

Моделирование системы регулирования температуры в биореакторе для выращивания микроводоросли *Chlorella*

С.И. Ефремкин, Б.М. Грицун, А.В. Савчиц

Волжский политехнический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Аннотация: В данной работе рассмотрен биореактор для выращивания микроводоросли *Chlorella*. Приведены показатели качества процесса, а также описание конструкции данного биореактора. Произведен расчет передаточной функции системы поддержания температуры воды в основной емкости по методу Ротача.

Ключевые слова: автоматизация, биореактор, биотехнологии, *Chlorella*, система регулирования, расчет передаточной функции, метод Ротача.

Введение

В настоящее время ситуация с развитием внешней политики в стране является нестабильной [1,2], основной проблемой которой стало введение тех или иных санкций, что влияет на экономический потенциал. В России слабо распространено производство биореакторов с наличием автоматизированной системы управления. Как правило, это явление наблюдается за рубежом, где биотехнологии более развиты.

Биореактор это сложный объект управления, который предназначен для выращивания микроводорослей. Сферы использования данного биоматериала обширны и включают в себя следующие: медицина, сельское хозяйство, экология. В сельском хозяйстве распространено явление химизации животноводства. Под этим подразумеваются меры, направленные на повышение качества кормовых добавок и продуктивности животных. К примеру, это может быть производство гормональных и негормональных стимуляторов роста, стабилизаторов корма, антибиотиков и пр. Как правило, все эти препараты являются химической продукцией, а соответственно и их последующее влияние на организм человека до конца не исследовано. Использование микроводоросли *Chlorella* в качестве добавки в корм является

более благоприятным фактором. Данный биоматериал является растением с наличием большого количества белка, полного набора незаменимых аминокислот, углеводов, жиров, витаминов и биологических стимуляторов. В связи с этим можно сказать, что влияние на животное будет максимально насыщенным, а потенциальный вред от полученной продукции минимальным.

В связи с этим можно сказать, что тематика данной статьи является актуальной для нашего времени и страны.

Основные показатели качества

Chlorella – типичный фотоавтотроф, развивающийся только при естественном или искусственном освещении на жидкой минеральной питательной среде при постоянной подаче углекислого газа и отвода образующегося кислорода [3].

После изучения литературы о выращивании данной микроводоросли было установлено, что для этого процесса необходимо:

1) Питательная среда. В среде, насыщенной минералами и другими полезными веществами, *Chlorella* растет быстрее. Такой питательной средой могут служить среда Тамия, водная среда с добавлением комплексных минеральных удобрений *Kristalon* и другие.

2) Освещение. Основным источником энергии для фотосинтеза. Источником света могут служить лампы накаливания, люминесцентные лампы или диодные ленты.

3) Насыщение среды углекислым газом. Интенсивно *Chlorella* может развиваться только при достаточном для этого процесса количестве углекислого газа, растворенного в питательной среде. Источником для насыщения может служить воздух из окружающей среды или баллон с концентрированным газом. Продуктом жизнедеятельности является кислород.

4) Температура среды. Микроводоросль наиболее эффективно размножается при определенных температурах, в зависимости от вида. Для поддержания температуры можно использовать нагревательные элементы различных видов и методов нагрева.

В зависимости от температуры штаммы *Chlorella* делят на:

- термофильные (опт. t° 35 - 37 $^{\circ}$ C),
- мезофильные (опт. t° 25 - 27 $^{\circ}$ C),
- криофильные (опт. t° 10-15 $^{\circ}$ C) [4].

5) Перемешивание среды. При перемешивании микроводоросль не оседает на дне реактора, что не дает создаваться толстому слою осадка, соответственно, большая часть питательной среды будет использоваться микроводорослью, и свет будет доходить до большинства клеток.

6) Показатель рН среды. Величина рН в процессе культивирования должна поддерживаться в диапазоне 5,5-6,5. При повышении рН коррекция производится фосфорной и азотной кислотой, при понижении рН – раствором гидрата окиси калия [5].

