

# Применение мерцающего света при культивировании *Chlorella sp.* как способ СНИЖЕНИЯ энергозатрат ПРИ ОЧИСТКЕ СТОКОВ И ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

**Исследована возможность культивирования микроводорослей с применением мерцающего освещения, осуществляемого с помощью светодиодов с генератором импульсов. Показано, что использование мерцающего света может снизить затраты электроэнергии на получение готового продукта в несколько раз, что позволит реально утилизировать парниковые газы – выбросы тепловых электростанций и другие организованные выбросы CO<sub>2</sub>, а также практиковать биологическую реабилитацию стоков путём их альголизации.**

## Введение

**Ф**ототрофные микроводоросли в процессе фотосинтеза ассимилируют углекислый газ под действием света. Микроводоросли обладают высокой продуктивностью, имеют относительно простую схему культивирования и поэтому всё большее количество отраслей промышленности используют биомассу микроводорослей и их метаболиты в качестве сырья (в пищевой промышленности, в сельском хозяйстве, в химической промышленности, в биоэнергетике и в сфере защиты окружающей среды). Одной из наиболее распространённых является зелёная микроводоросль *Chlorella sp.* [1, 6, 11]. Весьма существенны аспекты промышленного культивирования *Chlorella sp.* с целью создания на этой основе новой технологии получения препаратов для тонкой химии, медицины, парфюмерии, сельского хозяйства, а также ферментов и других биологически активных веществ. Эту водоросль можно применять также для регенерации воздуха в замкнутых биологических системах жизнеобеспечения, для очистки сточных вод и для создания циклических систем замкнутого водопользования [4].

**Н.В. Мальцевская\***,  
аспирант  
Московского  
государственного  
университета  
инженерной экологии  
Московского  
государственного  
университета  
инженерной экологии  
(МГУИЭ)

**В.В. Бирюков**,  
доктор технических  
наук, профессор,  
зав. кафедрой  
Экологической  
и промышленной  
биотехнологии  
Московского  
государственного  
университета  
инженерной экологии  
(МГУИЭ)



В настоящее время очистка сточных вод основывается на деятельности бактерий. Углекислый газ – продукт жизнедеятельности бактерий – выделяется в воздух, т.е. ныне существующие очистные сооружения являются потребителями кислорода и загрязнителями воздуха углекислым газом. В середине XX века были проведены разработки по очистке сточных вод культивированием в них различных видов водорослей. Культивирование водорослей способствовало очистке сточных вод от патогенной микрофлоры [3]. Выявлено также бактериостатическое действие *Chlorella sp.* на микрофлору сточной воды животноводческого комплекса. Рост водорослей сопровождается также снижением в воде аммиачного азота и минерального фосфора. Таким образом, в водоёмы должна сбрасываться не просто очищенная вода, а вода, прошедшая биологическую реабилитацию. Одним из возможных методов

\* Адрес для корреспонденции: maltsevskaya@yandex.ru

биологической реабилитации (повышение эффективности восстановления загрязнённой воды) является альголизация штаммами *Chlorella sp.* [4].

Однако масштабное культивирование *Chlorella sp.* лимитировано энергией, затрачиваемой на производство единицы готовой продукции [11]. Данная проблема актуальна, главным образом, для искусственных систем. Эта энергия расходуется на перемешивание, аэрацию и освещение. Наибольшие затраты приходится на освещение.

Свет, излучаемый осветителем, должен использоваться наиболее эффективно [9]. Эффективность можно повысить, снижая потери электроэнергии на нагрев окружающей среды, на «паразитную» засветку (когда излучение от источника не полностью направлено на потребителя). В настоящей статье рассмотрен ещё один возможный вариант снижения энергозатрат. При этом надо иметь в виду, что опыты, описанные в статье, носят лишь предварительный характер. В перспективе требуется проведение более масштабных исследований.

