

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА ПРИ ЗАКВАШИВАНИИ КОРМОВ

Г.Е. Кокиева, А.И. Павлова, М.И. Черкашина

Якутская ГСХА, г. Якутск

В данной статье описывается синтез модели процесса культивирования ферментационной жидкости. Этот метод позволяет регулировать степень аэрации. Способствует удалению от клеток микроорганизма продуктов обмена и лизиса, с также обеспечивает равномерное распределение кислорода в ферментационную жидкость по всему объёму ферментатора. В статье рассматривается процесс массообмена и гидродинамики в аппарате для культивирования микроорганизмов, которая напрямую влияет на расчёт скоростей жидкой фазы в газожидкостном потоке. Скорость газожидкостного потока зависит от скорости газа, физических и химических свойств среды, вязкости среды, газосодержания в барботажной и циркуляционной зонах и других параметров гидравлики и гидродинамики.

Ключевые слова: синтез, концентрация субстрата, растворимость газа, перемешивание, растворимость кислорода.

ВВЕДЕНИЕ

Большие успехи достигнуты в ходе экспериментальных исследований в области получения кормового белка в процессе микробного синтеза. Развитие животноводства невозможно без создания прочной кормовой базы, отвечающей требованиям рационального и полноценного кормления сельскохозяйственных животных и обеспечивающей получение наибольшего количества продукции при наименьших затратах труда и средств. Предлагается получение белково-витаминного концентрата в аппарате микробного синтеза.

При достаточном количестве сбраживаемых углеводов в субстратах активно развиваются обе группы микроорганизмов или в зависимости от условий перевес получается на стороне одних. Дрожжание грубых кормов после их предварительного осахаривания является одним из наиболее эффективных способов подготовки кормов к скармливанию. Дрожжи представляют собой одноклеточные микроскопические грибы, хорошо размножающиеся в средах со слабокислой реакцией, содержащих сахара, и при температуре 25-30°C.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В результате проведенного исследования проведена проверка адекватности математической модели, исследование стационарного режима в оборудовании, определение оптимального режима выделения основных взаимосвязей и закономерностей.

Обеспечение культур микроорганизмов кислородом в промышленных условиях осуществляется пропуском воздуха через культуральную жидкость с одновременным перемешиванием. С повышением концентрации субстрата появляется необходимость в интенсификации процесса аэрирования среды. В настоящее время важное значение имеет сложное сочетание принципов работы, многообразие разновид-

ностей и типоразмеров пищевого оборудования с условиями их функционирования.

Кислород плохо растворяется в воде, и его концентрация в воде составляет 8,1 мг/л. Применение в производстве барботажных ферментаторов имеет ряд своих преимуществ:

- возможность конструирования деталей в различных частях оборудования, в частности аэратора, осуществляющего подвод кислорода и поддержание температуры культивируемой среды, за счет возможности применения теплообменной аппаратуры в различных зонах аппарата для культивирования микроорганизмов;
- интенсивное перемешивание по всему объёму полезного объёма ферментатора, что в свою очередь увеличивает биомассу продукции кормового белка;
- защита оборудования от агрессивных сред;
- удобство обслуживания.

Можно выделить ряд научных работ [6,8,9,10], в которых исследована и проанализирована зависимость интенсивности процессов массообмена от размера пузырьков газа, что оказывает влияние на формирование микробной клетки и, следовательно, на скорость массообмена.

В ряде работ [10,11,12] исследована интенсивность процесса культивирования по массопередаче от размера пузырьков газа, что оказывает в свою очередь большое влияние на скорость массообмена. В аппаратах возникают пузырьковый, пенный, стержневой [1,2,8,10] режимы.

Пузырьковый (с подводом кислорода) возникает при скоростях газа менее 0,05-0,1 м/с. Здесь наблюдается примерно одинаковый размер пузырей, что способствует в свою очередь равномерному распределению частиц по всему объёму аппарата для культивирования микроорганизмов.

