

Современные тенденции совершенствования конструкций пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов

Александр А. Шевцов,¹
Алексей В. Дранников,² drannikov@list.ru
Александр В. Пономарев,³
Елена А. Шабунина¹

¹ кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

³ ООО «Инжиниринговый центр ВСМ», ул. 9 Января, 68, г. Воронеж, 394000, Россия

Реферат. Современные тенденции совершенствования конструкции пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов направлены на значительное увеличение производительности ценных продуктов из биомассы микроскопических водорослей и получение на их основе отдельных полезных веществ (препаратов), используемых в различных отраслях народного хозяйства и медицине. В пленочных аппаратах эффективно протекают процессы тепло- и массообмена при контакте газа с культуральной жидкостью, стекающей в виде пленки по прозрачной пленкообразующей поверхности при ее интенсивном освещении, а автотрофный биосинтез развивается только в присутствии смеси воздуха с углекислым газом. При этом полностью исключается накопление продуктов метаболизма за счет их непрерывного отвода из пленки культуральной жидкости с отходящим газом, что не характерно для аппаратов других типов. Небольшие габариты пленочных биореакторов позволяют увеличить степень насыщения жидкости углекислым газом с возможностью изменения концентрации газа в культуральной жидкости и обеспечить культивирование микроорганизмов с заданным выходом биомассы. В настоящее время разработано значительное количество способов обеспечения контакта газа с жидкостью (барботажный, газлифтный, механическое перемешивание, струйный, пленочный и др.), на основе которых созданы промышленные биореакторы, обладающие различным «стрессовым» эффектом. Считается, что для проведения культивирования наиболее оптимальными являются биореакторы с механическим перемешиванием жидкости, которые позволяют обеспечить наибольшую производительность по биомассе. Однако применяемые в них типовые механические перемешивающие устройства создают в рабочей полости биореактора хаотичное, неорганизованное перемешивание, что способствует к возникновению слабого массообмена, недостаточного для жизнеобеспечения клеток культур и микроорганизмов. Анализ способов взаимодействия газа с жидкостью в пленочных аппаратах показал необходимость создания биореакторов нового поколения с интенсивным массопереносом без вероятности лимитирования продуктивности биотехнологических систем. В работе показано последовательное изменение конструктивных элементов пленочных биореакторов, направленные на повышение эффективности их эксплуатации.

Ключевые слова: пленочный аппарат, фотоавтотрофный биосинтез, биореактор, светозависимые микроорганизмы, культуральная жидкость, пленкообразующая поверхность, тепломассообмен

Current trends for improving the design of membrane devices for photoautotrophic biosynthesis is light dependent microorganisms

Aleksandr A. Shevtsov,¹
Alekssei V. Drannikov,² drannikov@list.ru
Aleksandr V. Ponomarev,³
Elena A. Shabunina¹

¹ bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² machinery and food production machines department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

³ LLC "Engineering Center VSM", 9 Yanvarya str., 68, Voronezh, 394000, Russia

Summary. Modern trends in improving the design of membrane devices for photoautotrophic biosynthesis dependent lighting microorganisms aimed at a significant increase in the productivity of valuable products from biomass of microalgae and obtaining on the basis of their individual useful substances (drugs) used in various industries and medicine. In film devices effectively the processes of heat - and mass-exchange with the gas comes into contact with the culture fluid flowing as a film on a transparent film-forming surface is STI in its light intensity and autotrophic biosynthesis occurs only in the presence of a mixture of air with carbon dioxide. Thus, completely eliminated the accumulation of metabolic products due to their continuous removal from film culture liquid with the process gas, which is not typical for devices of other types. Small size membrane bioreactors may increase the degree of saturation of the liquid carbon dioxide with the possibility of changing the concentration of gas in the culture fluid and to ensure the cultivation of microorganisms with a specified biomass yield. At present up to date-developed a significant number of ways to ensure contact of the gas with the liquid (bubbling, gas-lift, mechanical stirring, jet, membrane, etc.) on the basis of which an industrial bioreactor, with various "stress" effect. It is believed that for the cultivation of the most optimal are bioreactors with mechanical stirring of the liquid, which allow the greatest productivity of biomass. However, the applied model of a mechanical mixing device to create a work whose cavity of the bioreactor chaotic, disorganized mixing, which contributes to the emergence, insufficient for the sustenance of the cell cultures and microorganisms. Analysis of the interactions of the gas with the liquid film devices showed the need to create a new generation of bioreactor with intensive mass transfer without the possibility of limiting the productivity of biotechnological systems. The work shows a consistent change in structural elements of membrane bioreactors to increase the efficiency of their operation.

Keywords: film unit, photoautotrophic biosynthesis, bioreactor, light-dependent microorganisms, the culture fluid, the film-forming surface, heat and mass transfer

Для цитирования

Шевцов А. А., Дранников А. В., Пономарев А. В., Шабунина Е. А. Современные тенденции совершенствования конструкций пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С. 68–76. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-68-76

For citation

Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Ponomarev A. V., Shabunina E. A. Current trends for improving the design of membrane devices for photoautotrophic biosynthesis is light dependent microorganisms. Vestnik VSUET [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 3. pp. 68–76. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-68-76

Введение

В настоящее время для получения суспензии фотоавтотрофных микроорганизмов (*Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella* и др.) используют биореакторы плёночного типа, позволяющие снабжать микроводоросли в необходимом объеме углекислым газом, световой энергией и питательными веществами [2].

