

ВИХРЕВОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ КУЛЬТУР МИКРОВОДОРОСЛЕЙ**Геворгиз Р.Г.¹, Уваров И.П.², Репков А.П.², Железнова С.Н.¹**¹ ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, РФ; e-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

² ГБУ Новосибирской области «Управление ветеринарии города Новосибирска»

г. Новосибирск, РФ

Поступила в редакцию: 30.07.2021

Аннотация. В работе рассматриваются различные способы перемешивания культур низших фототрофов в фотобиореакторах для интенсивного культивирования. Представлены преимущества и недостатки различных способов перемешивания суспензии клеток. Отмечены преимущества вихревого способа перемешивания, как наиболее перспективного способа перемешивания культур микроводорослей. Принципиальной особенностью современных газовых вихревых аппаратов является создание закрученных потоков воздуха над суспензией клеток. Воздушный вихрь над суспензией за счет трения воздуха о поверхность раздела фаз и разницы давления между периферией и центром газоздушного вихря вовлекает в вихревое движение саму суспензию клеток, благодаря чему происходит достаточно мягкое воздействие на клетки при перемешивании. Именно такое перемешивание суспензии закрученным потоком позволяет исключить высокотурбулентные и застойные зоны, гидроудары и эффект кавитации, а также образование как напряжения среза, так и зоны локальных перегревов, губительно сказывающихся на жизнеспособности чувствительных к механическому воздействию культур клеток. Таким образом, в вихревых аппаратах удовлетворяются практически все требования, предъявляемые к перемешиванию клеток для широкого класса микробиологических объектов. К культурам микроводорослей при перемешивании предъявляются гораздо меньшие требования. Поэтому для интенсивного культивирования микроводорослей достаточно использование вихря только в самой суспензии, что в значительной мере упрощает конструкцию вихревого аппарата. Одним из простейших способов создания вихря внутри суспензии является вращение погружённого на определённый уровень плоского кольца (диафрагмы) посредством механического привода или тангенциального ввода воздушного потока в фотобиореактор. Изготовление такого кольца возможно из любого прозрачного материала, например, из листового поликарбоната, что позволяет сделать кольцо любого диаметра, а процесс интенсивного культивирования микроводорослей легко масштабировать до заданного уровня.

Ключевые слова: низшие фототрофы, торнадо, фотобиореактор.

Одним из важнейших параметров условий культивирования низших фототрофов является перемешивание суспензии клеток. Экспериментально показано, что интенсивность перемешивания культуры микроводорослей многократно увеличивает её продуктивность, увеличивает скорость практически всех субстратзависимых процессов, а также биосинтез ценных биологически активных веществ и пр. Это связано с тем, что перемешивание культуры в значительной мере изменяет условия культивирования: 1. Активное перемешивание суспензии клеток повышает вероятность встречи лимитирующего биогенного элемента с клеткой, что увеличивает скорость реакции в узком месте метаболизма. 2. Исключает образования концентрационных ям во всем объёме фотобиореактора. 3. Для фототрофов активное перемешивание снижает время нахождения клеток в области облучённости ниже компенсационного пункта фотосинтеза. 4. Активное перемешивание культуры удаляет продукты жизнедеятельности клеток из околочелочной среды. 5. Активное перемешивание культур низших фототрофов позволяет удалить из суспензии избыток растворенного кислорода, ингибирующего рост клеток. 6. Активное перемешивание культуры снижает проявление процессов адгезии, что способствует замедлению или исключению обрастания поверхностей фотобиореактора. 7. Активное перемешивание, как правило, препятствует агглютинации микроводорослей, что обеспечивает равные условия культивирования для всех клеток. 8. Кроме того, при использовании сжатого воздуха для перемешивания (барботаж культуры воздухом) в суспензию проникает атмосферный CO₂, что увеличивает скорость темновых процессов фотосинтеза.

