

Введение

Хлорелла – представитель зеленых водорослей – микроскопических водных растений. Использование суспензии хлореллы в кормовом рационе сельскохозяйственных животных позволяет получать дополнительные привесы до 40% и довести сохранность поголовья до 99%. Это достигается благодаря тому, что хлорелла является уникальным биологическим природным продуктом. Ни одно другое, водное или наземное растение не обладает таким количеством полезных свойств, какими наделена хлорелла.

Из-за полезных свойств хлореллы, ее применение в различных областях деятельности человека очень широкое:

- в сельском хозяйстве для подкормки растений, птиц и животных, в пчеловодстве и рыбном хозяйстве;
- в пищевой промышленности;
- в медицине, косметологии и парфюмерии;
- для очистки сточных вод и реабилитации водоёмов;
- для производства кислорода;
- для производства биотоплива.

Известно, что благодаря хлорелле можно добиваться:

- увеличения среднесуточных привесов при откорме крупнорогатого скота и свиней на 30-40%, увеличения удоев коров до 25%;
- резкого, до 4-5 раз, сокращения падежа молодняка за счет укрепления природного иммунитета животных;
- значительного продления сроков хозяйственного использования животных;
- увеличения плодовитости родительского стада, сокращения непродуктивных осеменений и сроков сервис-периода, экономии на ветпрепаратах;
- повышения усвояемости кормов, позволяющее экономить их расходование до 22% [1].

Производство суспензии хлореллы основано на фотосинтезе микроводорослей, который осуществляется в емкости, с использованием искусственного освещения и раствора углекислого газа [2]. Фотобиореактор – устройство для создания благоприятных условий культивирования хлореллы [3]. Данное устройство, в зависимости от конструкции, способно работать в автоматическом или полуавтоматическом (с присутствием оператора) режиме. Позволяет выращивать значительные объемы данной водоросли в промышленном масштабе. В качестве источника света в закрытых установках традиционно применяют лампы накаливания, в том числе кварцевые галогенные с отражателями, зеркальные лампы, люминесцентные, но в настоящее время, на рынке светотехники широкое применение получили светодиоды, которые обладают рядом преимуществ перед традиционными источниками света.

Целью научно – исследовательской работы является создание энергоэффективного, автоматизированного фотобиореактора нового поколения со светодиодными источниками света оптимального спектра излучения для уменьшения времени выращивания хлореллы в искусственных условиях.

Вследствие сложившейся внешнеполитической и экономической ситуации в России, повышение уровня развития отечественного агропромышленного комплекса не вызывает сомнения. Автоматизирование фотобиореактора является ключевой задачей предлагаемого проекта. Фотобиореактор будет доступен каждому фермеру вне зависимости от его умения и образования, т.к. нет необходимости в присутствии контроля оператора.

Основные отличительные особенности разрабатываемого фотобиореактора, в отличие от конкурентных установок: использование полупроводниковых источников света в качестве облучателей; автоматизация процесса культивации; использование наиболее эффективной, со стороны распределения излучения, формы резервуара для культивации.

Планируется создать установку, которая будет обеспечивать водоросли всеми необходимыми условиями для их жизни и размножения. Следовательно, были поставлены следующие задачи:

1. Определить необходимые оптические характеристики резервуара фотобиореактора;
2. Подобрать компоненты, способные их обеспечить;
3. Подобрать отражающее покрытие с оптимальным коэффициентом отражения;
4. Разработать план автоматизации системы;
5. Создать прототип установки.

1. Микроводоросль хлорелла, ее применение. Фотобиореакторы для выращивания микроводоросли

1.1. *Chlorella Vulgaris*

Хлорелла – представитель зеленых водорослей – микроскопических водных растений.

Для приготовления кормовой добавки используется планктонный штамм *Chlorella Vulgaris*, который отличается высокой степенью использования световой энергии (КПД фотосинтетически активной радиации 3,6%) и химическим составом клетки по содержанию белков, незаменимых аминокислот, витаминов, набору микроэлементов, биологически активным веществам, с которыми не могут сравниться не только водные, но и наземные растения.

Для получения суспензии хлореллы используется минимальное количество химических реактивов, энергетических средств, полностью предотвращается загрязнение среды, а получаемая продукция является экологически чистой.

Производство суспензии хлореллы не имеет отходов, так как вся произведенная продукция используется в корм животным.

Высокая биологическая активность планктонного штамма дает возможность сократить дозировки и сроки выпаивания животным суспензии хлореллы, а эффект последствия позволяет сохранять высокие темпы роста и сохранности поголовья на весь период откорма.

Хлорелла является уникальной кормовой добавкой, не требующей больших трудозатрат и специальной подготовки персонала.

На сегодняшний день с микроводорослью хлорелла по получаемой продуктивности и сохранности поголовья животных, простоте использования и обслуживания, экономической эффективности никто не может конкурировать не только в России, но и за ее пределами.

Использование суспензии хлореллы в кормовом рационе сельскохозяйственных животных позволяет получать дополнительные привесы до 40% и довести сохранность поголовья до 99%. Это достигается

благодаря тому, что хлорелла является уникальным биологическим природным продуктом. Ни одно другое, водное или наземное растение не обладает таким количеством полезных свойств, какими наделена хлорелла [2].

Хлорелла — активный продуцент белков, углеводов, липидов, витаминов. Соотношение этих соединений легко регулируется при изменении условий культивирования: если при выращивании на обычных минеральных средах в ее сухой биомассе содержится 40—55% белка, 35% углеводов, 5—10% липидов и до 10% минеральных веществ, то при изменении концентрации компонентов среды можно получить биомассу следующего состава: 9—88% белка, 5—86% липидов, 6—38% углеводов. Хлорелла, растущая на среде, богатой азотом, накапливает преимущественно белок, при дефиците азота она синтезирует главным образом жиры и углеводы, добавление к среде глюкозы и ацетата приводит к повышению содержания каротиноидов и т.д. По качеству продуцируемых белка и витаминов хлорелла превосходит все известные кормовые и пищевые продукты — белок содержит все необходимые аминокислоты, в том числе незаменимые, а в 1 г массы сухого вещества водоросли содержится: каротина (провитамина А) — 1000—1600 мкг, витамина В1 — 2—18, В2 — 21—28, В6 — 9, В12 — 0,025—0,1, С — 1300—5000, провитамина D — 1000, К — 6, РР — 110—180, Е — 10—350, пантотеновой кислоты — 12—17, фолиевой кислоты — 485, биотина — 0,1, лейковорина — 22 мкг. В клетках хлореллы найдено в 1,5 раза больше, чем в дрожжах (богатый источник витаминов), инозита, биотина — в 2, пантотеновой кислоты — в 1,3, пара-аминобензойной кислоты — в 2,9 раза. Витамина В12 (цианкобаламина) нет ни в дрожжах, ни у высших растений, а хлорелла его продуцирует. Если в рыбьем жире содержится 6 витаминов, то в хлорелле — не менее 14. Количество витаминов — как в клетках, так и в культуральной среде — заметно варьирует в зависимости от условий выращивания и фазы развития водоросли.

Среди внеклеточных продуктов метаболизма хлореллы обнаружены витамин В1 (тиамин), В2 (рибофлавин), В3 (пантотеновая кислота), В5 (никотиновая кислота), В6 (пиридоксин), В12 (цианкобаламин), Вс (фолиевая кислота и ее производные), пара-аминобензойная кислота, Н (биотин), инозит. Содержание этих витаминов в среде значительно превосходит их количество в клетках. Так, на 6-й день культивирования хлореллы количество витаминов в среде максимально и составляет: для пантотеновой и пара-аминобензойной кислоты и биотина 80%, для пиридоксина — 70, тиамина, инозита, никотиновой кислоты — 60% общего содержания в клетках и среде. Затем эти цифры снижаются, но и на 14-й день выращивания они составляют около половины общего количества. Поэтому при использовании биомассы в качестве кормовых добавок следует учитывать это обстоятельство и спаивать животным суспензию клеток, не теряя находящиеся в среде витамины и другие биологически активные вещества.

Так как в белке хлореллы содержатся все незаменимые аминокислоты, его питательная ценность в 2 раза превосходит таковую для соевого белка. Если же сравнивать питательную ценность биомассы в целом, то окажется, что 1 кг ее равнозначен 4—5 кг сои. При добавлении 5—7 кг массы сухого вещества хлореллы к 1 т зерна его биологическая ценность увеличивается в 1,5 раза. По калорийности хлореллу можно приравнять к шоколаду, а ее белок равноценен белку сухого молока или мяса.

В Японии хлореллу добавляют в хлеб, кондитерские изделия, мороженое для обогащения их питательными веществами. А добавка к 10 частям муки 1 части смеси одноклеточных водорослей, в основном хлореллы, позволяет получать вареные и печеные продукты с улучшенными вкусовыми качествами и содержанием 22—29 г белка в 100 г продукта, что довольно много. На острове Тайвань хлореллу выращивают уже более 20 лет, и ежегодный «урожай» массы сухого вещества водоросли составляет 1,5 тыс. т. В Малайзии и на Филиппинах на пищевые цели расходуется более 500 т хлореллы в год.

Хлореллу весьма успешно применяют в сельскохозяйственном производстве — скотоводстве, свиноводстве, звероводстве, птицеводстве, пчеловодстве — в качестве пищевых добавок к рациону животных, а также для улучшения плодородия почв, увеличения всхожести семян, при силосовании кормов и т.д.

Введение суспензии хлореллы в рацион сельскохозяйственных животных сокращает до минимума падеж молодняка, способствует лучшему усвоению корма, увеличивает сопротивляемость организма к заболеваниям, что особенно важно при стойловом содержании скота на откормочных пунктах и в зимний период, является профилактическим средством против авитаминозных заболеваний, повышает привесы свиней, крупного рогатого скота, кроликов, птиц, увеличивает яйценоскость кур. В рацион животных хлореллу можно добавлять в виде суспензии, пасты или сухой биомассы. Наиболее целесообразно использование суспензии, так как половина водорастворимых витаминов находится в среде. В птицеводстве применение хлореллы ведет к возрастанию привесов от 5 до 30%, более ранней оперяемости, повышению яйценоскости на 9—13%, массы яиц — на 11,5—14% и содержания каротина в них — в 1,5—2 раза, к увеличению количества витаминов А и Е в печени, снижает гибель цыплят в 3—4 раза.

При использовании хлореллы в животноводстве наиболее целесообразно скармливать ее в виде суспензии с содержанием нескольких граммов сухого вещества в 1 л. Среднесуточные надои и привесы возрастают при этом на 15—20%.

В совхозе «Узденский» Минской области добавка суспензии хлореллы в количестве 3—3,5 л ежедневно к концентратному и концентратно-картофельному рациону откармливаемых подсвинков способствовала увеличению привесов на 9—10%, при этом показатели качества мясопродукции улучшались, депонирование витамина А в печени выросло на 92%, а витамина С — на 63%. В совхозе «Глыбочаны» Витебской области

скармливание суспензии крупному рогатому скоту в количестве 5 л каждой корове увеличивало приросты и уменьшало заболеваемость скота.

Потребность животноводства в суспензии хлореллы очень велика, так как она с успехом используется в качестве витаминно-кормовой добавки для всех видов животных: крупного рогатого скота, свиней, овец, коз, кроликов, птиц, рыб, насекомых, чернобурых лис, норок и т.д. [4].