**Теоретические предпосылки.** Известно, что процесс фотосинтеза проходит в две фазы – световую и темновую. По литературным источникам, длительность этих фаз составляет порядка 0,00001 с и 0,01 с, соответственно [5, 10]. Предполагается, что в процессе темновой фазы свет не требуется, поэтому постоянное освещение может быть излишним. Ранее это было показано с использованием обтюраторов для создания прерывистого освещения [7]. Такое освещение, предположительно, позволит синхронизировать чередование световой и темновой фаз всей культуры. Отсюда вытекает очевидный практический вывод – использовать мерцающее освещение с интервалами, соответствующими длительности световой и темновой фазы фотосинтеза. Теоретически при этом можно было бы получить 1000-кратную экономию энергии.



**Ключевые слова:**

микроводоросли,  
мерцающий свет,  
снижение  
энергозатрат,  
светодиодные  
источники света

Воплощение этой идеи наталкивается на технические условия реализации микроимпульсного освещения (с указанной выше длительностью импульсов), недостижимой для большинства традиционных источников света. Техническая реализация подобных систем в предыдущие десятилетия была затруднительна.

Возможно, конечно, использовать для электрического питания осветительных приборов генератор импульсов. Однако ввиду своих технических характеристик, стандартные осветительные устройства обладают некоторой инерционностью зажигания. Это не даёт возможность транслировать чередование с указанной выше частотой электрических импульсов в импульсы света. В связи с этим эта очевидная идея не получила практического воплощения.

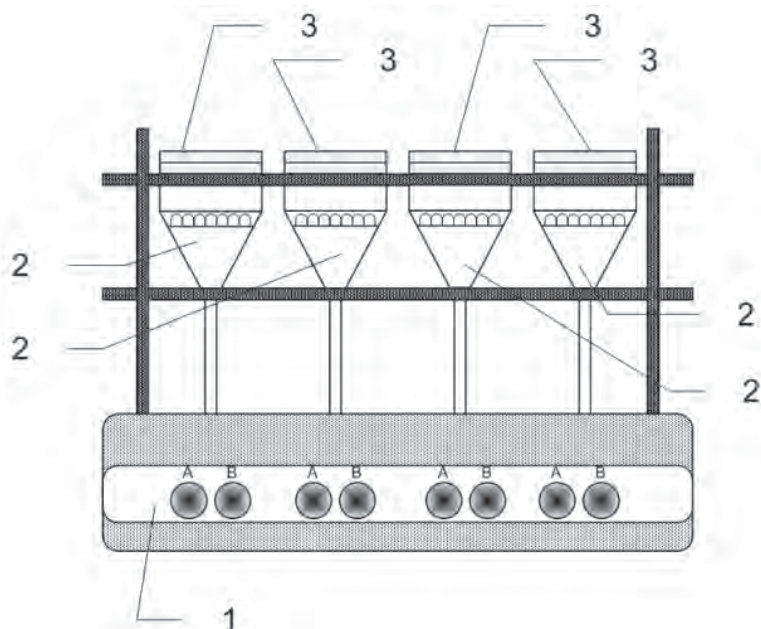
В настоящее время всё более широкое распространение получают светодиодные источники света, которые кроме высокого КПД и отсутствия «паразитной засветки» имеют практически нулевую инерционность и могут реализовать импульсное освещение с нужными параметрами [8].

## Материалы и методы исследования

**Н**ами предпринята попытка практически проверить целесообразные режимы освещения в процессах культивирования *Chlorella sp.* с чередованием постоянного («дневного») и импульсного («ночного») освещения. Длительность «ночного периода» варьировали на трёх уровнях – 12, 14, 16 часов. Длительность «ночного периода» выбрана в соответствии с максимальной длительностью тёмного времени суток в зависимости от времени года. Например, для Московского региона (около 54 °с.ш.) в зимние месяцы, когда продолжительность светового дня минимальна, «ночной период» составляет в среднем 15,7 часа в сутки.

Для мерцающего освещения использовали светодиодные источники света, обеспечивающие малую инерционность зажигания и затухания светового импульса в сочетании со специально сконструированным генератором импульсов. При этом длительность импульса света составляла 0,001 с, а длительность интервала между импульсами – 0,01 с.

