

И.А. Золотухин

(Пермский государственный педагогический университет;
e-mail: iazolot@yandex.ru)

ОСОБЕННОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ФОТОАВТОТРОФНЫХ БИОФИЛЬТРОВ

В лабораторных условиях исследован способ фотоавтотрофной биофльтрации загрязнённой воды с использованием светодиодов в качестве источников света для развивающихся водорослей. Способ может быть применён при разработке экологически чистых технологий защиты природных водоёмов от техногенных загрязнений.

Ключевые слова: очистка воды, автотрофные биофильтры, шахтные и карьерные воды, микроводоросли, светодиоды.

I.A. Zolotukhin

FEATURES OF LED LIGHTING FOR PHOTOAUTOTROPHIC BIOFILTERS

In the laboratory studied the way photoautotrophic biofiltration of contaminated water with the use of LEDs as light sources for developing algae. The method can be applied when developing environmental strategically clean technologies of protection of natural water bodies from technogenic pollution.

Key words: water treatment, autotrophic biofilter, mining and career water, microalgae, the LEDs.

Актуальность разработки фотоавтотрофных биофильтров определяется их экологической чистотой и тем, что они могут быть использованы при очистке сточных вод горнорудных предприятий (шахты, разрезы, карьеры), для которых не пригодны другие биологические методы. Одной из сложных технических проблем, возникающих при создании фотоавтотрофных биофильтров, является обеспечение светом водорослей, за счёт которых и осуществляется очистка воды [1]. Предварительными лабораторными экспериментами [2] показано, что одним из возможных путей решения этой проблемы является применение светодиодов.

Целью проведённого автором исследования было выявление особенностей, определяющих возможность использования светодиодов в биофильтрах. Поставленная цель достигалась путём решения следующих задач.

1. Определить возможность замены стекла на более технологичные синтетические материалы при разработке осветительного устройства и других конструктивных элементов.
2. Сравнить работу светодиодов с разными спектрами излучения.
3. Определить оптимальные режимы использования светодиодов.

Методика

В экспериментах использовали лабораторную установку из 9 прозрачных полиэтиленовых сосудов объемом по 1 дм³ (рис. 1). Каждый сосуд был оборудован осветителем со светодиодом и регулятором электрического тока в виде переменного сопротивления на панели управления. Водоизолирующим чехлом светодиода служила прозрачная трубка из поливинилхлорида (рис. 2).