Учитывая совокупность приведенных выше данных о положительном влиянии подкормки суспензией хлореллы на показатели продуктивности различных животных, следует признать целесообразным строительство хотя бы небольшой установки (биореактора) для выращивания хлореллы на каждом животноводческом комплексе и птицефабрике для введения в рационы кормления животных жизненно необходимых веществ, содержащихся в биомассе данной водоросли. Это позволит сократить расходы на ветеринарные препараты, увеличит выживаемость поголовья и суточные привесы, будет способствовать получению дополнительной прибыли.

1.2. Виды фотобиореакторов для выращивания хлореллы

Производство суспензии хлореллы основано на фотосинтезе микроводорослей, который осуществляется в емкости, с использованием искусственного освещения и раствора углекислого газа.

Процесс производства непрерывный, при котором из емкости ежедневно сливается часть объема суспензии клеток микроводорослей, которая идет на выпаивание животным. Воспроизводство хлореллы осуществляется в питательном растворе, приготовленном по специальному рецепту. Культивирование хлореллы ведется круглый год. Продуктивность хлореллы не зависит от сезона года [2].

По мере развития микробиологии до промышленного уровня накопилось множество данных, позволявших использовать дополнительное интенсивное освещение на благо экспериментаторов и производителей. На начальных этапах работы с микроводорослями проводили исследования влияния светового потока на хлореллу. Разумеется, обнаружили, что есть эффект дозы – при освещении, т.е. чем больше доза света получает объект, тем выше уровень культивации. Вскоре появились два логически оправданных решения проблемы – следить за симметричным расположением объектов относительно источника света или увеличивать освещённость. Проблемы стали острее с переходом на полупромышленный и промышленный уровни получения целевых продуктов в светозависимых технологических процессах. В этот момент времени появились разработки аппаратов для культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов, получивших название фотобиореакторы (ФБР).

Вследствие чего увеличилось количество патентов, статей в научных журналах. Но и на сегодня разработка фотобиореакторов для культивирования светочувствительных микроорганизмов остаётся актуальной.

При этом следует решить три основные задачи:

а) добиться требуемого уровня освещения клеток культивируемого микроорганизма,

б) добиться требуемого уровня аэрации культуры,

в) обеспечить максимальную степень однородности обеспечения каждой клетки культуры по этим двум параметрам.

Наиболее традиционным методом конструктивного решения задач является использование рабочих ёмкостей аппаратов, изготовленных из прозрачных материалов с расположением требуемого количества источников света снаружи. В таких случаях перемешивание и аэрация культуры производятся традиционными способами.

Существуют и другие способы подвода света к клеткам. Появилось много конструкций аппаратов с источниками света, расположенными непосредственно внутри рабочих ёмкостей. В этих ФБР вертикальные трубчатые лампы искусственного света установлены непосредственно в рабочей ёмкости и дополнительно служат отражательными перегородками (рисунок 1.1). В качестве примера давно и эффективно используемой конструкции можно привести отечественный аппарат, защищённый авторским свидетельством SU 1570678 A1 (1979). Обычные лопастные мешалки обеспечивают высокую кратность обновления освещённого слоя суспензии.

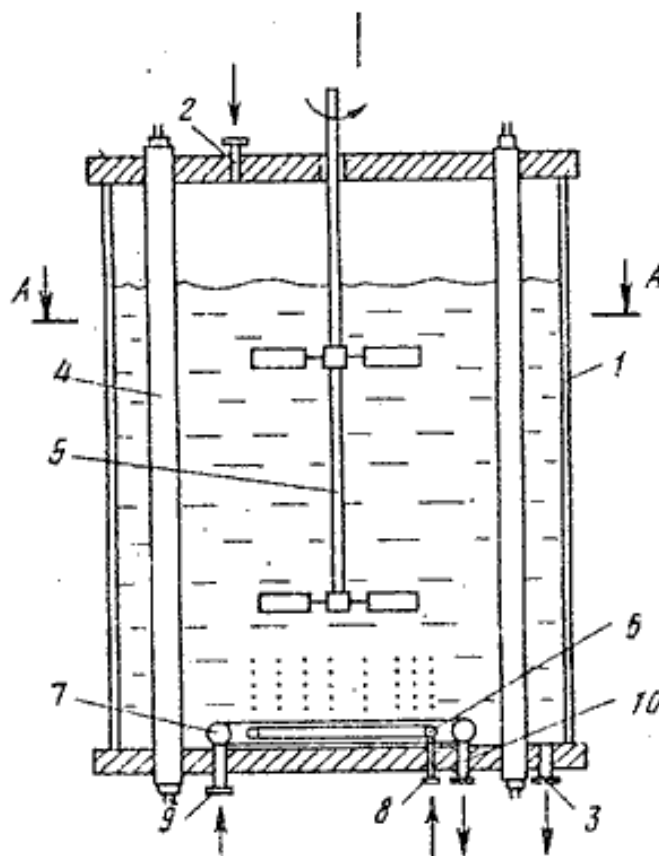


Рисунок 1.2.1 – ФБР защищённый авторским свидетельством SU 1570678 A1 (1979):

1. Емкость; 2. Патрубок для подвода питательной среды; 3. Патрубок для отвода питательной среды; 4. Источник искусственного света; 5. Лопастная мешалка; 6. Барботер; 7. Теплообменник; 8. Патрубок для подвода газа; 9. Патрубок для подвода хладагентов; 10. Патрубок для отвода хладагентов.

Настоящим прорывом в деле конструирования фотобиореакторов явилась разработка также отечественного аппарата – SU 1828660 A3 (1981), исходно предназначенного для выращивания водоросли с нежными клеточными стенками – спироулины. Принципиальное отличие аппарата, разработанного под руководством В.А.Жаворонкова, состоит в использовании гибких мешалок, закреплённых между двумя горизонтально расположенными дисками.

Вращение такого перемешивающего устройства обеспечивает образование воздушной полости в центре ёмкости аппарата за счёт усиления центробежного перемещения культуральной жидкости. В этой полости располагаются электрические лампы, заключённые в светопрозрачный двустенный кожух. В полости между двойными стенками циркулирует жидкость, служащая хладагентом для мощных натриевых ламп. В настоящее время фотобиореакторы с гибкими мешалками успешно используются при культивировании различных микроводорослей и светочувствительных бактерий. Вместе с тем, хотя полостные ФБР такой конструкции и признаны наиболее экономичными, нельзя не отметить относительную сложность конструкции системы освещения и охлаждения ламп, а также ограничения рабочих объёмов при использовании режима высокоплотного культивирования.

Следующий этап в эволюции ФБР связан с появлением светодиодов и их широчайшими потенциальными возможностями. Очевидно, что светодиоды являются реальной альтернативой традиционным источникам света, в том числе и для переноса световой энергии к клеткам микроорганизмов в процессе их культивирования. Осветительные устройства на базе светодиодов обладают уникальными технологическими преимуществами. Их размер составляет лишь несколько миллиметров. Все преимущества светодиодов благоприятны для увеличения скорости культивации хлореллы [5].

Из анализа публикаций можно сделать вывод, что нет крупных работ, направленных на разработку энергоэффективного и автоматизированного фотобиореактора для выращивания хлореллы в искусственных условиях в настоящий момент. Эволюция ФБР существует, однако применяют самые простые модели фотобиореакторов. В России культивацию хлореллы выполняют малое количество компаний.

Все известные виды фотобиореакторов можно классифицировать по следующим критериям: форма резервуара, степень изоляции от внешней среды и тип освещения (рисунок 1.2.2).



Рисунок 1.2.2 – Классификация фотобиореакторов

Рассмотрим более подробно некоторые установки, например, научно-производственная компания "ДЕЛО" является родоначальником внедрения инновационной биотехнологии хлореллы в животноводство.

Для выращивания хлореллы используются:

- установки серии КМК (установка культивации маточной культуры) - КМК-150, представленная на рисунке 1.2.3, производительностью 50 литров суспензии в сутки;

Потребляемая эл. мощность КМК-150 – 0,3 кВт/ч. Размеры установки 1,5*0,5*1,1 метра.



Рисунок 1.2.3 – КМК-150

- установки серии ФБР (рис. 1.2.4) - ФБР-150 и ФБР-250, производительностью соответственно 150 и 250 литров суспензии в сутки.



Рисунок 1.2.4 – ФБР-150

Потребляемая эл. мощность ФБР-150 – 0,7 кВт/ч. Размеры установки 1,5*1,0*1,1 метра.

Потребляемая эл. мощность ФБР-250 – 1,0 кВт/ч. Размеры установки 2,2*1,0*1,1 метра. Стоимость ФБР-250 – 285 тыс. рублей. Стоимость реактивов на год для ФБР-150 – 7,5 тыс. рублей, ФБР-250 – 10,5 тыс. рублей.

Установка КХ-60 (рис. 1.2.5) представляет собой модульную установку с производительностью суспензии хлореллы 60 литров в сутки и плотностью клеток 50- 60 млн/мл. Наращивание объема суспензии хлореллы достигается

увеличением количества установок. Так, например, 2 установки – 120 литров, 3 установки – 180 литров, 4 установки – 240 литров и т. д.



Рисунок 1.2.5 – КХ-60

Культиватор хлореллы КХ-60 состоит из одной емкости, двух светильников в стеклянных колпаках и сетчатой крышки. Производство суспензии хлореллы включает следующие стадии:

- в емкость с питательной средой вводят маточную культуру хлореллы (поставляется готовой);
- ежедневно в емкость вливают раствор углекислого газа;
- через четыре дня суспензия хлореллы готова к использованию;
- процесс выращивания микроводорослей, слив части готовой суспензии хлореллы и розлив питательного раствора осуществляется ежедневно [1].

Компания ООО «Энерготехнопром» город Казань изготавливает и производит монтаж биореакторов для выращивания суспензии хлореллы и создания в каждом отдельном хозяйстве полнорационных кормов (рис. 1.2.6).



Рисунок 1.2.6 – биореакторы компании ООО «Энерготехнопром»

Для культивирования хлореллы используются установки БР-1000, БР-4000, БР-10000, БР-12000 производительностью, соответственно, 800, 3200, 8000 и 9600 литров суспензии в сутки.

Биореактор хлореллы БР-1000 представляет собой установку 5 ёмкостей по 1000 литров для суспензии хлореллы с источниками света, и снабжен другими устройствами, обеспечивающими оптимальные условия для размножения хлореллы в специальной питательной среде.

Требования к используемым помещениям просты: минимальная температура в зимний период должна быть не ниже 22 градусов, при наличии напряжения 380 В.

Цены на установки по РТ:

БР-1000 580 000 руб.

БР-4000 1200 000 руб.

БР-10000 1700 000 руб.

БР-12000 1900 000 руб. [6].

Также известна зарубежная установка закрытого типа, представленная на рисунке 1.2.7, для промышленного выращивания микроводорослей хлорелла (*Chlorella vulgaris*) и спироулина (*Spirulina platensis*). Сама технология производства биомассы микроводорослей отличается соблюдением

специальных параметров (чистота, высокое качество исходных компонентов, стерильность). Стоимость данной установки - 600 000 руб / шт. [7].



Рисунок 1.2.7 – Фотобиореактор закрытого типа

Значительный недостаток имеющихся установок – это малая степень автоматизации и использование в качестве источника света в закрытых установках ламп накаливания и люминесцентных. Так же возникает вопрос об эффективности форм, имеющихся фотобиореакторов. Вся выполняемая работа направлена на исследования влияний источников излучения на культивацию микроводоросли хлореллы, выбор эффективной формы резервуара и возможность применения отражающего покрытия для уменьшения потерь светового потока.