Большие перспективы имеют аппараты со стекающей турбулентной пленкой жидкости по внутренней поверхности трубы с винтовой шероховатостью (рисунок 1). Скорость переноса газа в пленочных биореакторах и поверхностный коэффициент массоотдачи на порядок выше, чем в других биореакторах [1]. Коэффициент теплоотдачи в турбулентной пленке, при высоких нагрузках по жидкости, в 2–3 раза превышает значения, полученные в барботажных и газлифтных аппаратах. При этом достигается равномерное распределение температуры в объеме культуральной жидкости по причине пропускания всей ее массы через теплопередающую поверхность, что исключает образование застойных зон. Отвод тепла организуется непосредственно в зоне биохимической реакции, что не требует дополнительных конструктивных решений и не влияет на процесс интенсификации тепло- и массообмена.

В пленочных биореакторах исключается накопление продуктов метаболизма

в культуральной жидкости благодаря их интенсивному отводу из пленки с отработанным газом.

Проведение процесса ферментации в пленочных биореакторах возможно при низких расходах газа, так как в этих аппаратах газ не участвует в создании поверхности контакта фаз и турбулизации жидкости. При этом снижаются потери газа в окружающую среду, вследствие его размещения в зоне контакта с пленкой. Из-за высокой скорости подвода газа, отвода тепла и продуктов метаболизма пленочные биореакторы способны перерабатывать концентрированные питательные среды и получать высокую производительность и в несколько раз уменьшить габариты биореактора.

Небольшие габариты пленочного биореактора при высокой его производительности обеспечивают процесс ферментации при избыточном давлении, что увеличивает степень насыщения жидкости газом и позволяет легко изменять концентрацию газа в культуральной жидкости в процессе ферментации. В пленочном биореакторе исключается эффект флотации биомассы и пенообразования, что позволяет увеличить рабочий объем аппарата и обеспечить равномерное распределение микроорганизмов и питательной среды.

Пленочные биореакторы по конструктивному оформлению можно разделить на одноступенчатые (рисунок 1, а, в) и многоступенчатые (рисунок 1, б).

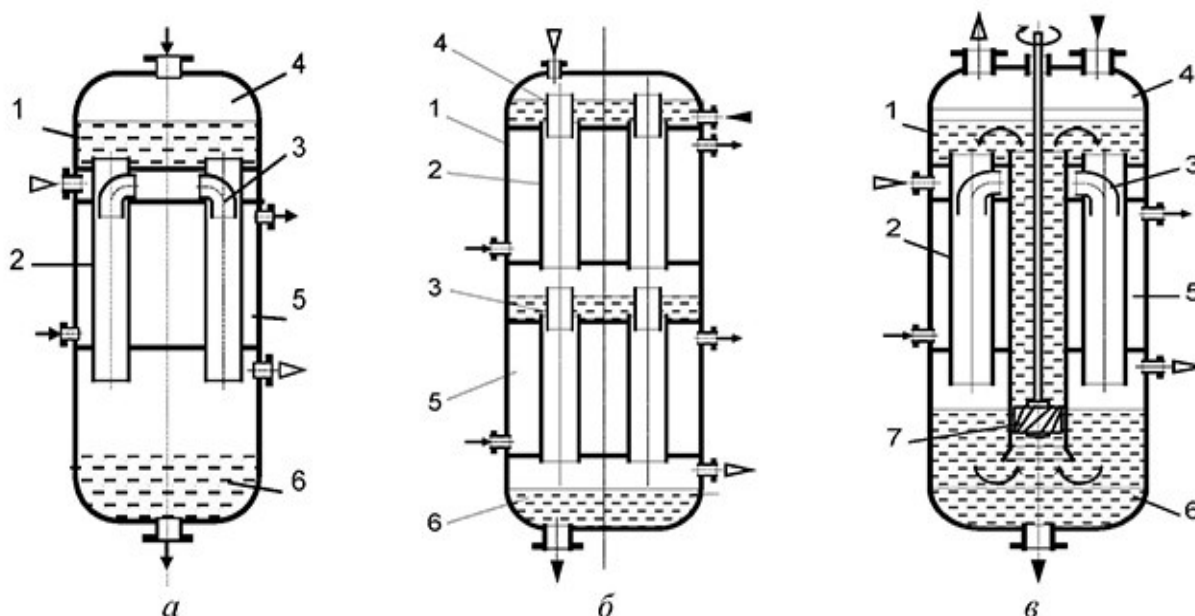


Рисунок 1. Схемы пленочных трубчатых биореакторов: 1 – корпус; 2 – контактная труба; 3 – газовый патрубок; 4 – камера для ввода газа; 5 – теплообменная секция; 6 – камера для культивирования; 7 – насос

Figure 1. Schemes of film tubular bioreactors: 1 – the case; 2 – contact tube; 3 – the gas pipe; 4 – gas injection camera; 5 – the heat exchange section; 6 – cell culturing; 7 – pump

В многоступенчатом биореакторе на каждой ступени осуществляется насыщение жидкости газом и его исчерпывание микроорганизмами. Это позволяет уменьшить расход перекачиваемой жидкости через аппарат, разместить большее количество культуральной жидкости в рабочей зоне биореактора.

Известные аппараты не могут быть использованы для культивирования автотрофных микроорганизмов, так как в конструкции не предусмотрена установка источника световой энергии для освещения суспензии, а цилиндрические трубы в зоне освещения выполнены непрозрачными.

Кроме этого эти аппараты не позволяют эффективно проводить процесс культивирования микроорганизмов с высоким выходом готовой биомассы, так как в них не предусмотрены

различные виды истечения суспензии и оптимальные условия для роста автотрофных микроорганизмов уже на первом цикле культивирования.

