



Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК637

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.0010

EDN: PUCLIH

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОБНОГО СИНТЕЗА

Галия Ергешевна Кокиева ¹, Юрий Андреевич Шапошников ²,
Варвара Семеновна Трофимова ³

^{1,3} Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, Россия

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ kokievagalia@mail.ru

² u_shaposhnikov@mail.ru

³ trofimovarvara15@mail.ru

Аннотация. Производительность ферментатора любой конструкции определяется совокупностью гидродинамических, массообменных, тепловых, технологических и микробиологических условий. Под двумя последними условиями понимают качество исходного сырья, соблюдение оптимальных параметров ведения технологического процесса по концентрации питательных солей, микроэлементов, количеству возвращаемой в ферментатор отработанной бражки, состоянию дрожжевой культуры и т.п.

В зависимости от технологических и микробиологических факторов при одинаковых гидродинамических, массообменных и тепловых условиях производительность аппарата может колебаться более чем в два раза. Технологические и микробиологические условия не зависят от конструкции ферментатора и, следовательно, при его проектировании конструкторы в первую очередь несут ответственность за достижение в аппарате заданных условий по интенсивности перемешивания, массообмена и теплообмена, которые определяются правильностью расчета основных конструктивных элементов и режимов работы ферментатора. Модернизация этих аппаратов является основным направлением как в усовершенствовании основного ферментационного оборудования для производства белково-витаминного концентрата (БВК), так и создании новых высокоэффективных конструкций аппаратов. Сравнение нормализованных характеристик позволило выделить перспективные технические направления в создании ферментаторов для производства кормового белка. Правильный выбор конструкции ферментатора и его производительности в значительной степени определяет экономическую эффективность любого микробиологического производства. Целью исследований является повышение выхода биомассы БВК посредством разработки научно-методологических основ для совершенствования технологии и оборудования при производстве концентрата. В данной статье приведены данные по разработке белково-витаминного концентрата, предназначенного для восполнения дефицита кормового белка.

Ключевые слова: ферментатор, белково-витаминный концентрат (БВК), трехфазная система, массообмен, гидродинамическая обстановка, затраты энергии, схема модели аппарата, статистическая значимость.

Для цитирования: Кокиева Г. Е., Шапошников Ю. А., Трофимова В. С. Исследование оборудования микробного синтеза // Ползуновский вестник. 2026. № 1, С. 64–67. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.010. EDN: <https://elibrary.ru/PUCLIH>.

Original article

RESEARCH ON MICROBIAL SYNTHESIS EQUIPMENT

Galiya E. Kokieva ¹, Yuriy A. Shaposhnikov ², Varvara S. Trofimova ³

^{1,3} Buryatian State Agricultural Academy, Ulan-Ude, Russia

² Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ kokievagalia@mail.ru

² u_shaposhnikov@mail.ru

³ trofimovarvara15@mail.ru

Abstract. The performance of a fermenter of any design is determined by the totality of hydrodynamic, mass transfer, thermal, technological, and microbiological conditions. The latter two conditions refer to the quality of the initial raw materials, adherence to optimal parameters for conducting the technological process regarding the concentration of nutrient salts, microelements, the amount of spent mash returned to the fermenter, the state of the yeast culture, and so on.

Depending on the technological and microbiological factors, with identical hydrodynamic, mass transfer, and thermal conditions, the apparatus's performance can fluctuate by more than twofold. Since technological and microbiological conditions are independent of the fermenter design, designers are primarily responsible for achieving the specified conditions regarding the intensity of mixing, mass transfer, and heat transfer within the apparatus. These intensities are determined by the correctness of the design calculations for the main structural elements and the operating modes of

© Кокиева Г. Е., Шапошников Ю. А., Трофимова В. С., 2026

the fermenter. The modernization of these devices is the main direction both in improving the primary fermentation equipment for PVC production and in creating new highly efficient apparatus designs. Comparing normalized characteristics made it possible to identify promising technical avenues in the creation of fermenters for feed protein production. The correct choice of fermenter design and its performance largely determines the economic efficiency of any microbiological production.

