

УДК 57.08

*А. К. Брянкина, В. О. Миленина, А. А. Парамонова**

ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ СТАДИИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Микроводоросли представляют собой одноклеточные и многоклеточные фотосинтезирующие, прокариотические или эукариотические микроорганизмы, обитающие в пресных и соленых водах. Микроводоросли являются потенциально эффективным возобновляемым сырьем для получения целого спектра продукции: биотоплива, водорода, белков, липидов и других ценных веществ. Перспективным является направление биотехнологии, основанное на получении биологически активных добавок (БАД) из пигментов микроводорослей. Каротиноидные пигменты являются одним из самых популярных натуральных продуктов, получаемых при культивировании микроводорослей. Виды микроводорослей *Haematococcus pluvialis*, *Chlorella* spp., *Scenedesmus* spp., *Spirulina platensis* наиболее известны биосинтезом β -каротина, лютеина, астаксантина и фикоцианина [1].

Основным биохимическим процессом, в ходе которого происходит накопление пигментов, является фотосинтез. Поэтому получение необходимого количества биомассы с заданными свойствами будет зависеть от следующих факторов: концентрации растворенного углекислого газа, уровня рН, температуры, уровня освещенности и светового режима.

Культивирование биомассы реализуется в специализированном оборудовании – фотобиореакторе. При разработке промышленных систем культивирования необходимо учитывать такие факторы, как конструктивные особенности, а также физиологические и биохимические особенности микроводорослей и специфику биосинтеза целевого компонента.

Целью работы является анализ особенностей технико-аппаратурного оформления стадии культивирования микроводорослей для получения БАД.

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора, заведующего кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ» Д. С. Дворецкого.

В настоящее время оборудование, применяемое для культивирования микроводорослей, можно разделить на две группы: открытые и закрытые установки для биосинтеза.

БАДы являются продукцией с высокой добавленной стоимостью, входящей в основу профилактического питания человека. Следовательно, использование открытых систем, в которых возможна контаминация суспензии и отсутствует контроль технологических и биохимических параметров, не является целесообразным. Наиболее перспективным является применение закрытых систем – фотобиореакторов, позволяющих получить большие объемы биомассы с заданными свойствами.

Фотобиореакторы включают в себя системы освещения (естественного или искусственного), системы контроля температуры и pH, системы подачи CO₂ и системы удаления O₂. В процессе культивирования происходит накопление продуктов метаболизма клеток. Во избежание отравления культуры в некоторых фотобиореакторах предусмотрены системы отвода экзометаболитов – введение свежей питательной среды, отбор культуральной жидкости, применение мембран [1]. При культивировании биомассы в фотобиореакторах контакт с окружающей средой минимален, следовательно, отсутствует опасность заражения. Перемешивание осуществляется с помощью механических или воздушных насосов [1]. Самыми распространенными конструкциями являются цилиндрические (барботажные и эрлифтные), плоскпанельные, трубчатые фотобиореакторы и реакторы с мешалкой.

Фотобиореакторы с барботажом и эрлифтом работают по общему принципу – использование воздухораспределителя в нижней части аппарата для насыщения культуры углекислым газом и интенсификации массообмена. Однако есть и различия.

Барботажный фотобиореактор представляет собой колонну, движение потока жидкости в которой осуществляется только за счет движения пузырьков, выпускаемых воздухораспределителем. Вблизи осевой области фотобиореактора из-за ослабления освещения в толще суспензии вследствие высокой концентрации клеток образуется «темная зона». Благодаря барботированию обеспечиваются циклы высокой интенсивности света, приближения к стенке и более низкой освещенности внутри колонны. При этом происходит поглощение углекислого газа, являющегося источником углерода в фотоавтотрофных культурах, и удаление образующегося кислорода, тормозящего фотосинтез.

Преимущества: низкая себестоимость биомассы, простая конфигурация и хороший массообмен. Недостатки: образование «темных зон» [1, 4].