Пенный (гетерогенный, турбулентный), возникает при увеличении значений определенных показателей газа. В процессе культивирования микроорганизмов

возникает увеличенное и масштабное пенообразование на поверхности культивируемой жидкости, поверхность контакта фаз при этом режиме достигает максимума. Образование пены в свою очередь снижает показатели производства кормового белка. Обычно пенообразование на поверхности культивируемой жидкости устраняют при помощи химических реагентов, что вносит отрицательный характер в питательную ценность кормового белка. На данный момент уже существуют механические методы по устранению данного недостатка путем реконструкции ферментаторов, а именно аппарата новой конструкции, в данном оборудовании имеется трехъярусное перемешивающее устройство, верхнее перемешивающее устройство предназначено для устранения и гашения пенообразования по всей поверхности культуральной жидкости.

Для обобщения полученных результатов в ходе теоретических и экспериментальных исследований, выделения основных взаимосвязей и закономерностей, которые характеризуют изучаемый процесс, в основном используют метод математического моделирования. Имея математическую модель [1,7], адекватную протекающему процессу, можно изучить поведение исследуемой модели в различных режимах с помощью расчётов (численного эксперимента), не прибегая к проведению дополнительных экспериментов.

На процесс производства биомассы микробиологического синтеза учеными рассматривается два основных вопроса: внесение питательных веществ способствует установлению определенных гидродинамических, влияние насыщения кислородом (массообмен).

Концентрация субстрата в ферментаторе определяется по формуле:

$$S=KS/(M_{MAX} - D), \quad (2)$$

где D – скорость разбавления в среде.

$D = M$ при постоянных параметрах процесса.

Концентрация биомассы в ферментаторе в стационарном состоянии:

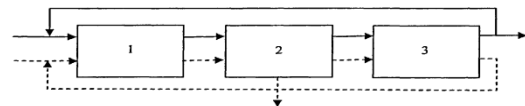
$$X=Y(S_r - S)=Y[S_r - KS/(M_{MAX} - D)] \quad (3)$$

где X – концентрация клеток; S_r – концентрация субстрата в поступающей среде; Y – экономический коэффициент, или доля потребляемого субстрата, затраченная на синтез биомассы.

Проверка адекватности математической модели заключалась в проверке разброса экспериментальных данных относительно расчетных по модели. На процесс культивирования микроорганизмов большое влияние оказывает процесс перемешивания ферментационной жидкости. Проведен многочисленный ряд исследований по гидродинамическому и массообменному процессу, но в основном отсутствие по исследованию влияния числа ярусов мешалок перемешивающих устройств и количества ярусов, установленных на валу. Данное конструкторское решение

крайне необходимо при расчете ферментаторов с механическим перемешивающим устройством.

На рис. 1 приведена структурная схема аппарата для культивирования микроорганизмов, состоящая из трёх зон: зона 1 – зона интенсивной массопередачи; зона 2 – зона охлаждения, включающая объём биореактора, в корпусе которого (см. рисунок 3) находится теплообменник. В этой зоне наряду с массопередачей и биосинтезом происходит охлаждение среды; зона 3 – циркуляционная зона. В этой зоне уменьшается газосодержание (газонасыщение) среды и интенсивность массопередачи.



1 – зона интенсивной массопередачи; 2 – зона охлаждения; 3 – зона циркуляции

Рис. 1. Структурная схема аппарата для культивирования микроорганизмов

При использовании самовсасывающих мешалок стремятся иметь максимальное газонасыщение, поэтому необходимо обеспечить минимальное сопротивление газопровода. Это требует по возможности широкого, но еще конструктивно допустимого положения вала, обусловленного размерами мешалки.

Для оценки точности расчета был принят следующий показатель:

$$\Phi = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |y_{ij}^{эксп} - y_{ij}^{расч}|, \quad (1)$$

где n – число выходных переменных, по которым проводилась идентификация, m – число идентифицируемых параметров. Для нашей модели $n=3, m=3$.

На поверхности культуральной среды в процессе культивирования микроорганизмов образуется пена.

Диаметр пенного пузырька d_n определяется размером отверстий в барботере и физико-химическими свойствами культуральной жидкости:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6d_0\epsilon}{q(p_{ж}-p_r)}}, \quad (2)$$

где: d – диаметр отверстия;

ϵ – поверхностное натяжение;

q – ускорение свободного падения;

$p_{ж}$ – плотность жидкости;

p_r – плотность газа.

Тогда количество пузырьков:

$$n = \frac{6V_r}{nd_n^3}, \quad (3)$$

где V_r – общий объемный расход воздуха при нормальных условиях.