The goal of the research is to increase the yield of PVC biomass through the development of scientific and methodological foundations for improving the technology and equipment used in the production of protein-vitamin concentrate. This article presents data on the development of a protein-vitamin concentrate intended to replenish the deficit of feed protein.

Keywords: fermenter, protein-vitamin concentrate (PVC), three-phase system, mass transfer, hydrodynamic conditions, energy consumption, apparatus model scheme, statistical significance.

For citation: Kokieva G. E., Shaposhnikov Yu. A. & Trofimova V. S. (2026). Research on microbial synthesis equipment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 64-67. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.010. EDN: <https://elibrary.ru/PUCLIH>.

ВВЕДЕНИЕ

Выращивание микроорганизмов с целью получения биомассы (кормового белка) является сложным процессом, который происходит в трехфазной системе газ–жидкость–клетка. Ферментатор должен быть рассчитан таким образом, чтобы его основные конструктивные элементы и режимы работы обеспечили необходимые условия для жизнедеятельности микроорганизмов. Такими условиями являются: обеспечение необходимой скорости переноса кислорода из газовой фазы в жидкую, обеспечение необходимой скорости переноса кислорода из жидкой фазы к клетке, равномерное распределение клеток, питания, солей, микроэлементов и других технологических параметров по объему среды, обеспечение необходимой скорости переноса продуктов метаболизма от клетки в объем среды. Модернизация является основным направлением как в усовершенствовании основного ферментационного оборудования производства белково-витаминного концентрата, так и создании новых высокоэффективных конструкций аппаратов. Сравнение нормализованных характеристик позволило выделить перспективные технические направления в создании ферментаторов для крупнотоннажных производств БВК. Ферментаторы являются аппаратами с высокой интенсивностью процессов перемешивания и массообмена.

Барботажные колонные ферментаторы выполняются в виде вертикальной емкости с размещенными газораспределительными устройствами.

МЕТОДЫ

При проведении работы использовались стандартные методики, соответствующие установленным ГОСТам. Все анализы проводились в тройной повторности. Для оценки погрешностей использовался критерий Стьюдента, что позволило учесть статистическую значимость полученных данных и обеспечить надежность выводов – разработка новой технологии приготовления кормовых дрожжей.

В программу исследования включались:

- подготовка лабораторной установки, изготовление рабочих органов к ней;
- подбор измерительной аппаратуры и разработка методики экспериментов;
- подтверждение основных теоретических положений по выявлению процесса роста микроорганизмов и выходу биомассы продукта на ферментере новой конструкции;
- оценка влияния перемешивающего устройства на характер процесса, качество продукции (рост и выход биомассы).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема модели аппарата лабораторного ферментатора (рисунок 1), который представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд с эллиптическим, сферическим или плоским днищем. Воздух к мешалке подводится через общий коллектор, подключенный к ротационным газодувкам. Культуральная среда засасывается насосом в аппарат и подается в верхние слои культуральной жидкости.



Рисунок 1 – Лабораторный ферментатор

Figure 1 – Laboratory Fermentor

Внутри аппарата по его оси установлено перемешивающее устройство, состоящее из вала и расположенной на ней мешалки. В качестве диспергатора воздуха используется полая перфорированная мешалка и полый вал, через который поступает воздух. На рисунке 2 представлено перемешивающее устройство в сборке [1–4].



Рисунок 2 – Перемешивающее устройство в сборе

Figure 2 – Mixing device assembly

- При этом должны соблюдаться следующие условия:
- рабочая вместимость аппарата не более 100 м³;
 - диспергатор-турбинная мешалка располагается на расстоянии $0,75 \dots 1 d_m$ от днища ферментатора;
 - диаметр диспергатора $d_d = d_m$ (d_m – диаметр мешалки);
 - отношение составляет: $d_m \cdot D - 1 = 0,2 \dots 0,3$ (D – диаметр ферментатора);
 - число ярусов мешалок (мя*) принимаем: $1 \dots 4$;

- расстояние между мешалками составляет (1...2) dm;
- окружная скорость мешалки (Wt) до 20 м·с⁻¹;
- скорость воздуха, приведенная к сечению ферментатора (Wr): 0,01...0,07 м³·с⁻¹;
- время гомогенизации (t): 120...300 с;
- давление (Pa) над зеркалом жидкости равно атмосферному;
- высота жидкости не более 8 м.

