#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

# «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт - физики высоких технологий

Направление подготовки (специальность) — <u>18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии</u> Кафедра - общей химии и химической технологии

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

# Тема

## «Системный подход к использованию ряски для очистки сточных вод и получения биомассы»

УДК 582.521.43:628.3:662.6

Студент

Группа	Группа ФИО		Дата
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха		

Руководитель

Должность	Должность ФИО		Подпись	Дата
Доцент	Тихонов В. В.	к. т. н., доцент		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Криницына З. В.	к. т. н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

The published additional of the first of the						
	Должность	Должность ФИО		Подпись	Дата	
			звание			
	Ассистент	Раденков Т. А.	Инженер			

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
OXXT	Ан В. В.	к. т. н., доцент		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

по основной образовательной программе подготовки магистров по направлению 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»,

## профиль подготовки «Машины и аппараты химических и нефтеперерабатывающих производств»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
результатов	
P1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной
P2	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения
P3	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач
P4	Проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии
P6	Осваивать и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.
P7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
Р9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

# «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт - физики высоких технологий

Кафедра - общей химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

Ан В.В.

(Подпись) (д

(дата) (Ф.И.О)

### ЗАДАНИЕ

## на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации	

Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха

Тема работы:

«Системный подход к использованию ряски для очистки сточных вод и					
получения биомассы»					
Утверждена приказом директора (дата, номер)	31.05.2017 №3766/c				

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2017
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

#### Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Исследовать ряску для очистки сточных вод от аммиачного азота и фосфатов. Изучить накопление ряской белкового азота. Рассчитать пруд для очистки сточных вод.

### Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе). Литературный обзор; характеристика объектов методов исследований; предоставление и обработка результатов исследований; разработка технологической материальный баланс технологический расчёт пруда для выращивании ряски; математическое моделирование системы пруд-ряска; раздел социальной ответственности; раздел финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения; список использованных источников припожения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Результаты экспериментов (в графическом и табличном виде); принципиальная технологическая схема; схема пруда по выращиванию ряски.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы					
Раздел		Консультант			
«Финансовый	менеджмент,	Криницына Зоя Васильев	зна		
ресурсоэффективность	И				
ресурсосбережение»					
«Социальная ответственност	LP»	Раденков	Тимофей		
		Александрович			
TT					

# Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

- Общее описание процесса управления органическими отходами
- Массовый баланс и конструкция системы пруда ряски
- Математическое моделирование системы пруда ряски

Дата	выдачи	задания	на	выполнение	выпускной	
квали	фикацион	ной работн	ы по J	линейному гра	фику	

## Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Доцент	Тихонов	К.Т.Н.		
	B.B.			

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

# «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

## Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха

Институт	ИФВТ	Кафедра	OXXT
Уровень	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и
образования			ресурсосберегающие
			процессы в химической
			технологии, нефтехимии и
			биотехнологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менед	джмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет научного исследования составляет 1292869 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды – 30%
Перечень вопросов, подлежащих исследованию,	, проектированию и разработке:
1. Предпроектный анализ	1.1 Потенциальные потребители результатов исследования 1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 1.3 Диаграмма Исикавы 1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации 1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования
2. Инициация проекта	Организационная структура проекта

Определение ресурсной (ресурсосберегающей),	3.1. Иерархическая структура работ
финансовой, бюджетной, социальной и	проекта
экономической эффективности исследования	3.2. Контрольные события проекта
	3.3. План проекта
	3.4.Бюджет научного исследования
	3.5.Организационная структура
	проекта
	3.6. Матрица ответственности
	3.7. План управления коммуникациями
	проекта
	3.8. Реестр рисков проекта
	3.9. План управления контрактами и
	поставками
4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей),	Оценка сравнительной эффективности
финансовой, бюджетной, социальной и	исследования
экономической эффективности исследования	

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1. Карта сегментирования рынка
- 2. Диаграмма Исикавы
- 3. Иерархическая структура работ по проекту
- 4. Сетевой план-график выполнения НИР
- 5. Распределение бюджета НТИ
- 6. Структура проекта

## Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Доцент кафедры менеджмента	Криницына З. В.	к.т.н., доцент		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

## Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха

Институт	ИФВТ	Кафедра	OXXT
Уровень	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и
образования			ресурсосберегающие
			процессы в химической
			технологии,
			нефтехимии и
			биотехнологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:			
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения			
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, п	роектированию и разработке:		
1. Опасности для здоровья  2. Экологическая безопасность	1.1. Высокоочищенные сточные воды в качестве кормовой аквакультуры 1.2. Система ряски в качестве кормления аквакультуры 1.3. Накопление химических веществ 1.1. Техническое обслуживание и меры безопасности ряски 1.2. Меры предосторожности		
	при инфекциях тела и заболеваниях 1.3. Вредные газы, взрывоопасные смеси и кислородный дефицит		
3. Спасательное оборудование для очистки	оборудования для обеспечения		
4. Общие причины несоответствия стоков пруда	безопасности  4.1. Органическая перегрузка  4.2. Короткое замыкание  4.3. Перерождение водорослей  4.4. Накопление осадка в прудах  4.5. Нитрификация или частичная нитрификация		

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
Auta beign in sugaring gire pusquia no trimonioni y i purping	

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая	Подпись	Дата
		степень,		
		звание		
Ассистент	Раденков Т. А.	Инженер		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха		

#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

# «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт - физики высоких технологий

Направление подготовки (специальность) — <u>18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии</u>

Кафедра - общей химии и химической технологии

## Раздела ВКР, выполнены на иностранном языке

Раздел (5)	Общее описание процесса управления органическими отходами
Раздел (6)	Массовый баланс и конструкция системы пруда ряски
Раздел (7)	Математическое моделирование системы пруда ряски

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Аль Кассаб Али Абдулкарим Ридха		

Консультант кафедры (ОХХТ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов В. В.	К. Т. Н.,		

Консультант – лингвист кафедры (ИЯФТИ):

Должность	ФИО	Ученая	Подпись	Дата
		степень,		
		звание		
Доцент	Игна О. Н.	д-р пед. наук		

### Реферат

Диссертация изложена на 196 страницах, включая 70 рисунков, 31 таблиц, 123 литературных источника и 4 приложений.

Ключевые слова: Ряска; *Lemna minor;* Метантенк; Очистка сточных вод; Аммоний; Полифосфаты; Белок; Белковый концентрат; Кормовая добавка; Ряски пруд; Система очистки сточных вод; Дизайн пруда; Моделирование ряски пруд.

Материалами исследований служили ряска вида *Lemna minor*, выращенная в лабораторных и естественных условиях водоема, исходные образцы сточных вод из метантенка. Объекты исследований — сточные воды, подвергшиеся очистке ряской вида *Lemna minor*.

Целью настоящих исследований являлось:

- 1. Изучение процесса ассимиляции основных веществ и накопления биомассы ряской с учетом варьирования концентрации сточных вод.
- 2. Изучение влияния условий культивирования на накопление белка в ряске *Lemna minor*. При этом внимание было уделено таким варьирующим факторам, как концентрация питательной среды и наличие/продолжительность освещения.
- 3. Изучение нового дизайна системы прудов с ряской, имитирующего логарифмическую скорость роста ряски.
- 4. Построение математической модели переноса массы питательных веществ в системе прудов с ряской.

В ходе изучения процесса очистки сточных вод из метантенка и накопления белков ряской *Lemna minor* акцент был сделан на следующие контрольные точки эксперимента: скорость роста биомассы ряски, скорость очистки сточных вод из метантенка и скорость поглощения питательных веществ ряской и процент накопления бклка.

В работе представлены результаты исследований по очистке сточных вод, полученных из метантенка и накапления белка, с помощью ряски вида *Lemna minor*. Установлено, что ряска эффективно ассимилирует, тем самым удаляет

азот и фосфор из реакционной среды (сточных вод), включая их в собственный процесс метаболизма. Установлено, что на 3-й неделе культивирования зафиксирован максимальный процент содержания белка в ряске с 27,62 до 29,14 % в трех различных концентрациях раствора с высоким содержанием питательных веществ.

Поглощение азота и фосфора ряской протекает достаточно быстро и в период лаг-фазы. На этапе экспоненциального роста ряска активно ассимилирует азот и фосфор с увеличением концентрации субстрата, включая данные вещества в свой метаболизм, о чем свидетельствует повышение скорости роста биомассы. В ходе эксперимента установлено, что зависимости поглощения ионов аммония и полифосфатов, а также объем накопленной биомассы были нелинейными с течением времени. Показано, что самая высокая удельная скорость ассимиляции наблюдалась в реакционной среде с концентрацией сточных вод 60%. При этом для ионов аммония данный показатель находился на уровне 0,609 г/м²/сут, для полифосфатов – 0,064 г/м²/сут, максимальный прирост биомассы ряски (по сухой массе) - 4,61 г/м²/сут.

Сибирский штамм ряски (*Lemna*) содержит более 25 % белка, что превышает примерно в 2,5 раза его количество в кукурузе и может составить конкуренцию по содержанию белка в сое. В ходе данной работы определено, что вид ряски *L. minor* способен производить белка от 3,54 до 5,454 т/га в год.

Параметры в модели представляют собой начальную концентрацию питательных веществ в объеме пруда с варьированием по глубине. Применяя вариации параметров одного порядка моделирование показало, что модель явно намного более чувствительна к глубине пруда, чем к концентрации, что указывает на то, что эффективность процесса поглощения питательных веществ в системе водоема с ряской ограничена глубиной.

## Оглавление

	3.2.1.	Исследование динамики концентрации ионов аммония	58
	3.2.2.	Исследование динамики концентрации полифосфатов	60
	3.2.3.	Изменение рН	62
	3.2.4.	Исследование динамики накопления биомассы ряски	63
	3.2.5.	Статистическая обработка полученных эксперимент	альных
	данных	65	
		Влияние условий культивирования на накопление белка	в ряске
	3.3.1.	Изучение динамики накопления азота в ряске	67
	3.3.2.	Изучение динамики накопления белка в ряске	69
4.	Выводы		72
5.	Overall proc	ess description of organic waste management system	75
	5.1. H	Biodigester	76
	5.2. S	Storage tank	79
	5.3. H	PDST	80
	5.4. I	Duckweed wastewater treatment pond	80
6.	Mass balance	e and design of duckweed pond system	82
	6.1. N	Material balance calculations	84
	6.1.1.	Water Mass balance	84
	6.1.2.	Overall biodigester mass balance	85
	6.1.3.	Ammonium mass balance	85
	6.2. I	Pond design	87
7.	Mathematica	al modeling of duckweed pond system	96
	7.1. I	Differentiation of the controlling equation	96
	7.2. H	Experimental data and model design	99
	7.3. F	Results and Discussion	101

	7.3.1. Calculation of First order Kinetics	101
	7.3.2. Ammonium profile for 20%, 40% and 60% concentration	102
	7.3.3. Phosphate profile for 20%, 40% and 60% concentration	103
	7.4. Conclusion	105
8.	Социальная ответственность	107
	8.1. Опасности для здоровья	107
	8.1.1. Высокоочищенные сточные воды в качестве кормо аквакультуры	овой 110
	8.1.2. Система ряски в качестве кормления аквакультуры	111
	8.1.3. Накопление химических веществ	113
	8.2. Экологическая безопасность	114
	8.2.1. Техническое обслуживание и меры безопасности ряски	115
	8.2.2. Меры предосторожности при инфекциях тела и заболевал 117	КВИЕ
	8.2.3. Вредные газы, взрывоопасные смеси и кислородный дефи 117	ицит
	8.3. Спасательное оборудование для очистки сточных вод	118
	8.4. Общие причины несоответствия стоков пруда	119
	8.4.1. Органическая перегрузка	119
	8.4.2. Короткое замыкание	120
	8.4.3. Перерождение водорослей	120
	8.4.4. Накопление осадка в прудах	121
	8.4.5. Нитрификация или частичная нитрификация	122
	8.5. Заключение	122
9.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	124
	9.1. Предпроектный анализ	124

9.1.1. Потенциальные потребители	124
9.1.2. Анализ конкурентных технических решений с поз	иции
ресурсоэффективности и ресурсосбережения	125
9.1.3. Диаграмма Исикавы	127
9.1.4. Оценка готовности разработки к коммерциализации	128
9.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-техничес	кого
исследования	131
9.2. Инициация проекта	131
9.2.1. Цели и результат проекта.	131
9.2.2. Организационная структура проекта.	133
9.2.3. Ограничения и допущения проекта.	134
9.3. Планирование управления научно-техническим проектом	135
9.3.1. Иерархическая структура работ проекта	135
9.3.2. Контрольные события проекта	136
9.3.3. План проекта	137
9.3.4. Диаграмма Ганта	140
9.3.5. Сетевой график	140
9.3.6. Бюджет научного исследования	141
9.3.7. Организационная структура проекта	150
9.3.8. Матрица ответственности	150
9.3.9. План управления коммуникациями проекта	152
9.3.10. Реестр рисков проекта	152
9.3.11. План управления контрактами и поставками	153
9.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансо	эвой,
бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	154

	9.5.	Вывод	158
10.	Список	использованных источников	159
11.	Прилож	ения	172
	11.1.	Статистическая обработка полученных эксперимен	тальных
даі	нных	172	
	11.2.	Регрессионный анализ экспериментальных данных	175
	11.3.	Спиральные данные графического участка	177
	11.4.	Профили абсорбции питательных веществ	181
	11.4	.1. Профили ионов аммония для концентрации 20%	181
	11.4	.2. Профили ионов аммония для концентрации 40%	182
	11.4	.3. Профили ионов аммония для концентрации 60%	183
	11.4	.4. Профили фосфатов для концентрации 20%	184
	11.4	.5. Профили фосфатов для концентрации 40%	185
	11.4	.6. Профили фосфатов для концентрации 60%	186

# Список таблиц

Таблица 1- Аминокислотный состав белков в ряске вида $L$ . $minor$ (г/100 г	белка 33
Таблица 2- Состав сточных вод из метантенка (субстрат)	57
Таблица 3- Значения линейных коэффициентов корреляций между биом ряски и показателями состава воды	1accoi
Table 4- Chemical composition of biogas [89].	77
Table 5- Regression analysis of the batch experimental data	101
Таблица 6- Оценочная карта для сравнения конкурентных техничразработок	еских 126
Таблица 7- Бланк оценки степени готовности научного проек коммерциализации	ста в 128
Таблица 8- Заинтересованные стороны проекта	131
Таблица 9- Цели и результат проекта	132
Таблица 10- Рабочая группа проекта	133
Таблица 11- Ограничения проекта	134
Таблица 12- Контрольные события проекта	136
Таблица 13- Календарный план проекта	137
Таблица 14- Параметры сетевого графика	141
Таблица 15- Группировка затрат по статьям	142
Таблица 16- Сырье, материалы, комплектующие изделия и покуполуфабрикаты	упные 143
Таблица 17- Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных р	работ» 144
Таблица 18- Баланс рабочего времени	146
Таблица 19- Расчёт основной заработной платы	147
Таблица 20- Заработная плата исполнителей НТИ	147

Габлица 21- Отчисления на социальные нужды			
Таблица 22- Научные и производственные командировки (руб.)	148		
Таблица 23- Оплата работ, выполняемых сторонними организациям предприятиями (руб.)	и и 149		
Таблица 24- Накладные расходы (руб.)	150		
Таблица 25- Матрица ответственности	151		
Таблица 26- План управления коммуникациями	152		
Таблица 27- Реестр рисков	153		
Таблица 28- План закупок проекта	153		
Таблица 29- Сравнительная оценка характеристик вариантов исполн- проекта	ения 156		
Таблица 30- Сравнительная эффективность разработки	158		
Таблица 31- Спиральные данные графического участка	177		

# Таблица фигур

Рисунок 1-Размеры различных видов ряски 25
Рисунок 2- Ряска растет нормально в защищаемой области 39
Рисунок 3- Ряска не могла расти в водоемах с движущейся поверхностью воды 39
Рисунок 4- Водоросли, полностью конкурирующие с ряской после одномесячного культивирования с начальной плотностью 30 г/м <sup>2</sup> 40
Рисунок 5- Ряска, непрерывно растущая с плотностью 100 г/м <sup>2</sup> . 41
Рисунок 6- Листья ряски заражены грибами и разлагаются микроорганизмами. 42
Рисунок 7- Листья ряски после одной недели обработки фунгицидом. 42
Рисунок 8- Ряска заражена тлей после 4 месяцев культивирования. 43
Рисунок 9- Тля умерла после одной недели обработки инсектицидом. 43
Рисунок 10- Ряска культивируется в двух биореакторах с начальной плотностью посева 300 г сухой массы на ${\rm m}^2$ .
Рисунок 11- Ряска полностью умерла через 4 недели 45
Рисунок 12- Спутниковый снимок схема маршрута поиска ряски с красным цветом 47
Рисунок 13- Водоем возле поселка Мирный 48
Рисунок 14- Спутниковый снимок водоема в районе пос. Светлый 49
Рисунок 15- Ряска уже хорошо выращены в этом водоеме 49
Рисунок 16- Вид ряски <i>Lemna minor</i> в районе корпуса ТГУ 50
Рисунок 17- Схема фотобиореактора: А- Аквариум 75 × 28 × 40 см; С-Воздушный компрессор; L- Лампа; Н- Нагревательный кабель; ТІS- Термостат; КS- Цифровой таймер - два канала; S- Датчик температуры.
Рисунок 18- Установка для отгонки аммиака: 1 - электроплитка; 2 - перегонная колба; 3 - каплеуловитель; 4 - холодильник; 5 - стеклянная трубка; 6 - приемная колба).