В пищевой, комбикормовой и других отраслях промышленности все большую актуальность приобретает алголизация – введение биомассы микроводорослей в состав продукта [8]. Для ввода в материал свежей суспензии микроводорослей ее целесообразно получать в условиях производства, включая в основную технологическую линию участок культивирования, ядром которого является фотобиореактор. Разработанный пленочный фотобиореактор (рисунок 2) предназначен для культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов, в частности, микроводоросли хлорелла [3].

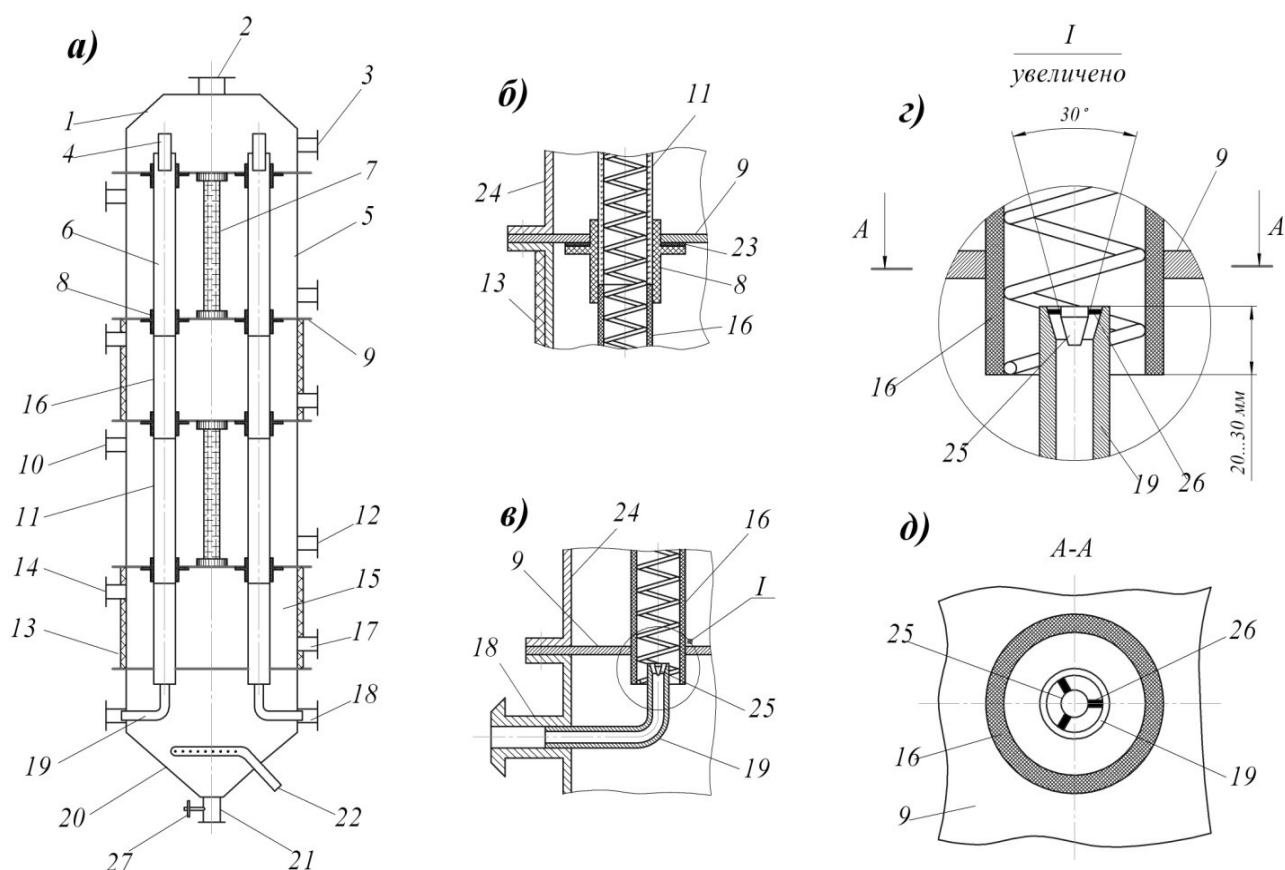


Рисунок 2. Фотобиореактор пленочного типа: а – общий вид; б – увеличенное соединение прозрачного и непрозрачного элементов цилиндрических трубок; в, д – увеличенная зона ввода смеси воздуха с углекислым газом в цилиндрические трубки

Figure 2. Photobioreactor film types: a – general view; b – increased connection of transparent and opaque elements of cylindrical tubes; c, d – increased air mixture entering the zone with carbon dioxide in the cylindrical tube

Пленочный фотобиореактор состоит из корпуса 24, на котором размещены штуцеры для ввода и вывода суспензии автотрофного организма 3 и 21, штуцера для ввода и вывода охлаждающего воздуха 10 и 12, штуцера

для ввода и вывода охлаждающей воды 14 и 17, штуцера для ввода и вывода смеси углекислого газа с воздухом 18 и 2. Корпус аппарата разделен горизонтальными перегородками 9 на секции ввода 1, вывода 20, секцию

теплообмена 15 и секцию освещения 5. В горизонтальных перегородках установлены цилиндрические трубки 11 с распределителями жидкости 4. Внутри цилиндрических трубок вставлена коаксиально винтовая спираль, представляющая собой проволоку круглого сечения. Прозрачные элементы трубок установлены в секции освещения, а непрозрачные – в секции теплообмена. Прозрачные и непрозрачные элементы соединены муфтами 8, снабженными уплотнениями 23. В центре секции освещения установлена цилиндрическая люминесцентная лампа 7, а внутренняя боковая поверхность этой секции выполнена зеркальной. Теплообменная секция пленочного аппарата снабжена наружной тепловой изоляцией 13. В секции вывода имеется барботажное устройство 22, а к штуцерам для ввода смеси углекислого газа с воздухом 18 присоединены изогнутые патрубки 19. Внутри изогнутых патрубков, на выходе, на трех штырях 26 установлена коническая пробка 25. В штуцере 21 для вывода суспензии предусматривается установка вентиля 27.