Объектом для исследований была выбрана культура *Chlorella sp.* Относительно простая организация, большая скорость размножения, возможность культивирования в полностью контролируемых условиях, высокая пластичность метаболизма давно сделали



**Рис. 1.** Экспериментальная установка. 1 – генератор импульсов с возможностью регулирования частоты (А) и длительности импульса (В); 2 – светодиодная лампа с рефлектором; 3 – чашка Петри с питательной средой и биомассой микроводорослей.

хлореллу классическим объектом для изучения процесса фотосинтеза [4]. Культивирование проводили в чашках Петри на агаризированной среде Тамия [6] в течение 10 суток на специальной установке при температуре +25 °С. Прирост биомассы микроводорослей определяли фотоколориметрированием суспензии, полученной после смыва биомассы с поверхностного слоя питательной среды в чашках Петри.

Экспериментальная установка (рис.1) представляет собой вертикальную стойку с полками, расположенными на двух уровнях, друг под другом.

На верхней полке располагают в специальных сквозных нишах-отверстиях чашки Петри. Подсветка осуществляется снизу. На нижней полке установлены светодиодные лампы с рефлектором. Каждая лампа содержит 12 светоизлучающих диодов белого цвета, тип RL – 3W744, имеющих следующие характеристики: световой поток до 5 лм, потребляемая мощность 0,05 Вт. Светодиодные лампы соединены с источником питания в виде генератора импульсов с регулируемой частотой и длительностью светового импульса.

В работе были применены светодиоды белого цвета, излучающие белый свет благодаря свечению люминофора. В связи с этим возник вопрос, насколько повлияет эффект «послесвечения» люминофора на форму светового импульса. Проверку формы светового импульса (инерционности люминофора) проводили с помощью осциллографа, соеди-

ненного с фотоэлементами, расположенными непосредственно над светодиодными импульсными источниками света. В качестве осциллографа применили специальное устройство ЛА-50USB, соединенное с ПК.

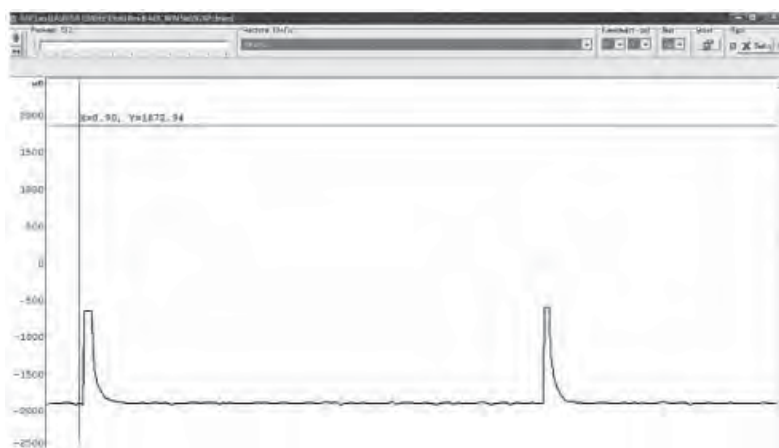
ЛА-50USB – аналогово-цифровой преобразователь, предназначенный для работы в качестве внешнего устройства совместно с ПК для преобразований непрерывных (аналоговых) входных сигналов в цифровую форму, которая удобна для дальнейшей обработки при помощи ПК. ПК при помощи специальной программы (ADCLab.exe) осуществляет обработку поступающего от устройства данных аналогово-цифрового преобразователя и выводит полученные и обработанные данные на монитор. Изображение с монитора компьютера приведено на рис. 2.

На рис. 2 отчетливо виден прямоугольный импульс, с мгновенным нарастанием и немного более медленным экспоненциальным спадом. Замедленный спад свидетельствует о наличии эффекта «послесвечения» люминофора. Однако этот эффект не оказывает существенного влияния на соотношение длительности темновой и световой фазы. Стоит отметить и тот факт, что во время «послесвечения» люминофора затрат электроэнергии не происходит, а, следовательно, энергоёмкость продукта не увеличивается.

