

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
Гимназия № 441 Фрунзенского района Санкт-Петербурга  
Центр детского и молодежного инженерного творчества ФГБОУ ВО РГПУ им. А.И. Герцена

# Разработка фотобиореактора для производства добавок в пищу

:  
Проект выполнила:  
Соколова Светлана,  
ученица 10 класса  
ГБОУ Гимназии № 441  
Руководители проекта: директор ЦД и МИТ  
ФГБОУ ВО РГПУ им.А.И.Герцена  
Сперанский М.М.  
Учитель биологии ГБОУ Гимназии № 441  
Деларова Е.В.

Санкт-Петербург  
2024

## Содержание

Паспорт проекта .....	3
Введение. Актуальность темы .....	4
Глава 1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Что такое биореактор?.....	5
1.2. Почему мы выбрали именно хлореллу? .....	5
1.3. Строение и питание хлореллы.....	5
1.4. Размножение хлореллы.....	6
1.5. Полезные свойства хлореллы.....	6
1.6. История и конструкция различных биореакторов.....	7
1.7. Типы биореакторов и их применение .....	7
1.8. Функции фотобиореактора.....	8
1.9. Какие компании занимаются разработкой и продажей суспензии хлореллы.....	9
Глава 2. Методика исследований.....	10
2.1. Состав и производитель добавок и удобрений .....	10
2.2. Оборудование .....	10
2.3. Какая у нас была последовательность эксперимента.....	10
2.4. Сбор биореактора и его анализ.....	10
Глава 3. Результаты исследований.....	11
3.1. Первый эксперимент.....	11
3.2. Второй эксперимент.....	12
3.3. Третий эксперимент.....	14
3.4. Итоговый эксперимент.....	16
3.5. Почему нужно смотреть именно на показатель мутности.....	18
3.6. Почему менялась температура суспензии хлореллы.....	18
3.7. Стоимость экспериментальной установки и ее эксплуатации за год.....	18
Вывод. Итог. Оптимальные условия для хлореллы.....	18
Список литературы .....	19
Приложение .....	20

## Паспорт проекта (заполняется совместно с руководителем проекта)

### 1. Исполнители учебного проекта

Образовательная ступень	<input type="checkbox"/> Начальная <input type="checkbox"/> Средняя <input type="checkbox"/> Старшая
Класс	10
Участники проектной группы (ФИО)	Соколова Светлана Геннадьевна
Руководитель проекта (ФИО)	Сперанский М.М. ЦД и МИТ ФГБОУ ВО РГПУ им.А.И.Герцена Деларова Е.В. учитель биологии ГБОУ Гимназии № 441
Рецензент (ФИО)	

2. Тема проекта. **Разработка фотобиореактора для производства биодобавок в пищу**

3. Цель проекта. **Разработать конструкцию биореактора и технологию культивирования хлореллы с минимальной себестоимостью**

4. Экспериментальные задачи проекта:

Изучить воздействие на рост хлореллы нескольких факторов:

- 1) Концентрация базовой смеси солей, микроэлементов и азотной добавки (аммиачной селитры)
- 2) Освещенность
- 3) Скорость аэрации

5. Тип проекта

По содержанию	<u>Монопредметный</u>	
	Межпредметный	
	Надпредметный (на основе сведений, не входящих в учебную программу)	x
По продолжительности	Краткосрочный	x
	Долгосрочный	
По количеству участников	Индивидуальный	
	Групповой	x
	Коллективный	
По преобладающему виду деятельности	Практико-ориентированный (прикладной)	x
	Исследовательский	x
	Информационный	
	Ролевой (игровой)	
	Творческий	
По преобладающему направлению деятельности	Учебный	
	Профорориентационный	x
	Социальный	

6. Необходимое оборудование: Прожектора, суспензия хлореллы, аэраторы, цилиндры объемом 1,5 л, термометры, весы для мелких граммовок, удобрение «Акварин», азотная добавка (аммиачная селитра), пипетка, датчик мутности, компьютер.

5. Предполагаемый продукт:  Материальное изделие     Проектная папка  
 Исследовательская работа     Другое

## **Введение**

Работа выполнена во время обучения в региональной осенней проектной школе-интенсиве на базе Кванториума РГПУ им. А.И.Герцена. Наша команда состояла из учащихся разных школ и классов, но несмотря на это мы объединились для создания и изучения биореактора.

В настоящее время исследования Арктики приобретают большую популярность. Исследования Арктики имеют важное стратегическое, экономическое значение, ученых всего мира изучают арктические экосистемы, влияние на них увеличивающейся антропогенной нагрузки. Реализация арктических проектов предполагает длительное пребывание человека в экстремальных условиях Арктической зоны. Люди, живущие там, не получают достаточное количество витаминов для нормальной жизнедеятельности, что в свою очередь связано с полугодовой полярной ночью, необычным фотопериодизмом, повышенной электромагнитной активностью и радиацией, несбалансированным питанием, своеобразным составом питьевой воды и т.д. [6]

Современные исследования хлореллы направлены на изучение воздействия добавок из микроводоросли на организм человека в целом и в экстремальных условиях существования.

Исследования по культивированию хлореллы проводились с середины 20 века. Первые опыты по использованию хлореллы для создания замкнутых экосистем были неудачными. [1] Хлореллу давно и успешно используют для очистки сточных вод. В XXI веке в западных странах (например, в США и Канаде) хлорелла стала использоваться в качестве добавки к пище. [16] На мировом и российском рынке сырья существует потребность в получении сравнительно недорогой и высококачественной биомассы фотосинтезирующих микроорганизмов, содержащих ряд ценных и незаменимых органических веществ, используемых в различных отраслях народного хозяйства. Недавно было доказано, что добавки этой микроводоросли благотворно действуют на млекопитающих, птиц и даже растений. В животноводстве хлорелла применяется как ингредиент для кормов, а также считается чрезвычайно ценной биологически активной кормовой добавкой. Дают ее крупному рогатому скоту, свиньям и птицам для лечения и профилактики заболеваний, регуляции метаболизма, повышения поедаемости кормов и увеличения продуктивности. Эта же добавка в короткие сроки повышает аппетит у телят, подвижность и тонус организма; улучшает качество шерсти. Добавление хлореллы в корма несушек положительно влияет на яйценоскость, увеличивает количество и качество отложенных яиц, улучшает показатели вывода. В свиноводстве тоже применяют хлореллу: как кормовая добавка, она улучшает питательную ценность мяса и повышает его нежность. Хлорелла в рационе скота и птицы повышает разнообразие микрофлоры кишечника – а это означает, что питательные вещества из корма усваиваются животными значительно лучше. [4]

Японские ученые в настоящее время проводят экспериментальные исследования на группе добровольцев по влиянию многокомпонентной добавки, полученной из хлореллы, на организм человека. [11]

### **Актуальность**

На данный момент влияние экстремальных условий Арктики на человека мало изучены. Единственное, что мы знаем — это нехватка витаминов в организмах полярников. Их недостаток влияет на здоровье и работоспособность. Чтобы решить эту проблему ученые ведут исследования возможности использования суспензией хлореллы.

### **Цель данного исследования:**

Разработать конструкцию биореактора и технологию культивирования хлореллы с минимальной себестоимостью.

## Глава 1. Теоретическая часть.

### 1.1 Что такое биореактор?

Биореактор (фитобиореактор) - устройство для выращивания микроводорослей. Прямое назначение нашего биореактора - выращивание микроводорослей хлореллы.

### 1.2 Почему мы выбрали именно хлореллу?

В хлорелле содержится много пигмента хлорофилла, окрашивающего листья растений в зелёный цвет. По структуре хлорофилл схож с молекулами гемоглобина в крови человека, поэтому в медицине его используют для лечения анемий.

Питательность водоросли обусловлена большим количеством белковых соединений. Уникальный состав микроорганизма включает в себя витамины группы А, В, С, D, Е, и К, полинасыщенные жиры и аминокислоты, а также микроэлементы: железо, магний, калий и другие.