Предлагаемый фотобиореактор позволяет культивировать фотоавтотрофные микроорганизмы; интенсифицировать процесс теплоотвода от пленки суспензии в цилиндрических трубках; создать в камере вывода дополнительное насыщение суспензии углекислым газом посредством барботажа; обеспечить рациональное распределение потока газозвушной смеси внутри цилиндрических трубок; создать оптимальные условия для компоновки аппарата в зависимости от требуемого выхода биомассы с использованием более одного комплекта чередующихся секций; повысить на 35...45% точность распределения потока ГВС по цилиндрическим трубкам.

Для интенсификации процесса культивирования была разработана конструкция фотобиореактора с комбинированным истечением жидкости (рисунок 3), которая представляет собой корпус, разделённый прозрачными горизонтальными перегородками 1, 2, 3 на пять герметичных секций: ввода суспензии 4, кольцевого истечения суспензии 5, промежуточную 6, плёночного истечения суспензии 7 и вывода суспензии 8 [4]. В секции 4 установлен штуцер для ввода суспензии 9, спиральный нагреватель 10 с термореле, регулятор давления 11. Между секциями ввода суспензии 4 и кольцевого

истечения суспензии 5 закреплена прозрачная горизонтальная перегородка 1 секции ввода суспензии 4, выполненная с углублениями.

В секции кольцевого истечения суспензии 5 расположены штуцеры для ввода и вывода газа-теплоносителя 11 и 12, две лампы накаливания типа ДНаТ 13 в верхней и нижней частях секции и по окружности на одинаковом расстоянии друг от друга прозрачные цилиндрические трубки 14 с закреплёнными внутри них винтообразными насадками 15, выполненными из полый ПФХ трубки, на поверхности которой зафиксирована лента в виде секторов через каждые 30 градусов.

Однако этот биореактор имеет следующие недостатки:

- невысокий выход биомассы, поскольку отсутствует рециркуляционная труба, обеспечивающая интенсивное перемещение культуральной жидкости;

- низкое качество получаемой биомассы в связи с тем, что не созданы условия для более равномерного освещения культуральной жидкости при ее рециркуляции посредством коаксиального размещения лампы;

- компоновочное решение аппарата нельзя признать оптимальным, т. к. в центральной зоне рабочего объема аппарата расположены лампы для освещения культуральной жидкости, а не рециркуляционная труба, обеспечивающая многократный возврат жидкости с последующим культивированием до достижения заданной концентрации биомассы культуральной жидкости с требуемым выходом;

- сложность конструкции аппарата из-за чередующихся секций при культивировании суспензии с учетом чередования участков освещения и охлаждения делает её части труднодоступными при профилактическом обслуживании, а также непосредственно связана с увеличением габаритных размеров аппарата;

- высокие удельные энергозатраты на получение биомассы, поскольку не используется кинетическая энергия газового субстрата на входе в биореактор;

- не позволяет обеспечить рациональное распределение потока газа, так как в конструкции не используется кольцевой коллектор по всему сечению аппарата;

Перечисленные недостатки исключаются в предлагаемой авторами конструкции фотобиореактора.

