесс выращивания микроорганизмов. К ним относится добавление по ходу процесса питательных веществ и предшественников, а также отбор культуральной среды. Одновременно возникает необходимость выбора зависимости скорости роста микроорганизмов от концентрации питательного субстрата.

На *первом* этапе разработана кинетическая модель. Математическая модель аэробного процесса выращивания дрожжей может быть записана в виде системы дифференциальных уравнений материального баланса, описывающих динамику изменения основных наблюдаемых параметров, а именно: концентрации биомассы X , сахаров S_1 , азота S_2 , фосфора S_3 и объема культуральной среды V .

Макроскопическая модель периодического процесса выращивания микроорганизмов имеет вид [1 – 4]

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X(\mu - \tilde{\mu}); \\ \frac{dS_i}{dt} = -Xq_{S_i}, \end{cases} \quad (1)$$

где μ , q_{S_i} – удельные скорости накопления биомассы и потребления лимитирующих субстратов соответственно, ч^{-1} ; X – концентрация биомассы микроорганизмов, $\text{кг}/\text{м}^3$; S_i – концентрации лимитирующих субстратов ($i = \overline{1, 3}$), $\text{кг}/\text{м}^3$; $\tilde{\mu}$ – удельная скорость автолиза биомассы, ч^{-1} ; t – время, ч .

Так как вопрос о выборе подходящих уравнений для многофакторных кинетических зависимостей неочевиден, в целях определения оптимальной кинетической модели роста микроорганизмов проведена идентификация различных вариантов зависимостей при использовании одних и тех же экспериментальных данных [5].

Трехсубстратные зависимости получены путем различных комбинаций односубстратных. Поиск коэффициентов математической модели осуществлялся методом Нелдера–Мида при использовании среднеквадратичного критерия в качестве функции невязки. Адекватность модели контролировалась по критерию Фишера. Наилучшей оказалась мультипликативная трехсубстратная кинетическая зависимость типа

$$\mu = \mu_m \frac{S_1}{K_1 + S_1} \frac{S_2}{K_2 + S_2} \frac{S_3}{K_3 + S_3}, \quad (2)$$

где μ_m – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов, $\mu_m = 0,608$; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты модели, $K_1 = 0,254$; $K_2 = 0,129$; $K_3 = 0,066$ [3].

Принимая во внимание выражения (1), (2) получен кинетический модуль периодического процесса аэробного культивирования дрожжей с учетом подпитки.

На *втором* этапе разработан модуль гидродинамики. Основу формирования гидродинамической модели составляет анализ структуры потоков в аппарате.

Перемешивание культуральной среды происходит путем подачи воздуха (идушего на аэрацию) в воздухораспределительные короба, установленные в аппарате. Высокие скорости перемешивания, применяемые на практике, позволяют сделать предположение о выполнении следующих условий идеального смешения: отсутствие градиента температуры и концентрации в аппарате. Исследуемая система относится к смешению на микроуровне со степенью сегрегации $J = 0$ [1]. Гидравлический блок запишем в следующем виде

$$\theta \frac{d\bar{z}}{dt} = \bar{z}^{(i)} - \bar{z}^{(i-1)} + \theta \bar{R}_z^{(i)}, \quad (3)$$

где $\bar{R}_z^{(i)}$ – кинетический блок; θ – время роста микроорганизмов в аппарате, ч; $\bar{z} = (X, S_1, S_2, S_3)$ – вектор параметров процесса; i – значения параметров в текущий момент времени, $(i - 1)$ – в предыдущий момент времени. Модель гидродинамики аппарата в развернутом виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta \frac{dX}{dt} &= \theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} - \theta K_4 X^{2(i)} - \theta \frac{F}{V^{(i)}} X^{(i)} + \\ &+ (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_1}{dt} &= -\frac{\theta}{Y_{X/S_1}} \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} - \theta m X^{(i)} - \\ &- \theta \frac{F_1}{V^{(i)}} (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_2}{dt} &= -\theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \left[\alpha_{02} + \frac{(\alpha_{m2} - \alpha_{02}) S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\ &+ \theta \frac{F_2}{V^{(i)}} (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\ \theta \frac{dS_3}{dt} &= -\theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \left[\alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m3} - \alpha_{03}) S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\ &+ \theta \frac{F_3}{V^{(i)}} (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\ F &= F_1 + F_2 + F_3. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где $K_4, Y_{X/S_1}, K_5, K_6$ – коэффициенты, $K_4 = 0,001 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{ч})$; $Y_{X/S_1} = 3,0$; $K_5 = 1,0 \text{ кг/м}^3$; $K_6 = 1,0 \text{ кг/м}^3$ [4, 6]; α_0, α_m – минимальное и максимальное содержание элемента в биомассе для минеральных субстратов, $\alpha_{02} = 0,016$; $\alpha_{m2} = 0,018$; $\alpha_{03} = 0,006$; $\alpha_{m3} = 0,008$ [1]; 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 диаммоний фосфата соответственно; S_{01}, S_{02}, S_{03} – концентрации сахаров, азота и фосфора в подпитке соответственно; m – скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности, $m = 0,036 \text{ ч}^{-1}$;