Фотобиореактор с эрлифтом является усовершенствованной версией барботажного: данный тип реактора имеет внутри две взаимосвязанные зоны. Одна из них представляет собой вертикальный канал, а другая – зону распада пузырьков, что позволяет интенсифицировать циркуляцию суспензии и повышать эффективность фотосинтеза. В биомассе, выращенной в эрлифтном реакторе, содержание астаксантина на 16% больше, чем в барботажном. Так же наблюдалась более высокая плотность клеток суспензии [1].

Плоскопанельные фотобиореакторы представляют собой прямоугольную емкость, расположенную как в помещении с использованием в качестве источника света искусственного освещения, так и на открытом воздухе. Фотобиореакторы, использующие в качестве системы освещения солнечный свет, обладают коммерческим потенциалом, так как энергия солнца содержит полный цветовой спектр, и с помощью специального УФ-фильтра можно обеспечить поглощение подходящей длины волны как для роста клеток микроводорослей, так и для биосинтеза пигментов [3]. Однако возможна потеря эффективности из-за отражения света от стенок фотобиореактора или проблемы фотонасыщения вследствие высокой интенсивности солнечной энергии. На основе исследований предложена новая V-образная конструкция фотобиореактора, одновременно рассеивающая солнечный свет и минимизирующая его потери [2].

Преимуществом плоскопанельных фотобиореакторов является простота структуры, эксплуатации и сбора биомассы, что приводит к экономии воды, энергии и уменьшению времени культивирования. К недостаткам можно отнести небольшую производительность по суспензии и обрастание внутренней поверхности клетками микроводорослей [1].

Для обеспечения миксотрофного и гетеротрофного культивирования микроводорослей широко используются фотобиореакторы с перемешивающим устройством и внешним источником света. Перемешивание суспензии в данной конструкции осуществляется за счет механической мешалки, приводимой в движение электродвигателем, в связи с этим реактор отличается хорошими тепло- и массообменом. Подача CO₂ осуществляется через воздухораспределитель. Фотобиореактор с перемешивающим устройством благодаря гидродинамическим свойствам позволяет получать высокую концентрацию клеток биомассы микроводорослей в культуральной жидкости, но при этом потребляет большое количество энергии [4]. Кроме того, высокие скорости сдвига вокруг крыльчаток мешалок повреждают клетки микроорганизмов, что может привести к потере ценных пигментов [2].

В таблице 1 представлены сведения о продуктивности по биомассе различных типов фотобиореакторов.

1. Продуктивность различных типов фотобиореакторов [3]

Тип	Продуктивность, г/(л·сут)
Фотобиореактор с барботажем	0,11...0,34
Фотобиореактор с эрлифтом	0,25...0,63
Плоскопанельный фотобиореактор	0,4...0,6
Закрытый фотобиореактор с мешалкой	0,021...0,090

Таким образом, на основе анализа вышеуказанных конструкций фотобиореакторов и данных таблицы, наиболее перспективным для получения пигментов-антиоксидантов в промышленном масштабе является фотобиореактор с эрлифтом, обеспечивающий более эффективный фотосинтез за счет интенсивной аэрации.

Список литературы

1. Borowiak, D. Bioenergy, Biofuels, Lipids and Pigments-Research Trends in the Use of Microalgae Grown in Photobioreactors / D. Borowiak, M. Krzywonos // *Energies*. – 15 (2022). – 48 p.
2. A novel V-shaped photobioreactor design for microalgae cultivation at low latitudes: Modelling biomass productivities of *Chlorella sorokiniana* on Bonaire / R. C. Chin-On, M. J. Barbosa, R. H. Wijffels, M. Janssen // *Chemical Engineering Journal*. – 449 (2022). – 11 p.
3. Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium / S. Chinnasamy et al. // *Bioresour. Technol.* – 101 (2010). – P. 6751 – 6760.
4. Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System / R. R. Narala et al // *Front. Energy Res.* – 4 (2016). – 10 p.