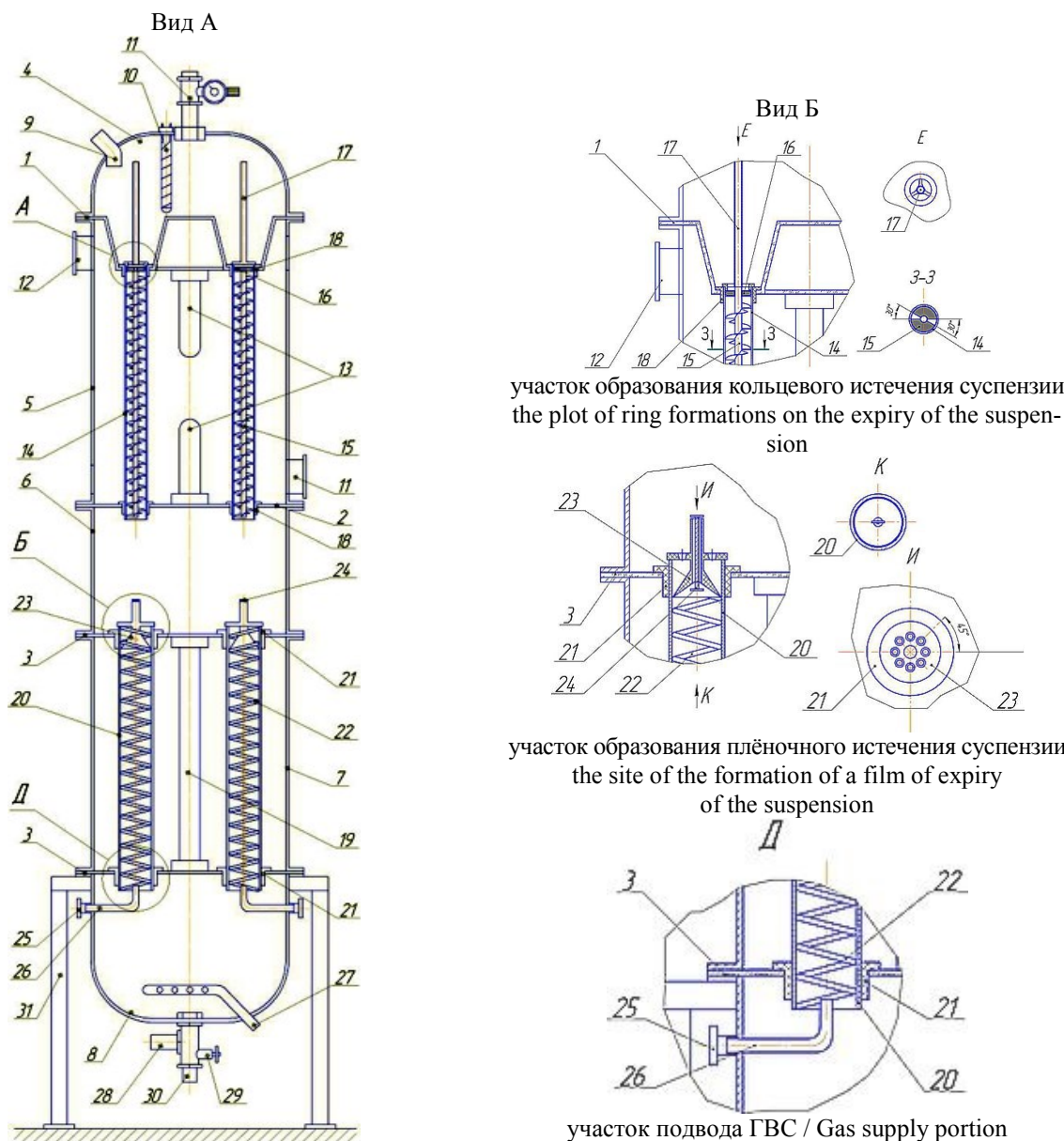


Рисунок 3. Конструкция фотобиореактора с комбинированным истечением жидкости

Figure 3. Construction of photobioreactor with combined expiration of the liquid

Фотобиореактор состоит из корпуса 1, который разделен горизонтальными перегородками 2 на секции ввода культуральной жидкости 3, вывода культуральной жидкости 4, и дополнительную секцию 5 с внутренней зеркальной поверхностью, предназначенную для освещения суспензии автотрофных микроорганизмов. В горизонтальных перегородках 2 вертикально установлены прозрачные цилиндрические трубки 6 с пленкообразующим устройством 7, и прозрачная рециркуляционная труба 8, расположенная вертикально по оси симметрии аппарата в дополнительной секции 5. По длине прозрачных цилиндрических трубок на их внутренней поверхности нанесена винтовая спираль из проволоки 9.

В дополнительной секции 5 коаксиально установлена лампа накаливания 10 с возможностью освещения прозрачных цилиндрических трубок 6 и прозрачной рециркуляционной трубы 8.

В секции вывода культуральной жидкости 4 размещено барботажное устройство 11, выполненное в виде кольцевого коллектора по всему сечению аппарата, с патрубком 12 подачи смеси углекислого газа и воздуха. Внутри рециркуляционной трубы 8 по всей высоте аппарата установлен вал 13 в подшипниках 14 и 15. Корпус подшипника 14 с крышкой 17 и сальником 18 закреплен в верхней части аппарата. Корпус подшипника 15 с крышкой 20 и сальником 21 расположен в патрубке барботажного устройства 11.

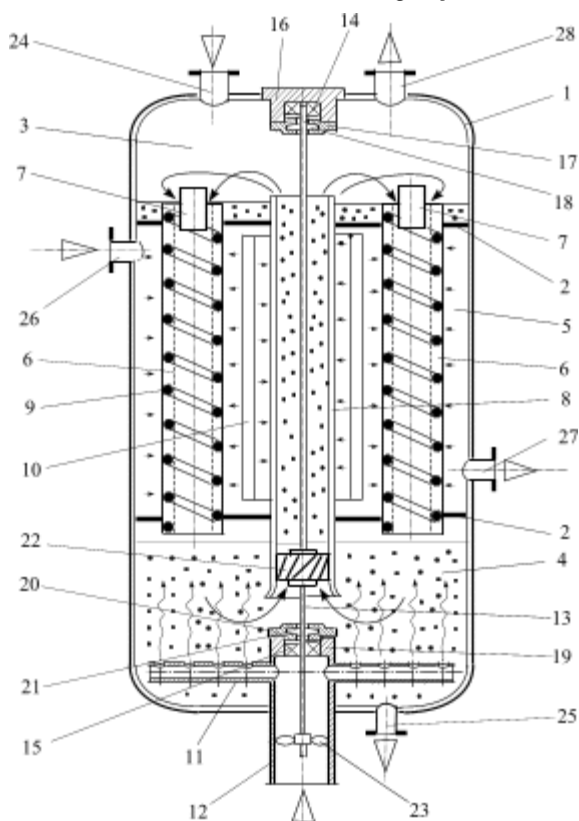


Рисунок 4. Конструкция фотобиореактора

Figure 4. Photobioreactor construction

На валу 13 внутри рециркуляционной трубы 8 в зоне вывода жидкости 4 закреплен роторный нагнетатель 22, направляющий культуральную жидкость из секции вывода культуральной жидкости 4 через рециркуляционную трубу 8 в секцию её ввода 3. Нижняя часть вала 13 снабжена крыльчаткой 23, которая расположена в патрубке 12 барботажного устройства 11 с возможностью вращения вокруг своей оси за счет кинетической энергии потока смеси углекислого газа с воздухом, подаваемой в секцию вывода культуральной жидкости 4.

На корпусе аппарата 1 размещены штуцера для ввода культуральной жидкости (суспензии автотрофного организма) 24 и вывода культуральной жидкости (готовой биомассы) 25, штуцера для ввода и вывода охлаждающего воздуха 26 и 27, штуцера для вывода отработанной смеси углекислого газа с воздухом 28.

Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов работает следующим образом. Суспензия автотрофного микроорганизма поступает через штуцер 24 в камеру для ввода культуральной жидкости 3, проходит через кольцевой зазор пленкообразующих устройств 7 и в виде жидкостной пленки стекает по внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок 6. Обтекая витки винтовых спиралей 9,

выполненных в виде канавки полукруглого сечения на внутренней стороне прозрачных цилиндрических трубок 6, жидкостная пленка в противотоке со смесью углекислого газа и воздуха, интенсивно взаимодействуют.

Винтовая спираль 9 обеспечивает вращательно-поступательное движение жидкости и позволяет удерживать большое количество культуральной жидкости на внутренней поверхности трубок 6. Наличие центробежной силы, вызванной вращательным движением пленки жидкости, предотвращает ее срыв и обеспечивает равномерное распределение по высоте прозрачных цилиндрических трубок 6.

Величину газожидкостного слоя, стекающего по пленкообразующей поверхности во впадине винтовой спирали определяли по зависимости [1]:

$$\bar{\delta}_{\text{вп}} \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{\text{вп}}}{2R} \right) = \left(1 - \frac{h}{2R} \right) \frac{hs}{(s+e)} + \left\{ \frac{\Gamma^2 (1-h/R)}{\rho^2 g} \left[\frac{\lambda e}{8(s+e)} + \frac{s}{4\sqrt{\pi}\sigma_1(s+e)} \right] \right\}^{1/3}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность газожидкостной смеси, кг/м³; e, h – ширина и высота выступа винтовой спирали, м; $\bar{\delta}_{\text{вп}}$ – толщина пленки газожидкостной смеси, м; $\Gamma = G/\pi d$ – массовая плотность орошения, кг/(с·м); R – радиус трубчатой насадки, м; s – расстояние между витками спирали, м; $\sigma = 8$ – эмпирическая поправка.

Плотность газожидкостной смеси определяли с учетом плотности жидкости $\rho_{\text{ж}}$, плотности газа $\rho_{\text{г}}$ и газосодержания φ :

$$\rho = \rho_{\text{ж}} (1 - \varphi) + \rho_{\text{г}} \varphi, \quad (2)$$

При этом подача смеси углекислого газа с воздухом в аппарат осуществляется через патрубок 12 барботажного устройства 11, которое обеспечивает дополнительное насыщение жидкости углекислым газом в секции 4 и равномерное распределение потока газовой смеси в прозрачных цилиндрических трубках 6.

За счет кинетической энергии потока смеси углекислого газа с воздухом, подаваемого в секцию вывода культуральной жидкости 4 через патрубок барботажного устройства 12, крыльчатка 23 приводится во вращательное движение и заставляет вращаться вал 13, установленный в подшипниках 14 и 15, а вместе с ним и роторный нагнетатель 22, направляющий культуральную жидкость из секции вывода 4 через рециркуляционную трубу 8 в секцию её ввода 3.

Для определения изменения концентрации CO_2 , растворенного в жидкой фазе по высоте рабочей зоны реактора с учетом кинетических закономерностей использована однопараметрическая диффузионная модель:

$$v \frac{dC_L}{dz} = D_L \frac{d^2 C_L}{dz^2} + k_L a \Delta C - \alpha_{CO_2} \mu_m \frac{C_L}{K_{CO_2} + C_L} x \quad (3)$$

где v – скорость потока, м/с; z – продольная координата, м; C_L – рабочая концентрация CO_2 в жидкой фазе; D_L – коэффициент осевой диффузии; $k_L a$ – объемный коэффициент массопередачи, м/с; α_{CO_2} – расходный коэффициент по потреблению CO_2 , клетками кг/кг; ΔC – разность концентраций CO_2 в газовой и жидкой фазах (движущаяся сила массопереноса); μ_m – максимальная скорость роста биомассы; индексы: G – газовая фаза; L – жидкая фаза; $x = 1,13\tau + 1,59$ – концентрация АСБ в суспензии, г/дм³, здесь τ – продолжительность культивирования.

Модель (3) была решена при следующих допущениях:

- концентрация CO_2 меняется только вдоль оси z , в радиальном направлении она выровнена;
- движение газовой фазы описывается моделью идеального вытеснения;
- рассмотрен установившийся режим культивирования;
- в аппарате отсутствуют застойные зоны и байпасные потоки;
- концентрация растворенного CO_2 превышает критическую.
- скорость потребления CO_2 клетками составляет $q(1,13\tau + 1,59)$.

Модель (3) в безразмерной форме принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\bar{C}_G}{dZ} - a_G(\bar{C}_G - \bar{C}_L) &= 0 \\ \frac{1}{Pe} \frac{d^2 \bar{C}_L}{dZ^2} + \frac{d\bar{C}_L}{dZ} + a_L(\bar{C}_G - \bar{C}_L) - b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $Pe = \frac{v_L L}{D_L}$ – диффузионный критерий

Пекле; $a_G = \frac{k_L a H}{\phi_G v_G \psi}$ и $a_L = \frac{k_L a H}{v_L \phi_L}$ – безразмерные параметры, определяющие массопередачу

CO_2 из газовой фазы в жидкую; $b = q(1,13\tau + 1,59)\psi L / (v_L C_G^0)$ – безразмерный параметр, определяющий скорость потребления CO_2 клетками микроводоросли (Сток CO_2); $Z = z / H$; $\bar{C}_L = C_L \psi / C_G^0$; $\bar{C}_G = C_G / C_G^0$ – относительные длина и концентрации соответственно; H – высота рабочей зоны реактора, м; ϕ – содержание фазы в рабочей зоне аппарата; C_G^0 – концентрация CO_2 в газовой фазе на входе в рабочую зону реактора; ψ – константа фазового равновесия.