На *третьем* этапе разработан энергетический модуль. Рассматривая процесс выращивания микроорганизмов в аппарате идеального перемешивания как изотермический с ограничением теплосъема, уравнение теплового баланса запишем в виде [1]

$$Q_{\text{биол}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{воз}} + Q_{\text{пит}} + Q_5, \quad (5)$$

где $Q_{\text{биол}}$ – количество биологического тепла, кДж/ч; $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{возд}}$, $Q_{\text{пит}}$, Q_5 – тепло, отводимое из аппарата охлаждающей водой, воздухом, подаваемым на аэрацию, при подаче питания и теплоизлучением соответственно, кДж/ч.

Если расписать слагаемые в уравнении (5), то получим:

$$\begin{aligned} Q_{\text{биол}} &= a_0(X^{(i)} - X^{(i-1)})V^{(i)}, \\ Q_{\text{пит}} &= a_1Q_{\text{биол}}; \\ Q_{\text{воз}} &= G_{\text{возд}}\Delta I; \\ Q_5 &= a_2Q_{\text{биол}}; \\ Q_{\text{в}} &= \frac{K_T G_{\text{в}}^{\text{OX}} S_{\text{б}}^{(i)} C_{\text{в}}}{K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}} (T^{(i)} - T_{\text{в}}^{(i)}), \end{aligned} \quad (6)$$

где a_0 – коэффициент удельного тепловыделения дрожжей, кДж/кг; $G_{\text{возд}}$ – массовый расход воздуха, кг/ч; ΔI – приращение теплосодержания воздуха, кДж/кг; $G_{\text{в}}^{\text{OX}}$ – массовый расход воды на охлаждение, кг/ч; $C_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·гр); T – температура культуральной среды в аппарате, °С; $T_{\text{в}}$ – температура воды в рубашке аппарата, °С; $S_{\text{б}}$ – площадь теплообмена, м²; a_1 , a_2 – числовые коэффициенты, K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·гр).

Тогда, с учетом (6) уравнение (5) запишем в следующем виде

$$\begin{aligned} &a_0(X^{(i)} - X^{(i-1)})V^{(i)}(1 - a_1 - a_2) = \\ &= G_{\text{возд}}\Delta I + \frac{K_T G_{\text{в}}^{\text{OX}} S_{\text{б}}^{(i)} C_{\text{в}}}{K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}} T^{(i)} - \frac{K_T G_{\text{в}}^{\text{OX}} S_{\text{б}}^{(i)} C_{\text{в}}}{K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}} T_{\text{в}}^{(i)}, \end{aligned} \quad (7)$$

отсюда

$$\begin{aligned} T^{(i)} &= a_0(X^{(i-1)} - X^{(i)})V^{(i)} \frac{(K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}})(1 - a_1 - a_2)}{K_T S_{\text{б}}^{(i)} G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}} - \\ &- G_{\text{возд}}\Delta I \frac{K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}}{K_T S_{\text{б}}^{(i)} G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}} + T_{\text{в}}^{(i)}, \end{aligned} \quad (8)$$

обозначая

$$\begin{aligned} \varphi^{(i)} &= \frac{(K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}})(1 - a_1 - a_2)}{K_T G_{\text{в}}^{\text{OX}} S_{\text{б}}^{(i)} C_{\text{в}}}; \\ \gamma^{(i)} &= \frac{K_T S_{\text{б}}^{(i)} + G_{\text{в}}^{\text{OX}} C_{\text{в}}}{K_T G_{\text{в}}^{\text{OX}} S_{\text{б}}^{(i)} C_{\text{в}}}; \\ S^{(i)} &= 2 \frac{V^{(i)}}{R}, \end{aligned}$$