Методика базируется на системе следующих основных эмпирических и аналитических уравнений, включающих исходные данные и подлежащие определению параметры [2, 12]:

$$M = \alpha^{0,2} \cdot X; \quad (1)$$

$$Vp = \varphi \cdot (24 \cdot X)^{-1}; \quad (2)$$

$$M = K_L \cdot \alpha \cdot \Delta C; \quad (3)$$

$$V\Gamma = V_P \cdot V_V; \quad (4)$$

$$K_L = Q = 30 \dots 35; \quad (5)$$

$$\tau = 120 \dots 300 = 225 Q^{0,27} \cdot m_{я}^{-0,32}; \quad (6)$$

$$Vp 0,785 (0,2 \dots 0,3)^{-1} \cdot (1 \dots 2) m_{я} \cdot m_{я}; \quad (7)$$

$$K_L = N_{OT} = 0,26 \text{ (при } K_{10PT} = 35); \quad (8)$$

$$H_o = (1 \dots 2) d_m \cdot m_{я}; \quad (9)$$

$$N^M = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5; \quad (10)$$

$$P_H = P_B = V\Gamma \cdot \ln(P_H / P_B); \quad (11)$$

$$P_{cp} = P_B + 0,05 H_o; \quad (12)$$

$$K_L a = 0,8 N_V^{0,6} \cdot n^{0,2} \cdot m_{я}^{0,47} \cdot (d_m / D)^{1,8}; \quad (13)$$

$$\Delta C = Y_K \cdot P_{cp} \cdot M p^{-1}; \quad (14)$$

$$Y_K = (Vv \cdot U_M - M / \rho O_2) / (Vv - M / \rho O_2); \quad (15)$$

где M – скорость растворения кислорода, кг $O_2 \cdot m^{-3} \cdot ч^{-1}$; Vp – рабочая вместимость аппарата m^3 ; $V\Gamma$ – расход газа, $m^3 \cdot с^{-1}$; τ – время гомогенизации, с; K_L – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, отнесенный к поверхности контакта фаз, $m \cdot с^{-1}$; $\alpha^{0,2}$ – расходный коэффициент по кислороду, $кг \cdot кг^{-1}$; X – концентрация абсолютно сухой биомассы, $кг \cdot m^{-3}$; φ – среднее газосодержание, об.доля, %; $K_L a$ – объемный коэффициент массопередачи, $с^{-1}$; C – концентрация кислорода в жидкой фазе, $кг \cdot m^{-3}$; V_V – удельный объемный расход газа, $m^3 \cdot с^{-1}$; N – мощность перемешивания; ρ – плотность, $кг \cdot m^{-3}$; n – частота вращения, $с^{-1}$; p – давление.

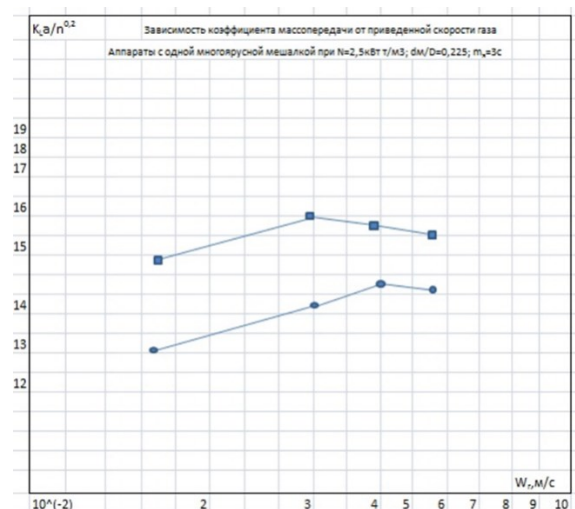


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента массопередачи от приведенной скорости газа