Граничные условия при работе биореактора в режиме противотока:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } Z=0: \frac{d\bar{C}_L}{dZ} &= 0; \quad l = \bar{C}_G \\ \text{при } Z=1: \frac{d\bar{C}_G}{dZ} &= 0; \quad \bar{C}_L^0 = \bar{C}_L - \frac{1}{Pe} \cdot \frac{d\bar{C}_L}{dZ} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Расчет диффузионной модели (1–3) на ЭВМ с использованием метода Рунге-Кутты проводили при рациональных значениях параметров культивирования, полученных в ходе исследования кинетических закономерностей процесса квазинепрерывного культивирования хлореллы.

Проверка адекватности результатов моделирования (рисунок 4) реальному процессу показала, что средняя ошибка аппроксимации по концентрации CO_2 в жидкой фазе составила 13%.

Модель позволяет определить распределение абсорбированного CO_2 в пленке суспензии по высоте рабочей зоны фотобиореактора и проводить масштабирование, то есть нахождение условий, при которых возможен непосредственный переход с экспериментальной установки на промышленный аппарат.

Рециркуляция культуральной жидкости позволяет обеспечить необходимое время культивирования автоавтотрофных микроорганизмов для достижения необходимой концентрации биомассы при заданном расходе смеси углекислого газа с воздухом (газового субстрата) с минимальными энергозатратами на процесс массообмена.

В дополнительной секции 5 суспензия автотрофного микроорганизма подвергается воздействию световой энергии посредством коаксиально установленной лампы накаливания дневного света 10. В процессе освещения лампой накаливания 10 выделяется теплота, которая компенсируется подачей охлаждающего воздуха в секцию 5 через штуцер 26. Отвод охлаждающего воздуха из секции 5 осуществляется через штуцер 27.

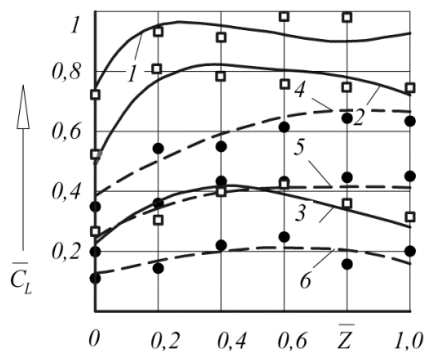


Рисунок 5. Влияние параметров диффузионной модели на изменение концентрации CO_2 в жидкой фазе по высоте рабочей зоны фотобиореактора: —□— — влияние параметра a_G : 1 – 65; 2 – 30; 3 – 10; —●— — влияние параметра b : 4 – 1,5; 5 – 2,0; 6 – 3,0.

Figure 5. The influence of parameters diffusion models the change in the concentration of CO_2 in the liquid phase along the height of the working area of the photobioreactor: —□— — influence of parameter a_G : 1 – 65; 2 – 30; 3 – 10; —●— — influence of parameter b : 4 – 1,5; 5 – 2,0; 6 – 3,0.

На выходе из цилиндрических трубок 6 насыщенная углекислым газом суспензия автотрофного микроорганизма поступает в секцию для вывода культуральной жидкости 4, где дополнительно насыщается газозвушной смесью с помощью барботажного устройства 11, при этом повышается суммарный коэффициент массообмена и тем самым интенсифицируется процесс культивирования. Из секции для вывода культуральной жидкости 4 суспензия автотрофного организма выводится в качестве готовой биомассы через штуцер 25.

Предложенный аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов позволяет:

- повысить выход готовой биомассы, поскольку предусмотрено использование рециркуляционной трубы, обеспечивающей интенсивное перемещение культуральной жидкости;

ЛИТЕРАТУРА

1 Войнов Н.А., Жукова О.П., Курганский О.В., Вырина Е.Е. Массообмен в проточном биореакторе с рециркуляцией жидкости // Химия растительного сырья. 2014. № 3. С. 241–247.
 2 Семенов Г.В., Булкин М.С., Меламед Л.Э., Тропкина А.И. Теплообмен в промышленных процессах вакуумного сублимационного обезвоживания с учетом условий контактирования // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 25–33.
 3 Семенов Г.В., Булкин М.С. Эффективная теплопроводность замороженных дисперсных материалов в процессах вакуумного обезвоживания // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 55–57.
 4 Пат. № 2458980 РФ, МПК7 С 12 М 1/00, С 12 М 1/06, В 01 D 3/32. Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов / Шевцов А.А., Дранников А.В., Ситников Н.Ю., Пономарев А.В., Мажулина И.В. № 2011126828; Заявл. 29.06.2011; Оpubл. 20.08.2012; Бюл. № 23.

- повысить качество получаемой биомассы в связи с тем, что созданы условия для более равномерного освещения культуральной жидкости при ее рециркуляции посредством коаксиального размещения лампы;

- уменьшить габаритные размеры аппарата и упростить его конструкцию за счет перехода от многоступенчатого аппарата к одноступенчатому;

- снизить удельные энергозатраты на получение биомассы, поскольку используется кинетическая энергия газового субстрата на входе в биореактор;

- обеспечить рациональное распределение потока газа в конструкции за счет использования кольцевого коллектора по всему сечению аппарата;

- повысить коэффициент массообмена благодаря равномерному освещению культуральной жидкости при ее рециркуляции посредством коаксиального размещения лампы и рационального распределения потока газа, с помощью кольцевого коллектора, установленного по всему сечению аппарата.