Ожидается, что усовершенствованный фотобиореактор для культивирования хлореллы позволит максимально автоматизировать процесс выращивания микроводорослей и устранить большую часть недостатков установок-аналогов. Скорость получения и качество готового продукта должны выйти на новый уровень, в то время, как сократятся затраты на электроэнергию и работу обслуживающего персонала.

Полученная в результате работы установка сможет широко применяться в крупных агропромышленных и сельскохозяйственных предприятиях, а учитывая небольшие размеры разработанной установки, также в частном сельском хозяйстве и малых фермах.

2. Моделирование и обоснование выбора формы фотобиореактора для культивирования микроводоросли

2.1. Моделирование формы и методика

В ходе работы были спроектированы модели наиболее популярной у производителей хлореллы формы резервуара (рисунок. 2.1.1.б), а также формы (рисунок 2.1.1.а и в), в которых ожидается наиболее равномерное распределение излучения. Целью данной работы был выбор конфигурации резервуара фотобиореактора для наиболее эффективного выращивания хлореллы в искусственных условиях, за счет лучшего распределения излучения по объему суспензии.

Объемы были приняты за равные (15 л), для создания необходимого объема были заданы габариты, представленные на рисунок. 2.1.2.

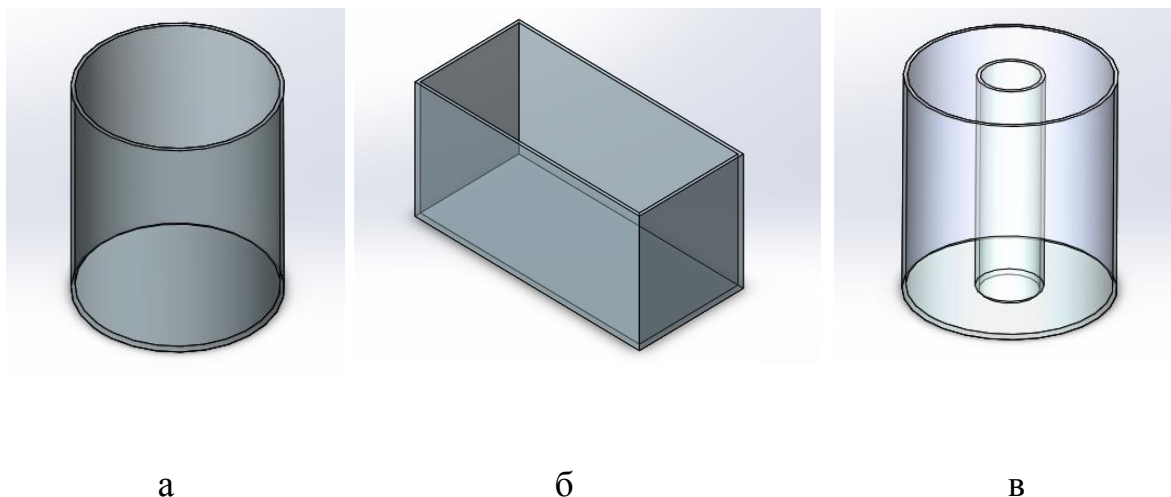


Рисунок 2.1.1 – рассматриваемые формы фотобиореакторов: а – цилиндр с наружным облучением; б – прямоугольный параллелепипед с наружным облучением; в – цилиндр с внутренним облучением.

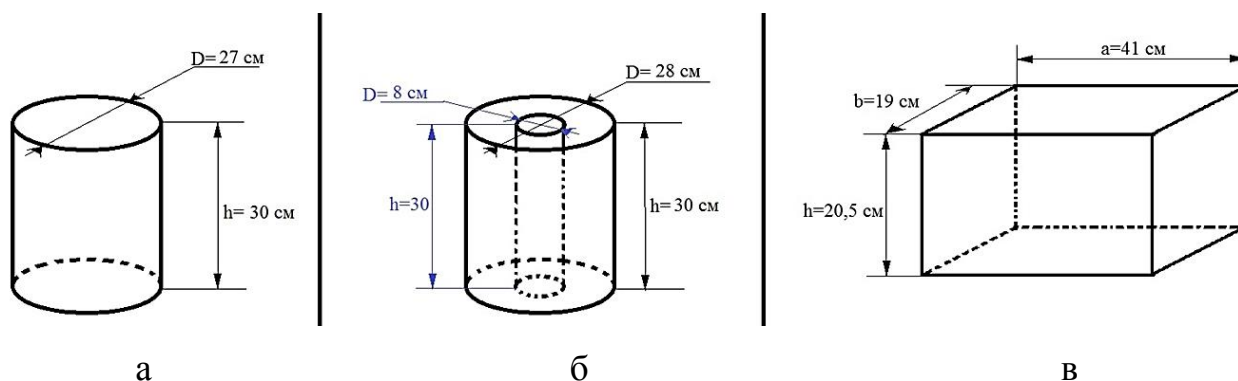


Рисунок 2.1.2 – Габаритные размеры резервуаров

Для каждого из типов резервуаров были подобраны различные облучательные установки, и проведены расчеты светотехнических параметров в программной среде Dialux. В качестве источников излучения при моделировании были использованы светодиоды марки CREE модели XLamp XT-E White, спектр излучения которых представлен на рисунке 2.1.3.

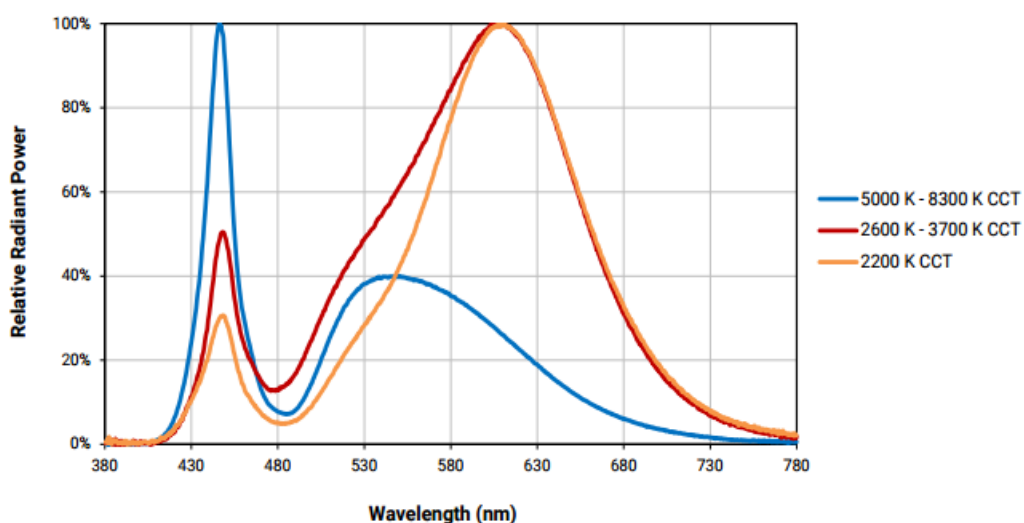


Рисунок 2.1.3 – Спектр излучения XLamp XT-E White

Габаритные размеры светодиода составляют 3,45x3,45 мм. Конструкция излучателей представлена на рисунке 2.1.4

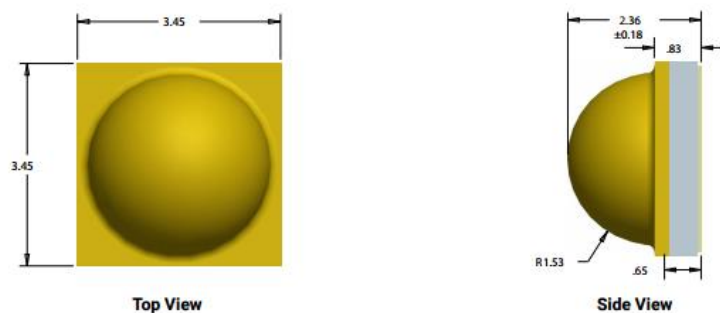


Рисунок 2.1.4 – Размеры XLamp XT-E White

Основные характеристики светодиода, использованного в моделировании, приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Характеристики XLamp XT-E White

Максимальная сила тока	1.5 A
Максимальная мощность	5 W
Максимальная светоотдача	456 lm @ 5 W (85°C)
Напряжение в прямом направлении	2.85 V @ 350 mA (85°C)
Угол обзора	115 °
Температура	85°C
Тепловое сопротивление	5 °C/W

Каждая из пяти облучательных установок состояла из 40 светодиодов, равномерно расположенных по поверхностям, выбранным за основу. Перечислим каждый из этих вариантов:

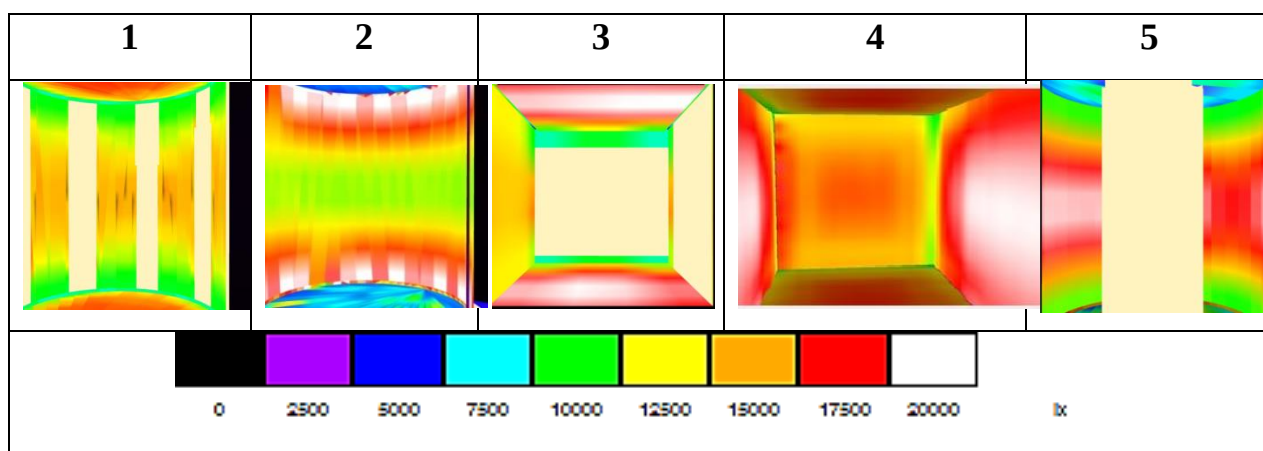
1. Расположение облучательных приборов на боковой поверхности цилиндра, образующего резервуар, представленный на рисунок. 2.1.1.а.
2. Расположение облучательных приборов на основаниях цилиндра, образующего резервуар, представленный на рисунок. 2.1.1.а.
3. Расположение облучательных приборов на боковых гранях параллелепипеда, образующего резервуар, представленный на рисунок. 2.1.1.б.

4. Расположение облучательных приборов на основаниях параллелепипеда, образующего резервуар, представленный на рисунок. 2.1.1.б.

5. Расположение облучательных приборов на боковой поверхности цилиндра, представляющего собой внутреннюю стенку резервуара, представленного на рисунок. 2.1.1.в.

Результаты расчета распределения излучения в фиктивных цветах приведены в таблице 2.1.2.

Таблица 2.1.2 – Распределение излучения в фиктивных цветах



Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод о том, что наиболее равномерное распределение излучения наблюдается в резервуарах с цилиндрической формой, так как при прямоугольной форме на местах стыков появляются потери излучения. Если сравнивать между собой варианты под номерами 3 и 4, то приоритетным из них является 4. С точки зрения расположения световых полей этот вариант лучше, не смотря на снижение уровня освещенности. При увеличении количества излучателей этот вариант можно использовать наряду с цилиндрическими формами.