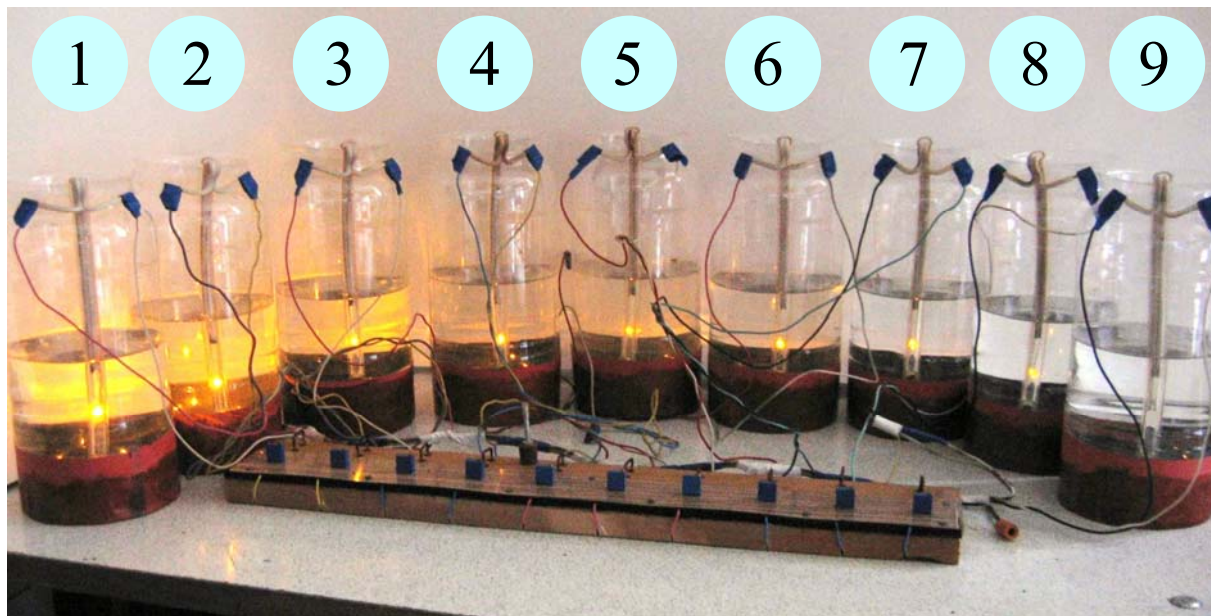


Рис. 1. Экспериментальная установка

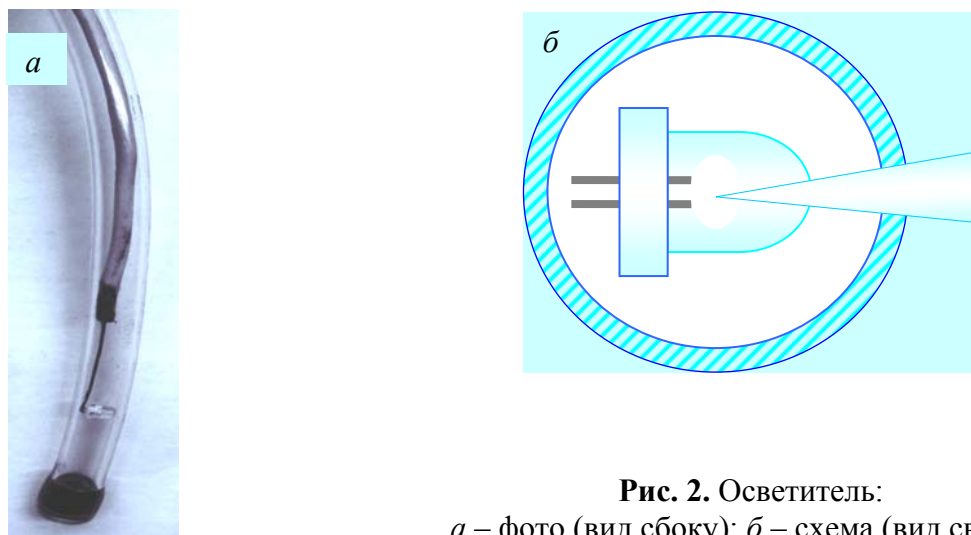


Рис. 2. Осветитель:
а – фото (вид сбоку); б – схема (вид сверху)

Для каждого сосуда (светодиода) была установлена отличная от других сила тока. Сосуды были снабжены аэраторами, конструкция которых, помимо аэрации, позволяла осуществлять непрерывную циркуляцию обрабатываемой воды (рис. 3). Скорость подачи воздуха составляла 50 ± 10 см³/мин. В исследованиях сравнивали работу двух типов аэраторов, которые отличались материалом корпуса (резиновый и стеклянный).

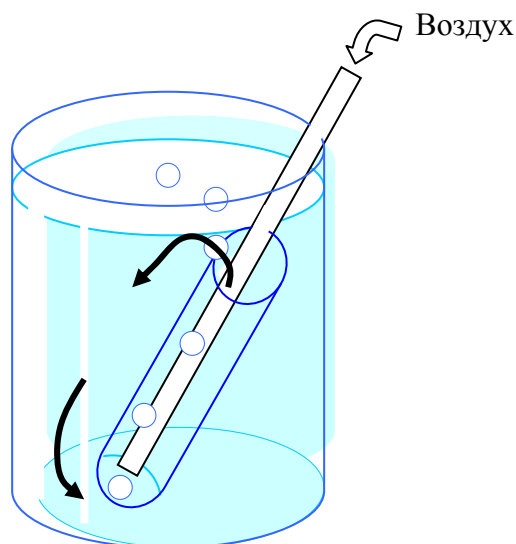


Рис. 3. Аэратор

В качестве имитата загрязнённой воды и среды для выращивания водорослей готовили тонкодисперсную суспензию глины в водопроводной воде с концентрацией взвешенных частиц $100 \pm 5 \text{ мг/дм}^3$.