Заключение

Рассмотрены современные тенденции совершенствования конструкций пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов. Выбор аппарата для производственного культивирования целесообразно определять исходя из условий биосинтеза конкретного фотоавтотрофного микроорганизма с предварительной экспериментальной проверкой режимов эксплуатации, обеспечивающих максимальный положительный эффект.

Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации МД-8104.2016.11.

5 Васильев В.Н., Куцакова В.Е., Фролов С.В. Кинетика диффузионных процессов при сушке квази-одномерных тел // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 3–5.

6 Семенова В.О., Ефремова А.А., Лисина Е.Ю., Тимиреева К.В. Изучение влияния бактериофагов на бактериальную загрязненность фарша, контаминированного гомологичными микроорганизмами // Биотика. 2015. Т. 7. № 6. С. 147–156.

7 Пат. № 2577150 РФ, МПК7 С 12 М 1/00, С 12 М 1/06, В 01 D 3/32. Способ производства биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов / Шевцов А.А., Тертычная Т.Н., Дранников А.В., Шабунина Е.А. № 2014153348; Заявл. 29.12.2014; Оpubл. 11.02.2016.

8 Пат. № 2411885 РФ, МПК7 А 23 Р 1/02, А 23 № 17/00. Способ производства крупки по технологии влажного гранулирования с использованием фототрофной биомассы и фуза растительных масел и линия для его осуществления / Шевцов А.А., Пономарев А.В., Шенцова Е.С., Лыткина Л.И., Дранников А.В., Бритиков Д.А., Хорхордин Д.С. № 2009132801/13; Заявл. 31.08.2009; Оpubл. 20.02.2011; Бюл. № 23

9 Kolesnikova Y.N., Pimenov N.V., Kapustin A.V. The etiology of anaerobic infections of cattle and comparative characteristics of the isolated strains of Clostridium // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2016. V. 56. № 8. P. 39-48.

REFERENCES

1 Voinov N.A. Zhukova O.P., Kurgansky O.V., Vyryna E.E. Mass transfer in the flowing recirculation bioreactor. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw material] 2014, no. 3, pp. 241-247. (in Russian)

2 Semenov G.V., Bulkin M.S., Melamed L.E., Tropkina A.I. Heat and mass transfer in industrial processes vacuum sublimation dehydration based on contacting conditions. Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda [Proceedings of the International Academy of Refrigeration] 2010, no. 2, pp. 25-33. (in Russian)

3 Semenov G.V., Bulkin M.S. The effective thermal conductivity of frozen particulate materials in the vacuum dewatering processes. Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda [Proceedings of the International Academy of Refrigeration] 2013, no. 3, pp. 55-57. (in Russian)

4 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Sitnikov N.Yu., Ponomarev A. V. et al. Apparat dlya kul'tivirovaniya avtotrofnykh mikroorganizmov [Apparatus for cultivation of autotrophic microorganisms] Patent RF, no. 2458980, 2011. (in Russian)

5 Vasiliev V.N., Kutsakova V.E., Frolov S.V. The kinetics of diffusion processes at drying quasi-bodies. Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda [Proceedings of the International Academy of Refrigeration] 2013, no. 3, pp. 3-5. (in Russian)

6 Semenova V.O., Efreimov A.A., Lisina E.Y., Timireeva K.V. The influence of bacteriophages on bacterial contamination of meat, contaminated homologous microorganisms. Biotika [Biotics] 2015, vol. 7, no. 6, pp. 147-156. (in Russian)

7 Shevtsov A. A., Tertychnyy T. N., Drannikov, A. V., Shabunina E. A. Sposob proizvodstva biomassy fotoavtofotofnykh mikroorganizmov [Method for the production of biomass of microorganisms photoautotroph] Patent RF, no. 2577150, 2016. (in Russian)

8 Shevtsov A.A., Ponomarev A.V., Chentsova E.S., Lytkina L. I. et al. Sposob proizvodstva krupki po tekhnologii vlazhnogo granulirovaniya [Method for the production of grits on the technology of wet granulation using phototrophic biomass and fuse vegetable oils and line for its implementation] Patent RF, no. 2411885, 2011. (in Russian)

9 Kolesnikova Y.N., Pimenov N.V., Kapustin A.V. The etiology of anaerobic infections of cattle and comparative characteristics of the isolated strains of Clostridium. Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. 2016, vol. 56, no. 8, pp. 39-48.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр А. Шевцов д. т. н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Алексей В. Дранников д. т. н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, декан факультета пищевых машин и автоматов, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

Александр В. Пономарев к. т. н., главный технолог проектного отдела, ООО «Инжиниринговый центр ВСМ», ул. 9 Января, 68, г. Воронеж, 394000, Россия

Елена А. Шабунина аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Александр А. Шевцов предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Алексей В. Дранников консультация в ходе исследования

Александр В. Пономарев консультация в ходе исследования

Елена А. Шабунина написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 13.07.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 23.08.2016

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr A. Shevtsov doctor of technical sciences, professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Aleksej V. Drannikov doctor of technical sciences, professor, Department of machines and equipment for food production, Dean of the Faculty of food machines and machines, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

Aleksandr V. Ponomarev candidate of technical sciences, Chief Technologist of project department, LLC "Engineering Center VSM", 9 Yanvary str., 68, Voronezh, 394000, Russia, Voronezh, 394000, Russia

Elena A. Shabunina graduate student, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

CONTRIBUTION

Aleksandr A. Shevtsov proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Aleksej V. Drannikov consultation during the study

Aleksandr V. Ponomarev consultation during the study

Elena A. Shabunina wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 7.13.2016

ACCEPTED 8.23.2016