Рисунок 19- Изменение концентрации ионов аммония, полифосфатов и ХПК в естественном водоеме с ряской (район корпуса ТГУ, г. Томск) в течение месяца 56
Рисунок 20- Образцы воды из водоема за корпусом ТГУ: слева – 15.08.2016, по центру – 01.09.2016, справа – 13.09.2016 57
Рисунок 21- Динамика изменения концентрации ионов аммония при начальной концентрации: $a-37$ ; $6-80,1$ ; $B-121$ г/м <sup>3</sup>
Рисунок 22- Динамика изменения концентрации полифосфатов при начальной концентрации: а - $8,74$ ; б - $15,3$ ; в - $17,23$ г/м <sup>3</sup> 61
Рисунок 23- Динамика изменения значения рН при начальной концентрации субстрата: $a-20$ ; $b-40$ ; $b-60$ %
Рисунок 24- Динамика изменения плотности биомассы 64
Рисунок 25- Скорость роста биомассы для субстратов с различной концентрацией 65
Рисунок 26- Динамика накопления азота в образцах ряски: а – процентное содержание TKN; б - количество TKN на единицу площади; в – скорость накопления TKN.
Рисунок 27- Динамика накопления белка в образцах ряски: а – процентное содержание; б - количество белка на единицу площади; в – скорость накопления. 70
Figure 28- Integrated system of manure management 76
Figure 29- Duckweed plug-flow system in the USA for tertiary treatment of effluent from three facultative ponds followed by a wetland buffer. Pond designed for average flow rate 19000 m <sup>3</sup> /day, with excess maximum flow rate 38000 m <sup>3</sup> /day [92].
Figure 30- Spiral design of duckweed pond system with initial diameter 1 m 95
Figure 31- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 33.3 g/m $^3$ and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; and c - 0.3 m.
Figure 32- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 71.3 g/m <sup>3</sup> and varied pond depth 103

Figure 33- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of $71.3~\text{g/m}^3$ and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m.		
Figure 34- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of $8.15~\text{g/m}^3$ and varied pond depth: a - $0.3~\text{m}$ ; b - $0.2~\text{m}$ ; c - $0.3~\text{m}$ . 104		
Figure 35- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of $14.56 \text{ g/m}^3$ and varied pond depth: a - $0.3 \text{ m}$ ; b - $0.2 \text{ m}$ ; c - $0.3 \text{ m}$ . $104 \text{ m}$		
Figure 36- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 16.39 g/m $^3$ and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m. 105		
Рисунок 37- Механический комбайн для уборки ряски [102].		
Рисунок 38- Малогабаритный механический харвестер [103]. 109		
Рисунок 39- Фиксированный комбайн со скоростью 700 галлонов/мин [105]. 110		
Рисунок 40- Система очистки сточных вод на основе ряски в Мирзапуре, Бангладеш.		
Рисунок 41- Карта сегментирования рынка переработки ряски 125		
Рисунок 42- Причинно-следственная диаграмма низкого выхода ряски 128		
Рисунок 43- Иерархическая структура работ по проекту переработке ряски 135		
Рисунок 44- График проекта (Диаграмма Ганта) 140		
Рисунок 45- Сетевой план-график выполнения НИР 141		
Рисунок 46- Распределение бюджета НТИ по статьям, % 143		
Рисунок 47- Структура проекта 150		
Рисунок 48- Зависимость между биомассой ряски и рН реакционной среды при начальной концентрации: а $-37$ ; б $-80$ ,1; в $-121$ г/м <sup>3</sup> 172		
Рисунок 49- Зависимость между биомассой ряски и концентрацией ионов аммония при начальной концентрации: а $-37$ ; б $-80$ ,1; в $-121$ г/м <sup>3</sup> 173		
Рисунок 50- Зависимость между биомассой ряски и концентрацией ионов полифосфатов при начальной концентрации: а — 37; б - 80,1; в - 121 г/м $^3$ 174		
Рисунок 51- График кинетики первого порядка для экспериментальных данных аммония При начальной концентрации: а - 33,3; б - 71,3; в - 105,37 г/м <sup>3</sup> 175		

Рисунок 52- График кинетики первого порядка для экспериментальных данных о фосфатах При начальной концентрации: $a - 8,15$ ; $6 - 14,56$ ; $8 - 16,39$ г/м <sup>3</sup> 176
Рисунок 53- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м $^3$ , глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 181
Рисунок 54- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м $^3$ , глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 181
Рисунок 55- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 182
Рисунок 56- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 182
Рисунок 57- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м3, глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 182
Рисунок 58- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м $^3$ , глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 183
Рисунок 59- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации $105,37$ г/м³, глубине пруда $0,1$ м: $a$ - $7$ дней; $6$ - $21$ день; $8$ - $35$ дней $183$
Рисунок 60- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации $105,37$ г/м $^3$ , глубине пруда $0,2$ м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней $183$
Рисунок 61- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации $105,37$ г/м $^3$ , глубине пруда $0,3$ м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней $184$
Рисунок 62- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации $8,15\ {\rm г/m^3}$ , глубине пруда $0,1\ {\rm m}$ : $a$ - $7$ дней; $6$ - $21$ день; $8$ - $35$ дней $184$
Рисунок 63- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации $8,15$ г/м³, глубине пруда $0,2$ м: $a$ - $7$ дней; $6$ - $21$ день; $8$ - $35$ дней $184$
Рисунок 64- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 8,15 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 185
Рисунок 65- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 14,56 г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 185
Рисунок 66- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 14,56 г/м3, глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней 185

Рисунок 67- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации	14,56
г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней	186
Рисунок 68- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации	16,39
г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней	186
Рисунок 69- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации	16,39
$\Gamma/M^3$ , глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней	186
Рисунок 70- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации	16,39
г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней	187

# Номенклатуры и сокращения

$a_i$	Весовой коэффициент і-го варианта исполнения разработки	164
$b_{i}$	Бальная оценка <i>i</i> -го варианта исполнения разработки	164
$C_i^p$	Ammonium concentration of the pond inflow (g/m³)	95
c <sup>n</sup>	Concentration of nutrients (g/m³)	101
$C_o^p$	Ammonium concentration of pond outflow (g/m³)	95
$F_i^p$	Inflow of the duckweed pond (m <sup>3</sup> /day)	95
$F_o^B$	Flow out of the biodigester (m³/day)	88
$F_o^p$	Outflow of the duckweed pond (m³/day)	95
$F_{\mathrm{w}}^{\mathrm{D}}$	Water volume consumed by duckweed biomass (m³/day)	96
$I_{pi}$	Интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки	164
$ m I_{\phi инp}^{ucn.i}$	Интегральный финансовый показатель разработки	163
${ m I}^a_{ m \phi u n p}$	Интегральный технико-экономический показатель аналога	166
$I^p_{\phi u \mu p}$	Интегральный показатель разработки	166
$m_d$	Moisture duckweed content	96
$M_{\rm o}^{ m NH4}$	Mass of ammonium at the effluent of the biodigester (kg/day)	89
$ ho_{ m w}$	Water density (kg/m <sup>3</sup> )	96

μ	Maximum biomass growth rate (kg/m²/time)	96
A	Reactor surface area (m <sup>2</sup> )	95
a	The initial spiral diameter	97
$\mathbf{B}_i$	Вес показателя (в долях единицы)	133
$C_{i}$	Initial ammonium concentration of duckweed pond (g/m³)	89
c <sup>n</sup>	Concentration of the substance (g/m³)	102
D	Diffusivity of the substance (m <sup>2</sup> /h)	102
e	The base of natural logarithms	96
F <sub>д</sub>	Действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала (раб. дн.)	153
h	Pond depth (m)	96
J	Mass transfer of specific substance in the system (g/m²/h)	102
j	Число параметров сравнения	164
K	First-order kinematic coefficient (m/time)	96
k	First-order kinematic coefficient time <sup>-1</sup>	95
$k_{\mbox{\tiny BHe}\mbox{\tiny 6}}$	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды	155
$k_{\text{доп}}$	Коэффициент дополнительной зарплаты	155
$k_{\scriptscriptstyle { m HaKJ}}$	Коэффициент накладных расходов	157

M	Навеска ряски (г)	57
$\mathbf{M}_1$	Масса высушенной ряски с фольгой	52
$M_2$	Масса фольги	52
$M_3$	Масса ряски до высушивания	52
$M_{\text{NH4}}$	Mass of consumed ammonium (g/day)	89
Mwt	Molecular weight (g/mole)	89
n	Number of moles of NH <sub>3</sub> (moles)	89
$N_{ m NH4}$	Содержание азота в аммонии	70
$N_{\text{op}_{\Gamma}}$	Органический азот	70
$R_{Ln}$	Резерв времени полного пути	148
S	Biomass substrate (t/animal/year)	80
$T_N$	Процент содержания азота	57
V	Gas volume (L)	89
V	The volume of the reactor (m <sup>3</sup> )	95
$V_a$	Количество взятого в приемник $0,1$ H раствора $H_2SO_4$ (см <sup>3</sup> )	57
V <sub>b</sub>	Количество 0,1 H. раствора NaOH пошедшего на обратное титрование $(cm^3)$	57
$V_{\rm m}$	Molar volume = 22.4 (mole/L)	89

X	Coordinate direction in which mass diffuses (m)	102
θ	The angular displacement (radians)	97
φ	The golden ratio	97
ω	Влажность ряски (%)	57
$\mathbf{F}_i$	Балл і-го показателя	133
$\mathrm{F}_{\mathrm{\Phi}}$	Проектируемая разработка	133
3 <sub>дн</sub>	Среднедневная заработная плата работника (руб.)	153
Здоп	Дополнительная заработная плата одного работника (руб.)	155
$3_{\scriptscriptstyle M}$	Месячный должностной оклад работника (руб.)	153
Зосн	Основная заработная плата	153
Зосн	Основная заработная плата работника (руб.)	155
К	Конкурентоспособность научной разработки или конкурента	133
M	Количество месяцев работы без отпуска в течение года	153
$C_{3\Pi}$	Сумма заработной платы	155
CM	Процент сухой массы	52
$T_{\kappa p}$	Критический путь	148
$T_p$	Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником (раб. дн.)	153

$\Phi_{ ext{max}}$	Максимальная исследовательского	стоимость го проекта	исполнения	научно-	163
$\Phi_{\mathrm pi}$	Стоимость і-го варианта исполнения			163	
$\mathfrak{Z}_{cp}$	Сравнительная эффективность проекта				
Сокращ	ения				
AD	Anaerobic digestion				78
BOD	Biological oxygen	demand			82
BP	Biodigester plant				85
BPR	Biogas production rate (m³/year/animal)				80
MBPR	Maximum biogas p	oroduction rate (m	<sup>3</sup> /t ODM/year)		80
MC	Moisture content				81
CSTR	Continues stirred tank reactor				81
DBM	Dry biomass				85
DM	Dry matter				79
DTPS	Duckweed treatment pond system				77
HRT	Hydraulic retention retention				81
MPR	Methane production rate (m³/day/animal)				81
OC	Organic carbon				78
ODM	The maximum orga	anic dry matter			80

OM	Organic matter	78
PDST	Post-digestion storage tank	81
PPF	Photosynthetic Photonic Flux	38
SMPR	Specific methane production rate (m³/kg VS)	81
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	70
VS	Volatile solids	80
VSPR	Volatile solids production rate (kg VS/day/animal)	81
AOOC	Агентство по охране окружающей среды	121
БПК	Биологическое потребление кислорода	125
BO3	Всемирная организация здравоохранения	116
OTB	Общее взвешенное твердое вещество	125
PKT	Растворение кислорода	125
ХБПК	Химический и биологический потребления кислорода	125

#### Введение

Рациональная организация переработки продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных является актуальным вопросом в сфере экологии. В связи со строгостью экологического законодательства, которое требует физико-химических лицензирования показателей сбрасываемых сточных вод, многие фермеры устанавливают анаэробные биореакторы для переработки коровьего навоза. В добавлении к невысокой стоимости установки и обслуживания, анаэробные биореакторы также производят биогаз. Этот побочный продукт используется для генерации электроэнергии. Несмотря на это, из-за высокого содержания питательных веществ в очищенных водах, полученных из биореактора, их нельзя сразу сбрасывать в природные воды. При постоянном использовании излишков очистных вод из биореактора в качестве удобрения ПОЧВЫ установлено значительное увеличение концентрации некоторых компонентов в почвах.

Однако хранение органических отходов сельского хозяйства (навоза) на площадках складирования приводит к потере большого количества питательных веществ в результате их вымывания дождевыми водами в почву и грунтовые воды, неконтролируемым выбросам метана в атмосферу в результате анаэробного разложения органических веществ.

Эффеткивное извлечение питательных веществ из полученных сточных вод (и следовательно их очистку) можно осуществить с помощью ряски. В данной работе приводятся результаты изучения процесса очистки сточных вод (полученных из метантенка) и накопления белка с помощью вида ряски *Lemna minor*.

Двойное применение системы прудов с ряской для очистки сточных вод и производства биомассы является основной целью этого исследования, где ряска представляет собой небольшое свободноплавающее водное растение, принадлежащее к семейству «Лемнацея».

В дополнение к очистке сточных вод биомасса, образующаяся во время обработки, содержит большое количество питательных веществ,

представляющих кормовую ценность. Биомасса ряски может использоваться в качестве дорогостоящей кормовой добавки для рыб из-за высокого содержания белка от 18,71% до 29,14%.

Установлено, что ряска эффективно ассимилирует, тем самым удаляет азот и фосфор из реакционной среды (сточных вод), включая их в собственный процесс метаболизма. Показано, что максимальная скорость поглощения ионов аммония в растворах с начальной концентрацией субстрата 20 %, 40 % и 60 % составила соответственно 2,77; 7,04 и 12,56 г/м³/сут. Скорость поглощения полифосфатов в субстратах с начальной концентрацией 20 %, 40 % и 60 % соответственно составила 0,66; 0,96 и 1,33 г/м³/сут. Максимальная плотность роста была достигнута (в  $\Gamma/M^2$ ): 67,4 - для 20 % субстрата на 30-е сутки; 63,0 - для 40 % субстрата и 66,0 - для 60 % субстрата на 27-е сутки культивирования. Наиболее сильные корреляционные связи биомассы ряски с показателями состава сточных вод получены для концентрации субстрата 20 %. установлена зависимость накопления содержания белка в ряске (Lemna minor) от концентрации сточных вод и времени культивирования. Установлено, что на 3-е неделе культивирования зафиксирован максимальный процент содержания белка в ряске от 27,62 до 29,14 % в трех различных концентрациях раствора с высоким содержанием питательных веществ. Максимальное содержание белка в ряске, выращенной на питательной среде с 20 % концентрацией субстрата наблюдалось на 16-е сутки эксперимента и составило 83,23 мг (16,16 г/м²) при максимальной скорости аккумуляции 0,97 г/м²/сутки. В субстрате с 40 %-ой концентрацией максимум белка -85,65 мг (16,63 г/м²) был зафиксирован на 19е сутки при скорости накопления 1,27 г/м²/сутки; с 60%-ным содержанием сточных вод -93 мг (18,06 мг/м<sup>2</sup>) при скорости 1,49 г/м<sup>2</sup>/сутки. Определено, что вид ряски *L. minor* способен производить белка от 3,54 до 5,454 т/га в год.

Пруды с ряской успешно применяются для переработки коровьего навоза, при этом производится биомасса с высоким содержанием протеина. Таким образом, в настоящем исследовании изучается эффективность

крупномасштабных прудов с ряской поглощения питательных веществ из сточных вод животноводческой фермы, оценивается выход биомассы.

Основными принципами разработки системы прудов с ряской, которые были предложены в этом исследовании, являются:

- максимизация темпов роста при ограниченном количестве труда;
- повышение качества и количества обработанной воды до приемлемого уровня в соответствии с местными экологическими нормами.

Пруд был спроектирован как логарифмическая спираль для моделирования скорости роста логарифмической биомассы и обеспечения высокого распределения питательных веществ. Первоначальный спиральный диаметр 1 м был выбран для минимизации распределения поверхности воды на впускной секции. Циркуляция будет достигнута за счет силы тяжести, которая является результатом уменьшения глубины. Этот новый дизайн пруда с ряской имеет несколько преимуществ:

- высокая эффективность обработки;
- легкость сбора ряски;
- сохранение требуемой площади поверхности;
- отсутствие системы циркуляции;
- простота обслуживания, эксплуатации и контроля;
- меньше затрат на рабочую силу и инфраструктуру.

Глубина пруда считалась равной 0,5 м, что позволяло осуществлять больший перенос общей массы к поверхности в единицу времени.

Система пруда для ряски эффективна только в течение пяти месяцев (с мая по октябрь) в Сибирском климате, что требует хранения большого количества органических отходов в зимний период и могут быть потенциальным источником загрязнения грунтовых вод. Выход сухой биомассы для этого типа конструкции для месячного периода выращивания может достигать 16,84 т/год/га. Это низкое значение урожая может быть небольшим из-за лабораторных условий, используемых для выращивания ряски, соответственно, существует высокая вероятность того, что в естественном состоянии мы можем

получить двойное значение выхода сухой биомассы. Влажный урожай составил бы 196,3 т/год/га с содержанием влаги 91,42%. Выходы ряски будут варьироваться в зависимости от многих параметров, включая климатические условия и наличия питательных веществ для роста ряски. Максимальные урожаи могут быть достигнуты в летний период и в начале осенних месяцев.

Система прудов с ряской была разработана в соответствии с нашими экспериментальными результатами, многочисленными вариантами технологии и литературными данными. Аммиак является основной формой азота в сточных водах с высоким содержанием питательных веществ, после чего все расчеты баланса массы и конструкция пруда будут осуществляться в соответствии с уменьшающейся концентрацией аммиака. В среднем каждая дойная корова выделяет около 68 литров навоза в день с содержанием влаги 87% и плотностью 983,52 кг/м<sup>3</sup>. Для мелкого стада из 250 коров может быть произведено 17 м<sup>3</sup> в день коровьего навоза. Однако для отмывки молочной фермы шлангами высокого давления требуется 50 литров воды в день на одного животного, в результате чего производится 12,5 м<sup>3</sup> сточных вод в сутки. В дополнение к 17 м<sup>3</sup> навоза, общий объем производства сточных вод будет составлять 29,5 м<sup>3</sup>/сут.

Была создана математическая модель для описания массопереноса питательных веществ в водоеме с ряской, предназначенного для переработки сточных вод. Ряска была выращена в высокопитательных сточных водах внутри анаэробных сбраживателей (биодигестерах) или биореакторах, размещенных на территории Томской области. В этой модели рассматривался периодический процесс, поскольку скорость потока сточных вод относительно низкая по сравнению с объемом реактора, поэтому скорость потока можно считать равной нулю. Параметры в модели представляют собой начальную концентрацию питательных веществ в среде и глубине пруда. Применяя вариации параметров одного порядка моделирование показало, что модель явно намного более чувствительна к глубине пруда, чем к концентрации, что указывает на то, что эффективность процесса поглощения питательных веществ в системе водоема с ряской ограничена глубиной.

### 1. Литературный обзор

Высокое количество питательных веществ в отходах животноводства и большие объемы этих отходов создали глобальную экологическую проблему [1]. В время требуются технологии, позволяющие эффективно настоящее использовать питательные вещества из сточных вод, что предотвратит загрязнеие поверхностных и подземных природных вод. Альтернативные системы очистки сточных вод, основанные на растениях, позволяют преобразовывать питательные вещества из сточных вод в растительную что позволит избежать проблем, связанных с утилизацией органических отходов сельского хозяйства [2].

В дополнение к экологическим преимуществам, высокопродуктивная биомасса ряски, произведенная во время очистки сточных вод, содержит высокое содержание питательных веществ. За последние 30 лет исследователи продемонстрировали потенциальные возможности использования ряски в качестве еды для сельскохозяйственных животных. В связи с высокой скоростью роста и высоким содержанием протеина, производительность ряски по протеину может быть в 10 раз больше чем у сои [3]. Cheng и др. [4] установили, что скорость роста ряски составляет 29 г-сухой/м²/сутки, что эквиваленто 104 т/га/г. Для небольших фермерских хозяйств выгодно использовать недорогие системы очистки сточных вод на основе ряски. При этом они также получают добавочную протеиновую биомассу.