Конструкция биореактора

Анализ научно-технической литературы и патентов [6,7,8,9] выявил основные недостатки существующих систем управления процессом выращивания водорослей:

1. Конструкция. Во-первых, чаще всего материал, из которого изготавливается устройство для культивирования, это стекло и конструкция представляет собой аквариум с открытым верхом. К минусам использования можно отнести: неравномерность насыщения микроводоросли углекислым газом, высокий уровень рассеивания тепловой и световой энергии, что повысит энергозатраты, также следует отметить, что данный материал является достаточно хрупким.

2. Степень автоматизации системы. Основным недостатком изученных систем управления процессом является слабый уровень использования средств автоматизации. Это влечет за собой определенные риски, затраты в обслуживании, сложность получения продукта требуемого качества.

На основе вышеизложенной информации было принято решение о создании своего биореактора с автоматизированной системой управления [10]. Структурная схема изображена на рис. 1.

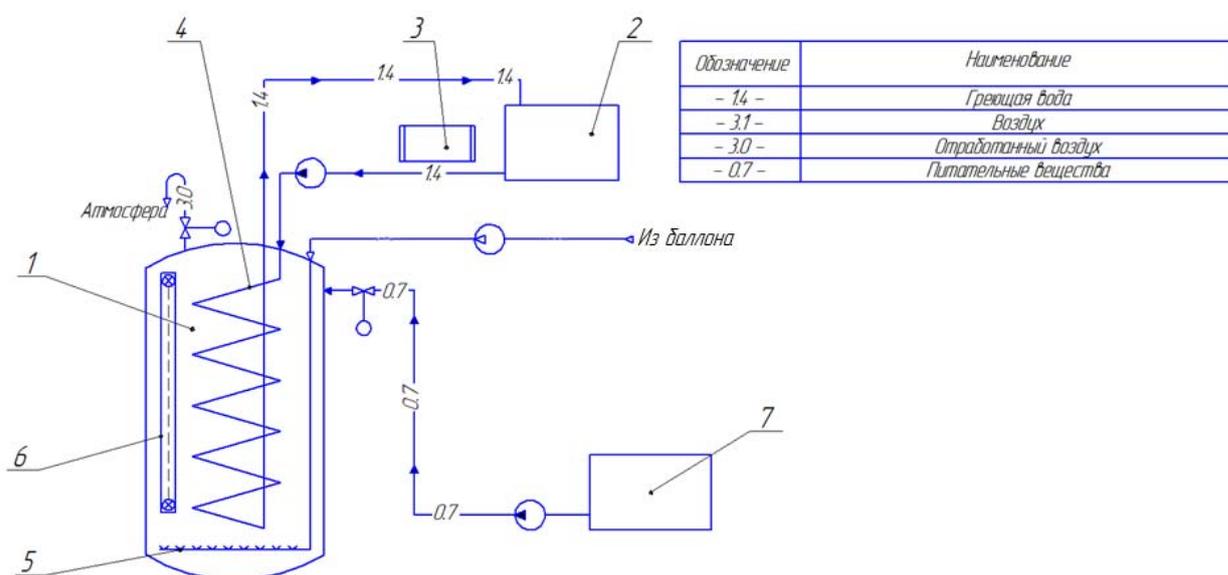


Рис.1– Структурная схема биореактора, где 1 – биореактор, 2 – емкость с греющей водой, 3 – нагреватель, 4 – змеевик, 5 – аэраторы, 6 – светодиодные лампы, 7 – емкость с питательными веществами.

Основным элементом является герметичная непрозрачная емкость 1, которая позволит существенно ограничить влияние внешней среды на среду выращивания микроводоросли.

Процесс начинается с залива в емкость 1 воды. Воду в емкости необходимо нагреть до оптимальной для роста микроводоросли температуры. Вода в емкости 1 нагревается при помощи змеевика 4, в котором течет греющая вода. Циркуляцию воды в змеевике обеспечивает

насос. Греющая вода циркулирует между змеевиком и емкостью 2. Греющая вода нагревается при помощи нагревательного элемента 3.