Среди вариантов 1, 2 и 5 самым эффективным по распределению излучения внутри объема резервуара можно назвать первый. Во втором варианте, где облучатели расположены на основаниях цилиндра, интенсивности излучения не достаточно для всей высоты цилиндра, в

середине наблюдается резкое снижение уровня облученности, что доказывает отсутствие равномерности. В пятом варианте, помимо сложности изготовления, к недостаткам можно отнести потери интенсивности на стыках между боковой поверхностью цилиндра и его основаниями.

Первый вариант относительно прост в изготовлении, а также распределение излучения здесь наиболее равномерно. Улучшить полученный результат возможно благодаря нанесению отражающего покрытия на боковую поверхность цилиндра (за светодиодами), которое устранил излишние потери излучения, а так же положительно повлияет на равномерность распределения излучения.

2.2. Моделирование фотобиореактора в процессе культивирования и его методика

Для начала процесса моделирования необходимо выполнить сбор информации по параметрам моделей. Необходимый уровень освещенности микроводоросли хлореллы должен составлять в среднем 14 клк [8,9].

Модель фотобиореактора состоит из комплектующих, характеристики которых были приняты за следующие:

1. Твердотельные источники света (100 шт.) – светодиод XLamp XT-E White, Излучатели расположены отдельно на расстоянии 44 мм (от одной наружной кромки до другой). Спектр излучения представлен на рисунке 2.1.3. Габаритные размеры 3,45x3,45 мм, более подробная информация представлена на рисунке 2.1.4, а характеристики светодиода в таблице 2.1.1.

2. Резервуар – аквариум из стекла цилиндрической формы. Резервуар имеет высоту 68 см и диаметр 20 см. Характеристики для стекла: $Rho = 6\%$; прозрачность = 70%; шероховатость = 0%; отражающий эффект = 90%.

3. Крышка. Предполагаемый материал для изготовления – полистирол: $Rho = 90\%$; прозрачность = 0%; шероховатость = 60%; отражающий эффект = 20%.

4. Отражатель. Материал – пищевая фольга, характеристики заданы в соответствии с измерениями: $Rho = 80\%$; прозрачность = 0%; шероховатость = 0%; отражающий эффект = 80%. Коэффициент отражения был взят из главы 3.3.

5. Имитация суспензии, заполняющая резервуар на 50 см в высоту, имеет характеристики:

- Характеристики среды в начале процесса культивирования. К модели добавлена имитация суспензии с прозрачностью 80%, соответствующей начальной оптической плотности 0,098.

- В конце процесса культивирования. К модели добавлена имитация суспензии с прозрачностью 58%, соответствующей оптической плотности, наблюдаемой в конце предыдущего эксперимента 0,233.

Общая конфигурация модели представлена на рисунке 2.2.1.

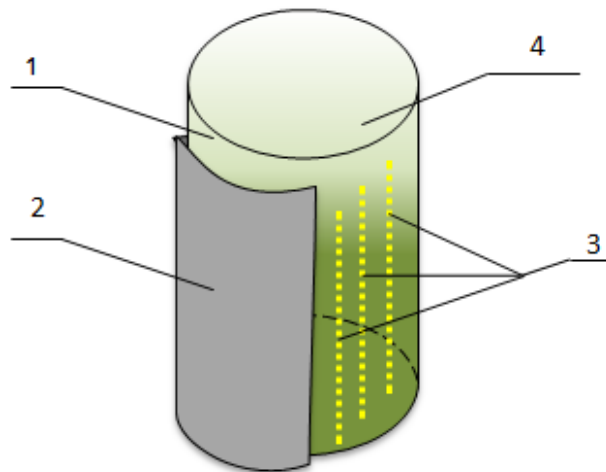


Рисунок 2.2.1 – Модель фотобиореактора: 1 – резервуар; 2 – отражающее покрытие; 3 – светодиоды; 4 – крышка

Создание конструкций в программном комплексе Dialux. Программа Dialux от известной немецкой компании DIAL GmbH на сегодняшний день является лучшей из бесплатных программ по расчёту наружного и внутреннего освещения при заданном типе, количестве и расположении различного рода светильников [10].

Dialux позволяет учитывать при расчете освещения цвет, коэффициент отражения и текстуру поверхности. В качестве результата обработки данных, можно получить полноценный общий 3D вид освещенности резервуара и графическое изображение распределения света по заданной поверхности. Программный продукт также разрешает зрительно (при помощи фиктивных цветов) увидеть распределение освещенности.

По завершению расстановки оборудования и расчета, появляется доступ к резюме, в котором отражается результат проделанной работы.

Необходимо будет создать модели, отражающие два этапа культивирования: начальный, когда концентрация микроводоросли мала;

конечный – спустя 12 часов, когда процесс культивирования завершен, следовательно, концентрация хлореллы увеличилась. А так же модель без суспензии.

Завершающей стадией моделирования является расчет коэффициента потерь при анализе результатов моделирования двух этапов без учета перемешивания смеси.

При помощи функции фиктивных цветов в Dialux можно увидеть распределение освещенности по поверхностям внутри резервуара. На рисунке 2.2.2.а представлено распределение света в начале процесса, на рисунке 2.2.2.б – спустя 12 часов, а на рисунке 2.2.2.в – без суспензии.

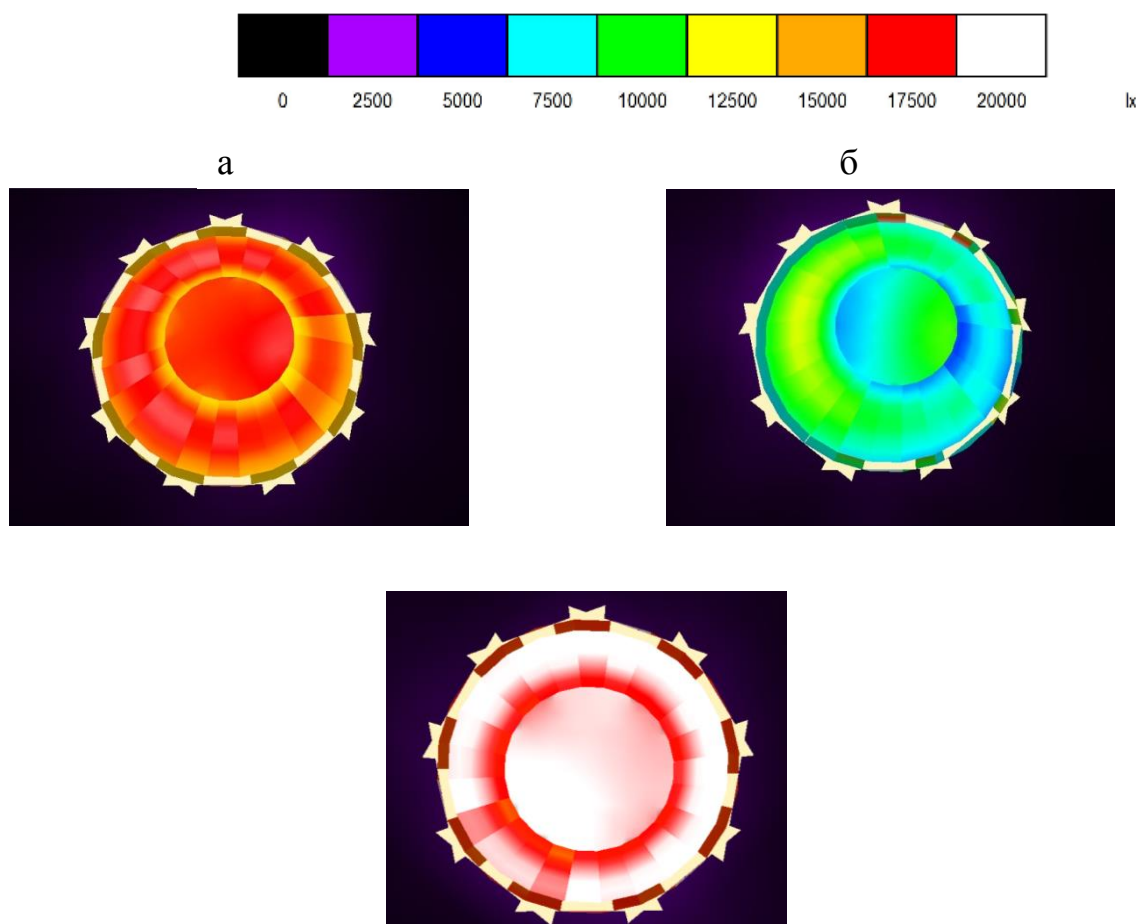


Рисунок 2.2.2 – Распределение интенсивности освещения в фиктивных цветах (вид сверху): а – начало процесса культивирования; б – спустя 12 часов; в – без суспензии

В результате моделирования световой поток после 12 ч уменьшился, в среднем, на 50,1 % от первоначальных параметров. Причиной таких потерь

является рост микроводоросли хлореллы, и как следствие, увеличение концентрации и уменьшение пропускающей способности среды. Что ведет к выводу о необходимости регулирования освещенности, а в частности, увеличения светового потока со временем при культивировании микроводоросли. Применение системы автоматического управления излучением позволит сохранить внутри резервуара необходимую освещенность, а также повысить эффективность установки фотобиореактора.

3. Устройство разрабатываемого фотобиореактора

3.1. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов над хлореллой с целью получения спектра для эффективного роста хлореллы была создана экспериментальная установка.

Установка представляет собой прямоугольный параллелепипед из оргстекла, наполненный водой (рисунок 3.1.1.). Емкость поделена на три отсека. Это необходимо для того чтобы излучение из соседнего отсека было сведено к минимуму или полностью отсутствовало. Также все поверхности выполнены в белом цвете, который способствует равномерному облучению суспензии. В каждом отсеке установлены источники излучения (1) – синий, красный и белый светодиодные модули, который питаются от отдельного блока питания. Заранее были измерены источники излучения на высокочувствительном оптоволоконном спектрофотометре AvaSpec-2048 для формирования одинакового фотосинтетического фотонного потока (Таблица 3.1.1).

Таблица 3.1.1 – Используемые источники излучения

Светодиодный модуль	Фотосинтетический фотонный поток, мкмоль/с	I, А	U, В
Синий	6	0,864	11,81
Красный		0,748	8,08
Белый		0,929	11,76

Так как исследования проводятся с термофильным штаммом хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer), для которой температурная петля оптимальная для роста водоросли составляет 36,5-37,5 С°, используются нагревательный элемент (2), так называемый «греющий кабель». Термо-проводник располагается на дне аквариума. Для поддержания постоянной температуры

используется цифровой термостат (6), задача которого – коммутация нагревателя при отклонении от температурной петли. Контроль осуществляется при помощи датчика, который, как предполагается, будет погружен в один из мерных стаканчиков. Для создания одинаковой температуры во всех трех отсеках были высверлены отверстия в нижней части установки (4).

В каждом отсеке на глубине не менее 10 см погружено по одному мерному стаканчику с суспензией (3), перемешивание и обогащение кислородом обеспечивается по средствам аэрации (7). Помимо этого, одна из трубок аэратора погружается в отсек для равномерного распределения тепла от нагревательного элемента.

Аэратор (7) предназначен для выполнения двух функций:

1) подача воздуха в каждый стакан для обеспечения культивации хлореллы,

2) воздушное перемешивание, подача воздуха осуществляются посредством трубок (8) с наконечников в виде диффузоров.

Для обеспечения безопасной работы, установка защищается дифференциальным автоматическим выключателем (5).