Возможность управлять ростом для большего содержания протеина или крахмала дают две возможности к последующему использованию биомассы ряски. Высокое содержание крахмала предполагает что ряска может быть использована как промышленный источник сырья для получения этанола в качестве топлива. Высокое содержание протеина дает возможность использовать его как корм для животных. Для коммерциализации этих потенциальных возможностей использования ряски необходимо разработать систему сбора урожая ряски, позволяющую стабильно получать большие количества биомассы ряски. В работе Cheng и Stomp [5] была разработана система, объединяющая

анаэробный биореактор и систему выращивания ряски. Анаэробный реактор производил энергию (биогаз) и раствор питательных веществ, который использовался как субстрат для выращивания больших количеств ряски с высоким содержанием крахмала или протеина.

Наиболее логично сосредоточиться на виде ряски *Lemnaceae* для использования его в водных системах, сконструированных для поглощения питательных веществ из отходов животноводческих ферм. Продукция сухой биомассы более высокая по сравнению с другими растениями и достигает 20,4 т/га в год для *Spirodela polyrrhiza* [6] и 54,8 т/га в год для *Lemna gibba* [7]; [8].

Биогаз является другим важным источником биоэнергии, который обычно получают в результате анаэробной переработки органических отходов, таких как муниципальные органические отходы и сточные воды, сельскохозяйственные органические отходы, индустриальные органические отходы [9]. Органические отходы обычно содержат длинноцепочечные молекулы, такие как углеводы, белки, жиры и целлюлоза. Эти органические соединения гидролизуются анаэробными бактериями до более мелких молекул (сахара, жирные кислоты, аминокислоты и пептиды, немного уксусной кислоты, водорода и углекислого газа). Сахара, жирные кислоты, аминокислоты, пептиды далее ферментируются другой группой анаэробных бактерий до летучих жирных кислот (пропионовая и бутановые кислоты) во время ацидогенеза. Легколетучие жирные кислоты разлагаются до уксусной кислоты, водорода и оксида углерода во время ацетогенеза. Анаэробный процесс заканчивается превращением уксусной кислоты и водорода в метан в процессе матаногенеза [9]. Благодаря обработанности технологии и ее низкой стоимости, производство биогаза получило значительный рост в последние годы, особенно в Европе [10]. Большой интерес вызывает производство биогаза из различных источников сырья, таких как навоз, муниципальные сточные воды и остатки сельскохозяйственных растений.

#### 1.1. Ряска

Ряска — это маленькое свободно плавающее водное растение, принадлежащее к семейству Lemnacea. Это семейство разделяется на четыре рода (расположены по убыванию количеств видов): Spirodela, Lemna, Wolffiella, и Wolffia. Самый большой вид Spirodela polyrhiza также называют «гигантской ряской» — длина листа данного вида составляет 15 мм. В тоже время представители рода Wolffia меньше 1-го мм. Виды ряски также отличаются строением их тела. Семейство Lemnacea обладает стеблем, к которому прикреплены листья и корни. В тоже время семейства Wolffiella и Wolffia не имеют корней из-за меленьких размеров листа (рисунок 1).

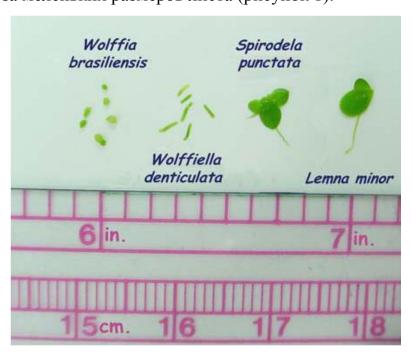


Рисунок 1-Размеры различных видов ряски

Ряска может размножаться половым путем с помощью цветов — этот способ размножения редко наблюдается у большинства видов. Вегетативное размножение является доминирующим способом размножения у ряски [11]; [12]. При вегетативном размножении дочерний стебель отрастает от материнского стебля и затем отделяется от материнского растения. Этот способ размножения напоминает бинарное деление микроорганизмов. По сравнению с другими растениями, ряска является одним из наиболее быстро растущих растений. В лаборатории при оптимальных условиях биомасса видов Lemna aequinoctialis и

Wolffia microscopica удваивается примерно за 24 часа [12]. Результаты многих исследований подтверждают высокую скорость роста биомассы ряски, но полученные данные разными исследователями могут сильно отличаться даже для одних и тех же видов и одинаковых условий. Полученная скорость роста ряски зависит от отличия в климате, вида ряски, типа среды, способа организации водоема для выращивания ряски [4]. Все эти условия могут значительно влиять на скорость прироста биомассы.

Ряска является подходящим объектом для исследования генетических модификаций. Ряска воспроизводит себя клонированием таким образом, что потеря экспрессии генов в следующем поколении сведена к минимуму. Эти характеристики ряски дают возможность производства лекарств и ферментов путем введения необходимых генов в геном ряски с помощью передовых биотехнологий [13].

Другими преимуществами ряски является уменьшение ею потерь воды при испарении в водоемах на 10-30% [8]; [14], а также сокращение количества комаров [15].

Также есть другие способы применения ряски, такие как очистка сточных вод и получение топлива из биомассы ряски. Ряска долгое время служила индикаторным растением при определении токсичности вод [12]; [16]; [17]. Простота выращивания, небольшие требования к пространству, а также быстрые темпы роста и равномерная культура позволяет ряски относительно быстро реагировать на загрязнители.

Известно, что ряска хорошо растет весной и осенью, значительно медленней летом и очень плохо зимой.

#### 1.2. Ряска для очистки сточных вод

Учены со всего мира проводят исследования по изучению потенциального использования ряски для очистки вод, особенно для удаления из воды питательных веществ. Предварительная анаэробная очистка сточных вод

повышает эффективность использования для очистки систем прудов с ряской, особенно для удаления из воды питательных веществ [18].

Высокая устойчивость ряски к высоким коцентрациям питательных веществ (200-800 г/м³ азота, и 30-100 г/м³ фосфора) является очень ценным ее свойством в очистке сточных вод. Еще одним преимуществом ряски перед другими водными растениями является ее устойчивость к низким температурам. В работе [19] было собрано несколько штаммов ряски из различных географических районов, устойчивых к низким температурам. Lemna gibba 8678 была помещена в открытую емкость на открытом воздухе и находилась там в течении нескольких дней при температуре ниже 0 °С. Впоследствии ряска оказалась способной к росту при температуре воды выше 0 °С. Устойчивость ряски к низким температурам позволяет круглогодично использовать ее для очистки сточных вод в холодных регионах, где невозможно использовать тропические растения, такие как водный гиациант, который растет только летом.

L. punctata имеет хорошую способность к извлечению питательных веществ из сточных вод свиноферм (с высокой концентрацией аммония около 240 г/м³). Скорость поглощения аммония и фосфат-ионов составляет соответственно около 1,0 г/м³/ч и 0,13 г/м³/ч [20]. Spirodela polyrrhiza также хорошо поглощает питательные элементы из сточных вод свиноферм − она может поглощать до 84 и 89% общего азота и общего фосфора соответственно. В ходе исследования способности Lemna minor очищать сточные воды свиноферм была установлена скорость поглощения азота и фосфора 2,1 г/м²/сутки и 0,6 г/м²/сутки соответственно [4].

Различные виды ряски используются для очистки сточных городских и промышленных вод во многих странах, включая Бангладеш, Израиль, США и др. [7]; [21]; [22]; [23]; [24].

Culley и др. [22] установили, что смесь видов ряски может поглащать до 1378 кг аозта (главным образом в виде аммония), 347 кг фосфора, 441 кг калия с одного гектара водной поверхности за год в климатических условиях Луизианы (США). Ряска также устойчива к высоким концентрациям питательных веществ

- Spirodela polyrrhiza способна к росту при концентрации азота и фосфора 1 г/дм<sup>3</sup> и 1,5 г/дм $^3$  соответственно [25]. Alaerts и др. [21] показали, что ряска удаляет до 74% общего азота (по Кельдалю) и до 77% общего фосфора в сточных водах Бангладеша при времени контакта 21 сутки в летний период. На выходе в сточных водах содержание азота (по Кельдалю) и общего фосфора составляет соответственно 2,7 г/м $^3$  и 0,4 г/м $^3$ . При выращивании штамма ряски *Lemna minor* 8627 на 50% растворе сточных вод свиноферм, уменьшение концентрации общего азота (по Кельдалю), NH<sub>3</sub>-N, фосфора общего, OPO<sub>4</sub>-P, общего органического вещества, K, Cu и Zn произошло соответственно на 83, 100, 49, 31, 68, 21, 28, и 67% [26]. В период роста ряска поглощает до 83,7% и 89,4% азота и фосфора (общего) соответственно из вод, полученных смешением сточных вод со свинной фермы (6%) с водой (94%) за 8 недель. Урожай ряски при этом собирался дважды в неделю [27]. Наблюдалось значительно улучшение качества сточных вод – в среднем содержание азота (по Кельдалю) уменьшалось на 98%, содержание общего фосфора падало на 98,8%. Скорость поглощения азота (по Кельдалю) ряской из сточных вод была одной из самых высоких и составила 4,4  $r/m^2$ / сутки. При этом содержание растворенного кислорода в воде увеличилось в среднем с 0 до 3,0 г/м<sup>3</sup> [28].

Как растение для очистки сточных вод, ряска имеет несколько преимуществ перед другими водными макрофитами, такими как водяной гиацициант и сальвиния. Первое — это высокая скорость поглощения питательных веществ, предпочтительно ионов аммония [7]. Поглощение аммония является очень важным в очистке сточных вод со свиноферм, так как азот находится в этих водах главным образом в виде иона аммония. Избыток аммония вызывает эвтрофикацию открытых водоёмов и как результат, превращение ионов аммония в нитрат-ионы и попадание их в грунтовые воды [7]. Ценным свойством ряски является ее предпочтение к более эффективному поглощению азота в виде NH<sub>4</sub> [29], а не NO<sub>3</sub> [30].

Из-за высокой чувствительности к различным органическим и неорганическим веществам, вид *Lemna species* используется как тестовый

организм для оценки качества воды, а также при проведении экотоксикологических исследований при изучении негативного влияния гербицидов, фармацевтических веществ, тяжелых метало и др. веществ на водные растения [31].

Водоросли и бактерии в природных водах конкурируют с ряски за питательные вещества, что вероятно приводит к замедлению роста ряски.

В связи с тем, что ряска маленькая и ее легко собирать, сбор и переработка ряски намного проще по сравнению с водорослями, которые сложно собирать. Например водный гиациант трудно перерабатывается из-за жесткости его волокон и мощной корневой системы. В дополнение к положительным свойствам, ряска поглощает ионы аммония и выделяет при этом ионы водорода, что приводит к снижению рН природных поверхностных вод. При низком значении рН уменьшается выделение аммиака из поверхностных вод в атмосферу [32].

Концентрация питательных веществ в среде обитания ряски является параметром, который влияет на кинетику роста ряски и скорость поглощения питательных веществ. Концентрации разных форм азота использовались как независимые переменные для предсказания скорости ростя ряски и поглощения ею питательных веществ. [34] использовал общую концентрацию азота в его модели для оценки скорости роста ряски *Lemna obscura* в растворе коровьего навоза, переработанном в анаэробном биореакторе. [37] использовал отдельно концентрации аммония и аммиака для исследования роста ряски *Spirodela polyrrhiza*.

Более сложные модели были разработаны [35] и [36]. Скорость роста Lemna gibba была описана с помощью модифицированной модели Монода которая учитывает концентрации различных питательных веществ, включая химическое потребление кислорода (ХПК) в сточных водах. В периодическом эксперименте, проведенном [20]; [4], продолжение роста ряски наблюдалось после поглощения ею всех форм неорганического азота и фосфора из стерильного питательного раствора. Это продолжение роста говорит о том, что в использованном питательном растворе могут быть другие источники доступных питательных веществ. Также было обнаружено, что ряска может поглощать значительное количество N и P из сточных вод без роста ее массы первые 96 часов эксперимента, что показывает способность ряски к поглощению и хранению питательных веществ в ее тканях для дальнейшего потребления [20]; [4].

Landolt и Kandeler [12] установили, что наиболее высокая концентрация азота и фосфора в биомассе *Spirodela punctata* составила соответственно 72 мг-N/г сухой биомассы и 24 мг-Р/г сухой биомассы, в то время как наиболее низкая концентрация азота и фосфора составили соответственно 17 мг-N/г сухой биомассы и 6 мг-Р/г сухой биомассы.

В связи с большим количеством микроорганизмов в сточных водах, ассоциация бактерий с ряской может повлиять на рост ряски. Underwood и Baker [33] показали, что введение бактерий Vibrio sp. в питательный раствор привело к значительному увеличению роста ряски Lemna minor, в тоже время добавление бактерий Klebsiella sp., Enterobacter sp., и Serratia sp. привело к небольшому усилению роста. Также было обнаружено присутствие азотфиксирующих гетеротрофных бактерий и цианобактерий в слое ряски в Техасе и Флориде [38]. Также было показано, что от 15 до 20% азота ряской потребляется за счет азотфиксации. Тем не менее, основная часть питательных веществ поглощается ряской из жидкой среды.

Использование ряски для очистки муниципальных вод не является новым способом [7]. Эти растения использовались для доочистки муниципальных сточных вод около двух десятилетий в США [39].

Было установлено, что удаление N и P ряской происходило лучше в природных условиях, чем в лабораторных. Это объясняется тем, что в лабораторных условиях удаление питательных веществ из воды происходит исключительно за счет роста ряски, тогда как в природных водах присутствуют бактерии, например нитрифицирующие и денитрофицирующие, которые также поглощают питательные вещества в добавлении к поглощению их ряской [40].

Технологии очистки, эффективные во время вегетативного периода данной культуры, требуют хранения большого объема органических отходов (навоза) в течении почти года во время работы животноводческих ферм, что приводит к значительному увеличению стоимости утилизации отходов для фермеров. В основном период роста ряски более продолжительный чем у других растений (кукуруза, соя). Продолжительность периода эффективной очистки сточных вод может быть увеличена за счет подбора штамма ряски, который хорошо растет ранней весной и поздей осенью. Этот штамм будет наиболее эффективно очищать сточные воды и в летний период времени [2].

В дополнение к высоким способностям ряски к очистке сточных вод, ряска, особенно виды *Lemna*, имеют возможность к их улучшению в будующем с помощью генетической инженерии. Простота процедуры внедрения чужеродных генов в виды *L. gibba* и *L. minor* была продемонстрирована в работе [13]. Эта технология позволяет увеличить способность ряски к поглощению питательных веществ или других специфических загрязнителей из сточных вод и выход биомассы, что экономически выгодно.

### 1.3. Использования ряски для получения белковых концентратов

Возможность использования ряски в качестве источника белков в кормах для животных начали активно изучать в конце 20 века. Внимание исследователей привлекли особые характеристики ряски вида *Lemnaceae*. Содержание белка в ней колеблется от 15 до 45 % сухой массы в зависимости от конкретных видов и штамма, в пределах одного вида, а также условий выращивания [12]. По этому показателю ряску можно сравнить с соей, содержание белка в которой может варьироваться от 33 до 49 % в зависимости от генотипа и условий культивирования [41]. Количество белка в ряске превышает его содержание в основных злаковых культурах [42].

Высокая скорость поглощения ряской биогенных веществ из воды, которые часто являются загрязнителями при их высокой концентрации, не является единственным определяющим внимание фактором.

Известны способы применения ряски для очистки сточных вод, получения топлива из биомассы ряски, для обогащения почв. В сельском хозяйстве интерес к ряске вызван ее высокой питательной ценностью. Многие исследователи считают возможным использовать ряску в качестве кормовой добавки для животных (кур, коров, рыбы) [12]; [44]; [45]; [46].

Так, в работе [11] представлены результаты оценки ряски в сравнении с соей, хлопковым зерном, арахисом и люцерной по способности к скорости продукции и содержанию питательных веществ. Установлено, что при выращивании на одинаковой площади за одинаковое время соя дает белка только на 10 % больше по сравнению с ряской. Однако для выращивания ряски требуется меньшая площадь, и скорость роста ее значительно выше, по сравнению с соей.

Содержание протеина является важной характеристикой, позволяющей в последующем использовать полученную биомассу ряски в качестве белкового корма для крупного рогатого скота, птицы, рыб. Клетки ряски содержат мало лигнина, вследствие чего ряска легко переваривается в желудке животных, и облегчается доступ к усвояемому белку [47].

Немецкие ученые [48] изучали пищевую ценность ряски *Lemnacea* с точки зрения возможности ее использования в качестве пищи для человека. Показано, что содержание белка в ряске составляет от 20 % до 35 %, жира - от 4 % до 7 % и крахмала - от 4 % до 10 % в пересчете на сухое вещество. Установлено содержание аминокислот в ряске: лизина - 4,8 %; метионина и цистеина – 2,7 %; фенилаланина и тирозина - 7,7 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что содержание данных аминокислот близко к рекомендациям Всемирной организации здравоохранения. Более того, эти крошечные растения содержат ценные омега-3 жирные кислоты такие, как стиоридоновая и альфа-линоленовая кислоты.

Содержание аминокислот в ряске вида L. minor представлено в таблице 1 [48].

Таблица 1- Аминокислотный состав белков в ряске вида L. minor (г/100 г белка)

Цистеи	Метио	Аспарагин	Треонин	Серин	Глутамин	Глицин	Аланин	Валин	Изолейцин	Лейцин	Тирозин	Фенилаланин	Лизин	Гистидин	Аргинин	Пролин
0,9	1,6	8,2	4,0	4,1	9,8	4,6	5,1	4,6	3,7	7,3	3,1	4,4	5,0	1,5	4,8	3,8

Во многих азиатских странах, таких как Камбоджа, Таиланд, Лаос, люди традиционно употребляют в пищу такой вид ряски, как *Wolffia* [49].

В настоящее время растения признаны единственной жизнеспособной производственной платформой для производства секреторных антител [50]. Особый интерес вызывают промышленные протеины растительного происхождения, представляющие собой гидролазы, включая гликозидазы (например, целлюлаза, амилаза и глюкуронидаза) и протеазы (например, трипсин). Биокатализаторы используются в больших количествах и во многих промышленных производствах, поэтому цена на них не должна выступать в качестве лимитирующего фактора. Основным препятствием для использования промышленных белков является тот факт, что для выращивания трансгенных растений необходимы значительные по площади земельные участки. Кроме того, широкое необходимо признание открытой культивации растений ДЛЯ производства белка [51].

В настоящее время используется несколько видов растительного сырья для производства белка, которые в той или иной мере служат еще и сырьевым продуктом питания (кормовой культурой). Учитывая также и тот факт, что глобальные запасы продовольствия, согласно прогнозам, становятся ограниченными, дальнейшее использование этих видов сырья будет встречать Поэтому очевидна необходимость в разработке новых сопротивление. производственных решений. Перспективной платформой является получение белка из болотной ряски, так как она не является в полной мере сырьевым продуктом питания и для ее выращивания не требуется большое количество земельных площадей. Ряска является идеальным сырьем для производства

рекомбинантных белков. Она безопасна, быстрорастущая (время удвоения биомассы порядка 36 ч), легко выращивается и собирается, имеет высокое содержание белка (до 45% сухого веса) [13]; [52]. Это растение способно продуцировать сложные белки, которые нелегко получить из бактерий и дрожжей, или произведенных в течение длительного периода времени клетками млекопитающих. Кроме того, ряска съедобна и, следовательно, представляет собой привлекательную систему для пероральных вакцин [53]; [54]. Крупнейшая биотехнологическая компаниия Biolex Inc. (Питтсборо, штат Северная Каролина) разработки эффективной системы ведет ДЛЯ производства фармацевтических белков на основе ряски Lemna [48].