Также у хлореллы крайне высокая скорость деления (количество клеток за сутки может увеличиваться в несколько раз). Но самое главное она пригодна к употреблению в пищу человеком и абсолютным большинством сельскохозяйственных животных. [12]

### 1.3 Строение и питание хлореллы

Хлорелла представляет собой низшее растение округлой формы, которое причисляют к группе зеленых водорослей. Организм является одноклеточным и автотрофным.

Автотрофность — это способность организма производить органические вещества на свету при помощи хлорофилла с использованием воды, углекислого газа, света.

Хлорелла (лат. *Chlorella vulgaris*) – это одноклеточная, зеленая микроводоросль существует на Земле с древнейших времен. Впервые была обнаружена в 1890 году датским микробиологом М. Бейжерником. В начале прошлого века ее начали культивировать в качестве богатого источника протеина. Позже были выявлены ее многочисленные полезные свойства, а также утверждение применения в качестве здорового питания для космонавтов. [17].

#### Классификация:

Царство – Plantae

Отдел – Chlorophyta

Класс – Trebouxiophyceae

Порядок – Chlorellales

Семейство – Chlorellaceae

Род – Chlorella

Вид – *Chlorella vulgaris* M. Beijerinck [*Chlorella vulgaris*].

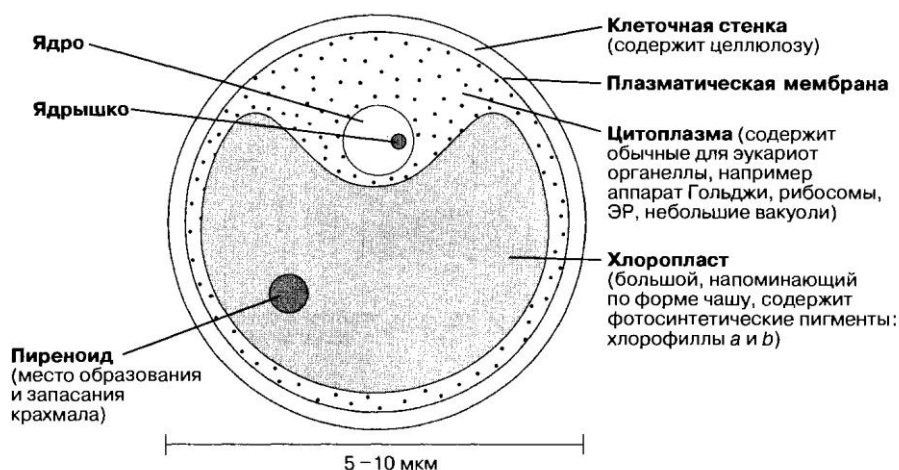


Рис. 1 – строение хлореллы [2]

1. Клетки окружены жесткой и сложной клеточной стенкой. Клеточная стенка состоит из нескольких слоев, включая внешний слой гликопротеинов, средний слой целлюлозы и внутренний слой пектина. Клеточная стенка обеспечивает структурную поддержку и защиту клетки.

2. Форма клеток: обычно имеют сферическую или эллипсоидную форму. Клетки маленькие и микроскопические, их диаметр составляет от 2 до 10 микрометров.

3. Вакуоли – это пузырьки, заполненные жидкостью, которые находятся в цитоплазме хлореллы. Они выполняют роль хранилища веществ, участвуют в регуляции осмотического давления и поддерживают форму клетки.

4. Хроматофор содержит многочисленные хлоропласты, которые отвечают за фотосинтез. Это мембранно-связанные органеллы, содержащие пигменты хлорофилла, которые придают хлорелле характерный зеленый цвет. Эти пигменты поглощают световую энергию для синтеза сахаров и других органических соединений.

5. Обладают четко выраженным ядром, которое является управляющим центром клетки. Ядро содержит генетический материал в виде ДНК, который несет в себе инструкции для роста, размножения и других клеточных процессов.

6. Пиреноид: представляет собой небольшую, богатую белком структуру внутри хлоропласта. Пиреноид участвует в фиксации углекислого газа в процессе фотосинтеза, способствуя преобразованию углекислого газа в органические соединения.

7. Цитоплазма: содержит различные органеллы, включая митохондрии для производства энергии, аппарат Гольджи для модификации и секреции белков и эндоплазматический ретикулум для синтеза белков и липидов. [12]

#### **1.4 Размножение хлореллы**

Размножение хлореллы происходит путем повторного деления сначала хроматофора и пиреноида, а затем и всего содержимого каждой клетки на несколько равных частей, от 2 до 16, которые остаются некоторое время окруженными материнской оболочкой, а после разрыва и её исчезновения, оказываются свободно лежащими, быстро увеличиваются в размерах и через некоторый промежуток времени повторяют тот же цикл развития. Каждые 12 часов количество хлореллы увеличивается в 2–4 раза.

Размножение – бесполое [12]

#### **1.5 Полезные свойства хлореллы**

В составе клеток хлореллы обнаруживается 45% белка, 20% жира, 20% углеводов, 5% клетчатки и 10% витаминов (бета-каротин, витамины Е и С, группа В) и минералов (марганец, медь, кобальт, железо, цинк, молибден, кальций, йод, магний, германий и другие) [4].

Белок хлореллы вдвое питательней соевого белка, к тому же, превосходит растительные кормовые белки: содержит он больше 40 аминокислот, и среди них все незаменимые (гамма-аминомасляная и глютаминовая кислоты, аланин, аспарагиновая кислота, цистин, глицин, тирозин, серин, пролин, β-аланин). [12]

Питательная ценность: считается высокопитательным источником пищи. Она богата основными питательными веществами, такими как витамины (включая витамины А, С, Е и витамины группы В), минералы (такие как железо, магний и цинк), белки и аминокислоты. Также содержит антиоксиданты, хлорофилл и пищевые волокна. Эти питательные компоненты делают хлореллу ценной диетической добавкой и способствуют общему здоровью и благополучию.

1. Детоксикация: была изучена на предмет ее потенциальных детоксикационных свойств. Она может способствовать выведению из организма тяжелых металлов — ртути и свинца. Клеточная стенка хлореллы имеет уникальную структуру, которая может связываться с токсинами, способствуя их выведению. Также считается, что она повышает активность некоторых ферментов, способствующих детоксикации организма.

2. Поддержка иммунной системы: содержит соединения, которые могут поддерживать функцию иммунной системы. Было обнаружено, что она повышает активность естественных клеток-киллеров, макрофагов и других иммунных клеток. Усиливая иммунную функцию, хлорелла может помочь организму защититься от инфекций и улучшить общий иммунный ответ.

3. Антиоксидантная активность: содержит различные антиоксиданты, включая хлорофилл, каротиноиды и витамины. Эти антиоксиданты помогают нейтрализовать вредные свободные радикалы в организме, уменьшая окислительный стресс и потенциальное повреждение клеток и тканей. Антиоксидантная активность хлореллы может способствовать ее потенциальному антивозрастному и защитному действию.

4. Здоровье пищеварительной системы: хлорелла является источником пищевых волокон, которые могут поддерживать здоровье пищеварения. Клетчатка способствует регулярной работе кишечника, помогает поддерживать здоровье кишечника и способствует росту полезных кишечных бактерий. Содержание клетчатки в хлорелле может способствовать улучшению пищеварения и общего состояния желудочно-кишечного тракта.

5. Потенциальное противовоспалительное действие: была изучена на предмет ее потенциальных противовоспалительных свойств. Определенные соединения, содержащиеся в хлорелле, такие как хлорофилл и полисахариды, продемонстрировали противовоспалительный эффект в лабораторных исследованиях. Эти свойства могут иметь значение для лечения заболеваний, связанных с воспалением.