Каждый час снимаются пробы суспензии из каждого стакана на спектрофотометре СФ-256, для определения оптической плотности суспензии на наличие прироста хлореллы в мерных стаканах (3), а также сравниваются температуры в каждом мерном стакане (3) с хлореллой при помощи градусников.

Длина греющего кабеля = 1,3м; мощность – 30 Вт/м. Из этого следует, что энергопотребление греющего кабеля составляет 0,039 кВт.

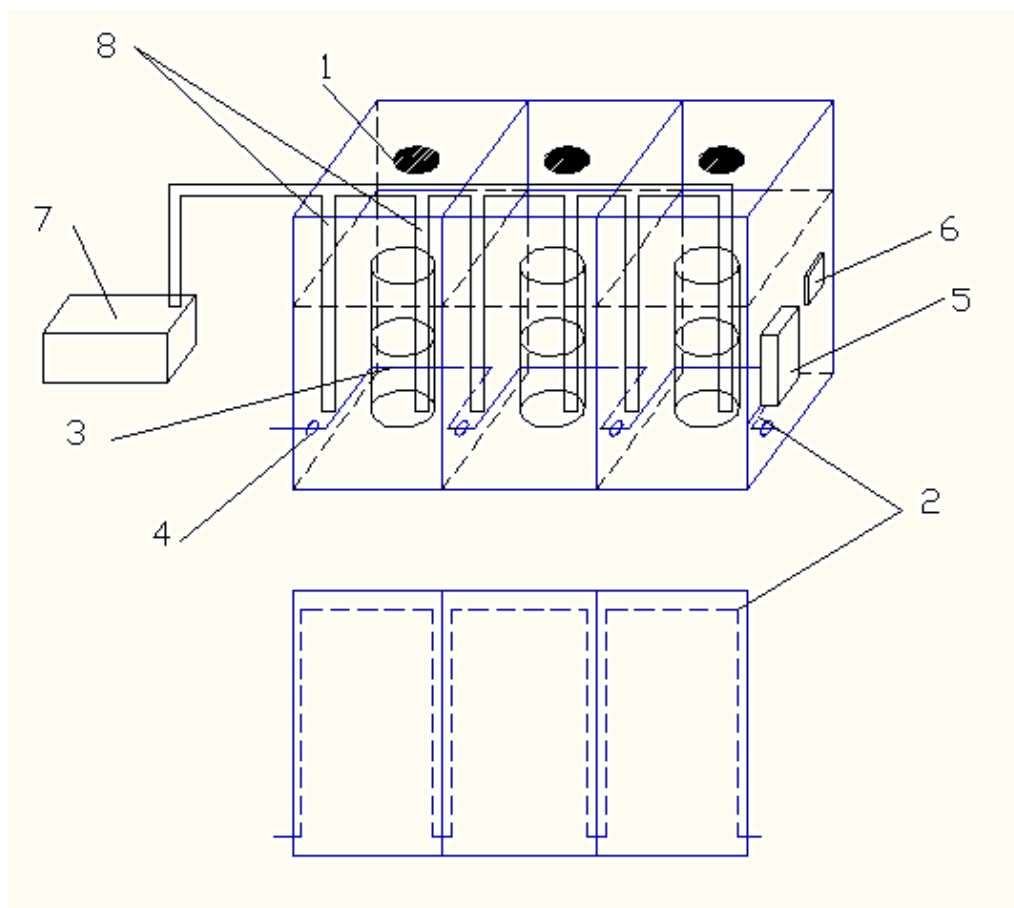


Рисунок 3.1.1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – Отверстия под светодиодные модули; 2 – Нагревательный элемент;
 3 – Мерные стаканчики; 4 – Отверстия для нагревательного элемента;
 5 – Дифференциальный автоматический выключатель; 6 – Термостат; 7 –
 Аэратор; 8 – Трубки аэратора.

3.2. Схема и устройство разрабатываемой установки

Проанализировав доступную информацию о приведенных в главе 1.2 биореакторах, были выявлены недостатки конкурентных установок:

1. Малая степень автоматизации, что делает необходимым наличие оператора для отслеживания параметров среды на протяжении всего цикла выращивания (около 18 часов), а это может привести к ошибке в технологическом процессе, так называемому «человеческому фактору».
2. Еще одним недостатком существующих конструкций является применение не энергоэффективных источников облучения: ламп накаливания и люминесцентных ламп.
3. Также форма источников облучения делает не возможным равномерное облучение хлореллы по всему объему культиватора.
4. К недостаткам можно отнести форму резервуаров для культивирования. Форма прямоугольного параллелепипеда создает большие потери излучения в углах резервуаров.
5. Отсутствие возможности регулировать спектральный состав излучателей для быстрого роста хлореллы.

При подборе формы биореактора возрастает эффективность использования потока исходящего от источника излучения, так как при правильном выборе формы, минимизируются потери, что ведет к лучшему росту микроводорослей [11].

Вследствие сложившейся внешнеполитической и экономической ситуации России, повышения уровня развития отечественного агропромышленного комплекса не вызывает сомнения. В сельском хозяйстве и на производствах культиваторы имеют чаще форму параллелепипеда. Была проведена реконструкция фотобиореактора ФБР-150 в программе DiaLUX, которая наглядно продемонстрировала потери излучения в углах культиватора (глава 2.1).

Прогнозируется создать фотобиореактор с постоянным контролем необходимых параметров для роста водорослей. На рисунке 3.2.2 можно увидеть примерную модель установки.

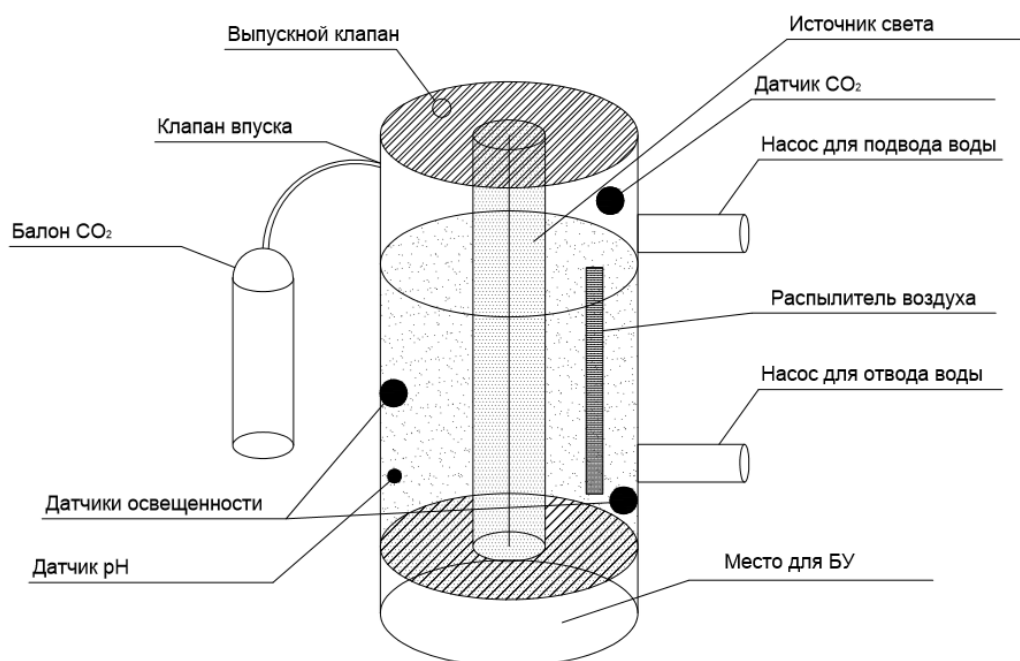


Рисунок 3.2.2 – Цилиндрический фотобиореактор

Реактор будет иметь датчики фиксации данных, блок управления и устройства для поддержания необходимых параметров. Первыми будут являться датчики

- освещенности,
- CO₂,
- pH,
- температуры.

Второй обязательный элемент – блок управления (БУ), который состоит из нескольких блоков микросхем.

Последней составляющей будут исполнительные органы культиватора, такие как

- насосы для подвода и отвода воды,
- клапан впуска CO₂,

- терморегулятор,
- распылитель воздуха (аэратор).

Помимо вышеуказанных элементов установки существует вспомогательный – выпускной клапан, служащий для контроля давления внутри реактора.

Конструктивно фотобиореактор представляет из себя цилиндр, выполненный из прозрачного материала (стекло, оргстекло). На внешней стороне устанавливаются светодиодные источники излучения с подобранным спектром и направленные внутрь фотобиореактора. Также с внешней стороны фотобиореактор покрывается отражающим материалом (поверх светодиодов) с наилучшими отражающими показателями. Внутри установки размещается гибкий нагревательный элемент (греющий кабель), который позволяет поддерживать необходимую для культивации температуру с наименьшими энергозатратами. Фотобиореактор имеет несколько датчиков, позволяющих контролировать основные параметры микроклимата, а именно кислотность среды pH, уровень содержания углекислого газа CO₂, температуру. Данные с датчиков поступают на микроконтроллер, который по полученным данным ведет управление. Для изменения содержания уровня углекислого газа в питательной среде используется газовый баллон со сжатым углекислым газом и газовый клапан, который управляется микроконтроллером. Система управления вынесена в отдельный блок с дисплеем, на котором отображаются все основные параметры микроклимата в реальном времени. Также система управления ведет запись параметров во внутреннюю память, что позволяет анализировать процесс культивации и вносить коррективы при необходимости. Реализация удаленного доступа к системе достигается путем применения GSM- и Ethernet- модулей для микроконтроллера для управления системой через мобильную связь и интернет соответственно.

Создание модели автоматической системы даст возможность отладить каналы связи устройств, а в будущем облегчить эксплуатацию фотобиореактора.

Основной упор в разработке автоматического фотобиореактора сделан на то, чтобы подобрать наилучший спектр излучения для наиболее продуктивного роста хлореллы, а также на создание автоматизированной (без присутствия оператора) и энергоэффективной установки. В настоящее время, в уже разработанных установках применяются в качестве источников излучения люминесцентные лампы. В разрабатываемой установке применяются светодиодные источники излучения, что позволяет подобрать наиболее благоприятный спектр излучения для роста хлореллы (прирост увеличивается в 2-4 раза по сравнению с бытовыми источниками излучения: лампа накаливания, компактная люминесцентная лампа, бытовая светодиодная лампа) и достичь лучших энергетических показателей, путем снижения потребления электричества.

Так же разрабатывается автоматическая система управления фотобиореактором, которая позволит исключить присутствие оператора, а также позволит управлять установкой удаленно, путем использования протокола GSM (сотовая связь) и глобальной сети Интернет. Данная система производит контроль основных параметров фотобиореактора, а именно: освещенность, температура, кислотность среды pH, содержание в питательной среде CO₂(углекислого газа), наличие которого существенно повышает прирост хлореллы. Также ведется постоянная запись параметров «микроклимата» в фотобиореакторе, для дальнейшего анализа и совершенствования установки. Реализуется данная система на контроллере Arduino.

3.3. Спектр отражающего покрытия

Для обеспечения минимальных потерь излучения от источника, существует необходимость в применении отражающих покрытий. Покрытия должны обладать рядом свойств: высокий коэффициент отражения спектра (в сине-красной областях), равномерность отражения на разных длинах волн, доступность, не высокая цена, прочность. В связи с этим сформулируем цель следующей работы: обзор существующих решений и обоснование выбора отражающего покрытия для фотобиореактора.

Для измерения спектра отражения образцов применялся спектрофотометр серии СФ-256, предназначенный для измерения спектральных коэффициентов пропускания или оптической плотности жидких или твердых прозрачных веществ.