Для перемешивания культур микроводорослей используют различные методы. Как правило, в лабораторных исследованиях применяется пневматическое перемешивание посредством барботажа воздухом (в специальных исследованиях вместо воздуха используют другие газы). Обусловлено это дешевизной и доступностью аквариумных компрессоров. Также в лаборатории применяют специальное оборудование, например, встряхиватели, вибраторы, магнитные мешалки и пр. При увеличении объёма суспензии кроме барботажа воздухом зачастую используют механический способ перемешивания: насосы различной конструкции и механические мешалки. Для промышленных фотобиореакторов большая часть устройств, перемешивающих суспензию клеток заимствована из химической промышленности. Однако в связи с биологическими особенностями различных видов микроводорослей разнообразие конструкций весьма ограничено, поскольку на перемешивание суспензии налагается ряд ограничений. Например, при перемешивании не должны разрушаться клеточные оболочки, трихомы, жгутики и пр., при перемешивании не должны возникать локальные повышения температуры, локальные перепады давлений. В различных частях рабочего объёма фотобиореактора должны

быть одинаковые световые условия и т. д.

Из всех известных способов перемешивания суспензии клеток наиболее эффективным можно считать перемешивание за счёт создания над суспензией воздушного вихря (управляемого торнадо) [1, 2]. Вихрь над поверхностью культуры клеток создает вихревые потоки внутри суспензии, благодаря которым происходит достаточно «мягкое» перемешивание, не травмирующее культивируемые клетки. Газовихревое перемешивание суспензии клеток позволяет получать в промышленных масштабах биомассу практически любых типов клеток: микроводорослей, бактерий, грибов, животных клеток, клеток человека и даже вирусов.

Существенным недостатком фотобиореакторов с газовихревым перемешиванием является уникальность и дороговизна некоторых частей оборудования. При изменении масштабов фотобиореактора, при внесении каких-либо конструктивных дополнений всегда требуются новые расчёты для устройства, создающего управляемое торнадо. Всё это ограничивает распространение и применимость газовихревого перемешивания суспензии клеток как для лабораторных, так и для промышленных масштабов. Однако нами показано, что для перемешивания культур микроводорослей нет необходимости создания вихря над суспензией, достаточно создание вихря внутри суспензии. Это обстоятельство в значительной мере упрощает конструкцию фотобиореактора и перемешивающего устройства.

Цель данной работы заключалась в анализе современных вихревых биореакторов и разработке механической мешалки, обеспечивающей создание вихревого перемешиванием культур низших фототрофов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Закрученные потоки жидкости и газа широко распространены в природе. Учёных давно привлекают такие явления как торнадо, смерчи, циклоны, водовороты и т. п. [2,3], поэтому проблемы теоретического представления вихревого движения ставились ещё со времён А. Пуанкаре в 19 веке [4]. При исследовании закрученных потоков были обнаружены такие необычные особенности вихревого движения как противоток и энергоделение (эффект Ранка). На сегодняшний день теория вихрей разработана достаточно подробно [1,5,6], что позволяет вихревое движение широко использовать в технике. Разработано большое количество различных аппаратов с различными характеристиками вихревого потока, которые используются в промышленности для разделения химических элементов, изотопов (например, урана), для утилизации тепла, очистки сточных вод и газов и т.д. [7,8].

Явление вихревого движения используется и в биологии, в частности в биотехнологии управляемого культивирования микроорганизмов [9-11]. Однако примеры такого использования немногочисленны. Отчасти это связано с тем, что специалисты в области вихревых потоков в микробиологии встречаются редко. Наибольших успехов в применении вихрей для суспензионного культивирования различных типов клеток были достигнуты сотрудниками ВНИИ молекулярной биологии НПО «Вектор» (г. Новосибирск). Под руководством В.И. Кислых был разработан ряд лабораторных и промышленных аппаратов для микробиологического синтеза с вихревым перемешиванием [12,13], которые успешно применяются в различных исследовательских и образовательных учреждениях, а также на предприятиях РФ для производства ценных биологически активных соединений, вакцин и т. п.

В практике биотехнологии микроводорослей применения вихревых потоков также достаточно редки. Практически единственным опытом применения газовихревых аппаратов было использование газовихревых микробиологических аппаратов, адаптированных под особенности выращивания микроводорослей для получения кормов для животных и фукоксантина из диатомовых водорослей с целью создания лечебно-профилактических препаратов [14-16]. Но, по сути, используемые газовихревые аппараты являли собой продолжение развития идей, заложенных при разработке аппаратов группой В.И. Кислых.