Суспензию заменяли еженедельно. При этом старую суспензию сливали полностью, осторожно взмучивая придонный осадок, но стараясь избежать смыва образовавшегося на осветителе слоя биообрастания. После чего наливали свежую порцию в объёме $0,5 \text{ дм}^3$ и в течение 1 часа каждые 15 мин из каждого сосуда отбирали пробу объёмом 5 см^3 для определения концентрации взвеси с применением фотоэлектрического колориметра КФК-2. По результатам измерений определяли часовую эффективность осветления суспензии, которую использовали в качестве косвенного показателя интенсивности развития слоя биообрастания.

После истечения 1 часа все сосуды, кроме контрольного, закрывали светонепроницаемыми чехлами до следующей замены суспензии.

Контрольным вариантом являлся стеклянный цилиндр вместимостью 250 см^3 , в который также заливали исходную суспензию и отслеживали изменение её концентрации на глубине 12 см при отстаивании в покое, без аэрации и циркуляции. Затем также определялась эффективность осветления за 1 час.

В экспериментальных сосудах системы освещения и аэрации работали непрерывно в течение всего эксперимента, длящегося от 95 до 193 суток. Еженедельно регистрировали параметры работы осветителей и аэраторов (ток, напряжение, освещённость на поверхности осветителя, расход воздуха, температура воды). Освещённость измеряли комбинированным люксметром-радиометром марки "ТКА-ПКМ", позволяющим измерять интенсивность излучения как в видимом, так и в ультрафиолетовом (300-400 нм) диапазоне. Для определения интенсивности света использовали предварительно полученную зависимость этого параметра от силы электрического тока светодиода.

Было проведено три серии экспериментов. В первой серии продолжительностью 112 суток использовали светодиоды жёлтого свечения марки ARL-3214UYC-1,5, диаметром 3 мм, светимостью 1,5 кандел, с углом рассеивания 15°. Во второй и третьей сериях (193 и 95 суток) применяли светодиоды белого (холодного) свечения марки ARL2-3214UWC-10, диаметром 3 мм, светимостью 10 кандел, с углом рассеивания 20°. В первой и второй сериях корпуса осветителей были изготовлены в виде поливинилхлоридных трубок (рис. 3), в третьей серии корпуса были заменены на стеклянные пробирки.

Результаты

В первой серии со светодиодами жёлтого света (табл. 1) в течение первых 2-х месяцев не происходило никаких изменений во всех экспериментальных сосудах. Вне зависимости от интенсивности освещения эффективность часового освещения суспензий находилась в пределах 25-30 %, в то время как в предыдущих исследованиях [2] эффективность за такой же период увеличилась с 25-30 % до 50-55 %.

Таблица 1

Параметры работы осветителей (светодиод жёлтый ARL-3214UYC-1,5)

№ сосуда	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток, мА ($n = 17$)	22,5 ± 0,7	12,3 ± 1,6	6,52 ± 0,14	4,37 ± 0,14	3,26 ± 0,11	2,37 ± 0,10	1,20 ± 0,07	0,63 ± 0,07	0
Напряжение, В	2,15	2,12	1,88	1,82	1,79	1,73	1,65	1,55	0
Мощность, мВт	48,4	25,9	12,3	7,95	5,84	4,10	1,98	0,98	0
Интенсивность света, Лк	3300	1900	1100	700	500	220	100	55	0

Возможной причиной отсутствия положительных эффектов могла быть замена стеклянных корпусов аэраторов на резиновые. Ещё одной причиной могло быть то, что в данной серии в суспензию не был внесён посевной микроводорослевый материал. Предполагалось, что диаспоры водорослей могут попасть в суспензию в достаточном количестве вместе с глиной, взятой из окружающей среды.