Для того чтобы платформа по производству белка из ряски была экономически целесообразной для промышленного производства, необходимо решить ряд вопросов, в том числе улучшить уровни экспрессии белка, исследовать геномную информацию о размножении ряски, также интенсифицировать методы для увеличения до промышленных масштабов производства, как в закрытых, так и открытых системах [52]. Систематические и согласованные исследовательские усилия, основанные на биологических и инженерных науках такие, как оптимизация процесса производства, использование регуляторных элементов и использование генетических кодов, а также разработка улучшенных систем культивирования в фотобиореакторах, будут иметь решающее значение в производстве протеина из Lemnaceae.

Существуют две основные категории биореакторов, обычно используемых для культивирования растений, клеток, тканей и органов: жидкофазные и газофазные реакторы [55]. Реакторы на жидкой фазе наиболее часто используются, но доставка кислорода в погруженные клетки или ткани остается проблемой. Большинство растительных клеток и тканей подвержены стрессу сдвига, поэтому, в отличие от микробных клеток, агрессивное возбуждение не особенно полезно. Газофазные реакторы с минимальным сдвигом решают проблему доставки О<sub>2</sub>. Для крупномасштабной культуры растительных клеток и тканей обычно используют следующие типы биореакторов: реакторы с

механическим перемешиванием, барботажные колонны, воздушные лифты, вращающийся барабан.

Для достижения разумной нормы прибыли производительность растительных клеточных культур должна возрасти в 10-50 раз, и это требует систематической стратегии, направленной на максимизацию эффективности всех этапов производственного конвейера от экспрессии генов до культуры клеток, процесса выделения, и, наконец, очистки белка [56]; [57].

### 1.4. Выращивание ряски и ее сбор

### 1.4.1. Скорость роста

Большинство исследователей рекомендуют начать и поддерживать систему выращивания ряски с сохранением одиночного слоя ряски, который полностью закрывает поверхность воды. Если ряска полностью закрывает водную поверхность, то это подавляет развитие водорослей [40]; [30]. Масса ряски удваивается за 2-7 дней и описывается логарифмическим законом роста. Линейный рост биомассы ряски находится в диапазоне 10-120 грамм сухой массы на 1 м² для *L. minor* [58]. Reddy и Debusk [58] установили, что при начальной концентрации ряски 10-11,9 г/м² (в пересчете на сухую массу) рост водорослей полностью подавляется; [22]; [59]; [60] установили, что конкуренция водорослей с ряской становится минимальной при начальной концентрации ряски 30-40 г/м² (в пересчете на сухую массу); в тоже время [61] и [21] рекомендуют начальную концентрацию ряски от 80 до 132 г/м².

Обычно выход сухой биомассы ряски составляет 7,4-23,5 т/га/год. Максимальный выход сухой биомассы установлен в работе [21]; [6] составляет 42-61,8 т/га/год, однако при низкой плотности растений, недостаточном освещении, неоптимальной температуре или концентрации питательных веществ наивыешая скорость роста растений достигается редко. [40] установил, что свет является важным фактором роста ряски и рекомендовал для максимальной скорости роста ряски диапазон значений освещенности 200-300 µмоль/м²/сек (PPF) в помещении. Зависимость плотности слоя ряски от

интенсивности освещения очень удобна для предсказания скорости роста и выхода биомассы ряски [65].

Следующие факторы тормозят скорость роста ряски. Скорость ряски уменьшается при достижении критического значения биомассы, при котором происходит перекрывание листьев ряски [40]; [59]; [22]; [58]. Также скорость ряски замедляется при низкой концентрации питательных веществ [30]. Ряска предпочитает поглощать азот в виде ионов аммония, нежели в виде аммиака или других форм в связи с тем, что поглощение ионов аммония и превращение их в аминокислоты и протены внутри ряски требует меньше энергии. Скорость роста уменьшается если NH<sub>3</sub>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> или когда рН больше рКа аммония, равному 9,25 [40]; [22], в то время как NH<sub>3</sub> (растворенный или газ) ингибирует метаболизм и газообмен в клетках ряски из-за влияния на систему переноса электронов [63]. Осаждение фосфора и кальция при рН около 9,3 приводит к уменьшению растворенных питательных веществ, вследствие чего скорость ряски также уменьшается. Ряд исследования показали, что ветер и движение воды также уменьшает скорость роста ряски [30]; [61]. При температуре ниже 17 °C ряска начинает уменьшать свою биомассу и при температуре около 5 °C она опускается на дно [64]. Скорость роста также уменьшается при конкурировании различных видов ряски между собой [6].

### 1.4.2. Сбор урожая ряски

Сбор ряски является неотъемлимым элементом системы очистки воды с помощью ряски так как это приводит к физическому удалению азота и фосфора из системы вместе с полученной биомассой. Без сбора урожая ряски растение будет умирать и опускаться на дно водоема, разлагаться и поглощенный ею азот и фосфор будут возвращаться в воду. Извлеченная биомасса может быть использована в качестве удобрения [64], в качестве белкового корма [22]; [66] или для производства топлив, например метана [62]; [67].

Частота сбора урожая и количество собранной биомассы за один сбор отличаются для различных исследований. При выращивании ряски, она должна

закрывать водную поверхность для подавления конкурирующих с ней за питательные вещества водорослей, и сбор урожая ряски необходимо проводить не реже один раз в 20 дней или чаще для лучшего удаления питательных веществ из очищаемой воды [68]. Вероятно одной из лучших систем по выращиванию ряски является система в Бангладеш, где выращенная на сточных водах ряска используется в качестве корма для трески [64]. Данная система очистки воды является успешной, так как побочный продукт в виде биомассы ряски используется в качестве корма для выращаваемой рыбы. Примером неудачной системы выращивания ряски является система в городе Булдер (США, штат Невада), где ряска выращивается в лагуне площадью 4,5 га, складируется на местной мусорке и используется в качестве компоста. Система работает неудовлетворительно из-за того, что четыре рабочих с двумя механическим сборниками урожая ряски не успевают ее собирать. Система выращивания ряски требует достаточное количество рабочей силы для сбора биомассы ряски [64].

Непрерывный сбор урожая улучшает удаление питательных веществ из воды и предотвращает переполнение водоема ряской, вследствие чего ряска может умирать, разлагаться и питательные вещества буду возвращаться в воду. В штате Луизиана [22] установили, что от 50% N и P в биомассе ряски возвращаются обратно в воду, если период сбора между урожаями ряски больше 20 дней. Несколько исследований подтверждают необходимость сбора большей части биомассы ряски, выросшей в течении 3 недель для улучшения удаления питательных веществ из воды. В Бангладеш [21] установили, что при сборе урожая каждые 2-3 дня при среднем приросте сухой биомассы ряски 4,5 г/м<sup>2</sup> в день удаление общего фосфора достигало 74-77% (90-95% в пересчете на РО<sub>4</sub>). В Австралии [61] при сборе урожая каждые 84, 132 и 250 ч установили, что максимальный прирост биомассы ряски и концентрация питательных веществ в биомассе отрицательно коррелируют с продолжительностью ее выращивания. В Тайланде [6] варьировали интервал между сборами урожая ряски в диапазоне 2-15 дней в зависимости от погодных условий сезона (теплый/холодный) и установили такую же закономерность, как и [61], а также обнаружили, что при

концентрации общего фосфора ниже 0,3 г/м<sup>3</sup> нормальный рост ряски невозможен. В другом исследовании было установлено, что при концентрации азота и фосфора соответственно 4 г/м<sup>3</sup> и 0,74 г/м<sup>3</sup> нормальный рост ряски также невозможен [69].

Несмотря на то, что частый сбор урожая увеличивает прирост биомассы и удаление питательных веществ из очищаемых вод, частота сбора ограничивается энергетическими и трудовыми затратами.

### 1.5. Ингибиторы роста ряски

Было проведено много различных исследований, которые показывают, как легко и в большом количестве растет ряска. Растения этого вида, ввиду скорости своего роста, хорошо подходят для изучения токсичности. В данной работе более 1,5 года были потрачены на разработку питательного раствора и внутренней среды, подходящей для роста ряски. В результате потери нескольких культур это исследование продемонстрировало несколько факторов, которые препятствуют росту ряски, в том числе: ветер, водоросли, грибки, тля и плотность посевов.

#### 1.5.1. Ветер

Ряска предпочитает расти в спокойных условиях. В начале исследования было обнаружено, что ряска встречается только в водоемах, защищенных от ветра деревьями и в медленно движущейся воде (рисунок 2), Однако она не может расти в прудах с движущейся поверхностью воды (рисунок 3). В нескольких исследованиях другими учеными были сделаны аналогичные наблюдения [6]; [70]. Существуют корпорации, которые продают плавающие барьеры для снижения воздействия ветра и движения воды [61].



Рисунок 2- Ряска растет нормально в защищаемой области



Рисунок 3- Ряска не могла расти в водоемах с движущейся поверхностью воды

# 1.5.2. Водоросли

Ряска имеет хорошую потенциальную возможность к снижению общего содержания взвешенных твердых частиц в сточных водах [71], главным образом перекрывая слой воды и подавляя рост водорослей. С другой стороны, если плотность посевов ряски значительно меньше 100% -ного покрова или 20-30 гсухой /м², то водоросли получают достаточное количество солнечного света [72];

[73]. Когда водоросли присоединяются к листьям ряски, небольшие пузырьки воздуха появляются под средой, отсекающей контакт ряски с жидкостью [12]. Как только водоросли начинают конкурировать с ряской, их трудно удалить [71] без химической обработки [6]. Для демонстрации потенциала водорослей к подавлению роста ряски был проведен эксперимент в двух 40-литровых пластиковых коробках, в первой из которых плотность ряски составил 30 г сухой массы на м², во второй – 100 г сухой массы на м². В обе коробки было налито 30 л водопроводной воды с концентрацией питательных веществ 0,05%. Ряска освещалась световым потоком в 140 µмоль/м²/с (РРF). Через 4 недели ряска в первом ящике перестала расти, стала желтеть, начался распад, На поверхности воды появились маленькие пузыри как показано на рисунок 4. Во втором ящике ряска продолжала нормально расти (рисунок 5).



Рисунок 4- Водоросли, полностью конкурирующие с ряской после одномесячного культивирования с начальной плотностью  $30~{\rm r/m^2}$ 



Рисунок 5- Ряска, непрерывно растущая с плотностью 100 г/м<sup>2</sup>.

### 1.5.3. Грибы

Грибы имели тенденцию появляться в урожаях ряски, часто как результат хлороза и некроза, который, если его оставить без присмотра, быстро размножался и уничтожал все культуры ряски [74]. Предполагается, что ежедневные изменения климата на открытом воздухе и большое количество ряски были в состоянии предотвратить грибы от уничтожения всего урожая ряски. Рекомендации по предотвращению и ликвидации грибковых инфекций в растениях включают: пониженные температуры, увеличение содержания кремния в растительной ткани [75] и использование фунгицидов. В этом грибами исследовании заражение появилось после четырех месяцев культивирования ряски в лабораторных условиях (рисунок 6). Для уничтожения грибов использовался фунгицид (Бактофит-Микробиологический препарат эффективный против грибных и бактериальных болезней растений) в концентрации 7 г/л. Этот фунгицид был распространен на площади поверхности ряски два раза в неделю, в течение двух недель, грибы полностью исчезли, и ряска снова начала нормально расти, как показано на рисунке 7.



Рисунок 6- Листья ряски заражены грибами и разлагаются микроорганизмами.



Рисунок 7- Листья ряски после одной недели обработки фунгицидом.

#### 1.5.4. Тля

Тля была замечена на поверхности ряски через один месяц культивирования в лаборатории ряски *L. minor* привезенной из водоема, как показано на рисунке 8. Хотя темпы роста в этих растениях были ниже, чем в растениях без тли, не ясно, играла ли тля главную роль в ингибировании роста ряски [6]. Тля, обитающая на поверхности ряски в некоторых случаях, была

связана с уменьшением роста [6]; [60]. Тля была удалена пестицидами Биотлин (Препарат реальная помощь садоводам в борьбе с тлёй) с концентрацией 0,3 мл/л, которыми обрабатывалась поверхность раствора в течении недели до исчезновения тли (рисунок 9).



Рисунок 8- Ряска заражена тлей после 4 месяцев культивирования.



Рисунок 9- Тля умерла после одной недели обработки инсектицидом.

#### 1.5.5. Плотность слоя ряски

Плотность культур выше 100 г сухой массы на м<sup>2</sup> приводит к тому, что слой ряски становятся переполненными и темпы роста ряски снижаются. С другой стороны, при меньшей плотности ряски наблюдается более высокие темпы роста. При плотности культуры 20-30 г сухой массы на м<sup>2</sup> наблюдается низкие темпы роста из-за увеличения конкуренции со стороны водорослей из-за дополнительного света, проходящего через слой [65]. Для исследования влияния плотности посева на темп роста была культивирована ряска (*L. minor*) в лабораторных условиях в двух фотобиореакторах с площадью поверхности 0,26 м<sup>2</sup>, заполненных 50 л водопроводной воды. Начальная плотность ряски составила 300 г сухой массы на м<sup>2</sup> при интенсивности света 154 µмоль/м<sup>2</sup>/с, рисунок 10. Через две недели наблюдалось уменьшение листьев ряски, и через 4 недели ряска начала разлагаться, как показано на Рисунок 11.



Рисунок 10- Ряска культивируется в двух биореакторах с начальной плотностью посева 300 г сухой массы на м<sup>2</sup>.



Рисунок 11- Ряска полностью умерла через 4 недели

Факторы, влияющие на рост ряски в этих экспериментах, включали: ветер (движение), водоросли, грибы, тля и плотность посевов. В лабораторных условиях наблюдается снижение темпов роста ряски в связи с отличием лабораторных условий от условий в естественной экосистеме. Преимуществом условий *in vitro* является контроль некоторых условий окружающей среды, таких как температура, интенсивность света и период, но лабораторная среда может значительно отличаться от естественной экосистемы.

## 1.6. Цели исследования

Целью настоящих исследований являлось

- 1. изучение процесса ассимиляции основных веществ и накопления биомассы ряской с учетом варьирования концентрации сточных вод.
- 2. изучение влияния условий культивирования на накопление белка в ряске *Lemna minor*. При этом внимание было уделено таким варьирующим факторам, как концентрация питательной среды и наличие/продолжительность освещения.
- 3. Изучение нового дизайна системы прудов с ряской, имитирующего логарифмическую скорость роста ряски.
- 4. Построение математической модели переноса массы питательных веществ в системе прудов с ряской.

## 2. Объект и методы исследования

## 2.1. Природные водоемы

В августе 2016 г. для сбора ряски в целях проведения экспериментов было исследовано несколько природных водоемов в районе поселков Мирный-Светлый (Томская область) (рисунок 12). На водоемах в районе от поселка Светлый до поселка Малая Михайловка ряска не была обнаружена как показано на рисунке 13. Это объясняется тем, что на этих водоемах отсутствует деревья, которые закрывают водоемы от ветра – ряска не растет на водоемах, доступных для ветра.

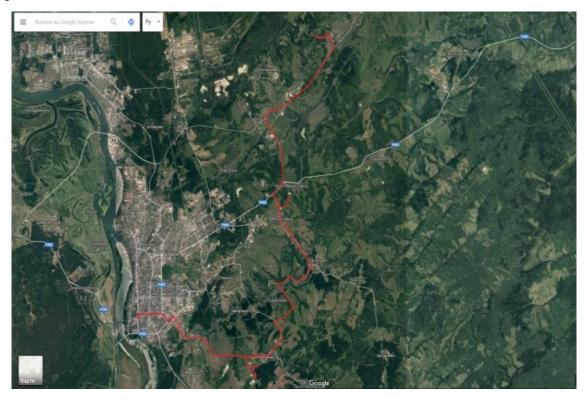


Рисунок 12- Спутниковый снимок схема маршрута поиска ряски с красным цветом

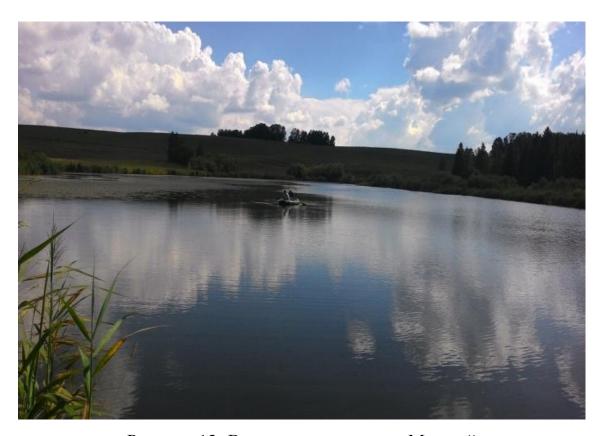


Рисунок 13- Водоем возле поселка Мирный

В районе поселка рассвет были обнаружены водоемы с ряской (рисунок 14)—эти водоемы были защищены деревьями от ветра (рисунок 15). Температура воды в это время днем составила 18,5 °C. Ряска собиралась с помощью специальной металлической сетки размером 0,447×0.65 м. Ряска была собрана из трех природных водоемов. Концентрация ряски в этих водоемов составляла 2244, 709 и 1080 г/м². В собранной биомассе было установлено два вида ряски: *Spirodela polyrrhiza* и *Lemna minor*.



Рисунок 14- Спутниковый снимок водоема в районе пос. Светлый



Рисунок 15- Ряска уже хорошо выращены в этом водоеме

Для перевоза ряски в лабораторию использовалась водопроводная вода. Для удаления других видов водных растений, насекомых и улиток, в лаборатории ряска также промывалась водопроводной водой. После этого в два идентичных фотобиореактора, размером 0,687×0,387×0.28 м, была помещена ряска таким образом, чтобы она полностью закрывала водную поверхность.

В районе корпуса Томского Государственного университета был обнаружен непроточный водоем с видом *Lemna minor* (рисунок 16). Из этого

водоема в сентябре с помощью сачка (0,14×0,19 м) было собрано свежей ряски. Температура водоема в это время составила 15 °C.



Рисунок 16- Вид ряски *Lemna minor* в районе корпуса ТГУ

Для оценки способности ряски поглощать аммоний в природных условиях из этого водоема были взяты три образца воды с итервалом две недели: первый образец — 15 августа 2016г, второй — 1 сентября, третий — 13 сентября. Химический анализ воды проводился в аккредитованной межвузовской лаборатории радиационной спектроскопии Томского Политехнического Университета.