где R – радиус основания аппарата. Получаем окончательно энергетический модуль в виде

$$\theta \frac{dT}{dt} = T^{(i)} + T_{\text{в}}^{(i)} + \theta \varphi^{(i)} a_0 (X^{(i)} - X^{(i-1)}) V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{возд}} \Delta I. \quad (9)$$

Окончательно математическая модель процесса запишется в следующем виде

$$\left\{ \begin{aligned}
 \theta \frac{dX}{dt} &= \theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} - \theta K_4 X^{2(i)} - \theta \frac{F}{V^{(i)}} X^{(i)} + \\
 &\quad + (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\
 \theta \frac{dS_1}{dt} &= -\frac{\theta}{Y_{X/S_1}} \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} - \theta m X^{(i)} + \\
 &\quad + \theta \frac{F_1}{V^{(i)}} (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\
 \theta \frac{dS_2}{dt} &= -\theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} \left[\alpha_{02} + \frac{(\alpha_{\mu 2} - \alpha_{02}) S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\
 &\quad + \theta \frac{F_2}{V^{(i)}} (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\
 \theta \frac{dS_3}{dt} &= -\theta \mu_m \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} X^{(i)} \left[\alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m 3} - \alpha_{03}) S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\
 &\quad + \theta \frac{F_3}{V^{(i)}} (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\
 F &= F_1 + F_2 + F_3; \\
 \theta \frac{dT}{dt} &= T^{(i)} + T_B^{(i)} + \theta \varphi^{(i)} a_0 (X^{(i)} - X^{(i-1)}) V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{возд}} \Delta I.
 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Полученная математическая модель процесса выращивания микроорганизмов представляет собой трехуровневую структуру, учитывающую наряду с кинетикой роста биомассы явления гидродинамики и теплопередачи в аппарате. Система дифференциальных уравнений (10) решалась методом Рунге–Кутты. Для решения использованы экспериментальные данные для 17-часового процесса культивирования. Результаты решения позволяют утверждать, что характер изменения параметров, рассчитанных по модели, совпадает с характером изменения параметров по ходу процесса культивирования, что говорит о целесообразности использования математического описания как для расчета концентраций, так и для целей управления.

Список литературы

1. Кантере, В. М. Теоретические основы технологии микробиологических производств / В. М. Кантере. – М. : Агропромиздат, 1990. – 271 с.
2. Кафаров, В. В. Моделирование и системный анализ биохимических производств / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М. : Лесная промышленность, 1985. – 280 с.
3. Математическая модель полупериодического процесса ферментации биомассы микроорганизмов / Н. В. Голубкина [и др.] // Информационные технологии и системы. Технологические задачи механики сплошных сред : тез. докл. республик. конф. – Воронеж, 1992. – С. 50.
4. Sun, J. Rapid Fermentation Process Development and Optimization [Электронный ресурс] / J. Sun, L. Chew // Engineering complex phenotypes in industrial strains. – 2012. – P. 133 – 168. – URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118433034.ch5/summary> (дата обращения: 30.06.2017). doi: 10.1002/9781118433034.ch5

5. Цирлин, А. М. Методы оптимизации для инженеров : монография / А. М. Цирлин. – М. : Берлин : Директ-Медиа, 2015. – 214 с.

6. Cristofalo, V. J. Cell Culture as a Model [Электронный ресурс] / V. J. Cristofalo, R. J. Pignolo // *Comprehensive physiology*. – 2011. – P. 53 – 82. – URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cphy.cp110104/abstract> (дата обращения: 30.06.2017). doi: 10.1002/cphy.cp110104

Model of Kinetics of the Microorganisms Cultivation Process

I. A. Avtsinov, Yu. E. Kozhevnikov, N. V. Sukhanova

Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia; Suhanovanv1971@mail.ru

Keywords: aerobic batch process; fluid dynamics; heat transfer; multi-factor kinetic dependency; specific heat capacity; volumetric feed rate of molasses, ammonium sulphate, diammonium phosphate.

Abstract: The block principle of constructing the kinetic model of the periodic process of yeast cultivation is considered. The mathematical model of the aerobic process of growing yeast is presented in the form of a system of differential equations of material balance, describing the dynamics of changes in the main observable parameters: the concentration of biomass, sugars, nitrogen, phosphorus and the volume of the culture medium. In order to determine the appropriate kinetic dependence, identification of various variants of three-substrate dependences was carried out. On the basis of analysis of the structure of flows in the apparatus, the system under investigation is referred to a micro-level mixing with a degree of segregation equal to zero. The heat balance equation is written for an isothermal process in an apparatus for perfect mixing with a limitation of heat removal. The obtained mathematical model of the process of growing microorganisms is a three-level structure that takes into account the phenomena of hydrodynamics and heat transfer in the apparatus, apart from to the kinetics of biomass growth.