## Результаты и их обсуждение

**В** процессе эксперимента проверены две гипотезы влияния мерцающего освещения на процесс культивирования *Chlorella sp.*

1. Рост биомассы происходит только в те периоды, когда объект освещён («дневное»



**Рис. 2.** Развертка во времени пиков освещенности при прерывистом освещении. Скриншот экрана компьютера в режиме работы осциллографа.

**Таблица 1**

Варианты освещения и сравнение полученных экспериментальных данных с ожидаемыми по различным гипотезам

1	2	3	4	5	6
Вариант освещения	Длительность постоянного освещения, ч	Длительность прерывистого освещения, ч	Ожидаемый прирост по гипотезе 1	Ожидаемый прирост по гипотезе 2	Относительный прирост к контролю в эксперименте
1.	24	0	1,0	1,0	1,0
2.	12	12	0,55	1,0	0,859
3.	10	14	0,475	1,0	0,802
4.	8	16	0,4	1,0	0,494

время при постоянном, «ночное» – в периоды всплеск светового импульса), а в периоды темновой фазы роста биомассы нет.

2. Накопление биомассы растёт не только в периоды освещения, описанные в п. 1, но также в течение некоторого времени темновой фазы.

В табл. 1 перечислены различные режимы освещения (варианты 1-4), различающиеся между собой длительностью циклов постоянного и прерывистого освещения.

В столбцах 4 и 5 представлены расчётные значения относительного по отношению к контролю прироста биомассы  $\Delta X/\Delta X_{max}$  соответственно для гипотез 1 и 2. Расчёт для гипотезы 1 проводили по формуле

$$\frac{\Delta X}{\Delta X_{max}} = \Delta X_{max} \cdot \frac{(24-T)}{24} + \frac{t_c}{t_T + t_c} \cdot \frac{T}{24}$$

где  $t_c$  и  $t_T$  – длительность светового импульса и темнового интервала, соответственно, с;  $T$  – длительность времени прерывистого освещения, ч/сут.

Та же величина для гипотезы 2 везде равна 1,0, поскольку предполагается, что за период темновой фазы 0,01 с в промежутке между световыми импульсами освещение не требуется, а рост биомассы продолжается как при постоянном освещении.

Такого результата, однако, не было получено ни в одном из вариантов освещения (экспериментальные данные по отношению к контролю представлены в столбце 6 табл. 1), кроме варианта 1 (контроль).

Но полученные цифры всё же значительно выше пессимистической гипотезы 1. Полученные результаты можно объяснить тем, что длительность темновой фазы, по-видимому, была завышена, и на какой-то период времени рост биомассы прекращался.

Если предположить, что существует некото-

рый оптимальный период темновой фазы  $t_0$ , который можно допускать без ущерба для роста микроорганизмов, то длительность темновой фазы меньше  $t_0$ , по определению должна давать величину относительного прироста биомассы  $\Delta X/\Delta X_{max}$  равной 1. Увеличение же длительности темновой фазы увеличивает непродуктивный период цикла, при этом

$$\Delta X/\Delta X_{max} \sim t_0/t_T$$

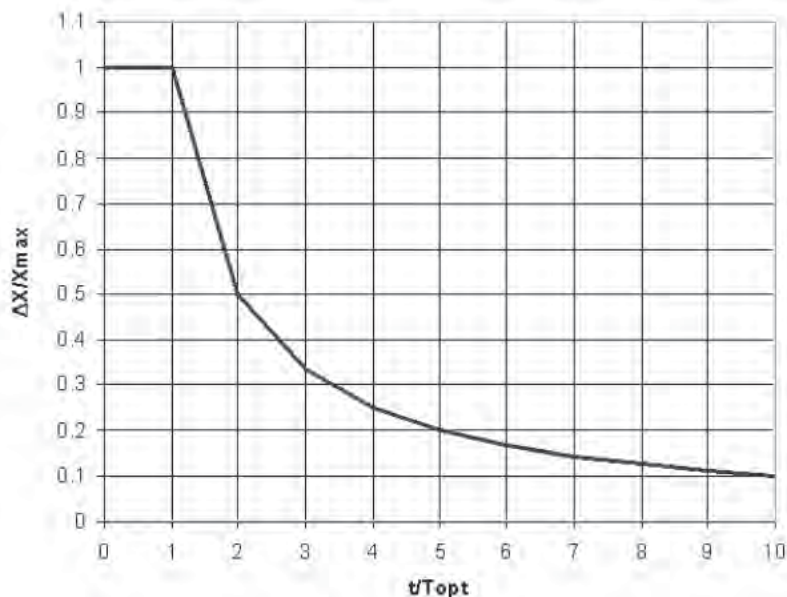
Графически это представлено на рис. 3

Из графика следует, что снижение эффективности по сравнению с контролем может быть вызвано тем, что выбранная длительность темновой фазы была велика и её следовало бы снизить.