Принципиальной особенностью современных газовихревых аппаратов является создание закрученных потоков воздуха над суспензией клеток. Воздушный вихрь над суспензией за счет трения воздуха о поверхность раздела фаз и разницы давления между периферией и центром газовой вихря вовлекает в вихревое движение саму суспензию клеток, благодаря чему происходит достаточно мягкое воздействие на клетки при перемешивании (рис. 1). Именно такое перемешивание суспензии закрученным потоком позволяет исключить высокотурбулентные и застойные зоны, гидроудары и эффект кавитации, а также образование как напряжения среза, так и зоны локальных перегревов, губительно сказывающихся на жизнеспособности чувствительных к механическому воздействию культур клеток. Таким образом, в вихревых аппаратах удовлетворяются практически все требования, предъявляемые к перемешиванию клеток для широкого класса микробиологических объектов.

К культурам микроводорослей при перемешивании предъявляются гораздо меньшие требования, поскольку оболочка низших фототрофов адаптирована к условиям различных потоков, встречающихся в естественной среде обитания (морские течения, бурные потоки рек и т. п.). Например, для клеток микроводорослей такие параметры как напряжения среза и зоны локальных перегревов несут незначительный вред, т. к. микроводоросли обычно культивируют в водных растворах с вязкостью близкой к единице (кинематическая вязкость воды равна $1,004 \cdot 10^{-2}$ мм²/с при температуре 20°C). Клетки многих видов микроводорослей легко переносят высокотурбулентные течения, способны выдерживать гидроудары и достаточно высокие перепады давлений. Поэтому при культивировании многих видов водорослей перемешивание путем барботирования воздуха, использования циркуляционных

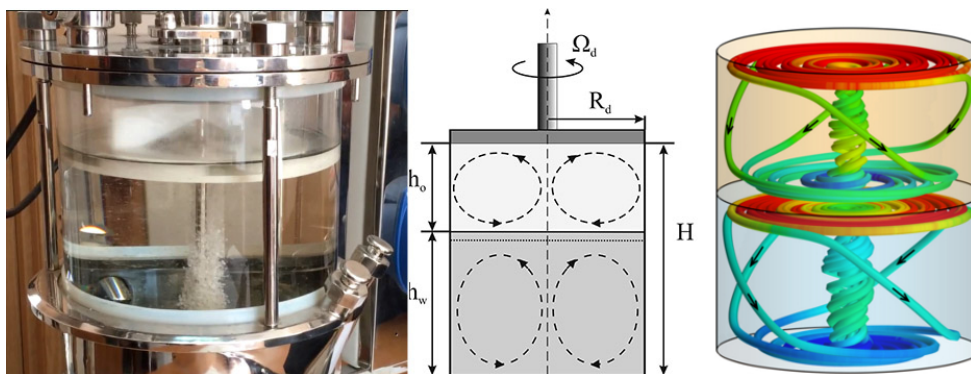


Рисунок 1. Демонстрация образующегося вихревого потока в газовихревом фотобиореакторе (слева) и схема потоков над суспензией и внутри суспензии клеток (в центр и справа) [3,14]

насосов, механических мешалок и пр. вполне допустимо. Однако некоторые виды микроводорослей из-за своих биологических особенностей выращивать в интенсивном режиме, используя традиционные способы перемешивания, практически невозможно. Например, бентосные виды микроводорослей характеризуются удельной плотностью больше единицы, поэтому они всегда оседают в «мертвой» зоне рабочего объема, у крупных динофлагелат достаточно мягкая оболочка, поэтому она разрушается при активном перемешивании и т. п. Для таких типов водорослей требования, предъявляемые к перемешиванию клеток в современных фотобиореакторах можно считать неудовлетворительными.

Учитывая опыт перемешивания суспензии клеток в вихревых аппаратах, можно с уверенностью сказать, что вихревое перемешивание пригодно не только для бактерий, но и для любых видов микроводорослей, включая прикрепленные формы. Более того, из-за меньшей требовательности к условиям перемешивания для интенсивного культивирования микроводорослей достаточно использование вихря только в самой суспензии. Это обстоятельство в значительной мере упрощает конструкцию вихревого аппарата и позволяет использовать фотобиореакторы вихревого типа как для лабораторных, так и для промышленных масштабов.

Одним из простейших способов создания вихря внутри суспензии является вращение погружённого на определённый уровень плоского кольца (диафрагмы) посредством механического привода или тангенциального ввода воздушного потока в фотобиореактор. Изготовление такого кольца возможно из любого прозрачного материала, например, из листового поликарбоната, что позволяет сделать кольцо любого диаметра, а процесс интенсивного культивирования микроводорослей легко масштабировать до заданного уровня.