При исследовании процесса абсорбции кислорода в питательной среде различной вязкости для расчета газосодержания принято уравнение:

$$\frac{\varphi}{(1-\varphi)^4} = 0,2 \left(\frac{D^2 \cdot \rho_{ж} \cdot g}{\sigma} \right)^{0,62} * \left(\frac{D^3 \cdot \rho_{ж}^2 \cdot g}{\mu_{ж}} \right)^{\frac{1}{12}} * \frac{W_r}{(D \cdot g)^{0,5}} \quad (4)$$

где D – диаметр аппарата.

Проведены систематические исследования [5-8] и даны рекомендации для определения φ (величина газосодержания) следующей зависимостью:

$$\varphi = \frac{1}{2 + \left(\frac{0.35}{W_r}\right) \left[\left(\frac{P_{жк}}{1}\right) \left(\frac{\sigma}{782}\right)\right]^{1/3}} \quad (5)$$

При исследовании газосодержания в рециркуляционной колонне диаметром $d = 0.15$ м и высотой $H = 10.5$ м авторами [4, 7] было получено следующее уравнение:

$$\varphi = W_r (0.24 + 1.35 W_{см}^{0.93})^{-1} \quad (6)$$

По данным [9, 10], при исследованиях на модели аппарата, изготовленного из стеклянных труб высотой 3 метра и диаметрами 0,055; 0,080 и 0,110 м получена зависимость, которая позволяет определять скорость жидкости в транспортных эрлифтах (газлифтах):

$$W_{ж} = \sqrt{2gH/\xi} (h/H - 1 + \varphi_{ср}) (1 - \varphi_{ср}) \quad (7)$$

Здесь ξ – суммарное гидравлическое сопротивление эрлифта, равно:

$$\xi = 0.5 + \lambda \frac{H}{d} \left(\frac{1-\varphi_0}{1-\varphi_{ср}}\right)^{0.5} + \left(\frac{1-\varphi_{ср}}{1-\varphi_0}\right)^{0.2}, \quad (8)$$

где: λ – коэффициент гидравлического трения при движении в трубе жидкости с той же приведенной скоростью;

φ_0 – газосодержание в месте выхода потока из эрлифта.

Для расчета $W_{жс}$, по данным [3, 9-12], рекомендуется использовать уравнение Бернулли, преобразованное для циркуляционного контура, следующего вида:

$$H(p_{жс} - p_r) \varphi^* g = \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{ц} \quad (9)$$

На данный момент в процессе производства кормового белка при культивировании микроорганизмов в культуральной жидкости происходит ряд реакций в ферментационной жидкости с кислородом.

Данный расчет выполняется методом приближений по одному из выбранных уравнений, которые подходят для определения газосодержания в культуральной среде. При давлении до 4 МПа на среде со свойствами, близкими к свойствам системы «вода-воздух», и соотношении барботажных и циркуляционных зон $f_{\sigma} \times f_{ц}^{-1} = 1$, приближенном к значению приведенной скорости жидкости, этими же авторами предлагается рассчитать $W_{ж}$ по упрощенному уравнению:

$$W_{ж} = 3.5 \left[\frac{H \cdot \beta}{\xi k} * \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_r}\right)^{0.125} \right]^{0.5} \quad (10)$$

где $\xi_k = 5.1 + 0.03 \left(\frac{H}{d_{\sigma}} + \frac{H}{d_{ц}}\right)$ – коэффициент сопротивления циркуляционного контура.

На поверхности раздела газ–жидкость воздушного пузырька образуются воздушные пленки. Они проходят через культуру, затрудняют диффузию кислорода по объему ферментатора и снижают образовавшееся сопротивление.

Исследованию процессов абсорбции кислорода в ферментаторах посвящен ряд работ [1, 7, 11].

Если рассматривать данный случай при плохом растворимом газе (кислород), значения m_{pc} и K_r велики, и диффузионным сопротивлением в газовой фазе можно пренебречь, при этом соблюдается неравенство:

$$\frac{1}{K_L a} \gg \frac{1}{K_r m_{pc}}, \quad (11)$$

где $K_L a$ – объемный коэффициент массопередачи от поверхности контакта фаз к культуральной жидкости, c^{-1} ; K_r – объемный коэффициент массоотдачи от потока газа к поверхности контакта фаз, кмоль $O_2/m^3 \cdot c \cdot Pa$; m_{pc} – константа фазового равновесия, $Pa \cdot m^3/кмоль$.