Используемые приборы СФ-256 часто применяются для измерения отношений двух потоков оптического излучения, один из которых — поток, падающий на исследуемый образец, другой — поток, испытавший то или иное взаимодействие с образцом. Спектрофотометр позволяет производить измерения для различных длин волн оптического излучения, соответственно в результате измерений получается спектр отношений потоков. Обычно используется для измерения спектров пропускания или спектров отражения излучения.

В данном случае измерялись спектры отражения различных материалов, таких как образцы фирмы Alanod (Miro 4, Miro 20, Miro-Silver 4, Miro-Silver 27, White 98 Film, White Optics Metal). Так же были измерены спектры отражения пищевой фольги, растрового отражателя, утеплителя для пола (пенофола), материала прожектора и фольги оконной.

Работа с прибором СФ – 256 осуществлялась через программное обеспечение, которое производило регистрацию спектров отражения. Программа позволяет экспортировать числовые данные и графики спектров в другие приложения Windows. Эта опция была использована для дальнейшей работы с полученными в ходе эксперимента данными.

В ходе измерений были получены графики зависимости коэффициента отражения от длины волны материалов. Результативные графики отображены на рисунках ниже (рис.3.3.1 – 3.3.8).

Анодированный алюминий имеет довольно высокий коэффициент отражения (до 85%), но в ряде случаев этот показатель оказывается не достаточным. Серия MIRO компании Alanod применяется в светотехнике, для изготовления отражателей и дефлекторов. Отражающая способность материала MIRO варьируется в зависимости от модели от 94% до 95% [12].

На рисунках 3.3.1.а и 3.3.1.б представлены графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов Miro 4 и Miro 20 в реальных условиях.

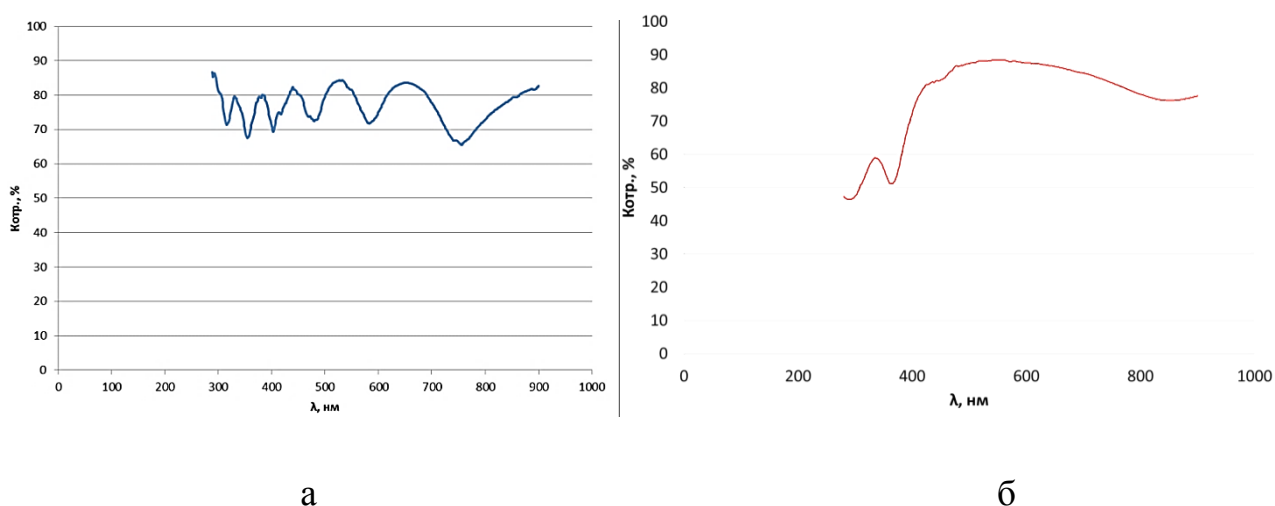


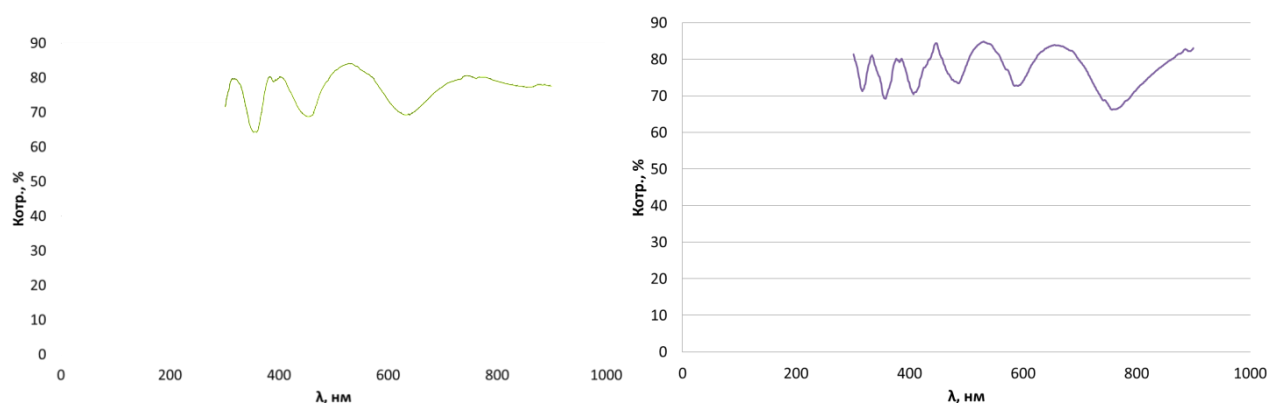
Рисунок 3.3.1 – Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов: а – Miro 4; б а – Miro 20

Из полученных результатов можно сделать вывод, что заявленный коэффициент отражения не соответствует реальному. Это может быть связано с тем, что при выпуске на заводе образцы сразу же измеряют на выявление коэффициента отражения (КО). При измерении в лабораторных условиях на коэффициенте отражения сказались органические покрытия, микродефекты образцов. В связи с этими причинами произошла потеря КО на 10-20%.

Из-за измерения КО во всем диапазоне длин волн, а не в одном (например, ИК – диапазоне), коэффициент не соответствует числу, заявленному производителем. По этой же причине графики получились волнообразные, а не прямые линии. Еще одна причина получения волнообразных графиков – покрытие материалов анодированной пленкой.

Следующими образцами, у которых измерялся коэффициент отражения, стали образцы фирмы Alanod - серии MIRO-SILVER. Анодированный алюминий серии MIRO-SILVER является материалом, применяющимся в светотехнике, для изготовления максимально эффективных отражателей и дефлекторов. Отражающая способность материала MIRO-SILVER составляет 97% - 98%[13].

На рисунках 3.3.2.а и 3.3.2.б представлены графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов Miro - Silver 4 и Miro - Silver 27 в реальных условиях.



а

б

Рисунок 3.3.2 – Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов: а – Miro-Silver 4; б – Miro-Silver 27

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы об отражении образцов фирмы Alanod: при выпуске на заводе образцы сразу же измеряют на выявление коэффициента отражения (КО). При измерении в лабораторных условиях на коэффициенте отражения сказались различные микродефекты образцов. Из-за измерения КО во всем диапазоне длин волн, а

не в одном (например, УФ – диапазоне), коэффициент не соответствует числу, заявленному производителем. По этой же причине графики получились волнообразные, а не прямые линии. Так же из-за покрытия материала анодированной пленкой графики получаются волнообразные. В связи с этими причинами произошла потеря $KO > 20\%$.

Следующий образец, коэффициент которого измерялся, был White 98. Этот вариант представляет собой белую плёнку, которую можно нанести на любую поверхность. Кроме того возможно применение различных технологий обработки, например, тепловой или вакуумной. Возможно изготовление пленки с самоклеящимся слоем [14]. Общее светоотражение составляет более 98%, рабочая температура ниже 80 °С. График зависимости коэффициента отражения от длины волны образца представлен на рисунке 3.3.3.а.

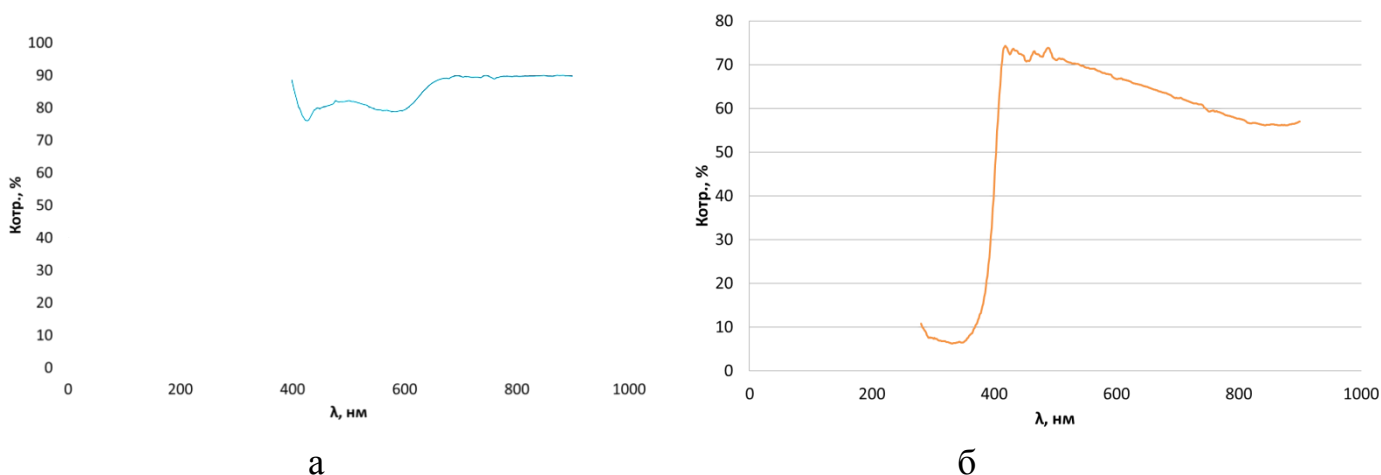


Рисунок 3.3.3 – Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов: а – White 98 Film; б – WO Metal

Еще один образец фирмы Alanod: White Optics – полимерное покрытие на металлической (алюминиевой или стальной подложке). В этом случае покрытие White Optics наносится на металл специальным запатентованным способом [14]. Что касается светоотражения, то оно больше 96%, а рабочая температура менее 80 °С, как заявляет производитель. График зависимости

коэффициента отражения от длины волны образца представлен на рисунке 3.3.3.б.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Образцы со временем деградируют, т.е. на них появляются царапины, оседает пыль и пр.;

2. Из-за измерения коэффициента отражения во всем диапазоне длин волн, а не в одном (например, видимом диапазоне), коэффициент не соответствует числу, заявленному производителем. По этой же причине графики получились волнообразные, а не прямые линии. В связи с этими причинами произошла потеря КО на 10-20%.

Следующий образец, коэффициент отражения которого измерялся, образец мягкой оконной фольги, прозрачность которой равна меньше 100% (рис. 3.3.4).