На 63 сутки была произведена замена резиновых аэраторов на стеклянные, которая не дала положительных результатов. В связи с этим можно предположить, что резина не является причиной отрицательного результата.

Во второй серии со светодиодами белого света (табл. 2) использовали резиновые аэраторы, а также на 60-е и 100-е сутки в экспериментальную суспензию был внесён посевной материал в виде микроводорослей, отобранных с поверхности влажной почвы.

Таблица 2

Параметры работы осветителей (светодиод белый ARL2-3214UWC-10)

№ сосуда	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток, мА ($n = 18$)	16,5 ± 0,87	11,2 ± 0,89	5,65 ± 0,85	4,08 ± 0,31	2,65 ± 0,30	1,77 ± 0,10	0,72 ± 0,03	0,31 ± 0,01	0
Напряжение, В	3,09	2,99	2,86	2,80	2,73	2,69	2,64	2,57	0
Мощность, мВт	50,99	33,49	16,16	11,42	7,23	4,76	1,90	0,80	0
Интенсивность света, Лк	17800	12100	6000	4500	2900	1800	900	500	0

Эксперименты, как и в предыдущей серии, не дали положительных результатов по осветлению суспензии, но были получены очень важные сведения по влиянию света на материал осветителей.

Результаты, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что в спектре излучения применённых светодиодов содержится фотохимически активный компонент, который вызывает почернение и потерю прозрачности материала осветителя. Из этого следует, что применённый поливинилхлорид не пригоден для изготовления осветителей.

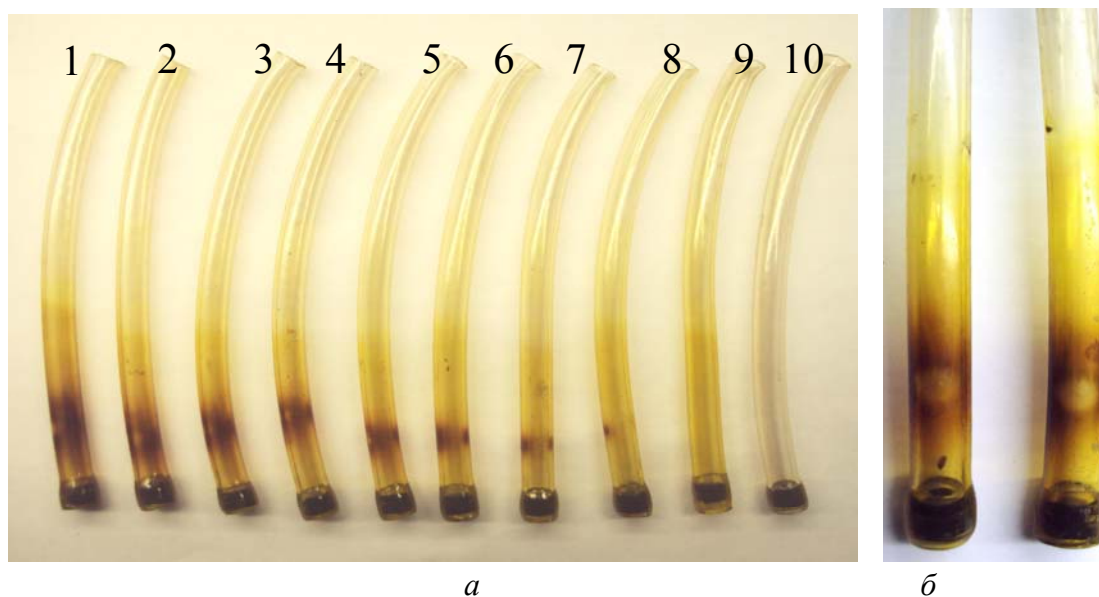


Рис. 4. Корпуса осветителей после экспериментов с белыми светодиодами
a – вид сбоку, *б* – вид со стороны выхода луча
 (№ 10 в экспериментах не участвовал)

В третьей серии экспериментов (табл. 3) взамен поливинилхлоридных корпусов были использованы стеклянные пробирки. Все остальные параметры соответствовали условиям второй серии.