Масса сырой биомассы ряски определялась сразу после взятия образца. Влага с ряски удалялась с помощью бумажных салфеток, после чего производилось взвешивание ряски. Высушивание ряски осуществляли (в трех повторностях) взвешивалась и помещалась в алюминиевую фольгу с предварительно известной массой в электрической печи (SNLO 58/350) при температуре 105 °C в течение 9 ч, после чего определяли массу сухой биомассы ряски. процент сухой массы рассчитывался по формуле 1 и составил 8,58:

$$CM = \frac{M_1 - M_2}{M_3} \times 100\%$$
 (1)

Где СМ- процент сухой массы;

 $M_1$  - масса высушенной ряски с фольгой;

М<sub>2</sub> - масса фольги;

М<sub>3</sub> - масса ряски до высушивания

### 2.2. Материалы и методы исследований очистки сточных вод

Материалами исследований служили ряска вида *Lemna minor*, выращенная в лабораторных и естественных условиях водоема, исходные образцы сточных вод из метантенка. Объекты исследований — сточные воды, подвергшиеся очистке ряской вида *Lemna minor*.

В ходе изучения процесса очистки сточных вод из метантенка ряской *Lemna minor* акцент был сделан на следующие контрольные точки эксперимента: скорость роста биомассы ряски, скорость очистки сточных вод из метантенка и скорость поглощения питательных веществ ряской.

На первоначальном этапе исследований провели процесс адаптации ряски к лабораторным условиям. После изъятия образца ряски из природного водоёма она была помещена в два стеклянных фотобиореактора номинальным объемом 70 дм<sup>3</sup> (рисунок 17).

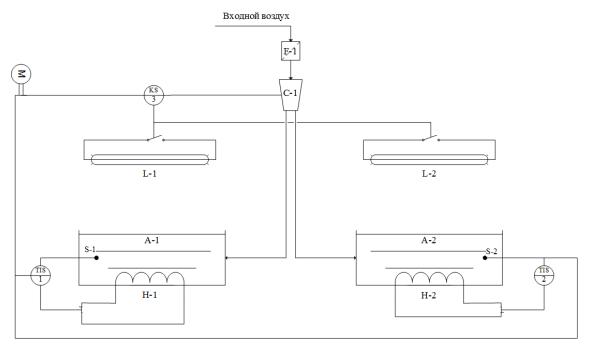


Рисунок 17- Схема фотобиореактора: А- Аквариум 75 × 28 × 40 см; С- Воздушный компрессор; L- Лампа; Н- Нагревательный кабель; TIS- Термостат; KS- Цифровой таймер - два канала; S- Датчик температуры.

Рабочий объем биореактора составлял 55 дм<sup>3</sup> водопроводной воды. Для имитации процесса фотосинтеза ряски использовалась специальная фотолампа FLUORA OSRAM, установленная на расстоянии 0,3 м над водной поверхностью. Поток фотонов от лампы составлял 154 мкмоль/м<sup>2</sup>/с (PPF), продолжительность периода освещения - 16 часов в день. В автоматическом режиме в фотобиореакторе поддерживалась температура 25 °C. Подача воздуха осуществлялась периодически - для перемешивания и поддержания постоянной концентрации растворенного кислорода в течение 1 мин, после чего 9 мин стадия покоя.

Для подавления роста водорослей стенки фотобиореактора были обклеены темной бумагой. Для поддержания постоянного уровня воды в фотобиореактор каждые три дня добавлялась водопроводная вода в таком количестве, чтобы ряска полностью покрывала водную поверхность. В результате плотность биомассы ряски составляла 500 г/м<sup>2</sup>.

На следующей стадии эксперимента в полиэтиленовые емкости, стенки которых не пропускают свет, помещалось 250 см<sup>3</sup> субстрата (сточной воды из метантенка) и 0,170 г (сухой массы) ряски таким образом, чтобы ряска образовывала одиночный слой и полностью закрывала поверхность воды, что необходимо для подавления роста водорослей.

Всего было приготовлено 10 групп образцов. Каждая группа состояла еще из трех подгрупп. Подгруппы отличались концентрацией субстрата. В первой подгруппе концентрация субстрата составляла 20 %, во второй - 40 %, в третьей - 60 %. Каждая подгруппа состояла в свою очередь из трех образцов с ряской и одного контрольного образца (без ряски). Данное детальное деление опытов проводилось для обеспечения возможности периодичного отбора проб через каждые 3 суток (два раза в неделю). В десятой группе ряска выращивалась 35 суток.

После каждого отбора проб субстрат анализировали по контролируемым показателям. Высвободившуюся ряску подвергали высушиванию (при 105 °C в течение 9 ч) и фиксировали массу.

Температура во время эксперимента поддерживалась постоянной на уровне  $25\pm1$  °C. Для освещения использовалась такая же лампа, как и для фотобиореактора.

Для устранения такого фактора, как испарение воды из образцов, каждые 3 суток в образцы вносили дистиллированную воду при перемешивании в количестве 25 см<sup>3</sup> для контрольных образцов и 20 см<sup>3</sup> для образцов с ряской.

Анализ образцов материалов и объектов исследований проводили в аккредитованной лаборатории «Проблемная научно-исследовательская гидрогеохимическая лаборатория Томского политехнического университета, в Центре управления научно-исследовательским оборудованием ТПУ, а также в аккредитованной межвузовской лаборатории радиационной спектроскопии ТПУ.

В образцах определяли следующие показатели: рН (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97, иономер «Эксперт»), содержание ионов аммония (ГОСТ 33045 (метод A), фотометр КФК-3-01), фосфат-ионов (ГОСТ 18309 (метод А), фотометр КФК-3-01), химическое потребление кислорода (ХПК) – методом по ПНД Ф 14.1:2:4.154-99 (Флюорат 02-3M), влажность образцов ряски гравиметрическим методом. Масса сырой биомассы ряски определялась сразу после взятия образца. Влага с ряски удалялась с помощью бумажных салфеток, производилось взвешивание Высушивание после чего ряски. осуществляли при температуре 105 °C в течение 9 ч, после чего определяли массу сухой биомассы ряски.

Для оценки зависимости между параметрами использовался корреляционный и регрессионный анализ.

### 2.3. Материалы и методы исследования накопления белка

Для определения общего азота и количества белка был использован метод Кьельдаля [76]; [77], сущность которого состояла в том, что навеска измельченной высушенной ряски сжигалась с концентрированной серной кислотой в присутствии катализатора. Из образовавшегося при этом сульфата аммония аммиак вытесняют крепкой щелочью, отгоняют его с водяным паром и улавливают 0,1 н. раствором серной кислоты. Избыток 0,1 н. раствора серной кислоты оттитровывают 0,1 н. раствором гидроксида натрия. По разности между взятым объемом раствора кислоты и раствора щелочи, пошедшей на титрование избытка, вычисляют количество см $^3$  0,1 н. раствора серной кислоты, связавшее аммиак.

Сжигание продолжается до того момента, когда жидкость в колбе почти полностью обесцвечивается. После этого нагрев прекращают и дают колбе остыть.

После охлаждения в колбу по стенке приливают небольшими порциями около 30 см<sup>3</sup> дистиллированной воды, переносят жидкость в перегонную колбу и приступают к отгонке аммиака на установке, показанной на рисунке .

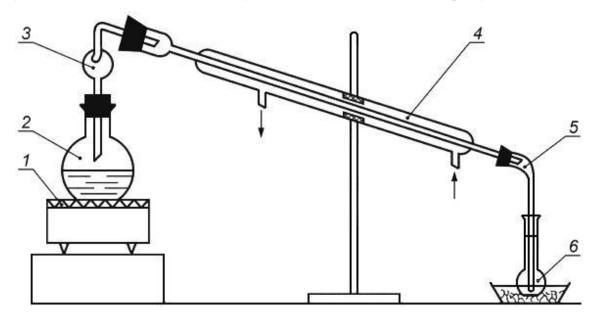


Рисунок 18- Установка для отгонки аммиака: 1 - электроплитка; 2 - перегонная колба; 3 - каплеуловитель; 4 - холодильник; 5 - стеклянная трубка; 6 - приемная колба).

Колбу с содержимым устанавливают на электроплитку, наливают в воронку с краном 50 см $^3$  40%-ного раствора щелочи, после чего, периодически открывая кран, спускают щелочь в колбу. При добавлении щелочи жидкость в перегонной колбе становится мутной, грязно-синего цвета. Предварительно в приемную колбу отмеривают 25 см $^3$  0,1 н. раствора  $H_2SO_4$ , добавляют 4-5 капель индикатора и подставляют ее под холодильник, чтобы форштос был погружен в

раствор кислоты. Кипение в перегонной колбе не должно быть слишком сильным, чтобы капли щелочи не попадали в каплеуловитель. Скорость перегонки регулируют с помощью нагрева. К концу перегонки объем жидкости в приёмной колбе увеличивается примерно вдвое. По окончании перегонки избыток кислоты оттитровывают 0,1 н. раствором NaOH до появления зеленого цвета. По разности между количеством взятой в приемник серной кислоты и израсходованным на обратное титрование количеством гидроксида натрия определяют количество серной кислоты нейтрализованной выделившимся аммиаком. Так 1 см<sup>3</sup> 0,1 н. раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> соответствует 1,4 мг или 0,0014 г азота, содержание азота определяется по формуле (2):

$$T_{N} = \frac{14 (v_{a} - v_{b})}{M (100 - \omega)}$$
 (2)

где  $T_N$  - процент содержания азота

 $v_a$  – количество взятого в приемник 0,1 н. раствора  $H_2SO_4$ , см<sup>3</sup>;

 $v_b$  –количество 0,1 н. раствора NaOH, пошедшего на обратное титрование,  $cm^3$  :

М - навеска ряски, г;

 $\omega$  – влажность ряски, %.

Для пересчета на белковые вещества количество азота умножают на коэффициент 6,25 [48]; [76]; [77]; [78].

Образцы ряски представляли собой:

- «Искусственный» образец, выращенный в искусственном водоеме, с добавлением питательных веществ, с применением специальной фотолампы FLUORA OSRAM;
- «Голодный» образец, выращенный в искусственном водоеме без использования фотолампы и добавления питательных веществ;
  - «Болотный» образец, выращенный в естественной среде.

# 3. Результаты проведенного исследования

#### 3.1. Оценить способность ряски в естественных условиях

Для предварительной оценки способности ряски очищать воду в природных условиях в естественном водоеме с ряской были взяты три образца воды в течение месяца с одинаковой периодичностью.

Установлено, что за исследуемый период времени в этом водоеме концентрация ионов аммония уменьшилась в 33 раза, полифосфатов в 63 раза, значение ХПК в 13 раз (рисунок 19).

Косвенным подтверждением способности ряски очищать воду также является визуальное состояние отобранных образцов воды (рисунок 20) — более поздние образцы воды более прозрачны.

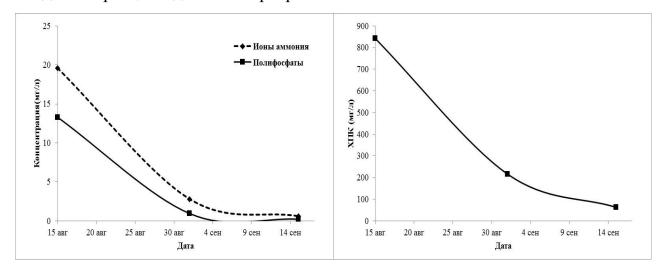


Рисунок 19- Изменение концентрации ионов аммония, полифосфатов и ХПК в естественном водоеме с ряской (район корпуса ТГУ, г. Томск) в течение месяца



Рисунок 20- Образцы воды из водоема за корпусом ТГУ: слева — 15.08.2016, по центру — 01.09.2016, справа — 13.09.2016

# 3.2. Применение ряски для очистки сточных вод из метантенка

В ходе изучения процесса очистки сточных вод из метантенка ряской *Lemna minor* акцент был сделан на следующие контрольные точки эксперимента: скорость роста биомассы ряски, скорость очистки сточных вод из метантенка и скорость поглощения питательных веществ ряской.

Характеристика химического состава субстрата для ряски представлена в таблице 2.

Таблица 2- Состав сточных вод из метантенка (субстрат)

Показатель	Концентрация (г/м³)	Показатель	Концентрация (г/м³)		
ХПК	2237,50	Fe	8,85		
PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> -	22,80	K	402,00		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	199,50	Mg	45,20		
NO <sub>3</sub>	20,80	Mn	1,46		

NO <sub>2</sub>	0,92	Mo	0,78×10 <sup>-2</sup>		
В	4,13	Na	103,00		
Ca	85,50	Ni	6,70×10 <sup>-2</sup>		
Со	1,50×10 <sup>-2</sup>	Pb	2,50×10 <sup>-2</sup>		
Cr	1,60×10 <sup>-2</sup>	Zn	25,10×10 <sup>-2</sup>		
Cu	7,20×10 <sup>-2</sup>				

### 3.2.1. Исследование динамики концентрации ионов аммония

Результаты анализа субстрата - сточных вод с ферм крупного рогатого скота (из метантенка) после анаэробной переработки свидетельствуют о том, что большая часть органического азота переходит в аммонийный азот  $NH_4^+$ -N. Количество неорганического азота (включая  $NO_3^-$  и  $NO_2^-$ ) достаточно мало (таблица 1). Отношение концентраций фосфора и азота P:N составляло 0,114, что сопоставимо с результатами других исследователей [26]; [79].

В работе Shen G. [79] показано, что уменьшение аммонийного азота происходит из-за испарения аммиака и процесса нитрификации. Поскольку улетучиванием аммиака можно пренебречь [80], продукты реакции нитрификации являются основным источником ионов аммония.

Согласно условиям спланированного эксперимента стерилизации сточных вод не предусматривалось для имитации естественных условий. Поэтому жизнедеятельность автотрофных бактерий из метантенка демонстрирует некоторое изменение концентрации ионов аммония и скорость его поглощения в контрольных растворах. Так, в контрольных образцах максимальный процент абсорбированного азота составил, для 20 % субстрата - 23,24 %; для 40 % - 24,93 %; для 60 % - 25,45 %. Фиксирование контрольного уровня происходило на 20 и

27 сутки. Отмечены несущественные флюктуации данного показателя в контрольных образцах в разные периоды эксперимента.

На рисунке 21 представлены результаты исследований динамики концентрации ионов аммония в зависимости от начальной концентрации субстрата. В опытных образцах процент ассимиляции аммония рассчитывался с учетом его естественного поглощения автотрофными бактериями из метантенка.

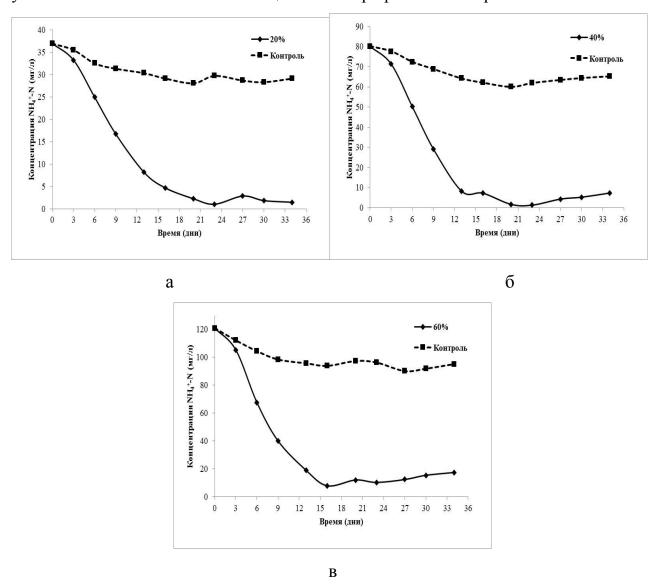


Рисунок 21- Динамика изменения концентрации ионов аммония при начальной концентрации: a - 37; б - 80,1; в -  $121 \text{ г/м}^3$ 

Установлено, что за 6 суток в растворе с исходной концентрацией субстрата 20 % ряска способна ассимилировать 20,54 % аммония; за 13 суток — 60,01 %. Максимальный процент поглощения аммония зафиксирован на 23-е сутки эксперимента и составил 77,72 %.

В субстрате с исходной концентрацией 40% эффект поглощения ионов аммония ряской немного отличается. Так, через 6 суток процент ассимилированного аммония составил 27,76 %; через две недели – 69,91 %; спустя 23 дня наблюдалось максимальное поглощение, составляющее 75,67 %.

Повышение концентрации субстрата до 60 % способствует увеличению количества абсорбированного аммония по истечении первой недели - 30,41 %. Однако в последующий период отмечалось некоторое снижение количества ассимилированного аммония по сравнению с предыдущими результатами. Так, через 13 суток процент усвоения возрос до 63,41 %; и далее зафиксирован максимальный процент поглощенного азота, составивший 71,06 %.

Таким образом, Максимальная скорость поглощения ионов аммония в растворах с начальной концентрацией субстрата 20 %, 40 % и 60 % составила соответственно 2,77; 7,04 и 12,56 г/м³/сут.

## 3.2.2. Исследование динамики концентрации полифосфатов

Результаты исследований динамики изменения концентрации полифосфатов в процессе очистки сточных вод из метантенка представлены на рисунке 22.

В ходе эксперимента установлено, что автотрофные бактерии из метантенка более активно поглощают ионы фосфора, чем аммоний.

Фосфор является фактором роста для микроорганизмов, т.к. входит в состав нуклеиновых кислот, АТФ, необходим для построения полимеров клеточных стенок. Так, контрольный уровень ассимиляции полифосфатов на конечный момент составил: для 20 % раствора субстрата - 27,23 %; для 40 % - 31,05 %; для 60 % - 32,39 %.

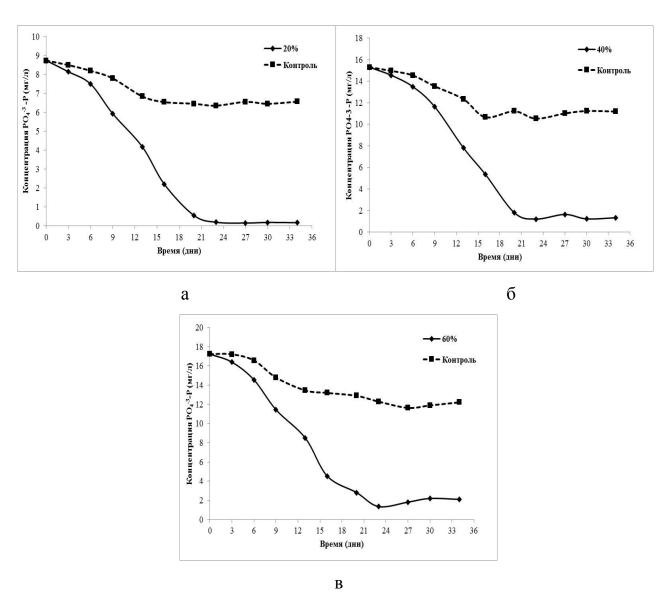


Рисунок 22- Динамика изменения концентрации полифосфатов при начальной концентрации: а - 8,74; б - 15,3; в - 17,23 г/м<sup>3</sup>

В метаболизме растений фосфор участвует в усвоении солнечной энергии, выработке энергии в составе АТФ и прочих процессах. Ряска продемонстрировала свою неоднозначность в усвоении фосфора. За первые 6 суток в субстратах с начальной концентрацией 20 %, 40 % и 60 % содержание полифосфатов уменьшилось незначительно, на 7,97 %, 6,84 % и 11,70 % соответственно. Эффект ассимиляции фосфора ряской приблизительно в 3-4 раза ниже, чем аммония.