6. Устойчивое развитие и экологические преимущества: водоросль привлекла к себе внимание благодаря своим потенциальным экологическим преимуществам. Ее можно выращивать, используя минимальные земельные и водные ресурсы по сравнению с традиционным растениеводством. Кроме того, способность хлореллы поглощать углекислый газ и выделять кислород в процессе фотосинтеза делает ее потенциальным кандидатом для связывания углерода и сокращения выбросов парниковых газов.[15]

## **1.6 История и конструкция различных биореакторов**

Для проведения исследований и получения реальных результатов был изобретен ферментер, который имеет вертикально положение, а не горизонтальное для экономии пространства. Жидкость движется, перемешивается и насыщается в данном типе биореактора с помощью эрлифтовой системы.

При проектировании промышленных биореакторов одним из главных условий было наличие большего освещения в установке, что способствовало появлению светодиодов с их широкими потенциальными возможностями, так как они имеют малые размеры, экономят энергию и имеют высокую насыщенность света.[14]

## **1.7 Типы биореакторов и их применение**

### **1) Биореакторы непрерывного действия с мешалкой**

- Наиболее эффективные непрерывные методы на сегодняшний день основаны на дрожжах и бактериях, где наиболее желательными продуктами являются клетки.
- Производство первичных метаболитов, ферментов и аминокислот.
- Процесс производства спирта (продукт, очевидно, связанный с механизмами роста или производства энергии).
- Наиболее популярным является процесс активного ила, применяемый в очистных сооружениях.

### **2) Биореакторы с барботажной колонной**

- Реактор широко используется для выращивания чувствительных к сельди организмов. Например, растительные клетки и плесень
- Химическое и фармацевтическое производство.
- Также для процессов брожения.

### 3) Эрлифтные биореакторы

- Реактор обычно используется в культуре чувствительных к сдвигу организмов.
- Воздушные биореакторы обычно используются для аэробной биотехнологии. Они обеспечивают контролируемый поток жидкости в системе рециркуляции путем перекачки.
- Из-за высокой эффективности эрлифтные биореакторы иногда предпочтительнее, например, для производства метанола, очистки сточных вод, производства одноклеточного белка.

### 4) Реакторы с уплотненным слоем

- Они используются с иммобилизованными или твердыми биокатализаторами.
- Высокая консервация на массу катализатора по сравнению с другими каталитическими реакторами. Таким образом, наиболее предпочтителен ферментер.
- Используется очистка сточных вод.

### 5) Биореактор с псевдооживленным слоем

- Эти реакторы могут использовать высокую плотность частиц и снижать объемную плотность жидкости.
- Кипящий слой используется как технический процесс, способный обеспечить высокий уровень контакта между газами и твердыми веществами.
- В псевдооживленном слое можно использовать характерный набор основных свойств, необходимых для современных технологических процессов и химической технологии.
- Пищевая промышленность: псевдооживленный слой используется для ускорения заморозки в некоторых туннельных морозильных камерах индивидуальной быстрой заморозки (IQF).
- Жидкость, используемая в псевдооживленных слоях, может также содержать жидкость каталитического типа.
- Кипящие слои также используются для эффективной сушки материалов.
- Технология псевдооживленного слоя в сушилках повышает эффективность за счет того, что вся поверхность сушильного материала находится в подвешенном состоянии и, следовательно, подвергается воздействию воздуха.

### 6) Фотобиореактор

- Основное применение фотобиореакторов — процессы фотосинтеза, включающие рост растительной биомассы или рост микроводорослей в ограниченных условиях.

### 7) Мембранный биореактор

- Использование широко распространилось и быстро растет как в исследовательских, так и в коммерческих приложениях.
- Разработано несколько вариантов систем MBR, и в настоящее время система MBR широко используется для очистки сточных вод из нескольких источников.

### 8) Вращающийся барабанный биореактор

- Вращающийся барабанный биореактор используется для проведения биохимических реакций, таких как ферментация, при которых микроорганизмы превращают сырье в конечный продукт. В данном случае вращение барабана способствует равномерному смешиванию компонентов и обеспечивает оптимальные условия для проведения реакций.

### 9) Туманный биореактор

- Они особенно полезны в исследовательских и промышленных условиях, где требуется производство соединений растительного происхождения или размножение растительных клеток.

### 10) Биореактор с иммобилизованными клетками



- Находят применение в ферментационных отраслях, где выгодно разделить фазы производства и роста, что позволяет эффективно контролировать и оптимизировать процесс.

#### 11) Биореактор с активным илом

- Реактор используется для очистки сточных вод и сточных вод.
- Этот конкретный реактор используется для производства биотоплива, такого как биогаз, биоэтанол и так далее. например, биотопливо, которое производится из отходов молока.

#### 12) Погружной мембранный биореактор

- Этот тип биореактора в основном используется для обработки текстильных и кожевенных отходов вместе со сточными водами и для повторного использования отходов аквакультуры.

#### 13) Биореактор с обратной мембраной

- Биореактор с обратной мембранной используется для разделения биологических материалов, таких как клетки или белки, от других веществ в растворе. Он позволяет эффективно очищать и концентрировать биопродукты. Это важно для многих процессов, таких как производство биологически активных веществ или очистка сточных вод. [14]

### 1.8 Функции фотобиореактора

1. Фильтрация воздуха: Растения в фитобиореакторе могут фильтровать вредные вещества из воздуха и преобразовывать их в биологически безопасные соединения. Это помогает улучшить качество воздуха в помещении.

2. Очищение воды: Растения в фитобиореакторе могут использоваться для очистки воды от загрязнений и нитратов. Они поглощают эти вещества через корни и преобразуют их в безопасные продукты.

3. Увлажнение воздуха и поддержание влажности: Растения в фитобиореакторе испаряют воду через свои листья, увлажняя воздух и поддерживая комфортный уровень влажности для людей.

4. Декоративная функция: Фитобиореакторы могут использоваться для создания живой зелени и красоты в помещении. Различные виды растений могут быть использованы для создания эстетически привлекательной среды.

5. Повышение настроения и снижение стресса: Исследования показывают, что нахождение рядом с растениями может улучшить настроение, снизить уровень стресса и повысить продуктивность.

6. Обеспечение кислорода: Растения в фитобиореакторе производят кислород в результате фотосинтеза, что положительно сказывается на качестве воздуха в помещении и благополучии людей.

Это лишь некоторые из функций фотобиореактора. Они могут быть использованы в различных сферах, таких как домашнее хозяйство, офисы, городские парки и даже космические станции. Есть много возможностей для применения фитобиореакторов в нашей жизни.[ 14]

### 1.9 Какие компании занимаются разработкой и продажей суспензии хлореллы

#### 1) Компания ООО НПК "ДЕЛО" [7]

- Фирма ООО НПК «ДЕЛО» начинает свою историю с 1994 г.
- С 1999 г. главным направлением нашей работы является разработка и внедрение в животноводство инновационной биотехнологии хлореллы и установок для производства микроводоросли нового планктонного штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111.

#### 2) Предприятие ООО «ЛЕС» [8]

#### 3) ООО "НПК АЛЬГОТЕХ" [9]

- Выращивание микроводоросли Хлорелла в промышленных объёмах.

#### 4) «Живая хлорелла» [3]

### Глава 2. Методика исследования

#### 2.1 Состав и производитель добавок и удобрений

- Азотная добавка — сульфат аммония, фирма не важна.
- Минеральное удобрение «Акварин» (универсальный)

Фирма: Буйские удобрения. Уровень pH: 3

Форма выпуска: порошок. Вес, кг: 0,522

Состав: N общ. -18,0 %; (N-NO<sub>3</sub>- 3,9%, N-NH<sub>2</sub>-12,0%, N-NH<sub>4</sub> - 2,1%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 18% K<sub>2</sub>O - 18%, MgO - 2%, S - 1,5%, Fe (ДПТА) - 0,054%; Zn (ЭДТА) - 0,014%; Cu (ЭДТА) - 0,01%; Mn (ЭДТА) - 0,042%; Mo - 0,004%, B - 0,02%.