Описание конструкции. Фотобиореактор представляет собой цилиндр круглой формы с погруженным в суспензию на глубину 3-5 см плоским кольцом (рис. 2). При вращении кольца за счёт центробежных сил суспензия напирет на стенки цилиндра, в результате чего уровень суспензии у стенок повышается, а у оси цилиндра понижается. Если выделить произвольную область вблизи стенок цилиндра, тогда разность уровней над этой областью создаёт силу, направленную к оси цилиндра. Именно эта сила определяет движение по окружности. В результате чего образуется вихревое движение с осью, совпадающей с осью цилиндра.

У дна цилиндра из-за силы трения скорость движения будет существенно ниже, поэтому будет наблюдаться движение не по окружности, а по спирали. Эти потоки достигают оси цилиндра и поднимаются вверх до поверхности суспензии в приосевой области сквозь отверстие кольца. У поверхности в результате действия центробежных сил они движутся к периферии, затем у стенок вниз к дну цилиндра. Образуется вторичный вихрь, наложенный на основное вихревое движение в цилиндре (рис. 2).

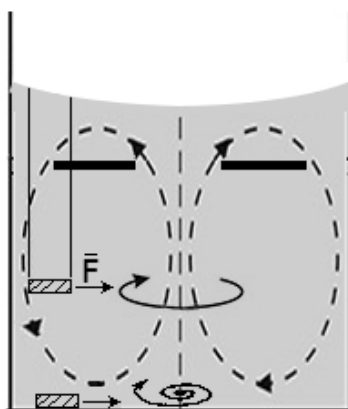


Рисунок 2. Схема вихревых потоков в суспензии микроводорослей

По истечению некоторого времени наступает установившийся процесс, при котором поверхность раздела фаз практически выравнивается благодаря восходящему потоку приосевой области. Именно наличие вращающегося кольца внутри суспензии способствует образованию мощного восходящего потока и гасит процессы автоколебаний в фотобиореакторе.

Механическая мешалка представляет собой плоское кольцо из прозрачного материала, снабженного поплавками. На поплавки устанавливаются крепления для механического привода или «паруса» для тангенциального ввода воздушного потока. При вращении кольца поток суспензии, выходящий из отверстия кольца, равномерно распределяется от оси цилиндра к периферии во всех направлениях.

Световая энергия вводится в фотобиореактора через боковую поверхность, либо через поверхность раздела фаз. Если поток световой энергии направлен сквозь боковую поверхность, тогда предпочтительным источником излучения являются светодиоды. При освещении фотобиореактора сверху допускается использование любых источников излучения, включая естественное освещение.

Для обеспечения клеток микроводорослей углеродом в фотобиореактор у дна через диспергатор вводится углекислота. Также в конструкции фотобиореактора предусмотрено введение питательных сред и отбор суспензии микроводорослей на урожай. Подача питательных сред с малой скоростью позволяет получить равномерное распределение всех биогенных элементов во всем объеме фотобиореактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование плоского кольца, погруженного в суспензию клеток, в качестве перемешивающего устройства для интенсивных культур микроводорослей расширяет возможности в создании фотобиореактора со всеми преимуществами вихревого перемешивания. При этом не требуется разработка и изготовление уникального оборудования для создания вихревых потоков над суспензиями микроводорослей. Вращение кольца возможно как посредством механического привода, так и за счет тангенциального введения воздушных потоков.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме НИР ФИЦ ИнБЮМ № 121030300149-0

Список литературы / References:

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. *Введение в теорию концентрированных вихрей*. Новосибирск, Институт компьютерных исследований, 2003, 504 с. [Aleksenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. *Introduction to the theory of concentrated vortices*. Novosibirsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003, 504 p. (In Russ.)]
2. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. *Торнадо*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011, 344 с. [Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeytshev V.N. *Tornado*. Moscow: FIZMATLIT, 2011, 344 p. (In Russ.)]
3. Наумов И.В. Штерн В.Н. Двухэтажное торнадо. *Природа*, 2021, № 4, с. 12-19. [Naumov I.V. Shtern V.N. Two-story tornado. *Priroda*, 2021, no. 4, pp. 12-19. (In Russ.)] DOI: 10.7868/S0032874X21040025
4. Пуанкаре А. *Теория вихрей*. Ижевск, 2000, 160 с. [Poincaré A. *Theory of vortices*. Izhevsk, 2000, 160 p. (In Russ.)]
5. Козлов В.В. *Общая теория вихрей*. Ижевск, 1998, 238 с. [Kozlov V.V. *General theory of vortices*. Izhevsk, 1998, 238 p. (In Russ.)]
6. Сэффмэн Ф. Дж. *Динамика вихрей*. М.: Научный мир, 2000, 376 с. [Saffman F.J. *Dynamics of vortices*. Moscow: Nauchnyy mir, 2000, 376 p. (In Russ.)]
7. Ляндзберг А.Р., Латкин А.С. *Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке*. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004, 149 с. [Lyandzberg A.R., Latkin A.S. *Vortex heat exchangers and swirling condensation*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatGTU, 2004, 149 p. (In Russ.)]
8. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. *Вихревые аппараты*. М., Машиностроение, 1985, 256 с. [Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V., Chizhikov Yu.V. *Vortex devices*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1985, 256 p. (In Russ.)]
9. Воробьев И.Д., Кислых В. И., Харченко В.А. Массообмен в клеточном культиваторе "Биоколь". *Гидродинамика и процессы переноса в биореакторах*. Новосибирск, Ин-т теплофизики, 1989, с. 35-40. [Vorobiev I.D., Kislykh V.I., Kharchenko V.A. Mass transfer in the cell cultivator "Biokol". *Hydrodynamics and transfer processes in bioreactors*. Novosibirsk, Institut teplofiziki, 1989, pp. 35-40. (In Russ.)]
10. Кислых В.И., Рамазанов Ю.А., Майстренко В.Ф., Мертвцов Н.П. Вихревой биореактор «Биок» 1. Опыт культивирования штамма *E. coli* BL 21 (DE 3) pZZSA, продуцирующего рекомбинантный антиогенин человека. *Биотехнология*, 2000, № 4, с. 72-79. [Kislykh V.I., Ramazanov Yu.A., Maistrenko V.F., Mertvetsov N.P. Vortex bioreactor "Biok" 1. Experience of cultivation of *E. coli* BL 21 (DE 3) pZZSA strain, producing recombinant human antiogenin. *Biotechnology*, 2000, no. 4, pp. 72-79. (In Russ.)]
11. Мертвцов Н.П., Рамазанов Ю.А., Репков А.П., Дударев А.Н., Кислых В.И. *Газовихревые биореакторы «Биок». Использование в современной биотехнологии*. Новосибирск: Наука, 2002, 118 с. [Mertvetsov N.P., Ramazanov Yu.A., Repkov A.P., Dudarev A.N., Kislykh V.I. «Biok» gas vortex bioreactors. Use in modern biotechnology. Novosibirsk: Nauka, 2002, 118 p. (In Russ.)]

12. Бадаев Б.Н., Воробьев И.Д., Кислых В.И., Харченко В.А., Репков А.П. *Аппарат для культивирования клеток тканей или микроорганизмов*. Пат. SU 1779690 (51) МПК C12M 1/04 (1990.01). Заявка: № 89 4700908, заявл. 06.06.1989, опубл. 07.12.1992, бюл. № 34. [Badaev B.N., Vorobiev I.D., Kislykh V.I., Kharchenko V.A., Repkov A.P. *Apparatus for the cultivation of tissue cells or microorganisms*. Pat. SU 1779690 (51) МПК C12M 1/04 (1990.01). Application: No. 89 4700908, app. 06.06.1989, publ. 07.12.1992, bul. no. 34. (In Russ.)]

13. Кислых В.И., Рамазанов Ю.А., Репков А.П., Воробьев И.Д. *Аппарат для суспензионного культивирования клеток тканей и микроорганизмов*. Пат. RU 2125579 C1, МПК C12M 1/14,3/00. № 98117375/13, заявл. 22.09.1998, опубл. 27.08.1999, бюл. № 34. [Kislykh V.I., Ramazanov Yu.A., Repkov A.P., Vorobiev I.D. *Apparatus for suspension cultivation of tissue cells and microorganisms*. Pat. RU 2125579 C1, МПК C12M 1 / 14.3 / 00. No. 98117375/13, app. 09/22/1998, publ. 27.08.1999, bul. no. 34. (In Russ.)]