Откуда следует:

$$k \approx k_{la} \quad (12)$$

На основании равенства $k \approx k_{la}$ уравнение массопередачи принимает вид:

$$\frac{dc}{dy} = K_i * a (c_p - c) - K_6 * x,$$

Левый член уравнения: $\frac{d^2 M}{dV_p dt} = k(C_p - C)$, называемый скоростью объемного массопереноса кислорода, или скоростью растворения кислорода, для абсорбции кислорода воздуха культуральной жидкости запишется в следующем виде:

$$\frac{d^2 M}{dV_p dt} = K_L a (C_p - C). \quad (13)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устойчивость и эффективность применяемых численных методов позволяют выполнить дальнейшую модификацию технологии расчета, включая подбор моделей турбулентности, с целью повышения точности расчетов. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что рациональное сочетание расчета и эксперимента позволяет расширить границы исследований, доводочные работы по созданию и совершенствованию перспективных конструкций ферментаторов. представлена зависимость коэффициента массопередачи от времени перемешивания для всех исследованных конструкций ферментатора во всем диапазоне изменения режимов его работы, как с одной, так и с тремя многоярусными мешалками. Полученная модель позволила сделать выводы о направлениях оптимизации процесса биосинтеза [2,3,4,5,12].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кокиева, Г.Е. Исследование аппарата для культивирования микроорганизмов / Г.Е. Кокиева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 123-125.
2. Кокиева, Г.Е. Исследование зависимости роста микробных клеток от концентрации биомассы в процессе получения кормовых

дрожжей / Г.Е. Кокиева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 31-33.

3. Кокиева, Г.Е. Роль кислорода при моделировании аппарата для культивирования микроорганизмов / Г.Е. Кокиева, И.Б. Шагдыров, Ю.А. Шапошников // Ползуновский вестник. – 2016. – № 3. – С.151-155.

4. Пат. 2565557 Российская федерация, МПК С 12 М 1/02, С 12 М 1/04, С 12 М 1/21. Аппарат для культивирования микроорганизмов / Кокиева, Г.Е., Шагдыров, И.Б., Шагдыров, Б.И., Болохоев, В.С.; Заявитель и патентообладатель Бурят. Гос. С.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. – № 2014127113/10; заявл. 02.07.14; опубл. 20.10.15. Бюл. № 29. – 7 с.: ил.

5. Пат. 2580160 Российская федерация, МПК А 23 К 10/12, А 23 К 10/37. Способ приготовления кормовых дрожжей / Кокиева, Г.Е., Шагдыров, И.Б., Шагдыров, Б.И., Болохоев, В.С.; Заявитель и патентообладатель Бурят. Гос. С.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. – № 2014127112/13; заявл. 02.07.14; опубл. 10.04.16. Бюл. № 10. – 7 с.: ил.

6. Стабников, В.Н. и др. Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1985, -503 с.

7. Романовский, Ю.М., Математическое моделирование в биофизике / Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

8. Рубцов, В.М. Разработка математического и программного обеспечения АСУТП выращивания микроорганизмов. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.16. – Воронеж: ВТИ, 1991. – 16 с.

9. Сборник материалов всероссийского семинара-совещания работников органов Ростехнадзора «Организация работы органов Ростехнадзора» Москва. ФГНУ «Росинформагротех» 2007.

10. Кокиева, Г.Е. Исследование аппарата для культивирования микроорганизма / Г.Е. Кокиева // Сб. научн. трудов. Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций». – Новосибирск, 2013. – С. 233-234.

11. Кокиева, Г. Е. Комплексный подход и анализ эксплуатации оборудования пищевой промышленности, диагностика и повышение долговечности / Г.Е. Кокиева // Потенциал развития отрасли связи Байкальского региона. Материалы 3-ей Региональной научно-практической конференции. Улан-Удэ, 2013. – С. 48-50.

12. Кокиева, Г.Е. Разработка методики экспериментального изучения масштабирования основных параметров ферментатора / Г.Е. Кокиева // Приволжский научный вестник. – 2014. – № 5. – С. 28-33.