Таким образом, получив в емкости 1 необходимую температуру, вводится штамм микроводоросли, получая среду для выращивания. После этого система разогрева воды в емкости 1 используется для поддержания температуры среды для выращивания.

Для выращивания микроводоросли среду в емкости 1 обогащают посредством аэрации и ежедневной подачи питательных веществ. Воздух подается при помощи компрессора на аэратор 5, который равномерно распределяет газ по всему объему жидкости. Так как система закрытого типа, постоянная подача воздуха нагнетает внутри установки давление. Для сброса избыточного давления предусмотрен клапан. Питание производится посредством насоса из емкости с питательным веществом 7.

Так же для выращивания хлореллы имеет огромное значение освещение. Освещение осуществляется при помощи светодиодных лент 6. Процесс выращивания занимает несколько дней. По достижению необходимого размера колонии водорослей, биоматериал выкачивают из емкости, после чего процесс можно повторять неоднократно.

Моделирование системы поддержания температуры в биореакторе

Основным параметром, который влияет на жизнеспособность микроводоросли, является температура. Тогда, целью управления процессом является поддержание температуры среды для выращивания *Chlorella* на значении $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$. При заданной производительности, при минимальных энергетических затратах, при условии, что процесс будет безопасным, безаварийным и непрерывным.

Расчет передаточной функции объекта управления реализуется по методу Ротаца [11]. На рис. 2 представлен график переходного процесса с параметрами, необходимыми для получения функции.

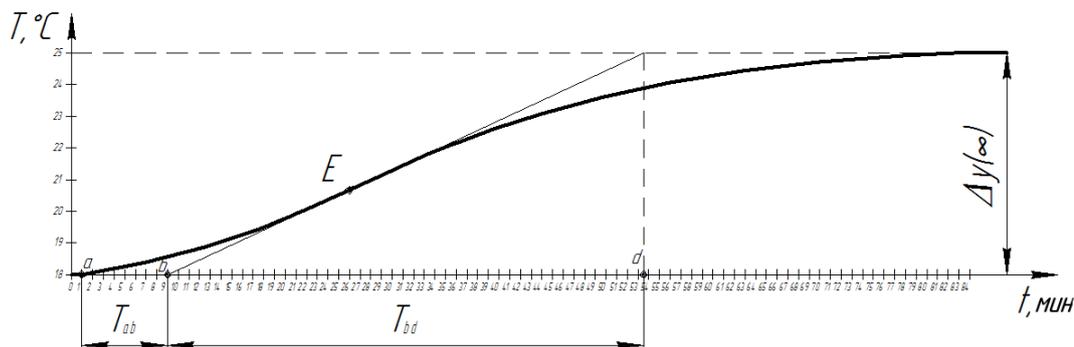


Рис.2– Определение передаточной функции по методу Ротача

На графике переходного процесса находится точка перегиба E, которая отмечает место перехода вогнутой части графика в выгнутую. К точке перегиба строится касательная и отсекает на оси абсцисс отрезки времени T_{ab} и T_{bd} : $T_{ab}=8$ минут; $T_{bd}=44,5$ минут. Также определяется значение коэффициента усиления k для данной системы $k=0,117$.

По отношению $T_{ab}/T_{bd}=0.179$ из таблицы 1 определяется порядок объекта управления n и значения вспомогательных коэффициентов k_1 и k_2 .

Таблица 1

Данные для определения порядка объекта и его передаточной функции

T_{ab}/T_{bd}	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

Исходя из данных таблицы получаем значения коэффициентов $n=2$, $k_1=2.718$, $k_2=0.282$. Передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^n} e^{-p\tau} \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления,

T – постоянная времени,

τ – время запаздывания.