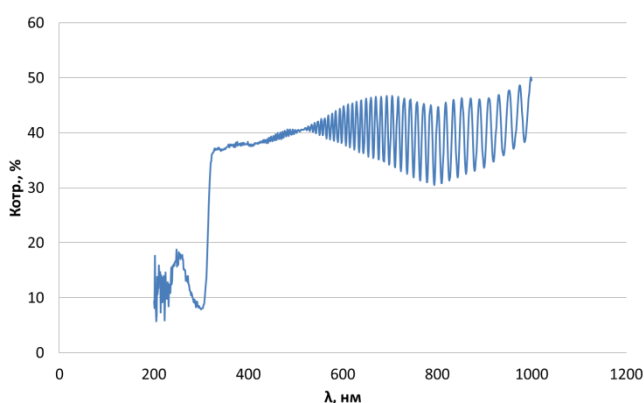


Рисунок 3.3.4 – График зависимости коэффициента отражения от длины волны образца фольги оконной (мягкой)

Что касается отражения от образца мягкой фольги, то учитывая, что фольга полупрозрачная, при измерении КО сказалась интерференция на тонких пленках. Поэтому график зависимости коэффициента отражения от длины волны получился волнообразный, а не прямая линия.

Следующим образцом, который измерялся, была алюминиевая фольга (рис. 3.3.5.а). Алюминиевая фольга – это материал, свойства и характеристики которого уникальны. Она не токсична, благодаря чему сфера ее применения значительно расширяется. Это отличный барьерный материал.

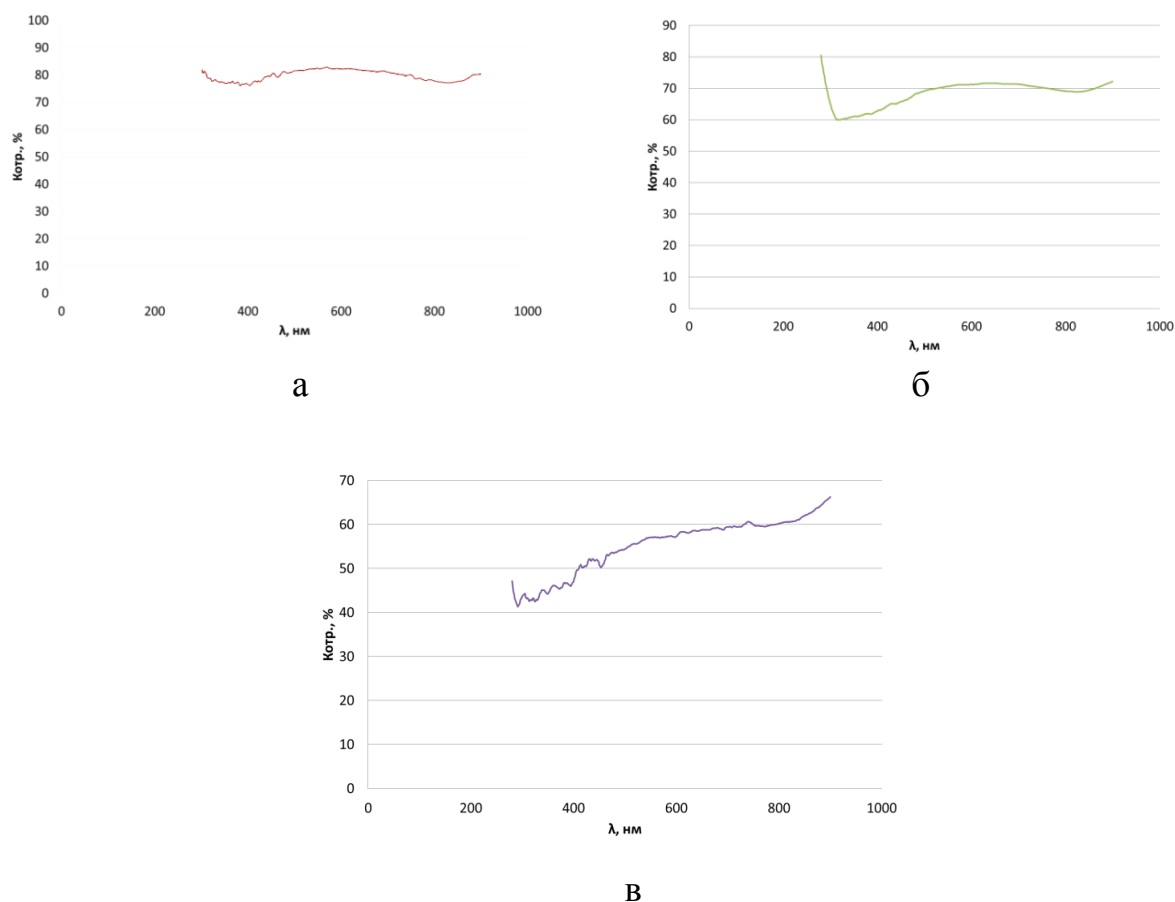


Рисунок 3.3.5 – Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов: а – алюминиевой фольги; б – отражателя в прожекторе; в – растрового отражателя

Нельзя не отметить структуру такого материала, как алюминиевая фольга. Она представляет собой упорядоченную плотную сетку, состоящую из атомов металла. Для данного вида фольги характерен высокий коэффициент отражения тепла и изоляции от пара.

Эксплуатационные характеристики алюминиевой фольги:

- Прекрасные теплоизоляционные качества;
- Отличная пластичность, алюминиевая фольга это материал, которому можно придать абсолютно любую форму;
- Устойчивость к коррозии, и низкая восприимчивость к воздействию света и воды. Это чрезвычайно долговечный материал;

- Хорошие эстетические качества и удобство использования благодаря легкости материала [15].

Так же были измерены графики зависимости коэффициента отражения от длины волны образцов: отражателя в прожекторе (рис. 3.3.5.б) и растрового отражателя (рис. 3.3.5.в).

Исходя из графиков отражения фольги и образцов отражателей, можно сделать вывод, что при измерении в лабораторных условиях на коэффициенте отражения сказались микродефекты (царапины, частицы пыли и пр.) образцов. Из-за измерения КО во всем диапазоне длин волн, а не в одном (например, ИК – диапазоне), коэффициент не соответствует числу, заявленному производителем. По этой же причине графики получились волнообразные, а не прямые линии. В связи с этим произошла потеря коэффициента отражения на 5-10%.

Следующий образец, у которого измерялся коэффициент отражения, - пенофол (рис. 3.3.6). Пенофол - это многослойный материал, который состоит из основы и полированной алюминиевой фольги. В качестве основы используются полиэтиленовые пены разной плотности, структуры и толщины. Фольга наносится методом термической сварки и отполирована до коэффициента отражения не менее 97%. Толщина фольги 20 микрон. Толщина пенополиэтилена варьируется от 2мм до 10мм. По отдельным требованиям, для «экстремальных ситуаций», производятся толщины до 40мм [16].

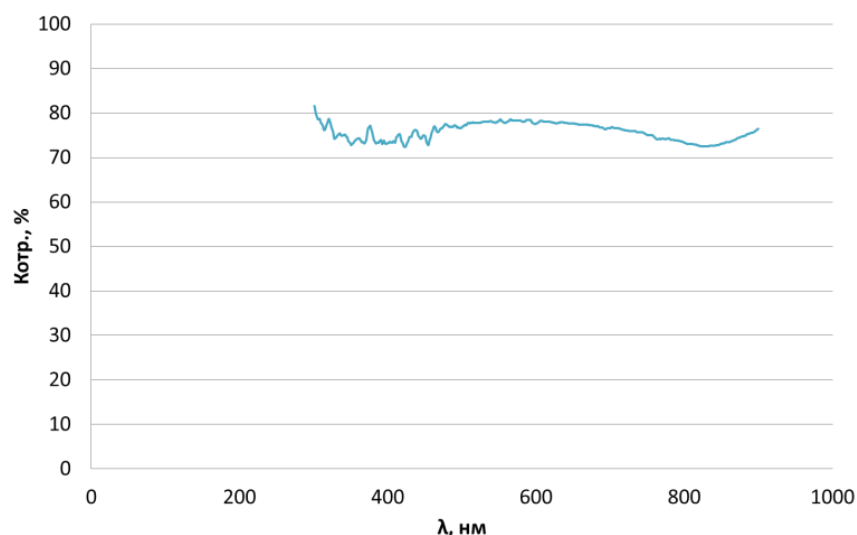


Рисунок 3.3.6 – График зависимости коэффициента отражения от длины волны образца пенофола

Судя по полученному графику, можно сказать, что при измерении в лабораторных условиях на коэффициенте отражения сказались микродефекты образца, мягость материала. Из-за измерения КО во всем диапазоне длин волн, а не в одном (например, ИК – диапазон), график получился волнообразный, а не прямая линия. В связи с этими факторами произошла потеря коэффициента отражения на 10-15%.

График, содержащий спектры отражений всех образцов, отображен на рисунке 3.3.7.

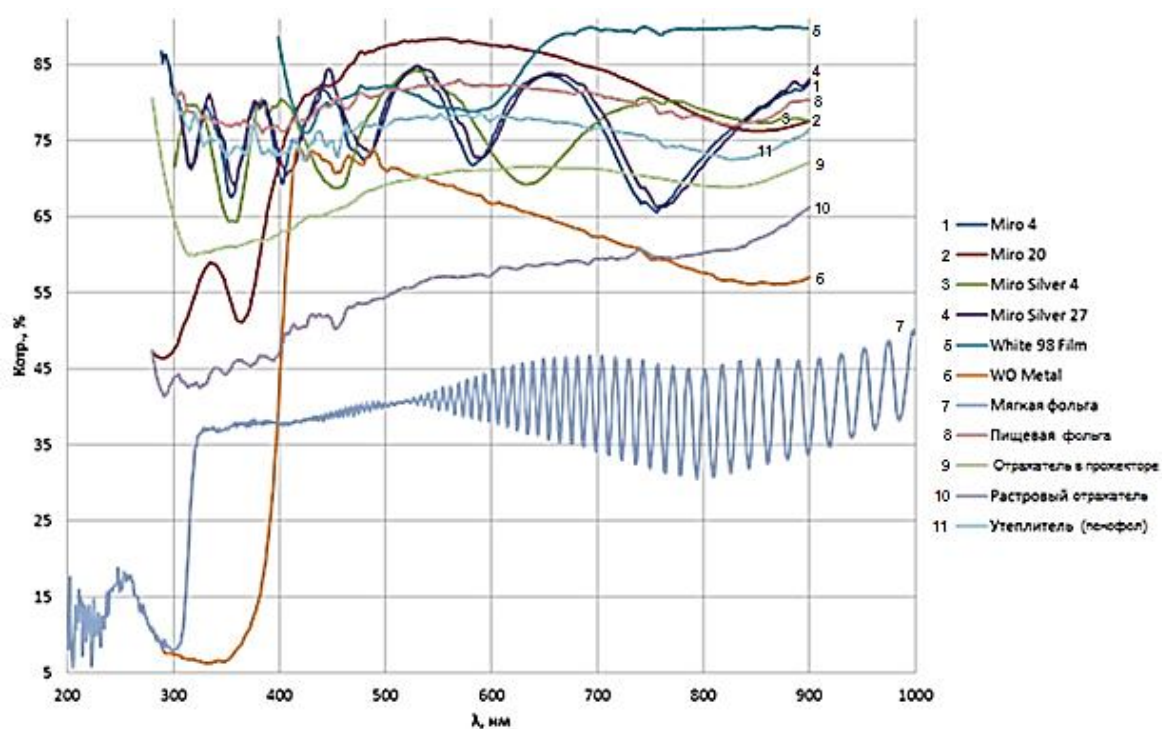


Рисунок 3.3.7 – Полученные результаты спектра отражения всех измеренных образцов для сравнения коэффициента отражения

Из всех представленных 11 образцов, можно выделить 3 образца, которые имеют большие коэффициенты отражений и равномерное распределение спектра отражений. Для наглядности, графики зависимости коэффициента отражения от длины волны данных материалов представлены на рисунке 3.3.8.