Figure 3 – Dependence of the mass transfer coefficient on the superficial gas velocity

ОБСУЖДЕНИЕ

С увеличением приведенной скорости воздуха газосодержание возрастает и распределяется более равномерно при работе мешалки. Максимальное газосодержание наблюдается в зоне мешалки, и включение соседней мешалки при этом же расходе воздуха приводит к перераспределению газосодержания, в результате чего среднее значение газосодержания увеличивается. При увеличении нагрузки по газу наблюдается веерообразное расслаивание экспериментальных точек (рис. 3).

На рисунке 4 приведена зависимость удельной скорости роста микроорганизмов в зависимости от поглощения глюкозы. Наиболее интенсивное потребление сахаров происходит в начальный момент процесса, причем поглощение глюкозы микробными клетками происходит с максимальной скоростью.

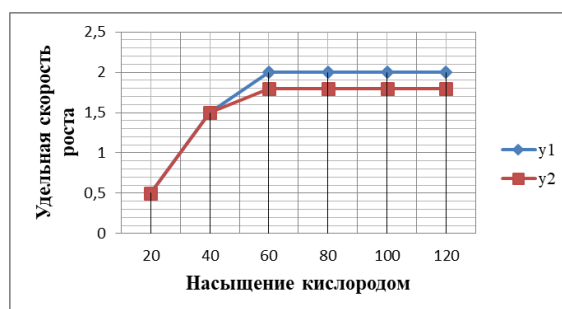


Рисунок 4 – Удельная скорость роста микробных клеток от концентрации насыщенного субстрата и концентрации биомассы

Figure 4 – Specific growth rate of microbial cells as a function of saturated substrate concentration and biomass concentration

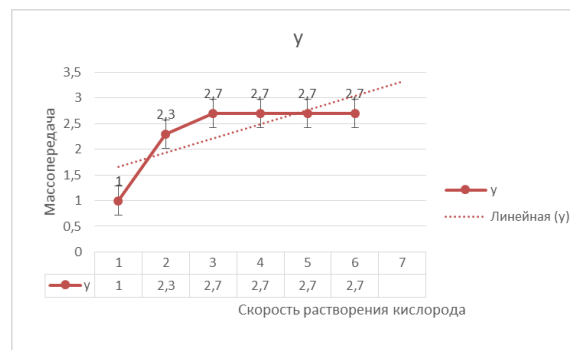


Рисунок 5 – Скорость растворения кислорода

Figure 5 – Oxygen Dissolution Rate

Анализируя влияние скорости воздуха на скорость растворения кислорода для различных конструкций, можно отметить линейную зависимость между этими параметрами. Величина удельных энерготрат характеризует экономику процесса растворения кислорода и эффективность конструкции, необходимо определить, как влияют гидродинамические параметры – приведенная скорость воздуха и рабочее давление – на эту величину [1–16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования гидродинамической обстановки установлен характер зависимости основных гидродинамических характеристик, а также тех-

нологических параметров от конструкции ферментатора и режимов его работы.

Конструкция ферментатора наиболее эффективна, если установка которой в технологическую линию даст минимальную себестоимость готовой продукции. Решающим фактором в этом случае являются затраты энергии на получение биомассы и растворение кислорода на стадии ферментации.

Правильный выбор конструкции ферментатора играет важную роль в создании экономичного производства кормового белка для вскармливания сельскохозяйственным животным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев М.Г. Организационно-экономические основы развития кормопроизводства в Республике Саха (Якутия) : дисс. ... на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Афанасьев Максим Гаврильевич. Якутск, 2007. 165 с. EDN GUKGCF.

2. Безгина А.С., Гулякин Д.В. Методы проведения теоретических и эмпирических исследований // Мир педагогики и психологии: международный научно-практический журнал. 2025. № 7 (108).

3. Войнаш С.А. Метод биологической обработки сельскохозяйственных отходов путем микробного синтеза // Основы и перспективы органических биотехнологий. 2020. № 3. С. 3–8.