14. Геворгиз Р.Г., Железнова С.Н., Зозуля Ю.В., Уваров И.П., Репков А.П., Лелеков А.С. Промышленная технология производства биомассы морской диатомеи *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin с использованием газовихревого фотобиореактора. *Актуальные вопросы биологической физики и химии. БФФХ-2016: материалы XI международной научно-технической конференции*, г. Севастополь, 25-29 апреля 2016 г.: в 2 т., Севастополь, 2016, т. 1, с. 73-77. [Gevorgiz R.G., Zheleznova S.N., Zozulya Yu.V., Uvarov I.P., Repkov A.P., Lelekov A.S. Industrial technology for the production of biomass of the marine diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin using a gas vortex photobioreactor. *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry. Materials of the XI International Scientific and Technical Conference, Sevastopol, April 25-29, 2016: in 2 volumes, Sevastopol, 2016, vol. 1, pp. 73-77. (In Russ.)]*

15. Геворгиз Р.Г., Железнова С.Н., Нехорошев М.В., Бобко Н.И., Зозуля Ю.В., Уваров И.П. Промышленная технология получения фукоксантина - морского противоопухолевого каротиноида. *Российский биотерапевтический журнал*, 2017, т. 16, № 51, с. 22. [Gevorgiz R.G., Zheleznova S.N., Nekhoroshev M.V., Bobko N.I., Zozulya Yu.V., Uvarov I.P. Industrial technology for producing fucoxanthin, a marine antitumor carotenoid. *Rossiyskiy bioterapevticheskiy zhurnal*, 2017, vol. 16, iss. 51, p. 22. (In Russ.)]

16. Зозуля Ю.В., Рожков О.А., Уваров И.П., Геворгиз Р.Г. *Кормовая комплексная биологически активная добавка для животных и птиц*. Пат. RU 2708161 C1, МПК A23K 10/16 (2019.08); A23K 10/30 (2019.08); A23K 20/28 (2019.08). № 2019111587, заявл. 16.04.2019, опубл. 05.12.2019, бюл. № 34. [Zozulya Yu.V., Rozhkov O.A., Uvarov I.P., Gevorgiz R.G. *Forage complex biologically active additive for animals and birds*. Pat. RU 2708161 C1, МПК A23K 10/16 (2019.08); A23K 10/30 (2019.08); A23K 20/28 (2019.08). No. 2019111587, app. 04/16/2019, publ. 05.12.2019, bul. no. 34. (In Russ.)]

VORTEX MIXING OF MICROALGAE CULTURES

Gevorgiz R.G.¹, Uvarov I.P.², Zheleznova S.N.¹

¹ Federal Research Center A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the RAS
Sevastopol, Russia; e-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

² Department of Veterinary Medicine of the city of Novosibirsk"
Novosibirsk, Russia

Abstract. Various methods of mixing cultures of lower phototrophs in photobioreactors for intensive cultivation are considered. The advantages and disadvantages of various methods of mixing the cell suspension are presented. The advantages of the vortex mixing method as the most promising method for mixing microalgae cultures are noted. A fundamental feature of modern gas vortex devices is the creation of swirling air flows over the cell suspension. The air vortex above the suspension, due to the friction of the air against the interface and the pressure difference between the periphery and the center of the gas-air vortex, draws the cell suspension itself into the vortex movement, due to which a rather mild effect on the cells occurs during stirring. It is this mixing of the suspension with a swirling flow that makes it possible to exclude highly turbulent and stagnant zones, hydraulic shocks and the effect of cavitation, as well as the formation of both shear stress and local overheating zones, which have a detrimental effect on the viability of cell cultures sensitive to mechanical stress. Thus, in vortex apparatuses, practically all the requirements for mixing cells for a wide class of microbiological objects are satisfied. Much less requirements are imposed on cultures of microalgae during mixing. Therefore, for intensive cultivation of microalgae, it is sufficient to use a vortex only in the suspension itself, which greatly simplifies the design of the vortex apparatus. One of the simplest ways to create a vortex inside a suspension is to rotate a flat ring (diaphragm) submerged to a certain level by means of a mechanical drive or tangential introduction of an air flow into the photobioreactor. The production of such a ring is possible from any transparent material, for example, from sheet polycarbonate, which allows making a ring of any diameter, and the process of intensive cultivation of microalgae can be easily scaled to a predetermined level.

Key words: lower phototrophs, tornado, photobioreactor.