- Суспензия хлореллы (планктонная). Изначальная мутность: 0,3

#### 2.2 Оборудование

№ п/п	Название оборудования	Характеристики
1	Камень аэратора	Размеры: любые главное, чтобы подходили к колбе модель: PRIME PR-4104 Пьезокомпрессор Мощность: 1,8 Вт, 18 л/ч Трубку для камня аэратора выбирать по размерам (в том случае, если в комплекте нет трубки)
2	Цилиндры	Объем: 1,5 л
3	Прожектора	Аппаратура технопарка
4	Датчик мутности	Аппаратура технопарка
5	Термометр	Аппаратура технопарка

#### 2.3. Методика эксперимента.

На проведение опытов и сбора анализов была всего неделя. Все эксперименты проводились по нарастанию показателей. Из первого эксперимента стало понятно, что наилучшее удобрение для суспензии хлореллы это 3,75гр удобрения «Акварин» и 3,75 гр азотной добавки. Во втором эксперименте, во всех цилиндрах был одинаковый раствор удобрения и суспензии (то есть результаты 1-ого эксперимента были перенесены на 2-ой эксперимент). Во втором эксперименте выявилось, что с таким содержанием удобрения лучше всего использовать нужно 2 прожектора: 1 на тах яркость, 1 на middle яркость. Из этих 2-ух экспериментов мы поняли, как взаимодействуют между собой освещение и удобрения. Остается еще 2 эксперимента: один- на интенсивность аэрации, второй- контрольный.

Что бы понять, как взаимодействуют аэраторы с освещением, необходимо было во все цилиндры поставить разное количество света и аэраторов (хочу напомнить, что количество удобрений остается таким, как и было, то есть «Акварин» + азотная добавка в одинаковых пропорциях). Из третьего эксперимента можно увидеть, что лучше использовать 2 аэратора. По поводу освещения стоит брать 2 прожектора: 1 на тах яркость, 1 на middle яркость и 1 прожектор на тах яркость дают практически один и тот же результат. И так как нам надо сделать бюджетную установку, то остановимся на 1 прожектор на тах яркость.

То есть последовательность было по нарастающей для того, чтобы выявить лучший результат. Также все прожектора стояли на одном и том же расстоянии от колбы, примерно 9 см

#### 2.4 Сбор биореактора и его анализ

Все опорные данные выдал педагогический состав Кванториума РГПУ Герцена. После ознакомления с ним мы поняли сколько нужно добавлять удобрения в суспензию, при

какой температуре хлорелла погибает и рассчитали удельную скорость роста биомассы. [приложение 1]

### Глава 3. Результаты исследований

#### 3. 1. 1-й эксперимент: Влияние концентрации смеси солей, микроэлементов и азотной добавки

Этапы:

1) Берем 3 цилиндра и наливаем туда 1,5 л суспензии хлореллы с мутностью 0,3.  
2) Из пособия мы выяснили, что на 1 литр суспензии можно добавлять максимум 5 гр удобрений. Так как у нас 1,5 л суспензии, то считаем:

1л – 5 гр

1,5л – 7,5 гр

3) Чтобы узнать какое удобрение лучше влияет на культивирование хлореллы в 1 колбу мы добавляем 3,75 гр минерального удобрения «Акварин», во 2 колбу 3,75 гр минерального удобрения «Акварин» и 3,75 гр азотной добавки, в 3 колбу добавляем 7,5 гр минерального удобрения «Акварин».

4) Во всех цилиндрах должна быть одинаковая освещенность (1 прожектор) и количество аэраторов (1), так же следует соблюдать температуру, если будет больше 27°C (рис. 2)

5) Оставляем на 24 часа (рис. 2)



Рис. 2 Первая экспериментальная установка (Фото автора)

Таблица 2. Первый эксперимент. Влияние минеральных добавок на мутность раствора

	1 колба	2 колба	3 колба
Объем суспензии хлореллы	1,5 л	1,5 л	1,5 л
Освещенность	1 прожектор	1 прожектор	1 прожектор
Аэраторы	1 аэратор	1 аэратор	1 аэратор
Длительность эксперимента	24 ч	24 ч	24 ч
Исходная мутность (у.е.)	0,29	0,29	0,29
Конечная мутность (у.е.)	0,3	0,32	0,29
Азотная добавка	-	3,75 г	-
Минеральное удобрение «Акварин»	3,75 г	3,75 г	7,5 г

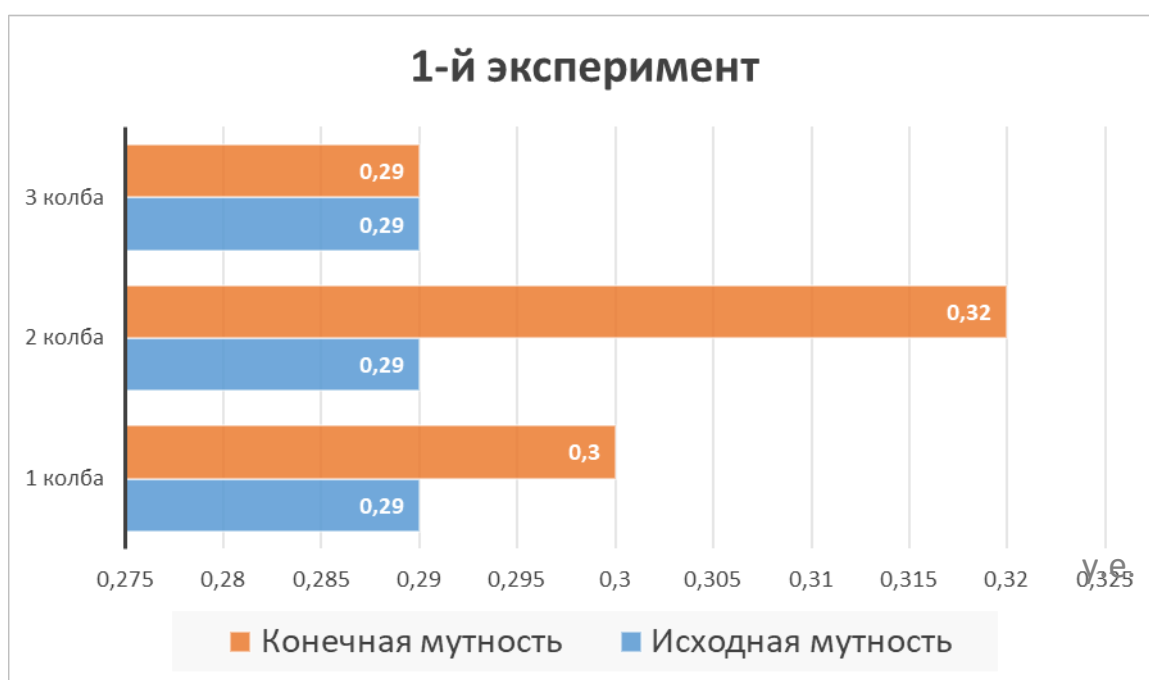


рис 3. Первый эксперимент. Влияние минеральных добавок на мутность раствора

На диаграмме (табл. 2), представленной на рисунке 2 видно увеличение мутности на 0,03 у.е. во 2-м цилиндре, в который вместе с удобрением «Акварин» была добавлена селитра. В 1-м цилиндре исходная мутность была 0,29 у.е., а конечная 0,3 у.е., то есть выросла на 0,01 у.е. В 3-ем цилиндре мутность была не изменилась, 0,29 у.е.

Вывод: для культивирования хлореллы подходит интенсивнее, если использовать минеральное удобрение «Акварин» в количестве 3,75 гр вместе с азотная добавка в количестве 3,75 гр.

### 3.2. 2-й эксперимент: Как влияет освещенность на культивирование хлореллы:

Этапы:

- 1) Берем 3 колбы и наливаем туда 1,5 л суспензии хлореллы с мутностью 0,3 (у.е.).

2) Как мы уже узнали хлорелла погибает при температуре более 27°C, поэтому будем тщательно выбирать расстояние от прожектора до колбы.

3) Количество аэраторов (1) и удобрения одинаковое (минеральное удобрение «Акварин» в количестве 3,75 гр и азотная добавка в количестве 3,75 гр.)