Очевидно, что эта величина ( $t_0$ ) не является постоянной для всех фототрофных организмов и её следует уточнять в эксперименте, учитывая также условия проведения процесса.

Следует отметить, что представленные в табл. 1 варианты освещения № 2 и № 3 при условии использования в дневное время естественного света (для Московского региона с марта по ноябрь характерна длительность дня не ниже 10 часов в сутки) уже позволят снизить энергозатраты на получение биомассы.

Таким образом, поскольку предполагается, что происходящие в клетках основные биохимические реакции идентичны в аппаратах разного масштаба, можно ожидать, что затраты на электроэнергию при культивировании микроводорослей в темное время суток



**Рис. 3.** Зависимость относительного прироста биомассы от длительности темновой фазы при прерывистом освещении.

в условиях мерцающего освещения могут быть снижены в 8 раз; скорость потребления углекислоты при этом не меняется.

## Заключение

**П**роведенные эксперименты подтверждают, что использование мерцающего света позволяет существенно снизить затраты на культивирование микроводорослей. Создание промышленной установки такого типа в сочетании с крупномасштабным фотобиореактором является перспективным направлением совершенствования систем очистки стоков и выбросов.

## Литература

1. Биотехнология. Принципы и применение: Пер. с англ./ под ред. И. Хиггинса, Д. Беста и Дж. Джонса. М.: Мир, 1988. 480 с.
2. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация водоёмов // 3 изд., доп. и перераб. Пенза: РИО ПГСХА, 2008., 126 с.
3. Левина Р.И. Антибактериальные свойства протококковых водорослей в отношении кишечной микрофлоры // Всесоюзное сове-

щание по культивированию одноклеточных водорослей: тез. докл. Л., 1961. С. 22-23.

4. Мельников С.С., Мананкина Е.Е. Хлорелла: Физиологически активные вещества и их использование. Мн.: Навука і тэхніка, 1991. 79 с.
5. Рейвин П., Эверт Р., Айхорн С. Современная ботаника: В 2-х т. Т.1: Пер. с англ. – 1990. – 348 с.
6. Сальникова М.Я. Хлорелла – новый вид корма. М., «Колос», 1977. 96 с.
7. Светоимпульсная стимуляция растений, под ред. Шахова А.А. –М.: Наука, 1971 – 368 с.
8. Справочная книга по светотехнике/ Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.
9. Энергосбережение в освещении. Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Издательство «Знак», 1999, 264 с.
10. Якушкина Н.И. Физиология растений: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 032400 «Биология» / Н.И. Якушкина, Е.Ю. Бахтенко. // М.: ВЛАДОС, 2005. – 463 с.: ил.
11. Graham, Linda E. Algae/ Linda E. Graham, Lee Warren Wilcox, CIP 2000



N.V. Maltsevskaya, V.V. Biryukov

## FLICKERING LIGHT FOR MICROALGAE CULTIVATION AS THE POSSIBLE WAY OF LOWERING ELECTRIC POWER CONSUMPTION AT CLEARING SEWAGE WATERS AND GAS EFFLUENTS

**T**he possibility of cultivation of microalgae using the flickering light realized by light emission diodes with electric pulse generator was investigated. It has been shown that the use of flickering light results

in some times lowering the electric power consumption that will really allow to utilize greenhouse gases – emissions of thermal power stations and other organized emissions of CO<sub>2</sub>, and also to practice biological

rehabilitation of drains by their algolization.

**Key words:** microalgae, flickering light, cost reduction of the electric power, LEDs