Последовательно определяем недостающие значения коэффициентов.

$$T = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{44,5}{2,718} = 16,37 \text{ мин}$$

$$\tau = T_{ab} - T \cdot k_2 = 8 - 16,37 \cdot 0,282 = 3,38 \text{ мин}$$

Подставляем значения в формулу (1) и получаем передаточную функцию объекта управления.

$$W(p) = \frac{0,117}{268p^2 + 32,74p + 1} e^{-3,38p}$$

Заключение

В рамках данной работы была обоснована актуальность культивирования микроводоросли *Chlorella* и создания биореактора для ее выращивания, приведена структурная схема предлагаемого биореактора, произведен расчет передаточной функции для системы поддержания температуры в емкости биореактора. По итогам работы можно сделать вывод о необходимости моделирования системы управления биореактором для повышения качества получаемой продукции.

Литература

1. Маремуков А.А. Экономические аспекты продовольственного обеспечения в КБР // Инженерный вестник Дона, 2012, №4, (часть 2). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1418.
2. Ашхотов Э.Ю. Производственно-экономические и организационные проблемы инвестирования в региональные АПК // Инженерный вестник Дона, 2012, №1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/669
3. Хлорелла // Энциклопедия Info-FARM.RU: Фармацевтика, медицина, биология. URL: info-farm.ru/alphabet_index/kh/khlorella.html (дата обращения 18.12.18).
4. Культивирование хлореллы // Удобная усадьба. URL: cozyhomestead.ru/Rastenia_13051.html (дата обращения 18.12.18).



5. Аужанова Н.Б. Морфологическая и систематическая характеристика хлореллы. Ее производство и применение // Научный вестник – 2014. URL: elibrary.ru/download/elibrary_23413346_47865426.pdf (дата обращения 18.12.18).

6. Установка для культивирования микроводорослей // Патент РФ № 2477040. URL: findpatent.ru/patent/247/2477040.html (дата обращения 18.12.2018).

7. Установка для выращивания микроводорослей // Патент РФ № 125999. URL: poleznayamodel.ru/model/12/125999.html (дата обращения 18.12.2018).

8. Установка для выращивания хлореллы // Патент РФ № 2218392. URL: freepatent.ru/patents/2218392 (дата обращения 18.12.2018).

9. Method and Unit for Large-Scale Algal Biomass Production // Патент US № 20110258915A1. URL: patents.google.com/patent/US20110258915A1/en (date of access 18.12.2018).

10. Industrial Control Panel Design Guide: Schematics, Standards, Design Considerations & More. URL: mpofcinci.com/blog/industrial-control-panel-design-guide/ (date of access 18.12.2018).

11. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с., ил.

References

1. Maremukov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1418

2. Ashhotov Je.Ju., Bevov R.K., Ashhotov V. Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/669

3. Chlorella: encyclopedia Info-FARM.RU. Pharmacy, medicine, biology (in Russian), 2016. URL: info-farm.ru/alphabet_index/kh/khlorella.html



4. Kul'tivirovanie hlorelly [Cultivation of Chlorella]. Udobnaya usad'ba, 2018. URL: cozyhomestead.ru/Rastenia_13051.html
5. Auzhanova N.B. Nauchnyj vestnik, 2014. URL: elibrary.ru/download/elibrary_23413346_47865426.pdf
6. Ivanov G.Ju., Mirzojan A.V. Ustanovka dlja kul'tivirovanija mikrovodoroslej [Plant for cultivation of microalgae]. Patent Russia, no. 2477040.
7. Usachev D.S., Luk'janov V.A. Ustanovka dlja vyrashhivaniija mikrovodoroslej [Installation for cultivation of microalgae]. Patent Russia, no. 125999
8. Bogdanov N.I., Kunicyn M.V. Ustanovka dlja vyrashhivaniija hlorelly [Chlorella growing plant]. Patent Russia, no. 2218392
9. Method and Unit for Large-Scale Algal Biomass Production. Patent US, no. 20110258915A1.
10. Industrial Control Panel Design Guide: Schematics, Standards, Design Considerations & More. URL: mpofcinci.com/blog/industrial-control-panel-design-guide/ (date of access 18.12.2018).
11. Rotach V.Ja. Teorija avtomaticheskogo upravlenija [Automatic control theory]. Moscow, MPEI, 2008. 396p. (in Russian)