Таблица 3

Параметры работы осветителей (светодиод белый ARL2-3214UWC-10)

№ сосуда	1*	2	3	4*	5	6	7	8*	9*
Ток, мА ($n = 13$)	17,03 $\pm 0,52$	10,37 $\pm 0,70$	6,16 $\pm 0,46$	3,96 $\pm 0,14$	2,73 $\pm 0,14$	1,16 $\pm 0,08$	0,50 $\pm 0,006$	0,25 $\pm 0,005$	0
Напряжение, В	3,10	2,97	2,86	2,79	2,74	2,69	2,64	2,57	0
Мощность, мВт	53,63	30,80	17,62	11,05	7,48	3,12	1,32	0,64	0
Интенсивность света, Лк	18200	11190	6600	4270	3000	1310	580	330	0

* – варианты, представленные в виде графиков (рис. 5)

Особенностью этой серии было появление примерно через 50 суток зелёного налёта на осветителях в вариантах с высокой освещённостью (на рис. 5 показано стрелкой). Появившееся биообрастание постепенно увеличивалось и распространялось на варианты с более слабой освещённостью.

В целом можно отметить некоторое постепенное увеличение эффективности освещения суспензии от 40-43 % вначале до 47-49 % к концу экспериментов (рис. 5). Причём принципиальные различия в поведении графиков, соответствующих вариантам с разной освещённостью, не наблюдались, а характер хода графиков экспериментальных вариантов был аналогичен графику контрольного варианта. Эти факты и то, что увеличение эффекта явно не превышало величины случайных отклонений, следует рассматривать как свидетельство отсутствия существенного влияния интенсивности света и появившихся водорослей на процесс освещения суспензии.