References

1. Kantere V.M., *Teoreticheskie osnovy tekhnologii mikrobiologicheskikh proizvodstv* [Theoretical bases of technology of microbiological productions], Moscow: Agropromizdat, 1990, 271 p. (In Russ.)

2. Kafarov V.V., Vinarov A.Yu., Gordeev L.S., *Modelirovanie i sistemnyi analiz biokhimicheskikh proizvodstv* [Modeling and system analysis of biochemical productions], Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1985, 280 p. (In Russ.)

3. Golubkina N.V., Gordeev L.S., Anufriev V.V., Shchepkin G.I., Tikhomirov S.G. [Mathematical model of a semi-periodic fermentation process of the biomass of microorganisms], *Informatsionnye tekhnologii i sistemy. Tekhnologicheskie zadachi mekhaniki sploshnykh sred* [Information technologies and systems. Technological problems of mechanics of continuous media], Voronezh: Voronezh gos. un-t, 1992, p. 50. (In Russ.)

4. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118433034.ch5/summary> (accessed: 30 June 2017), doi: 10.1002/9781118433034.ch5

5. Tsirlin A.M., *Metody optimizatsii dlya inzhenerov : monografiya* [Optimization methods for engineers: monograph], Moscow: Berlin: Direkt-Media, 2015, 214 p. (In Russ.)

6. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cphy.cp110104/abstract> (accessed: 30 June 2017), doi: 10.1002/cphy.cp110104

Modell der Kinetik des Kultivierungsprozesses der Mikroorganismen

Zusammenfassung: Es ist das Blockprinzip der Konstruktion des kinetischen Modells des periodischen Prozesses der Hefekultivierung betrachtet. Das mathematische Modell des aeroben Prozesses der Züchtung von Hefe ist in Form eines Systems von Differentialgleichungen der Materialbilanz dargestellt, die die Dynamik der Veränderungen der wichtigsten beobachtbaren Parameter beschreiben: die Konzentration von Biomasse, Zucker, Stickstoff, Phosphor und das Volumen des Kulturmediums. Um die entsprechende kinetische Abhängigkeit zu bestimmen, wurde die Identifizierung verschiedener Varianten von Dreisubstratabhängigkeiten durchgeführt. Auf der Grundlage der Analyse der Struktur der Strömungen in der Einrichtung ist das zu untersuchende System zu einer Mischung auf der Mikroebene mit einem Grad der Segregation gleich Null gezählt. Die Wärmebilanzgleichung ist für einen isothermen Prozess in einer Einrichtung zum perfekten Mischen mit einer Begrenzung des Wärmeentzugs geschrieben. Das erhaltene mathematische Modell des Prozesses der Züchtung der Mikroorganismen ist eine dreistufige Struktur, die neben der Kinetik des Biomassewachstums die Phänomene der Hydrodynamik und der Wärmeübertragung im Apparat berücksichtigt.

Le modèle de la cinétique du processus de la cultivation des micro-organismes

Résumé: Le présent article prend en considération la question relative au principe modulaire de la construction du modèle cinétique du processus périodique de la cultivation de la levure. Le modèle mathématique du processus aérobique de la cultivation de la levure est présenté sous forme du système d'équations différentielles de la balance matérielle décrivant la dynamique de l'évolution de principaux paramètres observés de la concentration de la biomasse, des sucres, de l'azote, du phosphore et du volume du milieu culturel. Afin de la détermination de la cinétique de la dépendance convenable a été réalisée l'identification de différentes options des dépendances de trois substrats. A la base de l'analyse de la structure des flux dans l'appareil, le système analysé est rangé au alliage à micro-échelle avec le degré de la ségrégation égal au zéro. L'équation d'équilibre thermique est enregistrée pour le processus isotherme dans l'appareil du mélange parfait avec la restriction du prélèvement de la chaleur. Le modèle mathématique du procédé de la cultivation des micro-organismes obtenu est présenté sous forme d'une structure à trois niveaux, tantant compte de la cinétique de la croissance de la biomasse, ainsi que des phénomènes de l'hydrodynamique et du transfert de la chaleur dans l'appareil.

Авторы: *Авцинов Игорь Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Кожевников Юрий Евгеньевич* – старший преподаватель кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Суханова Наталья Валентиновна* – доцент кафедры «Информационные и управляющие системы», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Скрыпников Алексей Васильевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.