4) Около 1 колбы поставим 2 прожектора: 1 на тах яркость, 1 на middle яркость. Свет холодный.

5) Около 2 колбы поставим 1 прожектор на тах яркость. Свет холодный.

6) Около 3 колбы поставим 2 прожектора на тах яркость. Свет холодный.

7) Оставляем на 19 часов (рис.4)

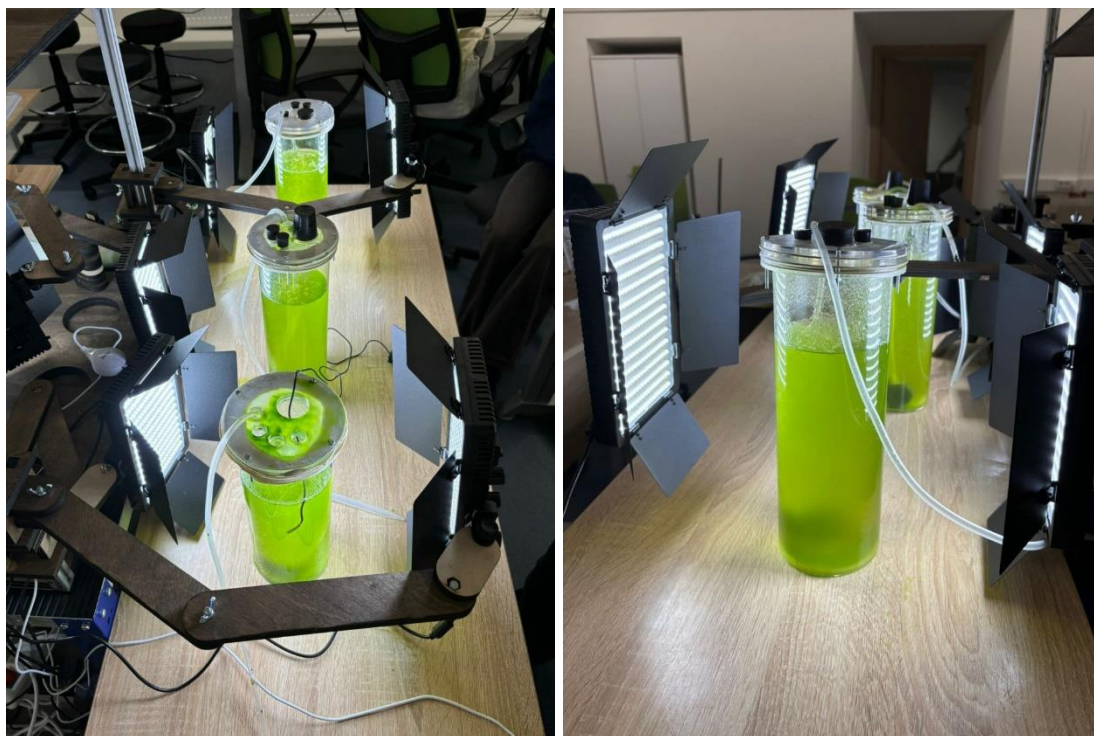


Рис. 4. Вторая экспериментальная установка (Фото автора)

Таблица 3. Второй эксперимент. Влияние освещенности на культивирование хлореллы

	1 колба	2 колба	3 колба
Объем суспензии хлореллы	1,5 л	1,5 л	1,5 л
Аэраторы	1 аэратор	1 аэратор	1 аэратор
Длительность эксперимента	19 ч	19 ч	19 ч
Освещенность	2 прожектора: 1 на тах яркость 1 на middle яркость	1 прожектор на тах яркость	2 прожектора на тах яркость
Цвет	холодный	холодный	холодный
Исходная мутность (у.е.)	0,31	0,31	0,31
Конечная мутность (у.е.)	0,38	0,36	0,34
Исходная температура	24°C	24°C	24°C
Конечная температура	29,9°C	28,3°C	30,3°C
Азотная добавка	3,75	3,75	3,75
Минеральное удобрение «Акварин»	3,75	3,75	3,75

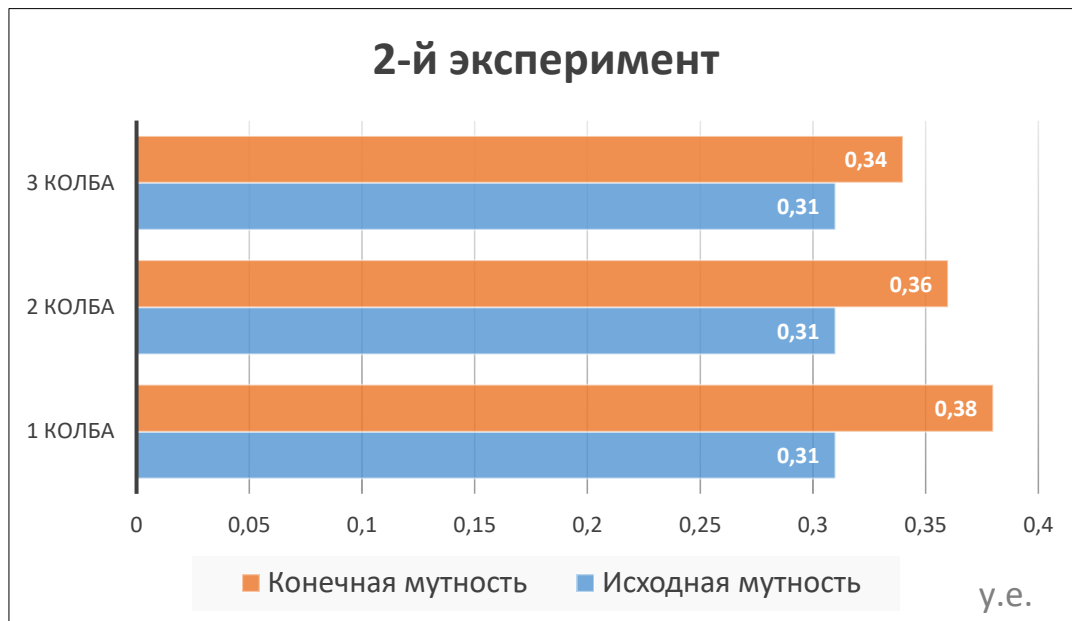


рис 5. Второй эксперимент. Влияние освещенности на культивирование хлореллы

В 1-м цилиндре исходная мутность была 0,31 (у.е.), а конечная 0,38 (у.е.), то есть выросла на 0,07. Во 2-м цилиндре исходная мутность была 0,31 (у.е.), а конечная 0,36 (у.е.), то есть выросла на 0,05. В 3-ем цилиндре исходная мутность была 0,31 (у.е.) и конечная 0,34 (у.е.), то есть выросла на 0,03. В ходе эксперимента в цилиндрах изменилась температура, которая связана с интенсивностью освещения сосудов. Для выяснения зависимости роста хлореллы от освещенности следует провести дополнительные исследования. Так как в этом эксперименте изменялись два показателя. (рис. 5, табл. 3)

Вывод: для лучшего культивирования хлореллы нужно 2 прожектора:1 на тах яркость,1 на middle яркость

### 3.3. 3-й эксперимент: Влияет ли интенсивность аэрации на культивирование хлореллы?

Этапы:

- 1) Берем 3 колбы и наливаем туда 1,5 л суспензии хлореллы с мутностью 0,3.
- 2) в каждую колбу добавляем 3,75 гр минерального удобрения «Акварин» и 3,75 гр азотной добавки.
- 3) Мы выяснили как взаимодействует освещение с удобрением в прошлых 2-ух экспериментах. И в этом должны проверить как будут вести себя вместе 2 фактора: освещенность и интенсивность аэрации.
- 4) в 1 колбу мы добавляем 2 аэратора и 2 прожектора:1 на тах яркость,1 на middle яркость
- 5) в 2 колбу мы добавляем 2 аэратора и 1 прожектор на тах яркость
- 6) в 3 колбу мы добавляем 1 аэратор и 2 прожектора:1 на тах яркость, 1 на middle яркость (рис.6)