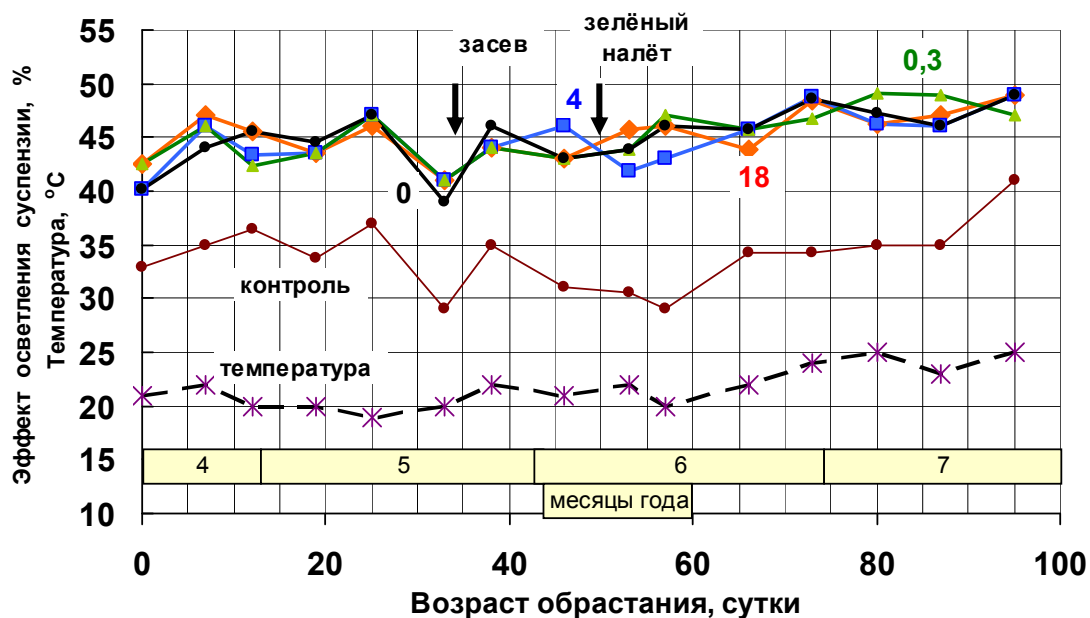
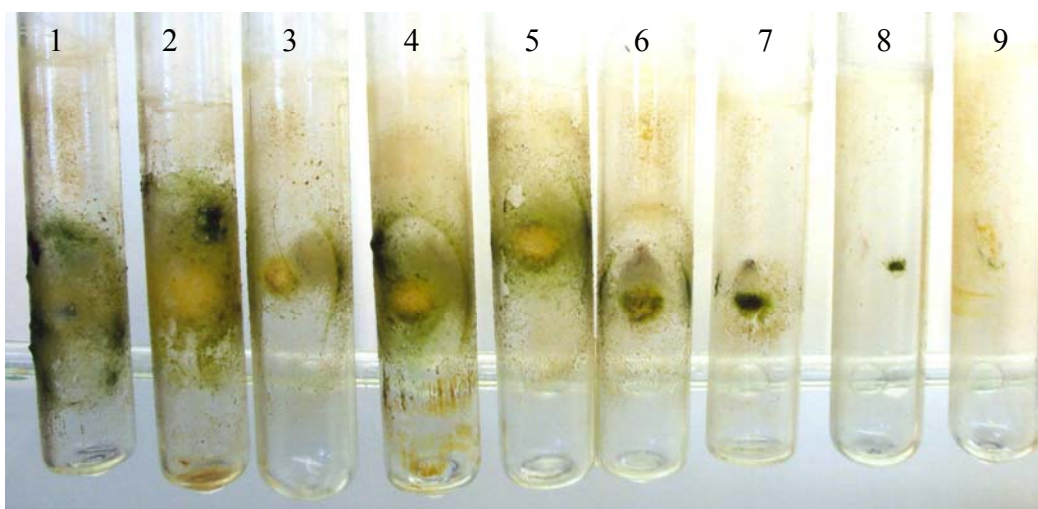
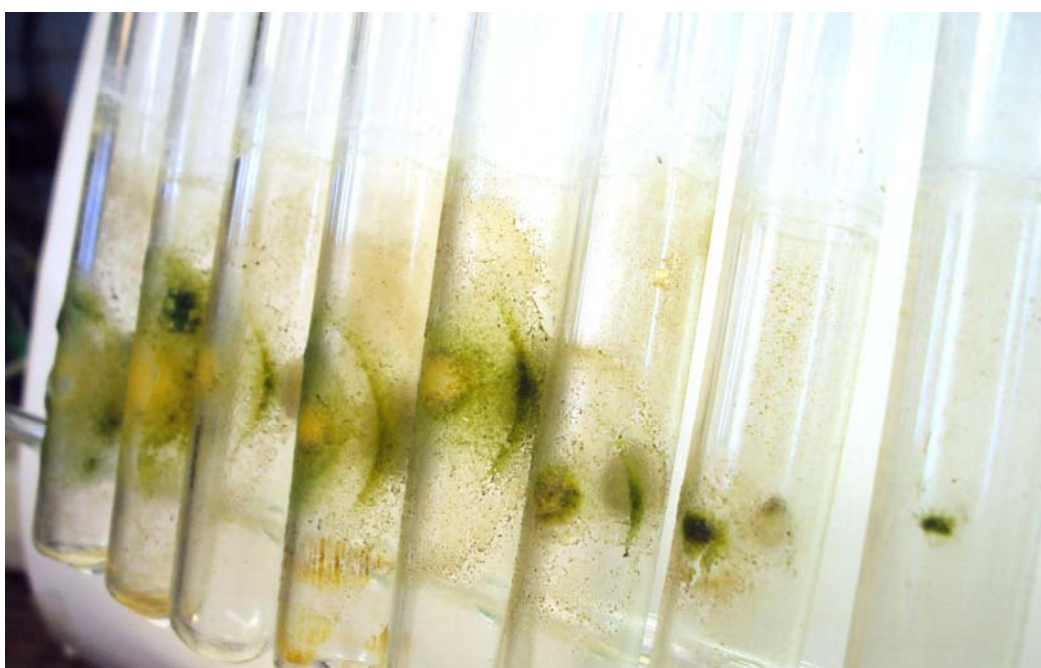