Через две недели процентный ряд поглощения фосфора составил 30,43 - 29,63 - 28,81 % в соответствии с рядом концентраций субстрата 20 - 40 - 60 %, что также ниже уровня поглощения ряской ионов аммония в 2 раза.

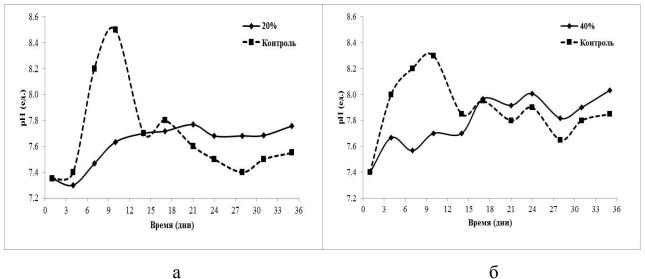
К концу периода эксперимента наблюдалось максимальное поглощение, которое составило 73,26 % в растворе субстрата 20 %, 65,49 % - в растворе 40 % и 63,53 % в растворе 60 %.

Таким образом, скорость поглощения полифосфатов в субстратах с начальной концентрацией 20 %, 40 % и 60 % соответственно составила 0,66; 0,96 и 1,33 г/ $\text{м}^3$ /сут.

### 3.2.3. Изменение рН

Для процесса роста и накопления биомассы ряски большое значение имеет буферная емкость сточных вод, так как метаболизм этого растения приводит к довольно быстрому снижению рН - приблизительно от 7,0 до 5,0 в течение около 24 часов. В работе Cheng J. [4] доказано, что при наличии достаточного количества питательных веществ В реакционной среде pН раствора увеличивается.

В ходе экспериментальных исследований обнаружилась незначительная вариабельность рН на уровне 0,2-0,7 ед. к концу процесса (рисунок 23). При этом резкий экстремум на кривых отмечен для начального периода до 10 суток. Далее характер кривых приобретает более сглаженный вид.



б

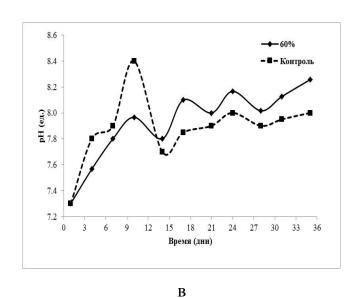


Рисунок 23- Динамика изменения значения рН при начальной концентрации субстрата: a - 20; 6 - 40; 6 - 60 %

Так, значение данного показателя изменялось в узком диапазоне от 7,35 до 7,76 (концентрация субстрата 20 %), от 7,4 до 8,03 (концентрация субстрата 40 %) и от 7,3 до 8,26 (концентрация субстрата 60 %) во всех экспериментах.

Полученные экспериментальные зависимости свидетельствуют о высокой буферной емкости сточных вод, взятых из метантенка.

### 3.2.4. Исследование динамики накопления биомассы ряски

Как любой представитель живой природы ряска в период своей жизнедеятельности проходит четыре стадии: лаг-фаза, фаза экспоненциального роста, линейная (стационарная) фаза роста и фаза отмирания (рисунок 24).

После процесса адаптации ряски к новым условиям, она начинает быстро расти и поглощать питательные вещества из реакционной среды. Как правило, более быстрый рост ряски и поглощение ею питательных веществ наблюдается в средах с высокой концентрацией питательных веществ.

Для исследуемого образца ряски была проведена стадия адаптации к лабораторным условиям, вследствие чего лаг-фаза имела довольно короткий период и составила 3 суток для всех образцов.

Продолжительность экспоненциальной фазы роста ряски для всех образцов составила от 3 до 13 суток. При этом установлено, что скорость роста

ряски во время экспоненциальной фазы отличалась для субстратов с различной концентрацией. Отмечено прямое влияние концентрации питательных веществ на скорость роста — чем выше концентрация, тем выше скорость.

По истечении 13 суток превалирующая часть азота и фосфора ассимилирована ряской. Для этой фазы получена линейная скорость роста для всех образцов.

После месяца эксперимента отмечено отмирание ряски по причине достижения максимальной плотности биомассы на единицу поверхности.

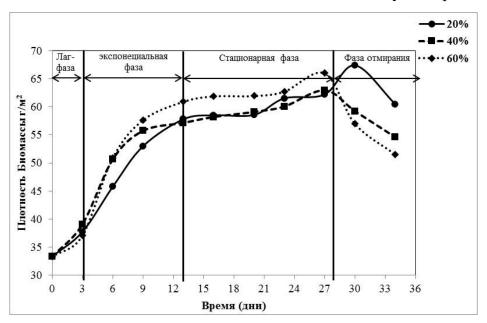


Рисунок 24- Динамика изменения плотности биомассы

Точкой отсчета для контроля исследуемого показателя служила масса ряски в количестве 0,171 г (сухого вещества) при плотности распределения на поверхности субстрата 33,3 г/м<sup>2</sup>. Измерения массы в динамике производились для сухой биомассы.

В ходе эксперимента установлено, что удельная скорость роста ряски для растворов с начальной концентрацией субстрата 20 %, 40 % и 60 % составила 2,675, 3,853 и 4,613 г/м²/сут соответственно (рисунок 25). При этом для субстрата с концентрацией питательных веществ 60 % наблюдалась более высокая скорость прироста биомассы.

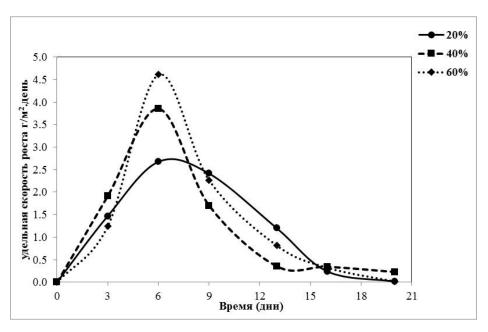


Рисунок 25- Скорость роста биомассы для субстратов с различной концентрацией

Отчетливая разница в удельной скорости роста для различных концентраций субстрата отмечалась на 6 сутки культивирования. Плотность ряски на данный момент составляла около  $45,7\,$  г/м²,  $50,6\,$  г/м² и  $50,9\,$  г/м² в соответствии с рядом концентраций субстрата  $20-40-60\,$ %.

Максимальная плотность роста была достигнута (в г/м²): 67,4 - для 20 % субстрата на 3-е сутки; 63,0 - для 40 % субстрата и 66,0 - для 60 % субстрата на 27-е сутки культивирования. После чего прирост биомассы прекратился для всех образцов. Далее происходило снижения массы ряски за счет процессов распада. По достижению продолжительности культивирования 29-31 суток отмечалась максимальная плотность, и, следовательно, падение скорости роста биомассы ряски.

# 3.2.5. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных

Для оценки зависимости между параметрами процесса очистки сточных вод из метантенка ряской *Lemna minor* использовали корреляционный и регрессионный анализ.

Для всех концентраций субстрата получены значимые сильные и средней силы связи биомассы с концентрациями ионов аммония, полифосфатов и рН (приложение 11.1).

Значения расчетных коэффициентов корреляций между накоплением биомассы ряски и показателями состава сточных вод представлены в таблице 3. Наиболее сильные связи биомассы ряски с показателями состава сточных вод получены для концентрации субстрата 20 %.

Таблица 3- Значения линейных коэффициентов корреляций между биомассой ряски и показателями состава воды

Концентрация субстрата, %	Скорость роста	pН	Концентрация ионов аммония	Концентрация полифосфатов
20	0,18	0,919	0,975	0,926
40	0,16	0,748	0,952	0,815
60	0,39	0,781	0,939	0,797

### 3.3. Влияние условий культивирования на накопление белка в ряске

Как показал анализ научной информации, предыдущие исследования ученых в области получения из ряски кормовых добавок для животных не охватывали в полной мере процесс оптимизации.

Для достижения поставленной цели необходимо было провести исследования по изучению динамики накопления биомассы ряской, т.к. этот показатель напрямую связан с выходом конечного продукта - протеина.

Установлено, что стадия адаптации ряски к измененным искусственно условиям культивирования имела довольно короткий период и составила 4 суток для всех образцов. Скорость роста ряски во время экспоненциальной фазы (5-14 сутки) отличалась для субстратов с различной концентрацией. Отмечено прямое влияние концентрации питательных веществ на скорость роста. После месяца эксперимента отмечен переход ряски в фазу «отмирания» по причине достижения максимальной плотности биомассы на единицу поверхности.

В ходе эксперимента определено, что удельная скорость роста ряски для растворов с начальной концентрацией субстрата 20 %, 40 % и 60 % составила

2,675, 3,853 и 4,613 г/м²/сут) соответственно. При этом для субстрата с концентрацией питательных веществ 60 % наблюдалась более высокая скорость прироста биомассы.

Максимальная плотность роста была достигнута (в г/м²): 67,4 - для 20 % субстрата на 30-е сутки; 63,0 - для 40 % субстрата и 66,0 - для 60 % субстрата на 27-е сутки культивирования. После чего прирост биомассы прекратился для всех образцов.

#### 3.3.1. Изучение динамики накопления азота в ряске

Азот в природе существует в нескольких формах. С точки зрения очистки сточных вод, различают следующие типы азота: общий азот, общий азот по Кьельдалю (TKN), аммиак, органический азот, нитраты и нитриты. С этой позиции важно понимать взаимоотношения различных форм азота.

Как показал анализ исходного субстрата (сточных вод из метантенка) концентрация нитратов в реакционной среде достаточно низкая. Концентрация аммония к нитрату составила 10:1.

Сточные воды из муниципальных объектов обычно содержат менее  $1 \text{ г/м}^3$  нитритов. Большие концентрации обычно обнаруживаются, когда растение частично нитрифицировано. В исследуемых сточных водах содержание нитритов составляет  $0.92 \text{ г/m}^3$  (таблица 2).

Известно, если pH сточных вод находится в кислой или нейтральной зоне, большая часть азота приходится на аммоний ( $NH_4^+$ ). При pH более 8,0, азот в основном представляет собой аммиак ( $NH_3$ ). Органический азот в сточных водах представляет собой малую фракцию, обычно 1-2 г/м<sup>3</sup> органического азота, не поддается биологической обработке. Общий азот по Кьельдалю (TKN) включает в себя аммоний и органический азот:

$$TKN=N_{NH4}+N_{opr}$$
 (3)

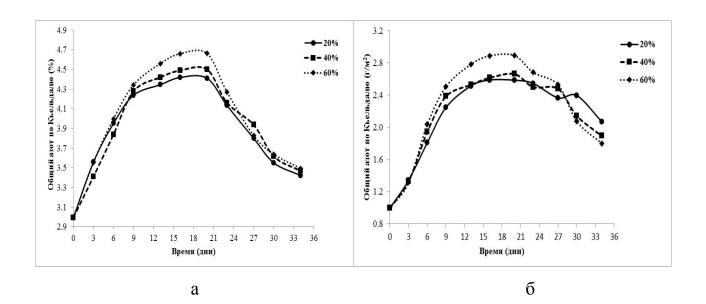
Где TKN- Общий азот по Кьельдалю;

N<sub>NH4</sub> - содержание азота в аммонии;

### $N_{\text{орг}}$ - органический азот

Так как общий азот в сточных водах на 93,1 % состоит из аммония [27], ряска хорошо абсорбирует азот в данной форме. Согласно условиям эксперимента, в растворе с концентрацией субстрата 20 % количество аммония составило 37 г/м³; в растворе с 40 %-ой концентрацией – 80,1 г/м³; а с 60 %-ой – 121 г/м³.

Максимальное содержание общего азота по Кьельдалю в ряске, выращенной на питательной среде с 20 % концентрацией субстрата наблюдалось на 16-е сутки эксперимента и составило 13,32 мг (2,59 г/м²) со максимальной скоростью накопления 0,16 г/м²/сутки. В субстрате с 40 %-ой концентрацией на 19-е сутки был зафиксирован максимум общего азота — 13,7 мг (2,66 г/м²) при максимальной скорости накопления 0,20 г/м²/сутки; с 60%-ным содержанием сточных вод — 14,88 мг (2,89 г/м²) при скорости 0,24 г/м²/сутки (рисунок 26).



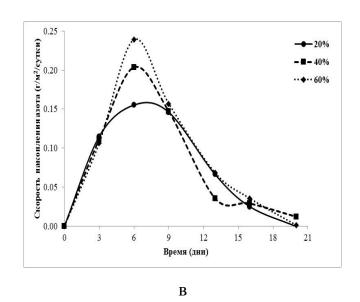


Рисунок 26- Динамика накопления азота в образцах ряски: а – процентное содержание TKN; б - количество TKN на единицу площади; в – скорость накопления TKN.

Таким образом, содержание общего азота в ряске составило: в 20 %-ном субстрате – 4,42 %; в 40 - и 60 %-ных растворах – 4,5 % и 4,66 % соответственно.

#### 3.3.2. Изучение динамики накопления белка в ряске

Наблюдения [70] показали, что содержание белка зависит от условий культивирования ряски. Например, в биомассе ряски, перенесенной из искусственной среды в чистую воду, отмечалось снижение содержания белка, но увеличение содержания крахмала. Так же было выявлено, что световые условия не влияют на аминокислотный состав ряски.

В настоящих исследованиях для определения разности содержания белка в ряске согласно разным условиям культивирования были взяты 3 образца растения – «Искусственный», «Голодный», «Болотный».

Установлено, что наибольший процент протеина зафиксирован в образце «Болотный» — 25,17 %. В образцах «Искусственный» и «Голодный» процент белка составил 18,68 и 18,65 % соответственно. Возможно, это обусловлено тем, что недостаток некоторых питательных веществ (таких, как фосфат, аммоний) или присутствие некоторых тяжелых металлов увеличивает содержание крахмала и уменьшает содержание белка [48].

В ходе наблюдений было математически вычислено, что в растворе с 20 %-ной концентрацией сточных вод содержание белка составило 83,23 мг (16,16 г/м²) при максимальной скорости накопления 0,97 г/м²/сутки; в растворе с 40 %-ным содержанием субстрата — 85,65 мг (16,63 г/м²) при скорости 1,27 г/м²/сутки; а для образца содержащего 60 % питательных веществ — 93 мг (18,06 г/м²) со скоростью аккумуляции 1,49 г/м²/сутки (рисунок 27-в ).

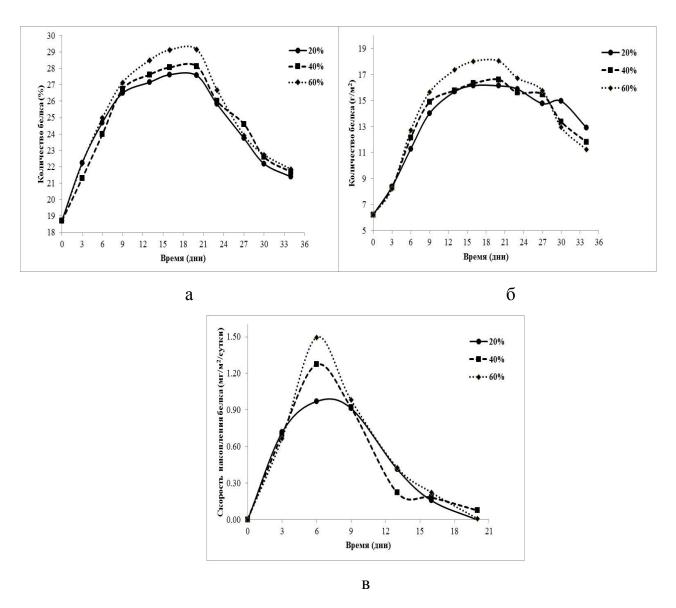


Рисунок 27- Динамика накопления белка в образцах ряски: а — процентное содержание; б - количество белка на единицу площади; в — скорость накопления.

В ходе эксперимента установлено, что на 16-е сутки культивирования был зафиксирован максимальный процент содержания белка в ряске для 20 %-ного

субстрата - 27,62 %, в то время как в 40 %-ном - 28,13 % и в 60 %-ном - 29,14 % - на 19-е сутки выращивания.

Согласно полученным данным определено, что вид ряски L. minor способен производить белка от 3,54 до 5,454 т/га в год.

#### 4. Выводы

Ряска (*L. minor*) продемонстрировала большой потенциал с точки зрения ассимиляции фосфора и азота, а также снижения ХПК в природных водоемах. *L. minor* проявляет способность к накоплению биомассы при различных концентрациях питательных веществ в сточных водах из метантенка. Доминантный характер распространения ряски по поверхности воды также характеризует ряску как надежный и эффективный инструмент для процесса очистки сточных вод.

Ряска быстро адаптируется в изменяющихся условиях таких, как интенсивность света, температура и концентрация питательных веществ. Важным фактором оптимизации системы «ряска-очистка» является варьирование начальных концентраций питательных веществ в сточных водах. Этот фактор влияет как на скорость ассимиляции, так и на рост биомассы ряски.

Поглощение азота и фосфора ряской протекает достаточно быстро и в период лаг-фазы. На этапе экспоненциального роста ряска активно ассимилирует азот и фосфор с увеличением концентрации субстрата, включая данные вещества в свой метаболизм, о чем свидетельствует повышение скорости роста биомассы. В ходе эксперимента установлено, что зависимости поглощения ионов аммония и полифосфатов, а также объем накопленной биомассы были нелинейными с течением времени. Показано, что самая высокая удельная скорость ассимиляции наблюдалась в реакционной среде с концентрацией сточных вод 60 %. При этом для ионов аммония данный показатель находился на уровне 0,609 г/м²/сут, для полифосфатов – 0,064 г/м²/сут, максимальный прирост биомассы ряски (по сухой массе) - 4,61 г/м²/сут. Темп роста *L. minor* в сточных водах из метантенка составил примерно на одну шестую часть от данного показателя, который демонстрирует ряска при очистке бытовых сточных вод [4].

Несмотря на тот факт, что реакционная среда истощается на 23-е сутки эксперимента, ряска *L. minor* продолжает накапливать биомассу до 29 дней культивирования, что свидетельствует о способности ряски аккумулировать азот и фосфор.

Таким образом, полученные в ходе исследований результаты позволяют обоснованно рекомендовать использование ряски *L. minor* для очистки сточных вод из метантенка. Предлагаемый способ позволит существенно снизить негативное влияние органических отходов сельскохозяйственных животных на окружающую среду.

Таким образом, проведенные исследования показали, что количество белка в ряске можно легко регулировать, оптимизируя условия культивирования различных видов ряски и клонов, и получить на выходе содержание протеина, достигающим 40 % от сухого веса. Благодаря аминокислотному составу общий белок ряски можно квалифицировать как высококачественный источник белка для питания человека. Следует подчеркнуть, что содержание критических аминокислот в рясках находится в пределах не ниже рекомендаций ВОЗ (в ред. 2007 г.). Дополнительным аргументом в пользу возможности включения белковых концентратов из этих растений в питание человека является то, что ряска легко абсорбирует макроэлементы, которые растворены в воде. Это означает, что с малыми затратами и усилиями, рясковые протеиновые ΜΟΓΥΤ быть профилактики концентраты использованы ДЛЯ дефицита минеральных соединений.