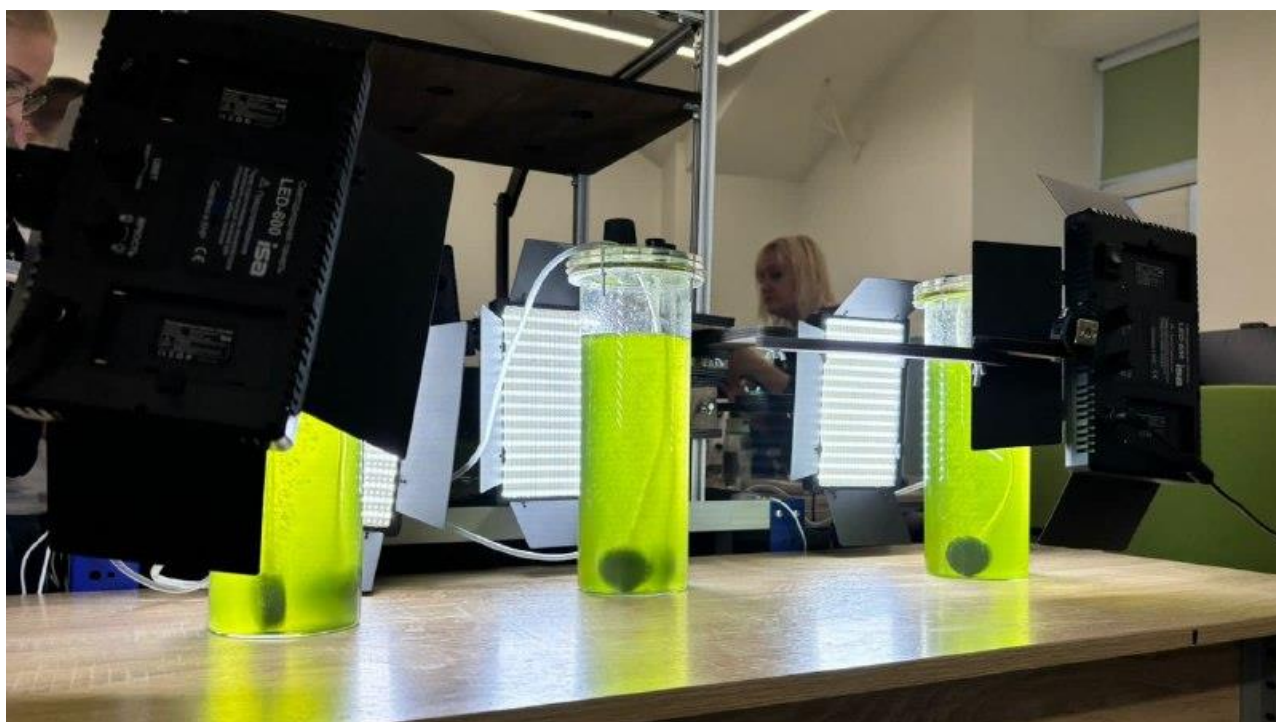


Рис.6 – третья экспериментальная установка (Фото автора)

Таблица 4. Третий эксперимент. Влияние интенсивности аэрации на культивирование хлореллы

	1 колба	2 колба	3 колба
Объем суспензии хлореллы	1,5 л	1,5 л	1,5 л
Аэраторы	2 аэратор	2 аэратор	1 аэратор
Длительность эксперимента	21 ч	21 ч	21 ч
Освещенность	2 прожектора: 1 на max яркость 1 на middle яркость	1 прожектор на max яркость	2 прожектора: 1 на max яркость 1 на middle яркость
Цвет	холодный	холодный	холодный
Исходная мутность (y.e.)	0,3	0,3	0,3
Конечная мутность (y.e.)	0,36	0,4	0,38
Исходная температура	24°C	24°C	24°C
Конечная температура	29,5°C	30,1°C	30,5°C
Азотная добавка	3,75	3,75	3,75
Минеральное удобрение «Акварин»	3,75	3,75	3,75

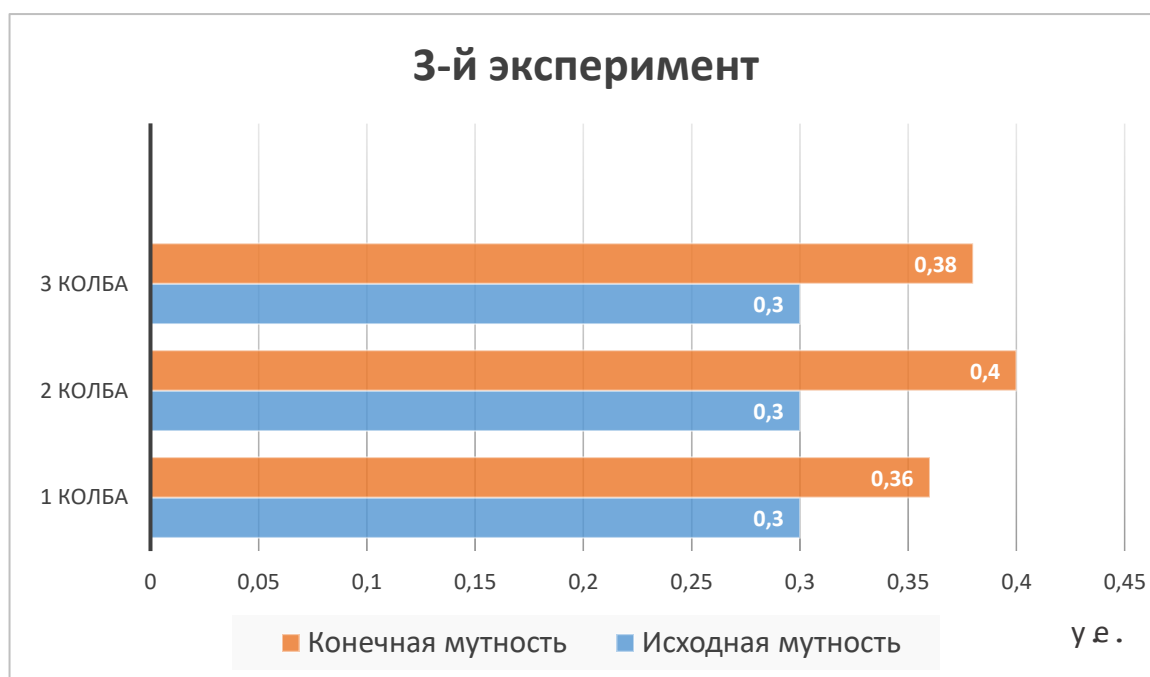


Рис.7. Третий эксперимент. Влияние интенсивности аэрации на культивирование хлореллы

В 1-м цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.), а конечная 0,36 (у.е.), то есть выросла на 0,06. Во 2-м цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.), а конечная 0,4 (у.е.), то есть выросла на 0,1. В 3-ем цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.) и конечная 0,38 (у.е.), то есть выросла на 0,08. (рис.7, табл. 4)

Вывод: как мы уже выяснили на культивирование хлореллы влияет интенсивность перемешивания, которая создается с помощью аэратора, следовательно лучше использовать 2 аэратора. По поводу освещения мы увидели, что 2 прожектора:1 на max яркость,1 на middle яркость и 1 прожектор на max яркость дают практически один и тот же результат. И так как нам надо сделать бюджетную установку, то остановимся на 1 прожектор на max яркость