Рис. 5. Зависимость эффективности освещения суспензии от возраста биообрастания:
 - числа у кривых соответствуют освещённости в килोलюксах;
 - стрелками показаны моменты внесения посевного материала и появления водорослей

На 95 сутки эксперимент был закончен и сделаны фотоснимки слоя биообрастания (рис. 6, а, б). Снимки демонстрируют явную зависимость характера обрастания от силы электрического тока светодиодов и интенсивности света на поверхности осветителей. Причиной относительно слабого обрастания 3-го осветителя явилось падение яркости светодиода, обнаруженное на 53 сутки эксперимента, после чего была произведена замена светодиода.



a



б

Рис. 6. Фото биообрастания осветителей в двух ракурсах

Площадь, покрытая обрастанием, чётко делится на три зоны.

1-я зона – центральное белёсое пятно, соответствующее месту выхода основного светового луча. Здесь интенсивность светового потока явно превышает оптимальную величину и среднюю номинальную освещённость, которую показывает люксметр. Только край этой зоны имеет вид тонкого тёмно-зелёного кольца, где освещённость, видимо, ближе к оптимальной. При переходе к осветителям с более слабой номинальной освещённостью тонкое кольцо становится более широким. В конечном итоге центральное пятно из белёсого превращается целиком в тёмно-зелёное, что является признаком оптимизации луча. Но при этом резко сокращается площадь, имеющая оптимальную освещённость.

2-я зона для осветителей с высокой освещённостью имеет форму широкого зелёного кольца не очень интенсивной зелёной окраски, окружающего центральное пятно. По предположению, это может быть область со слабой освещённостью, явно ниже оптимальной. Её доля от общей площади обрастания является преобладающей.

За 2-й идёт 3-я зона, имеющая вид тонкого кольца большого диаметра, интенсивно зелёного цвета, который можно рассматривать как свидетельство оптимальной освещённости.

Такой характер обрастания становится более понятным после анализа вида светового пятна светодиода на белом экране. На фото рис. 7 видно, что светодиод имеет основной центральный луч, имеющий форму конуса с определённым углом расхождения. Величина этого угла и указывается в технической характеристике светодиода. Затем идёт зона с очень низкой освещённостью – тёмное кольцо. И, наконец, имеется внешнее световое кольцо, которое образовано лучом в виде конической поверхности с углом расхождения более значительным, чем у центрального луча. По всей вероятности, это побочный эффект оптической системы светодиода.



Рис. 7. Пятно от луча светодиода

Сопоставление результатов биообрастания и анализа оптических свойств светодиода приводят к выводу, что испытанный вариант конструкции осветителя крайне неэффективен, то есть, почти вся энергия основного луча не может быть использована водорослями в силу значительного превышения оптимальной интенсивности света.

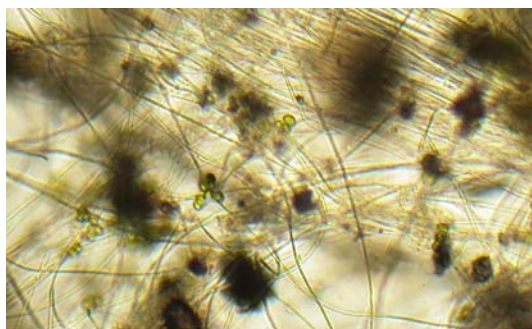
Надо учесть также, что освещённость, измеренная плоским датчиком на закруглённой поверхности осветителя, имеет величину ниже истинной, то есть, может рассматриваться только как величина относительная (абсолютный максимум в опытах – 18 тыс. люкс). Фактическая же освещённость в центре луча может существенно превышать максимальную солнечную освещённость, которая в природе находится в пределах 100-150 тыс. люкс.

Таким образом, требуется разработка специальной конструкции, позволяющей рассеивать световой поток светодиода и делать его по возможности максимально равномерным.