Водные растения и их клетки по существу являются хорошим сырьем для производства рекомбинантных белков. Данные технологии имеют экономические преимущества, в том числе и преимущества по безопасности перед обычными системами производства. Было подсчитано, что при 1 % мас. экспрессии белка в кукурузе на сухой весовой основе, а также 50 %-ном извлечения белка во время очистки, стоимость белков растительного производства в 10-50 раз ниже, чем у микробных систем и до 1000 раз ниже, чем в системах культуры клеток млекопитающих [82]; [83]; [84].

Стоит отметить, что значительный прогресс достигнут в производстве рекомбинантых белков из растений, выращенных в искусственных условиях. Но искусственные условия выращивания в промышленных масштабах очень трудоемкий и затратный процесс.

Сибирский штамм ряски (*Lemna*) содержит более 25 % белка, что превышает примерно в 2,5 раза его количество в кукурузе и может составить конкуренцию по содержанию белка в сое. В ходе данной работы определено, что вид ряски *L. minor* способен производить белка от 3,54 до 5,454 т/га в год. Для сравнения, ученые в Таиланде установили, что такой вид, как *Wolffia globosa* способна производить около 2 т/га в год, при том, что соя может производить 0,3, рис – 0,07, кукуруза – 0,18 т/ га в год [85]. Даже если считать, что протеин ряски обладает меньшей биологической ценностью, виды ряски (*Lemnaceae*) дают намного больший выход протеина с единицы площади произрастания растения, что очень важно в условиях роста населения планеты и роста потребностей в пище.

С учетом особенностей климатических условий в сибирском регионе, выращивание ряски в природной среде и ее сбор в течение всего календарного года достаточно затруднено. Для того чтобы организовать полноценный непрерывный процесс производства белка в промышленных масштабах, необходима заготовка биомассы ряски в летний период для хранения и использования ее в качестве сырья для производства белковых концентратов в зимний период.

#### 5. Overall process description of organic waste management system

Large-scale animal production facilities produce massive amounts of organic animal waste (manure), with high nutrients concentrations, a situation that has created global environmental concern [1]. New integrated systems are needed for effective application of waste stream nutrients to decrease surface and ground water pollution and increase the income. Alternative pond-based systems for sequestering nutrients into biomass potentially may avoid the environmental problems associated with disposal of animal wastes [2].

Due to the environmental regulations, many producers have installed anaerobic biodigesters for the treatment of organic waste to reduce the environmental impact. Moreover, this technology has low installation and operation costs and produces biogas that can be used as fuel for electricity generation. Nevertheless, the effluent from biodigesters contains high concentration of nutrients which requires an additional treatment step. In current research, modified complete system was suggested as an efficient and low-cost option for manure waste treatment as shown in figure 28.

Furthermore to the environmental advantages, biomass generated during treatment contains high nutritional value with high production rate. Duckweed biomass can be used as a high-value supplement for fish feed due to its high protein content ranging from 18.71% to 29.14% (figure 27-a).

Duckweed treatment pond system (DTPS) is effective only five months (from May to October) in Siberian climate which require storage of large amounts of organic waste during winter, which can be potential pollution source of ground water, and additional cost to the producer. In general, duckweed grows over a longer period compared to other crops (e.g. maize, soybeans). To extend the duckweed growth period, additional research must be conducted for selection the best strains that have better performance in the early spring and late autumn. Moreover, these may be more efficient for biomass-protein production during the summer [2].

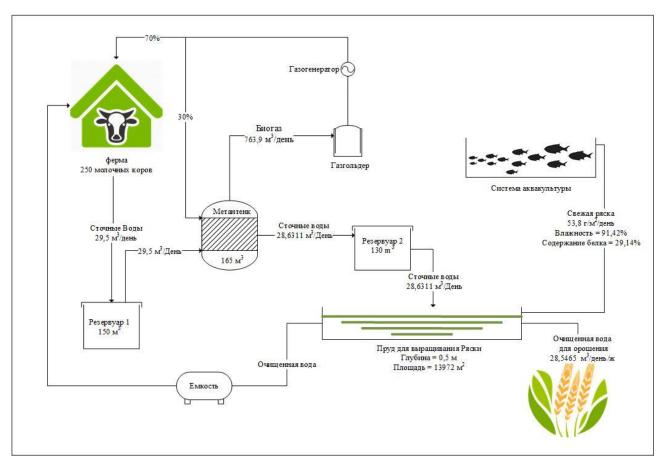


Figure 28- Integrated system of manure management

## 5.1. Biodigester

Anaerobic digestion (AD) of cow manures has been practiced in various methods for many years. AD decreases the organic matter (OM) content in the waste through the biological conversion of organic carbon (OC) and produces a biogas containing primarily mixture of methane and carbon dioxide. Due to the strict of environmental regulation, thousands of anaerobic treatment processes are now installed and operated worldwide in addition to millions of small and simple systems operating throughout less industrialized nations [88].

Biogas is produced by a metabolically diverse community of bacteria and microorganisms that act as an integrated metabolic unit to produce methane and carbon dioxide through a series of reactions. The end-products of one group's metabolism are used as substrate by the next group. However, the biological production of biogas from high-organic manure involves four main processes: hydrolysis, fermentation (acidogenesis), acetogenesis, and methanogenesis [88].

The produced biogas consists of methane (CH<sub>4</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), together with insignificant quantities of nitrogen, hydrogen, ammonia and hydrogen sulphide (Table 4) [89].

The content of methane in biogas ranges from 50% to 80%. The higher the methane content of the biogas, the more energy obtained.

Table 4- Chemical composition of biogas [89].

Chemical component	Volume percentage	
CH <sub>4</sub>	50-80%	
$CO_2$	50-20%	
$N_2$	<1%	
$H_2$	<1%	
NH <sub>3</sub>	<1%	
$H_2S$	<1%	

The average production of manure of dairy cows is 24.82 ton per animal per year, with 13% of dry matter (DM) [86]. Depending on the pasturing policy on a specific farm, much of this amount can be produced when they are pasturing [89].

OC content of manures can be estimated with adequate accuracy by measuring the loss of weight (volatile solids content) following combustion of a sample at 550 °C. Manure carbon content is approximately equal to half of volatile solids (VS) content [90]. The average VS production rate are 7.5 kg/day/animal [86], as a result, the average production of organic carbon of, 3.75 kg/day/animal. The maximum organic dry matter (ODM) is 85%, and the maximum biogas yield is 400 m³ per ton of ODM [88].

When process parameters are within the optimum range, the biogas production rate (BPR) will be close to the theoretical production. The chemical and physical characteristics (e.g. percent of DM and OM) of the manure will determine the biogas yield. The total biogas production rate can be calculated using the following formula (4):

$$BPR = S \times DM \times OM \times MBPR \tag{4}$$

Where BPR - biogas production rate (m³/year/animal);

S - Biomass substrate (t/animal/year);

DM - the percent of dry matter;

OM - percent of organic matter;

MBPR- maximum biogas production rate (m³/t ODM/year).

BPR = 
$$24.82 \times \frac{13}{100} \times \frac{85}{100} \times 400 = 1100 \text{ m}^3/\text{year/animal}$$

For wet fermentation systems, the total solids content of the manure slurry is typically less than 12 %, with 2 to 10 % most regular for treatment of wastewater [88]. In current study the total solids of 7.5%.

This continuous process is most suitable for farmers who have to store their manure for long periods. The digester can be constructed on a relatively small scale, because it will contain the manure only for the duration of the digestion process (retention time). The storage function of the digester is less important, as the digestate is stored mainly in the post-digestion storage tank (PDST) [89].

For continuous flow digester plants, the hydraulic retention retention (HRT) time decreases with increasing temperature as reaction rates increase with increasing temperature. A more HRT for a given influent flow rate will result in larger required reactor volume. For two stage continues stirred tank reactor (CSTR) with anaerobic

filter the hydraulic retention time can be 2 days for the first stage and 2.3 days for the second stage, this process can produce methane 0.42 m<sup>3</sup>/kg VS [88], thus, biomethane can be calculated according to the formula 5:

$$MPR = SMPR \times VSPR \tag{5}$$

Where MPR-methane production rate (m³/day/animal);

SMPR-Specific methane production rate (m³/kg VS);

VSPR- volatile solids production rate (kg VS/day/animal)

MPR =  $0.42 \times 7.5 = 3.15 \text{ m}^3/\text{day/animal}$ 

However, Biogas production unit contains many equipments (e.g. pumps, heat exchangers, mixers, flirters, sensors and controllers), thus, 30% of produced energy from biogas will be recycled for operation of biogas production system and the net energy (70%) can be utilized for farm equipment operation [89].

On average, each dairy cow excretes approximately 68 liters of manure per day per animal with moisture content (MC) 87% [86]. For an average small herd of 250 cows, this equates to 17 m³ per day. However, cleaning farm dairy with high-pressure hoses, 50 liters of water per day per animal is required [87], thus for total farm of 250 animal the generated effluent of, 12.5 m³ per day, in addition to 17 m³ of manure, a total effluent production rate will be 29.5 m³/day. For two stages of CSTR with HRT 4.3 days and 30% increased size the total volume of the reactor will be 165 m³.

## **5.2.** Storage tank

A storage tank will be utilized to collect effluent from farm prior to biogas production plant. The storage tank volume requirement is 150 m³ with a 5-days increased storage capacity. The excess capacity of the storage tank provides a safety feature in case of unexpected problems in the biodigestion plant or capacity of the farm. The tank can be a square cast-in-place concrete structure placed above the ground. In

this stage small percent of ammonia will be evaporated and consumed by microorganisms, in current research this quantity of ammonia will be neglected.

#### **5.3. PDST**

A biogas plant running in continuous mode must be included a separate PDST. The effluent that enters the post-digestion step may contains some substrates that will continue to digest, however this amount of biogas produced in this step will be neglected in this study. The roles of PDST are to settle insoluble organic waste and collect effluent from biodigester prior to DPTS. The insoluble waste is settled by gravity to a concrete storage tank. The storage tank volume requirement is 130 m<sup>3</sup> with. The tank will be a square cast-in-place concrete structure placed above the ground. The solids will be given time to settle to the bottom of the tank and the wastewater from the top will be pumped continuously to the duckweed pond system.

Moreover, the settling of the insoluble matter in the storage tank will reduce the amount of sludge entering the duckweed pond. In addition a reduction in the biological oxygen demand (BOD) is achieved by settling, thus, the removing efficiency can be increased. The reduced amount of solids entering the duckweed pond will in turn reduces the HRT of the process, while the solids collected by the storage tank can be used as a fertilizer for other crops [91].

### 5.4. Duckweed wastewater treatment pond

Biogas digesters followed by duckweed effluent treatment pond can be a proper system combination for treatment of wastewater with a high organic load [92]. The utilization of digester plants effluents for duckweed cultivation system is promising technology. In a duckweed wastewater treatment system, the OM is not consumed directly by duckweed biomass, however degraded by aerobic, anoxic and anaerobic microorganisms in the whole water body. The carbon is finally released from the system as greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) and microbial sludge [92].

Partial pretreatment in AD allows reuse of the organic matter through the biogas, however the remaining nutrients in the effluent can be recovered by duckweed pond system. In this system, ideal reuse of energy and nutrients can be achieved. Furthermore, the efficiency of anaerobic pretreatment process can be achieved with high nutrient concentration of nitrogen and phosphorous due to hydrolysis of organic nitrogen and phosphor compounds [92].

In agreement with experimental results duckweed system has high absorption rate of nutrients. The ammonium absorption rate can reach  $12.56 \text{ g/m}^2/\text{day}$  with initial NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration  $121 \text{ g/m}^3$ , however  $1.33 \text{ g/m}^2/\text{day}$  absorption rate can be achieved for PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> with initial concentration  $17.23 \text{ g/m}^3$ .

Duckweed for food production should only be grown on wastewaters with extremely low toxin concentrations. Even low concentrations in the raw wastewater may become hazardous due to the manifold bioaccumulation in duckweed and, possibly, in the food chain [92].

Utilizing duckweed biomass as fish feed needs precise and continues analysis to control toxins concentration that can be transfer to food chain. According to our experimental results, the protein production rate can be varied from 1 to 1.5 g/m²/day depending on the biomass growth rate, nutrients concentration and protein concentration. For Siberian climate, duckweed can grow approximately five months, as a result the annual production rate can reach 2.241 t/ha/year, thus duckweed can be promising animal feed.

Waste treatment ponds have been commonly used in many countries around the world to treat all types of wastewater. However, efficiency of pond systems can varied depending on the rate of biological reactions (a consequence of the metabolism of living organism) which can be controlled by many parameters: kind of living organism (aquatic plant, algae etc.); chemical and physical characteristics of waste water; climatic condition and pond design.

# 6. Mass balance and design of duckweed pond system

The main design principles of duckweed pond system are maximizing growth rate with limited quantities of labor and increasing treated water quality and quantity to the acceptable level according the local environmental regulations. The pond was designed as logarithmic spiral to simulate the logarithmic biomass growth rate and to guarantee high distribution of the nutrients. A 1 m initial spiral diameter was chosen to minimize surface water distribution at the inlet section. The circulation will be achieved by gravity which is the result of declined bottom. This new design of duckweed pond has several advantage: high treatment efficiency; ease of duckweed harvesting; conserving the required surface area; without mechanical circulation system; ease of maintenance, operation and control; less labor and structure cost. The pond depth was considered to be 0.5 m which allow more mass transport to the surface area with respect to time.

The flow into the duckweed ponds will be achieved using gravity flow from the biodigester plant (BP), however, to increase the wastewater distribution, holes with 10 cm diameter can be considered every 1 meter inside the wall of the spiral. The effluent will be added continuously with 28.63 m<sup>3</sup> per day. The HRT will be 13 days according to our experimental results.

Tomsk region is exposed to high winds at early spring and late autumn (Duckweed growth period). The DPTS must be protected from the wind, where duckweed can be affected by high surface water disturbance as mentioned in the literature review. The larger surface area of the pond the greater wind influence on the duckweed system. To pass this obstacle, concrete internal barriers can be constructed inside the spiral which will be curved according to outside spiral curve, moreover construction of floating grid with 2×4 m<sup>2</sup> section area can be considered another option for controlling surface water disturbance, which will be inexpensive and more reliable and changeable with respect to wind velocity. The additional costs of this barriers should be counted by increased production.

The dry biomass (DBM) yield for this type of design for fife month growing period could reach to 16.84 t/year/ha. This low yield value could be small due to laboratory conditions used to grow the duckweed, accordingly, there is high chance that in natural conditions we can get twofold of this value. The abovementioned DBM yield based on a 91.42% MC would be 196.3 t/year/ha on wet basis. Duckweed yields are varied depending on many parameters including climate condition and nutrients load. The maximum yields can be reached during the summer period and early fall months [91].

The amounts of duckweed produced can be utilized directly as protein supplementation source for aquiculture system.

Duckweed (L. minor) have small size (1-8 mm) and floating on the surface water, thus, harvesting process is conventional and not expensive. Simple mechanical technology can be used for this purpose. There are many possible harvesting technologies for duckweed system, however there is no specific technology for harvesting this kind of aquatic plant. Selecting the proper technology of harvesting duckweed can depend on limited parameters (e.g. culturing area and duckweed application). The biomass could be collected by a conveyor belt that is placed at the end of the pond. The concrete barriers can be useful to collect and direct the biomass towards the harvesting conveyor belt. The belt could transport the biomass into the harvest truck and then to the aquiculture pond, or can transport the biomass directly for feeding fish with considering the feeding rate. Another method of harvesting could be achieved by an auger system that collects duckweed and feeds the plants on a harvest truck. Feeding duckweed on a wet basis without drying could also reduce the cost of harvest management [91]. Duckweed harvesting rates varied according to many parameters: duckweed species; climatic condition; pond design; and nutrients concentration.

The DPTS was designed according to many assumptions and literature data. Ammonia is the main form of nitrogen in the high-nutrients wastewater, subsequently all the mass balance calculations and pond design will be according to the decreasing rate of ammonium concentrating. On average, each dairy cow excretes approximately 68 liters of manure per day per animal with moisture content 87% and density 983.52 kg/m<sup>3</sup>[86]. For small herd of 250 cows, 17 m<sup>3</sup> per day of dairy cow manure can be produced. However, polishing dairy farm with high-pressure hoses, 50 liters of water per day per animal is required [87], as a result 12.5 m<sup>3</sup> per day of effluent can be generated, in addition to 17 m<sup>3</sup> of manure. The total effluent production rate will be 29.5 m<sup>3</sup>/day.

The percent of produced ammonia in BP can reach 1% of biogas [89]. Moreover, in natural conditions, bacterial activities such as nitrification/denitrification could contribute to nutrient removal in addition to duckweed growth [40]. According to our experimental results, 25% of ammonium concentration can be reduced in duckweed pond as a result of volatilization and metabolisms of microorganism.