#### 3. 4. Итоговый эксперимент, для подтверждения наших результатов

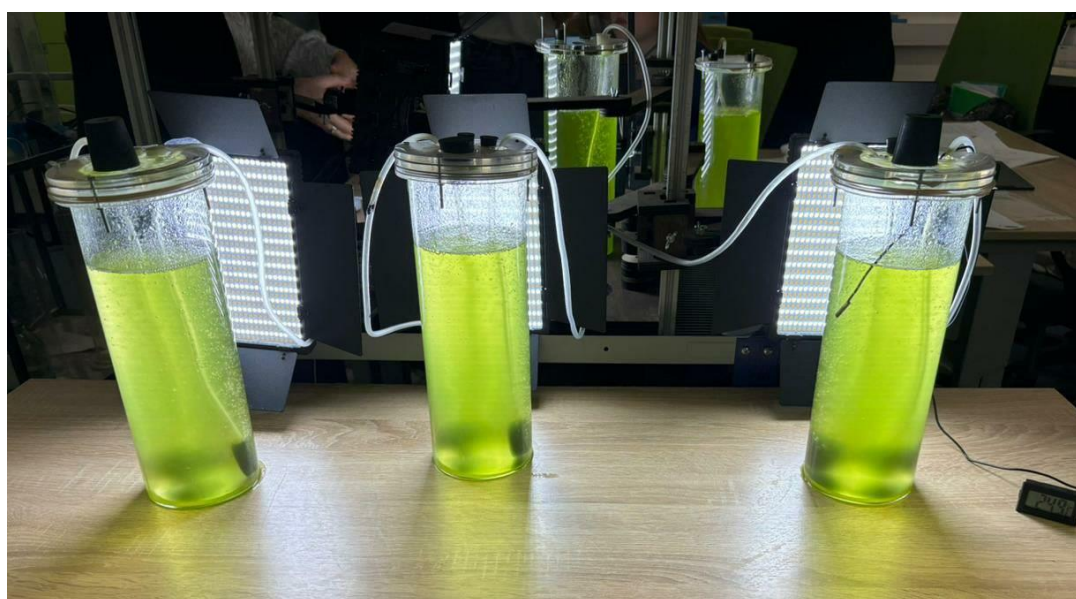


Рис. 8. Итоговая экспериментальная установка (Фото автора)



Таблица 5. Итоговый эксперимент.

	1 колба	2 колба	3 колба
Объем суспензии хлореллы	1,5 л	1,5 л	1,5 л
Аэраторы	2 аэратора	2 аэратора	2 аэратора
Длительность эксперимента	22 ч	22 ч	22ч
Освещенность	1 прожектор на тах яркость	1 прожектор на тах яркость	1 прожектор на тах яркость
Цвет	холодный	холодный	холодный
Исходная мутность(у.е.)	0,3	0,3	0,3
Конечная мутность(у.е.)	0,32	0,4	0,39
Исходная температура	24°C	24°C	24°C
Конечная температура	29°C	30,4°C	29,3°C
Азотная добавка	3,75	3,75	3,75
Минеральное удобрение «Акварин»	3,75	3,75	3,75

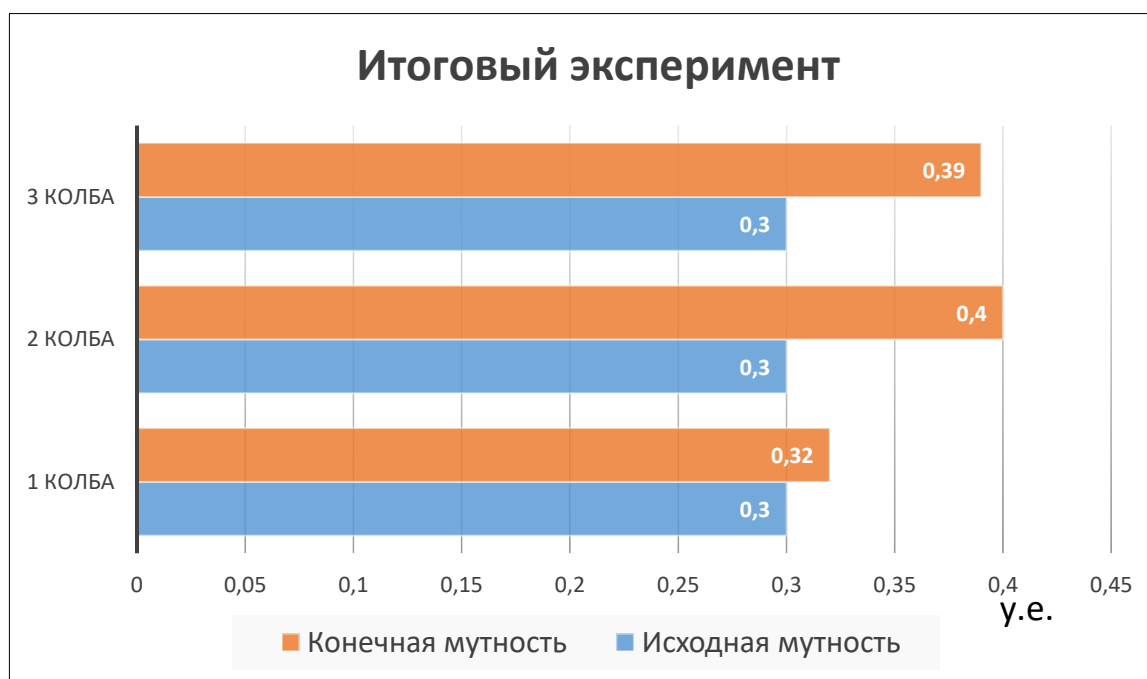


Рис. 9. Итоговый эксперимент

В 1-м цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.), а конечная 0,32 (у.е.), то есть выросла на 0,02. Во 2-м цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.), а конечная 0,4 (у.е.), то есть выросла на 0,1. В 3-ем цилиндре исходная мутность была 0,3 (у.е.) и конечная 0,39 (у.е.), то есть выросла на 0,09 (рис.9 табл. 5)

### **3.5 Почему нужно смотреть именно на показатель мутности?**

По показателю мутности можно увидеть прогресс культивирования хлореллы. Изначальная мутность было 0,3, и после каждого эксперимента она росла. Из этого можно сделать вывод. Чем больше мутность у хлореллы после эксперимента, тем лучше она культивировалась.

### **3.6 Почему менялась температура суспензии хлореллы и как она не погибала при температуре выше 27 градусов?**

Температура суспензии менялась из-за освещения прожекторов, ведь они отдают тепло. В пособии, которое было выдано РГПУ Герцена, можно было заметить, что хлорелла погибает при температуре выше 27 градусов. Но в моих установках температура могла достигать 30 градусов, и при таких условиях хлорелла оставалась жива. Как? Следовательно, если вспомнить курс биологии, то можно ответить на этот вопрос так: при повышении температуры до определенных значений активность ферментов начинает увеличиваться, но при слишком высокой температуре они начинают утрачивать свою активность и происходит денатурация белковой молекулы.

### **3.7 Стоимость экспериментальной установки и ее эксплуатации за год**

6 Прожекторов - 6000 рублей

12 компрессоров - 12000 рублей

Прочие компоненты - 20000 рублей

22, 5 г на 9 литров - Азотная добавка ( в день) = 4 руб 44 коп. В год = 1620 руб. 60 коп.

22,5 г на 9 литров - удобрение «Акварин» ( в день) = 13 руб. 50 коп. В год = 4 927 руб. 50 коп.

Электроэнергия - 10 руб/квт. час \* 21 ч = 210 рублей ( в день)

210 рублей \* 365 дней = 76650 рублей ( за год)

Итоговая стоимость годовой эксплуатации биореактора:

$6000 + 12000 + 1620, 6 + 4 927, 5 + 76650 + 20000 =$

121 198 руб. 10 коп

## **4. Вывод. Итог. Оптимальные условия для хлореллы**

Исходя из наших экспериментов можно сделать следующий вывод:

Для лучшего культивирования хлореллы стоит использовать азотную добавку и удобрение «Акварин» в одинаковых пропорциях (3, 75 гр) , также стоит использовать либо два прожектора для освещения ( один на top, второй на middle), либо 1 на top яркость. Эффект на хлореллу у них одинаковый. Но так как нам нужно было сделать бюджетную конструкцию биореактора, мы в итоговой стоимости взяли 1 прожектор.