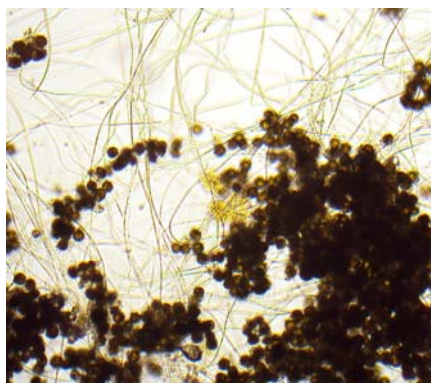
Для испытанных осветителей на основании рис. 6 оптимальными можно считать освещённость и затраты электроэнергии, соответствующие осветителям 4 и 5. Конкретные величины, соответственно, составляют от 3 до 4 тыс. люкс и от 15 до 22 Вт/ч на 1 м³ обработанной суспензии.

После окончания третьей серии экспериментов был произведён микроскопический анализ проб биоматериала, отобранных в виде соскобов, произведённых отдельно из белёсых и зелёных участков обрастания.

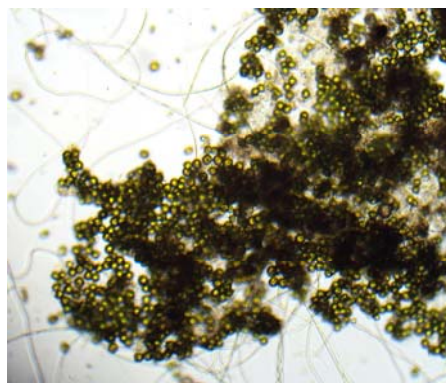
Интересной особенностью явилось то, что по видовому составу пробы белёсых и зелёных участков принципиально не отличались друг от друга (рис. 8). Во всех случаях доминировали две формы водорослей. Одна – нитчатая, предположительно, сине-зелёная водоросль из класса гормогониевых. Вторая – одноклеточная водоросль с клетками сферической формы, характерными для зелёных водорослей из порядка протококковых. Обе формы присутствовали в исходном посевном материале, отличием которого было явное доминирование нитчатых (рис. 8, а), в то время как в экспериментах доминантной формой были одноклеточные, а нитчатые являлись субдоминантой (рис. 8, б, в). Такой расклад отчасти может объяснить низкую полученную эффективность удаления взвешенных веществ из воды, поскольку только нитчатые формы способны создавать эффект волокнистого фильтра с эффективной абсорбцией дисперсных примесей.



а



б



в

Рис. 8. Микрофотографии образцов посевного материала (а) и биообрастания белёсых (б) и зелёных (в) участков поверхности осветителей

Выводы

1. Не все синтетические прозрачные пластмассы пригодны для использования в качестве материала осветительных устройств. Некоторые виды поливинилхлорида при длительном интенсивном освещении чернеют и теряют прозрачность. Такой фотохимический эффект зависит от спектральных характеристик излучателя.

2. При конструировании осветительных устройств на основе светодиодов необходимо учитывать геометрию и неоднородность светового луча, следует применять светорассеивающие приспособления, обеспечивающие максимально равномерное распределение света. В противном случае более половины всей световой энергии не может быть использовано водорослями, поскольку эта энергия представлена потоками слишком сильной интенсивности.

3. Для применённой в данных исследованиях конструкции осветителя оптимальной величиной освещённости на его поверхности можно считать величины от 3 до 4 тыс. люкс. При этом удельные затраты электроэнергии находятся в пределах от 15 до 22 Вт/ч на 1 м³ обработанной суспензии.

4. Степень развития слоя биообрастания не однозначно влияет на эффективность осветления мутной воды, поскольку абсорбция взвешенных частиц существенно зависит и от видового состава микроводорослевого сообщества. Видовой состав является трудно регулируемым, что можно рассматривать как недостаток фотоавтотрофных биофильтров.

Статья подготовлена при поддержке Программы стратегического развития Пермского государственного педагогического университета.

Литература

1. **Золотухин И.А.** Растения как средство очистки олиготрофных сточных и природных вод: Монография. Пермь: Перм. гос. пед. ун-т., 2001. 235 с.
2. **Золотухин И.А.** Светодиоды как источники света для микроводорослевых биофильтров // Современные проблемы науки и образования. № 1, 2011. С. 40-44.