INTENSITY OF MICROBIAL SYNTHESIS PROCESS DURING FEEDING FOOD

G.E. Kokieva, A.I. Pavlova, M.I. Cherkashina

Yakut state agricultural academy, Yakutsk

Abstract – This article describes the synthesis model of the cultivation process. This method allows you to adjust the degree of aeration and its amount. The method of exchanging the products of cell activity for microorganisms. The article presents the processes of mass transfer and hydrodynamics in the apparatus for the cultivation of microorganisms, which directly affect the calculations of the velocities of the liquid phase in the gaseous-bone flow. The gas-liquid flow velocity depends on the gas velocity, the physical and chemical properties of the medium, the viscosity of the medium, the gas content in the bubbling and circulating medium, and other parameters of hydraulics and hydrodynamics.

Key words: synthesis, substrate concentration, gas solubility, mixing, oxygen solubility.

REFERENCES

1. Kokieva, G.E. Research of the device for cultivation of microorganisms / G.E. Kokieva//the Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2014. – No. 4. – Page 123-125.
2. Kokieva, G.E. Research of dependence of growth of microbic cages on concentration of biomass in the course of receiving fodder yeast / G.E. Kokieva//the Scientific and technical bulletin of the Volga region. – 2016. – No. 3. – Page 31-33.
3. Kokieva, G.E. Rol of oxygen when modeling the device for cultivation of microorganisms / G.E. Kokieva, I.B. Shagdyrov, Yu.A. Shaposhnikov//Polzunovsky the messenger. – 2016. – No. 3. – Page 151-155.
4. Stalemate. 2565557 Russian Federation, MPK C 12 M 1/02, C 12 M 1/04, S 12 M 1/21. The device for microorganisms / Kokiyev's cultivation, about E., Shagdyrov, I. B., Shagdyrov, B.I., Bolokhoyev, V. S.; Applicant and patent holder Buryat. State.Agricultural academician Im. V.R. Filippov. – No. 2014127113/10; заявл.02.07.14; опублик.20.10.15, Bulletin No. 29. – 7 pages: silt.
5. Stalemate. 2580160 Russian Federation, MPK And 23 K 10/12, A 23 K 10/37. Way of preparation of fodder yeast / Kokieva, about E., Shagdyrov, I. B., Shagdyrov, B.I., Bolokhoyev, V. S.; Applicant and patent holder Buryat. State.Agricultural academician Im. V.R. Filippov. – No. 2014127112/13; statement 02.07.14; publ. 10.04.16, Bulletin No. 10. – 7 pages: silt.
6. Stabnikov V.N., etc.Processes and devices of food production. M.: Agropromizdat, 1985, -503 pages.
9. The Raman Yu.M., Mathematical modeling in biophysics / Yu.M. Romanovsky, N.V. Stepanova, D.S. Chernavsky. –M.: Science, 1975. – 344 with
10. Hems V.M. Development mathematical and software of industrial control system of cultivation of microorganisms. Avtoref.yew ... Cand.Tech.Sci.: 05.13.16. – Voronezh: VTI, 1991. – 16 pages.
11. The collection of materials of the All-Russian seminar of a meeting of workers - bodies of Gostekhnadzor "Organization of work of bodies of Gostekhnadzor" Moscow. FGUN "Rosinforma-grotekh" of 2007.
13. Kokieva, G.E. Research of the device for cultivation of a microorganism / G.E. Kokieva//Sb. sciens. works. Materials of the Russian scientific and technical conference "Informatics and Problems of Telecommunications".-Novosibirsk., 2013. – Page 233-234.
14. Kokieva, G. E. Integrated approach and analysis of operation of the equipment of the food industry, diagnostics and increase in durability / G.E. Kokieva/Potential of development of the industry of communication of the Baikal region. Materials of the 3rd Regional scientific practical conference.Ulan-Ude., 2013. – Page 48-50.
15. Kokieva, G. E. Development of a technique of experimental studying of scaling of key parameters of a fermenter / G.E. Kokieva//Volga scientific bulletin. – 2014. – No. 5. – Page 28-33.

Kokieva Galia Ergeshevna – Doctor of Engineering sciences, Professor, Yakut state agricultural academy, +79248666537, kokievagalia@mail.ru

Pavlova Aleksandra Innokentyevna – Doctor of veterinary sciences, Professor, Yakut state agricultural academy, +79142256946, ipkapk@mail.ru

Cherkashina Maria Ilinichna – master of Agronomist, Yakut state agricultural academy, +79142819788, 703210@mail.ru