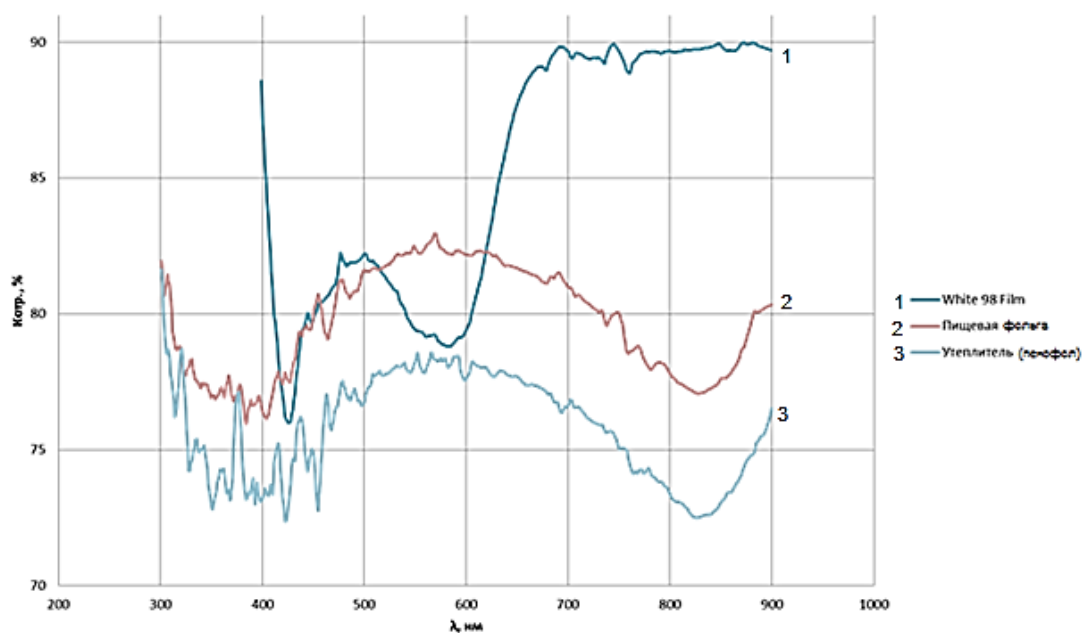


Рисунок 3.3.8 – Графики спектров отражения материалов: Alanod White 98 Film, пищевая фольга и пенофол

Из рисунка 3.3.8 видно, что у пищевой фольги и отражателя фирмы Alanod White 98 Film самые высокие коэффициенты отражения и наиболее равномерные спектры отражения относительно остальных образцов. Актуальным вопросом остается цена – фольга имеет стоимость ниже, чем образец White 98 Film. А также фольга – очень распространенный и доступный материал, в отличие от отражателя White 98 Film, который нужно заказывать у производителя. Недостатком обоих образцов является то, что некоторые виды фольги подвержены окислению при контакте с водой, равно как и отражатель White 98 Film производитель советует оберегать от намокания. По результатам измерений коэффициент отражения образца White 98 Film $\geq 90\%$.

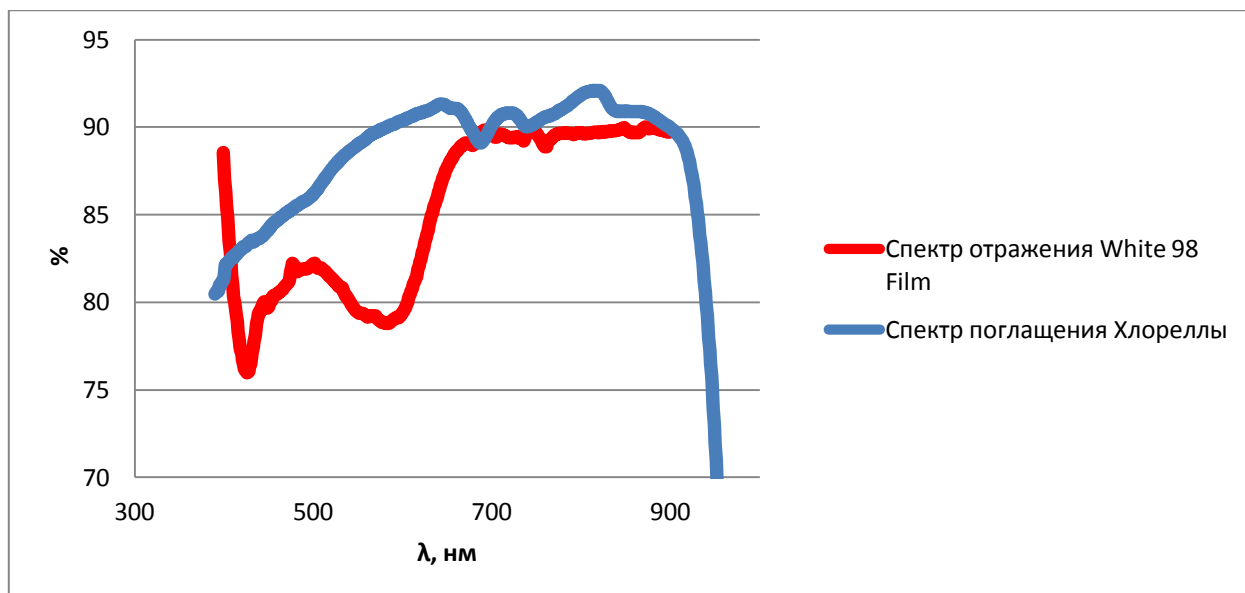


Рисунок 3.3.9 – Графики спектров отражения Alanod White 98 Film и поглощения хлореллы

На рисунке 3.3.9 представлены в относительных единицах графики спектров отражения Alanod White 98 Film и поглощения хлореллы. Как видно из графиков, геометрия отличается незначительно. Более того, подражание двух графиков составляет от 88 до 100 % по отношению друг к другу. В связи с этим, именно образец Alanod White 98 Film наиболее оптимально использовать в фотобиореакторе как отражатель.

Заключение

В ходе проведенных работ и исследований по созданию энергоэффективного и автоматизированного фотобиореактора нового поколения для выращивания хлореллы в искусственных условиях было выявлено, что разработка будет обладать рядом преимуществ, перед существующими аналогами.

Применение светодиодных модулей имеет большие перспективы в области выращивания хлореллы, если при их использовании обеспечить необходимый тепловой режим, и подобрать спектральный состав, который будет соответствовать спектру поглощения суспензии хлореллы. Возможность выбрать оптимальный спектр для хлореллы появляется так же при использовании твердотельных ИИ (RGB). Но данное исследование требует ряд экспериментальных и исследовательских работ, которые планируется выполнить в дальнейшем.

Помимо источников излучения были исследованы отражающие покрытия для фотобиореактора на предмет величины коэффициента отражения и спектра отражения. Из всех промеренных 11 образцов, можно выделить 2 образца: пищевая фольга и отражатель фирмы Alanod White 98 Film. Касаемо цены, фольга имеет стоимость ниже, чем образец White 98 Film, а также фольга – очень распространенный и доступный материал, в отличие от отражателя White 98 Film, который нужно заказывать у производителя. Недостатком обоих образцов является то, что некоторые виды фольги подвержены окислению при контакте с водой, равно как и отражатель White 98 Film производитель не советует особо подвергать воздействию влаги. По результатам измерений коэффициент отражения образца White 98 Film $\geq 90\%$, поэтому именно этот материал из предложенных образцов максимально подходит для использования в фотобиореакторе.

Была подобрана оптимальная форма резервуара – цилиндр, а так же доказано, что форма – прямоугольный параллелепипед, предлагаемый конкурентами, имеет не эффективную форму.

Так в проекте имела место проработка автоматизации, ведь применение системы автоматического управления излучением позволит сохранить внутри резервуара необходимую освещенность и температурный режим. На примере экспериментальной установки видно, что автоматизация процесса выращивания хлореллы и использование светодиодных источников оказались энергоэффективны, снизилась энергетическая потребность установки.

Все приведенные выше исследования, станут отправной точкой по сборке образца, у которого скорость получения и качество готового продукта должны выйти на новый уровень, при экономии затрат на электроэнергию и работу обслуживающего персонала.

Фотобиореактор сможет широко применяться в крупных агропромышленных и сельскохозяйственных предприятиях, а учитывая небольшие размеры разработанной установки и предполагаемая простота использования, также в частном сельском хозяйстве и малых фермах.

Список литературы:

1. Арьянова Э. Д. , Иванова С. С. , Карпова О. С. , Трофимчук О. А. , Шевченко И. Г. , Алексеев М. А. , Коршунов К. О. Культиватор для выращивания хлореллы в искусственных условиях // Архитекторы будущего: сборник научных трудов Всероссийской научной школы по инженерному изобретательству, проектированию и разработке инноваций, Томск, 28-30 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 18-23.
2. Научно исследовательский институт альгобиотехнологии // Использование хлореллы для выращивания и откорма сельскохозяйственных животных. Пенза, 2004 - С. 8.
3. Лисовский Г. М. Управляемое культивирование микроводорослей. Изд. «Наука», 1964. – 153с.
4. Мананкина Елена, Мельников Станислав. Научно – практический журнал "Наука и инновации" // Использование хлореллы в кормлении сельскохозяйственных животных. Номер 8(90) 2010.
5. Складнев Д. А. Интернет-журнал «Коммерческая биотехнология». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cbio.ru/page/43/id/3433/>, свободный. Дата обращения: 1.02.16.
6. Официальный сайт компании ООО "Энерготехнопром". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.biovet-service.ru/uslugi/chlorellarost.html>, свободный. Дата обращения: 10.02.16.
7. Официальный сайт компании "Агросервер" (Российский агропромышленный сервер). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.agroserver.ru/b/fotobioreaktory-dlya-vyrashhivaniya-mikrovodorosley-khlorella-i-s-167300.htm>, свободный. Дата обращения: 10.02.16.
8. Мещерякова Ю.В. «Культивирование микроводоросли хлорелла с целью получения биотоплива»/ Ю.В. Мещерякова, С.А. Нагорнов// университет им. В.И. Вернадского, Вопросы современной науки и практики – 2012 – специальный выпуск (43) - С. 33–36.

9. Официальный сайт ООО «Башкирская птица». Режим доступа: <http://башптица.рф/> 2013/10/09/хлорелла/, свободный. Дата обращения: 20.11.15
10. Официальный сайт DIALux Help: расчет и проектирование. Режим доступа: <http://www.dialux-help.ru/>, свободный. Дата обращения: 28.08.15.
11. Алексеев М. А. , Арьянова Э. Д. , Иванова С. С. , Карпова О. С. , Коршунов К. О. , Трофимчук О. А. , Шевченко И. Г. Фотобиореактор для культивирования хлореллы // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. - 2015 - №. 3. - С. 221-223.
12. Официальный сайт компании "БПС". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bps-kontakt.ru/index.php/production/miro>, свободный. Дата обращения: 21.09.15.
13. Официальный сайт компании "БПС". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bps-kontakt.ru/index.php/production/msilver>, свободный. Дата обращения: 21.09.15.
14. Официальный сайт компании "БПС". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bps-kontakt.ru/production/wo>, свободный. Дата обращения: 21.09.15.
15. Официальный сайт компании "Folimpex". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.folimpex.ru/articles/183/>, свободный. Дата обращения: 21.09.15.
16. Официальный сайт группы компаний "Амитег Строй". [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.isolaciya.ru/reflect_teploisolation/penofol/, свободный. Дата обращения: 21.09.15