Как мы уже поняли на культивирование хлореллы влияет интенсивность перемешивания, которая создается с помощью аэратора, следовательно лучше использовать 2 аэратора

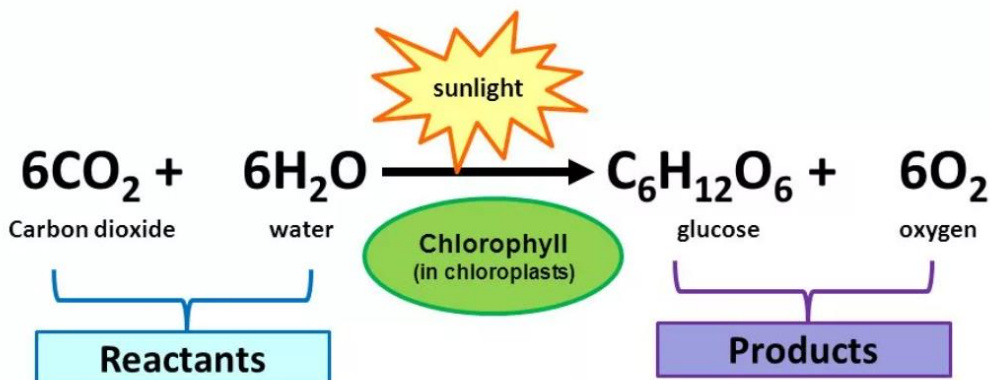
## Список литературы

- 1.«БИОС-3» – Советская «Биосфера» <http://priroda.su/item/3254>
- 2.Грин Н., Стаут У., Тейлор Д., Биология в 3-х томах, т 1, пер. с англ. под ред. Р. Сопера, 3-е изд. М.:Мир, 2004, 454 с.
- 3.«Живая хлорелла» <https://живаяхлорелла.рф/>
- 4.Использование хлореллы в сельском хозяйстве <https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/articles/odna-na-vsju-zhizn-kak-hlorella-vsjo-sel-skoe-hozjajstvo-vyruchaet>
- 5.Как и зачем производят хлореллу в промышленных масштабах? <https://dzen.ru/a/XuDtMujBTEw-Drxb>
- 6.Ключи от Арктики: как современные исследователи открывают ее заново <https://rgo.ru/activity/redaction/articles/klyuchi-ot-arktiki-kak-sovremennye-issledovateli-otkryvayut-eye-zanovo/>
- 7.Компании ООО НПК «ДЕЛО» <http://www.хлорелла.рф/about-company-delo-chlorella.html>
- 8.Компания по продаже суспензии хлореллы <https://ecotonica.ru/>
- 9.ООО «НПК АЛЬГОТЕХ» <https://agroserver.ru/user/383213/>
- 10.Олейникова Д.В., Горбунова В.Ю., *Chlorella vulgaris*, Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы, № 3(56) 2020 с.21-28
- 11.Сачиро Умемото, Такеши Оцуки Многокомпонентные добавки, полученные из хлореллы , повышают аэробную выносливость у молодых людей J Clin Biochem Nutr сентябрь 2014 г.; 55 (2): 143–146. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4186384/>
- 12.Строение хлореллы, размножение, полезные свойства <https://wiki.fenix.help/biologiya/hlorella>
- 13.Тип питания хлореллы [https://spravochnik.ru/biologiya/hlorella\\_pod\\_mikroskopom/#stroenie-hlorelly](https://spravochnik.ru/biologiya/hlorella_pod_mikroskopom/#stroenie-hlorelly)
- 14.Типы биореакторов, конструкция, детали, области применения, ограничения [https://microbiologynote.com/ru/биореактор/#Bioreactor\\_Types](https://microbiologynote.com/ru/биореактор/#Bioreactor_Types)
- 15.Шевцова А.А., Шенцова Е.С., Дранников А.В., Пономарев А.В., Исследование процесса массового культивирования хлореллы методами планирования эксперимента Известия ВУЗов. Пищевая технология, № 2-3, с.62-64
- 16.Хлорелла <https://ru.wikipedia.org/wiki/Хлорелла>
- 17.Chlorella <https://hlorella.jimdofree.com/>

Приложение 1.

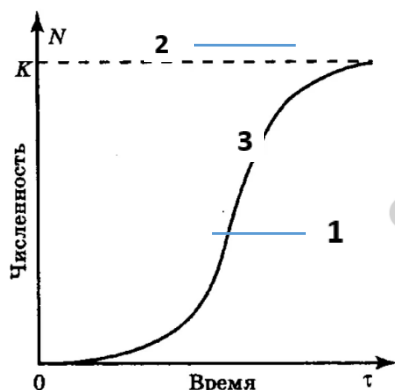
**ПРОЕКТ «БИОРЕАКТОР»: МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЪЯСНЕНИЯ**

Хлорелла – микроводоросль. Питание – автотрофное, т.е водоросли растут, синтезируя вещества своего тела путем фотосинтеза из углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и воды, согласно уравнению:



Очевидно, скорость фотосинтеза и, следовательно, роста хлореллы будет зависеть от количества поступающего углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и освещенности. Также хлорелле необходимы минеральные соли. Все эти факторы будут сказываться на продуктивности биореактора.

Водоросли имеют характерную кривую изменения численности и биомассы в замкнутом сосуде без поступления биогенов (нужных для их роста солей).



Сначала кривую увеличения численности или биомассы можно описать экспонентой, когда удельная скорость прироста биомассы постоянна (1). Потом удельная скорость прироста уменьшается (2), и кривая «выходит на плато».

Для нашего проекта примем, что в течение 6-ти суток культивирования, при начальной концентрации базового раствора солей и микроэлементов 2,5 г/л; и при начальной биомассе хлореллы 0,5 г/л (которой соответствует мутность суспензии хлореллы 0,05) - удельную скорость роста хлореллы можно считать постоянной. Примем для дальнейших расчетов, что численное значение биомассы хлореллы – в 10 раз больше численного значения мутности.

Удельная скорость роста биомассы в экспериментах может быть рассчитана по уравнению:

$$\mu_B = \frac{\ln B_2 - \ln B_1}{\Delta t}$$

где  $\mu_B$  - удельная скорость роста биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $B_1$  – биомасса хлореллы в начале эксперимента;  $B_2$  - биомасса хлореллы в конце эксперимента;  $\ln$  – натуральный логарифм,  $\Delta t$  - интервал времени, сут.

Удельную скорость роста биомассы хлореллы через показания датчика мутности можно рассчитать как:

$$\mu_B = \frac{\ln T_2 - \ln T_1}{\Delta t}$$

где  $C_v$  – оценка удельной скорости роста биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $T_1$  – мутность суспензии хлореллы в начале эксперимента;  $T_2$  – мутность суспензии хлореллы в конце эксперимента;  $\ln$  – натуральный логарифм,  $\Delta t$  – интервал времени, сут.

Если необходимо, зная начальное значение мутности или биомассы, воспользоваться этими значениями через определенное время, можно воспользоваться уравнением:

$$V_t = V_0 e^{C_v t}$$

Где  $V_t$  – биомасса хлореллы (г/л) в момент времени  $t$ ;  $V_0$  – биомасса хлореллы (г/л) в момент времени  $t_0$ ;  $C_v$  – удельная скорость роста биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $t$  – время, сут;  $e$  – основание натурального логарифма.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Необходимо разработать конструкцию биореактора и технологию культивирования хлореллы с минимальной себестоимостью. Для этого предлагается изучить воздействие на рост хлореллы нескольких факторов из списка:

- Освещенность (осторожно, перегрев хлореллы более 27 градусов может вызвать ее гибель)
- Скорость аэрации (1 или 2 компрессора на экспериментальный цилиндр)
- Концентрация базовой смеси солей и микроэлементов (удобрение Акварин)
- Концентрация азотной добавки (аммиачная селитра)

Не рекомендуется превышение общей концентрации солей в среде для культивирования хлореллы свыше 5 г/л