4. Дарбасова Л.А., Васильева Т.И. Математическая модель производительности ферментатора при непрерывном процессе производства БВК / Л.А. Дарбасова, Т.И. Васильева // Научно-технический вестник Поволжья, 2018. № 10. С. 82–84.

5. Дюкарев В.В. Кормовые добавки в рационах животных: Теория и практика / В.В. Дюкарев, А.Г. Ключковский, И.В. Дюкар. М. : Агропромиздат, 2009. С. 279.

6. Иванов Р.В., Пермьякова П.Ф. Научные основы совершенствования технологии кормления и содержания лошадей якутской породы. Часть II. Опыты на взрослых лошадях : монография. Новосибирск : Изд. АНС «СИБАК», 2018. 112 с.

7. Кузнецов Н.И., Воронников И.Л. [и др.]. Перспективы научно-технологического развития переработки сельскохозяйственного сырья: производство готовых кормов для животных. Саратов ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2016. 27 с.

8. Лаврентова В. Рынок протеиновых ингредиентов комбикормов // Сельскохозяйственное обозрение, 2017. № 11. С. 32–50.

9. Ишевский А.Л., Гунькова П.И., Успенская М.В. Практическая биотехнология : учеб. пособие по направлению подготовки 12.04.04, 18.04.02, 19.04.01, 19.04.02, 19.04.03 в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры / Санкт-Петербург, 2023.

10. Кокаева М.Г. Влияние биологически активных препаратов на гематологические показатели коров / М.Г. Кокаева, Д.О. Гурчиева // Сборник научных трудов Северо-Кавказского научно-исследовательского института животноводства. 2016. Т. 2. № 5. С. 80–85.

11. Кокиева Г.Е. Математическое моделирование

аппарата для культивирования микроорганизмов с подводом кислорода, содержащим механическое перемешивающее устройство / Г.Е. Кокиева, И.А. Савватеева, Т.Г. Дмитриева // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 9. С. 48–50. EDN VJXGEQ.

12. Кокиева Г.Е. Эксплуатация ферментатора в сельском хозяйстве : монография // Г.Е. Кокиева. Барнаул, 2016. 120 с.

13. Increase of Animal Products by Means of Complete Feed Provision / A.G. Cherkashina, S.V. Stepanova, A.V. Spiridonova, R.G. Kalininsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, City of Vladivostok, 25–26 января 2021 года. City of Vladivostok, 2021. P. 012118. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012118. EDN LDKQSB.

14. Pozdieiev S.V., Nizhnyk V.V., Ballo Y.V., Nuianzin A.M., Uhansky R.V., Kropyvnytskyi V.S. The rationale for a safe distance between fermenters for biogas production // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. 2018. T. 51. № 3. С. 60–67.

15. Kwak J.H., Baek S.H., Woo Y. Beneficial immunostimulatory effect of short-term Chlorella supplementation: enhancement of natural killer cell activity and early inflammatory response (randomized, double blinded, placebo-controlled trial) // Nutr. J. 2012. Vol. 11. P. 53.

16. Otsuki T., Shimizu K., Iemitsu M., Kono I. Salivary secretory immunoglobulin A secretion increases after 4-weeks ingestion of chlorella-derived multicomponent supplement in humans: a randomized cross over study // Nutr. J. 2011. Vol. 10. P. 91.

Информация об авторах

Г. Е. Кокиева – доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис в АПК и общинженерные дисциплины» Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова.

Ю. А. Шапошников – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт и наземные технологические системы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

В. С. Трофимова – ассистент кафедры «Технический сервис в АПК и общинженерные дисциплины» Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова.

Information about the authors

G.E. Kokieva - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Technical service in agriculture and general engineering disciplines» at the Buryat State Agricultural Academy.

Yu.A. Shaposhnikov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Automobile transport and ground technological systems» of the Polzunov Altai State Technical University.

V.S. Trofimova - Assistant Professor of the Department of «Technical service in agriculture and general engineering disciplines» at the Buryat State Agricultural Academy.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.