#### 6.1. Material balance calculations

#### **6.1.1.** Water Mass balance

Water mass balance was calculated according to literature data, experimental results and several assumptions. Mat of duckweed can reduce evaporated water, therefore, the mass of evaporated water in duckweed pond will be neglected in this study. Duckweed growth rate can reach 6.3 g/m²/day (experimental result). The required total surface area of duckweed pond (as will be calculated later) is 13972.2 m². The dairy cow can produce 68 dm³/day of manure with 87% moisture [86]. 12.5 m³ of water are required for polishing manure of 250 animals [87]. The moisture percent of duckweed biomass is 91.41%. Assuming there is no water loss during fermentation and storage step. General Mass balance equation (6) can be applied:

$$V \frac{d_C}{dt} = \text{mass in - mass out + generation - consumption}$$
 (6)

At steady-state with no generated water or consumed, mass balance equation 6 can be rearranged as following equation 7:

$$Input = Output (7)$$

$$68 \times 250 \times \frac{87}{100} + 50 \times 250 = \frac{6.3}{1000} \times 16481 \times \frac{91.42}{100} + F_o^p$$

$$F_0^p = 27209.53 \text{ kg/day} = 27.2 \text{ m}^3/\text{day}$$

Where  $F_o^p$  – flow out of treated water  $m^3$ /day

### **6.1.2.** Overall biodigester mass balance

The effluent rate from biodigester should be calculated before calculating the ammonium mass balance. Mass balance equation (5) can be applied for overall mass balance. Biogas consist mainly on average of 65% of CH<sub>4</sub> and 35% of CO<sub>2</sub>, however for 250 animals 753.42 m³/day of biogas can be produced (as calculated in the previous chapter), consequently 490 m³/day of CO<sub>2</sub> and 263.42 m³/day of CH<sub>4</sub> can be produced. The volume of one cubic decimeter gas equal to 22.4 dm³ and the molecular mass of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> are 16.04, 44.01 g/mole respectively. The effluent flow can be calculated as follow

$$68 \times 250 + 12500 = \frac{490 \times 1000}{22.4} \times \frac{44.01}{1000} + \frac{263.42 \times 1000}{22.4} \times \frac{16.04}{1000} + F_o^B$$

$$F_o^B = 28631 \text{ kg/day} = 28.63 \text{ m}^3/\text{day}$$

Where F<sub>o</sub><sup>B</sup>-flow out of the biodigester (m<sup>3</sup>/day)

#### 6.1.3. Ammonium mass balance

The concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> of fresh dairy cow manure is 998 g/m<sup>3</sup> (wet basis) [93]. By polishing the cow manure with 50 dm<sup>3</sup> per animal the ammonium concentration will be diluted to reach 575.11 g/m<sup>3</sup>. According to experimental results, the HRT of absorbing NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ions to reach 7.8 g/m<sup>3</sup> is 13 days. The first-order kinetic parameter as calculated by experimental results is 0.1944 day<sup>-1</sup>. The concentration of ammonia in biogas can reach 1% [89]. For 1100 m<sup>3</sup>/year/animal biogas production

rate (as calculated in the previous chapter), 7.53 m<sup>3</sup> of ammonia per day can be evaporated.

$$n = \frac{V}{V_m} = \frac{7.53 \times 1000}{22.4} = 336.35 \text{ moles/day}$$

Where n- number of moles of  $NH_3$  (moles);

V- gas volume (dm<sup>3</sup>);

 $V_m$ -molar volume = 22.4 mole/dm<sup>3</sup>;

According to stoichiometry of equation (8), 336.35 mole per can be produced by biodigester.

$$NH_4^+ \Leftrightarrow NH_3 + H^+$$
 (8)

$$M_{NH4} = n \times Mwt = \frac{336.35 \times 18}{1000} = 6.054 \text{ kg/day}$$

Where M<sub>NH4</sub> – mass of consumed ammonium (g/day);

Mwt- Molecular weight (g/mole)

To calculate the concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> at the effluent of the biodigester, ammonium mass balance of biodigester should be considered. By applying mass balance equation 6 at steady-state (accumulation=0), the formula of mass balance is rearenged as follow (equation 9):

Output = Input - produced 
$$(9)$$

$$M_o^{NH4} = \frac{575.11 \times 29.5 - 6054.3}{1000} = 10.911 \text{ kg/day}$$

Where  $M_o^{\rm NH4}$ - mass of ammonium at the effluent of the biodigester (kg/day)

$$C_i = \frac{M_o^{NH4}}{F_o^B}$$

Where  $C_i$  - Initial ammonium concentration of duckweed pond  $(g/m^3)$ ;

$$C_i = \frac{10911}{28.63} = 381 \text{ g/m}^3$$

### 6.2. Pond design

Duckweed pond systems for wastewater treatment can be considered as classical stabilization ponds with the addition of a floating network system to control the effects of wind [94]. Nevertheless, integrated design and operation strategies aiming at the dual application of duckweed in wastewater treatment and high biomass production are deficient. Duckweed system can be operated as batch or continuous flow. Site selection and proper design of the duckweed pond system should be guarantee easy access to the pond surface for operation and maintenance. Consequently, channel pond design is more convenient than broader ponds [92].

Primary treatment of wastewater is essential for partially initial treatment of pathogens, solids and suspended material. In the case of continuous systems, sedimentation is the main key to prevent degradation of the organic matter. Sufficient pretreatment is important to release organic nitrogen and phosphorous through metabolism of microorganism, as the availability of ammonium and orthophosphate was suggested to be the limiting factor for high growth rate [21]. Anaerobic pretreatment dissociate organic NH<sub>4</sub> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, the main forms of nutrients for duckweed growth [92].

Use of classical earthen anaerobic sedimentation ponds is an efficient system, inexpensive, simple and controllable for primary treatment, especially in limited-wages countries. The most general design standards include average depth of 2.5 m, a hydraulic retention time of 1-6 days, construction of baffles to increase circulation and avoid clay padding. Nevertheless, traditional ponds have several drawbacks: large

surface area requirement, missed emitted biogas, odor emission, algal growth (which can increase total suspended solid in the effluent), and a potential hazard of pollution of ground water without a concrete padding. The formation of a duckweed mat that cover most of water surface at steady-state operation can reduce odors, algal growth and favor anaerobic conditions [92].

Continues (plug-flow) and batch operation systems can be applied for duckweed treatment ponds. A plug-flow design (figure 29) can be appropriate treatment option for large effluent volume, this design guarantees continuous distribution of the nutrients. A plug-flow design can improves the contact surface between wastewater and duckweed. To ensure plug-flow system operation, a plug-flow width to length percentage of 1:10 is optimum [95]. Another ratio was reported with exceptional treatment results with a width to length ratio of 1:38 [21]. Furthermore, a channel-like design guarantee easy access to the pond for maintenance and operation [92].

In a plug-flow system, duckweed production rate, nutrients concentration and absorbing efficiency drop gradually with increasing HRT. Nutrients starvation causes yellowing duckweed fronds at some point in the plug-flow pathway, decreasing the growth rate and reducing the absorbing rate than the initial stages of the plug-flow. Additionally, the fiber content of duckweed increases and the protein content declines. At the end of the plug-flow process, the dual use of wastewater treatment and biomass production begins to differentiate [92]. Nevertheless, there is no dependable design guidelines for a duckweed plug-flow system, as a result nutrient depletion will occurs at the end point of the system. Consequently, a perfect duckweed plug-flow system should include several wastewater feeding sources and a recycling system [92].



Figure 29- Duckweed plug-flow system in the USA for tertiary treatment of effluent from three facultative ponds followed by a wetland buffer. Pond designed for average flow rate 19000 m<sup>3</sup>/day, with excess maximum flow rate 38000 m<sup>3</sup>/day [92].

Batch operation system are another practical option for duckweed aquaculture in rural community (where already natural ponds are existing), which, can save capital costs for additional excavation work [92]. However, batch system have low treatment efficiency, high HRT, and less biomass production rate.

To guarantee standard pathogen removal and efficient treatment, relatively long retention times in the range of 20 to 25 days are assumed for duckweed continues systems. The HRT is dependent on the organic, nutrient and hydraulic loading rate, depth of the pond and harvesting rate [94]. According to our experimental results (where duckweed grown in lab conditions), the HRT for wastewater treatment is 13 days, however this period can be reduced to 5 days or less in natural condition, since duckweed growth rate can be increased with sunlight exposure.

Several literatures reported pond depths range from 0.3 to 2.7 m up to 5 m, however, the optimal range of pond depth from 0.4 to 0.9 m, suggesting that one meter is sufficient for acceptable temperature controlling. Higher depths are also a practical choice for effluent with relatively low BOD, which can save land and reduce

recirculation rate. Low system depths are suitable for high organic loads, however this system can be applied with inexpensive land prices [92]. Nevertheless, with less depth more surface area, as a result much evaporated water will be lost. In this study for design purposes, 0.5 m pond depth will be considered.

As mentioned in the literature review, duckweed is very sensitive to wind and water currents. Quiescent conditions of the duckweed on the water surface is a key factor for duckweed system. Siberian climate is relatively windy in the early spring and late autumn period, therefore water surface disturbance can be prevented through floating grids or concrete barriers dividing the pond surface into cells or sections. Disturbance of water surface can occur in the case of continuous flow systems, which can be controlled by flow velocity in the system. Square or rectangular bamboo poles with area range from 2×4 to 5×8 m² are most commonly used [92]. The area of the grid is varied according to disturbance conditions. With higher wind and flow velocities, smaller cells and as a result more system's costs. Furthermore, pond can be protected by afforestation around the pond area [64].

Moreover, polyethylene grid system also can be used. Polyethylene grids are resistant to extreme environmental conditions, however, the costs of such a system are relatively expensive. Conversely, a more practical and expensive grid system may be an economically more feasible option on a long term than a less expensive bamboo grid system which has to be replaced frequently [92].

New system design is required to meet the dual application of duckweed. Logarithmic spiral pond design can be a promising design for duckweed system, which can simulate the natural duckweed condition by increasing the ratio of surface area with logarithmic growth rate of duckweed. Furthermore, this new design can ensure high distribution of nutrients and efficient treatment, therefore, there is no need for multiple input point or circulation system, which can decrease the operation cost and save labors. As a replacement for circulation system for efficient distribution, central holes with 10 cm diameter can be considered every 1 meter in the internal section of the spiral wall. The effluent will be supplied continuously with 28.63 m<sup>3</sup> per day at the

center of the spiral through 10 cm diameter pipe. For initial design calculation, the HRT will be considered 13 days according to our experimental results. However, this period can be reduced to 5 days or less depending on system conditions. To minimize surface water distribution at the inlet section a 1 m initial spiral diameter was specified for design calculations. The circulation will be achieved by gravity which is the result of declined bottom, this technique will save the operation cost and decrease maintenance and labor wage.

This design of duckweed pond has many advantage: high treatment efficiency; ease of duckweed harvesting; conserving the required surface area; without circulation system; ease of maintenance, operation and control; less labor and structure cost. However, the major drawback is after two circles the open surface area will increased extensively, as a result the surface area will exposure for high disturbance by wind and other factors, therefore concrete internal barriers can be constructed inside the spiral which will be curved according to outside spiral curve. However these barriers have several disadvantages: additional construction cost; uncomfortable maintenance and operation; and will be difficult to use mobile harvester. Moreover construction of floating grid with 2×4 m² section area can be considered as another option for controlling surface water disturbance, which will be inexpensive and more reliable and changeable with respect to wind velocity. The additional costs of these barriers should be counted by increased production.

The pond depth was considered to be 0.5 m which allow more mass transport to the surface area with respect to the surface area.

Since ammonium is the major nutrient component for duckweed growth, therefore to calculate the volume of the reactor, ammonium mass balance at steady-state ( $\frac{dc}{dt} = 0$ ) can be considered as following equations (10, 11, 12, 13, 14):

$$V\frac{dc}{dt} = F_i^p C_i^p - F_o^p C_o^p - K A c(t) - 0.25 C_i^p$$
 (10)

$$K = h k \tag{11}$$

$$A = \frac{V}{h} \tag{12}$$

$$F_{o}^{p} = F_{i}^{p} - F_{w}^{D}$$
 (13)

$$F_{\rm w}^{\rm D} = \frac{\mu \, m_{\rm D} \, A}{\rho_{\rm w}} \tag{14}$$

Where V – the volume of the reactor ( $m^3$ );

 $F_i^p$  – inflow of the duckweed pond = 28.63 (m<sup>3</sup>/day);

 $C_i^p$  – ammonium concentration of the pond inflow = 381.1 (g/m<sup>3</sup>);

 $F_0^p$  – outflow of the duckweed pond =  $(m^3/day)$ ;

 $C_o^p$  – ammonium concentration of pond outflow = 7.8 (g/m<sup>3</sup>);

c (t) – ammonium concentration with time (at t=13 days (HRT), c (t) =  $C_0^p = 7.8$  g/m<sup>3</sup>);

A – reactor surface area ( $m^2$ );

k- first-order kinematic coefficient =  $0.1944 \text{ day}^{-1}$ ;

h - Pond depth = 0.5 (m);

K-first-order kinematic coefficient = 0.0972 (m/day);

 $F_{w}^{D}$ - water volume consumed by duckweed biomass (m<sup>3</sup>/day);

 $\mu$  - maximum biomass growth rate = 0.00663 kg/m<sup>2</sup>/day;

 $m_D$ - moisture duckweed content = 91.42%;

 $\rho_{\rm w}$ - water density (kg/m<sup>3</sup>).

By substituting equations (11), (12), (13) and (14) in equation (10), and solving the equation for V, the volume of the reactor equals 6986 m<sup>3</sup>, consequently the pond surface area equal 13972.2 m<sup>2</sup>.

Logarithmic spiral can be recognized from the Archimedean spiral by the fact that the distances between the circles of a logarithmic spiral increase with angular displacement, however in an Archimedean spiral these distances are constant [96].

In geometry, a golden spiral is a logarithmic spiral whose growth factor is  $\varphi$  (the golden ratio). Specifically, a golden spiral gets wider (or further from its origin) by a factor of  $\varphi$  for every quarter turn it makes [97]. The golden spiral has the following polar equation 15:

$$r = a \, \phi^{\theta} \frac{2}{\pi} \tag{15}$$

The polar equation (16) for a golden spiral is the same as for other logarithmic spirals, but with a special value of the growth factor b

$$r = a e^{b \theta} \tag{16}$$

Where e - is the base of natural logarithms;

a – the initial spiral diameter = 1 m;

 $\theta$  – the angular displacement (radians), the equations (15) and (16) can be rearranged as follow (equation 17):

$$\varphi = e^{b\theta} \tag{17}$$

Where  $\varphi$  – the golden ratio = 1.6180339887

To find the value of b, equation (14) was rearranged, and substituting the golden ration as following equation 18:

$$b = \frac{\operatorname{Ln}\left[\varphi\right]}{\frac{\pi}{2}} \tag{18}$$

$$b = \frac{\text{Ln} \left[1.6180339887\right]}{\frac{\pi}{2}} = 0.306349$$

If the curve is given by  $r = f(\theta)$ , and the angle subtended by a small sector is  $\Delta\theta$ , the area will be calculated as following equation 19:

$$A = \frac{\Delta \theta \ f(\theta)^2}{2} \tag{19}$$

Consequently we approximate the total area as follow (equation 20):

$$A = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} f(\theta_i)^2 d\theta$$
 (20)

When  $\theta \to 0$  the area can be calculated by definite integral as follow (equation 21):

$$A = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} f(\theta^2) d\theta \tag{21}$$

To find the angular displacement for logarithmic spiral with surface area 13972.2 m<sup>2</sup>, equation (21) will become (equation 22):

$$A = \int_0^\theta \frac{1}{2} e^{2b\theta} d\theta \tag{22}$$

As a result  $\theta = 5.0644~\pi$ , or in another word, spiral will circulate 2.5 times with initial diameter 1 m and final diameter 129 m

The value of x and y at polar coordinates can be calculated as following equations 23 and 24:

$$x = r\cos(\theta) \tag{23}$$

$$y = r \sin(\theta) \tag{24}$$

By applying the calculatuin abovementioned the resulted plot will be as shown in figure 30. Ploting data are shown in appendix (11.3)

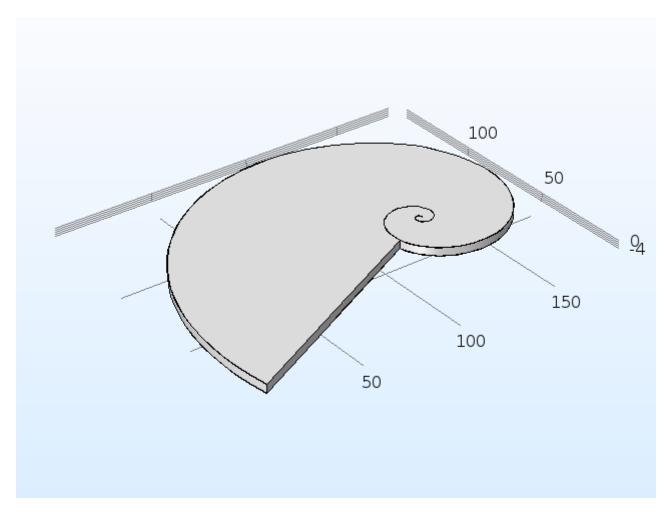


Figure 30- Spiral design of duckweed pond system with initial diameter 1 m

#### 7. Mathematical modeling of duckweed pond system

A mathematical model was established to describe mass transfer of nutrients in duckweed wastewater treatment pond. Duckweed has grown in high-nutrient effluent of biodigester, installed in Tomsk region. In this model, batch process was considered, as the flow rate of wastewater is relatively low comparing with the reactor volume (as calculated in the previous chapter), therefore, the flow velocity can be considered zero. A COMSOL Multiphysics 5.2a was used to build the model that describes the ammonium and phosphates ions transfer and their concentrations difference in the pond with respect to time. The parameters in the model are the initial concentration of the nutrients in the medium (c<sup>n</sup>) and pond depth (h). Applying one order of magnitude parameter variations, the simulations showed that the model was clearly much more sensitive to pond than to concentration, indicating the process efficiency of nutrients absorption in duckweed pond system is depth limited. Laboratory experiments were conducted with duckweed (*Lemna minor*), to adjust the model.

### 7.1. Differentiation of the controlling equation

The mass balance of nutrients was described by the equation 6. To calculate the uptake rate constant with first order kinetics, linear regression of the experimental data has implemented. In our experiment, duckweed (*L. minor*) was cultured in plastic Jars with 8.1 diameter, filed with 250 ml of high-nutrient medium at initial ammonium concentrations of 60%, 40%, and 20% of wastewater solution at 25±1°C and under 140 µmole/m²/s) photon flux density. The mass balance of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> is described by the following equation 25:

$$V\frac{dc^n}{dt} = F_i c_i^n - F_o c_o^n - K c^n$$
 (25)

The experiment was done with batch test, thus there is no input nor output mass from the system. The absorption rate was assumed as the sum of nutrients consumption by duckweed and other microorganisms. However, to obtain clear image of the nutrients absorption dynamics, the mass settled by gravity and emitted as a biogas will be neglected in this model. Note that the reaction term should take the form of an area-

based expression due to the fact that the reaction occurs only at the surface of the culturing medium. The area-based first order expression can be expressed as following equations:

$$V \frac{d_{c^n}}{dt} = -K A c^n$$
 (26)

$$V \frac{d_{c^n}}{dt} = -K A c^n$$
 (27)

$$\frac{d_{c^n}}{dt} = -\frac{K}{h} c^n \tag{28}$$

Where  $c^n$  - concentration of nutrients (g/m<sup>3</sup>);

K - First order uptake constant (m/h);

A- Top surface area (m<sup>2</sup>);

h - Pond depth (m).

Equation 28 was rearranged and solved to obtain the following equation 29

$$\ln c_0^n = -\frac{K}{h} t + \ln c_i^n$$
 (29)

This model does not include the lag and stationary phase portion of the growth rate curve, because duckweed was assumed to grow and harvested in batch treatment system and continuously absorbs nutrients from the medium. This assumption is also true for continues operating system, because duckweed should always be adapted to the medium with continuous biomass harvesting [92]. The Initial ammonium and phosphates concentration in the simulation is the first data point after lag phase ended and the final ammonium concentration is the first point of the linear phase.

The diffusion coefficient of ammonia in in water is  $7.2 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/h [98], while the diffusion coefficient of phosphates at pH=7,  $3.6 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/h [99]. The water concentration in most water resources including lagoon is approximately 55.56 moles/dm<sup>3</sup> (molecular weight of H<sub>2</sub>O = 18 g/mole). The concentration of dry mater in biodigester effluent is approximately 5% which is very small related to concentration

of water, thus it can be ignored. In this model the high-nutrient wastewater was diluted as 20%, 40% and 60% solution, consequently further reduction of the ions concentrations and dry mater effect in the culturing medium [100]. Thus, the mentioned above values of diffusion coefficients of  $NH_4^+$  and  $PO_4^{3-}$  was applied in this model.

Mass transfer of  $NH_4^+$  and  $PO_4^{3-}$  ions follow Fick's law, which is expressed in terms of flux in one-dimensional coordinate system (equation 30):

$$J = -D \frac{\partial c^n}{\partial x}$$
 (30)

Where J- mass transfer of specific substance in the system  $(g/m^2/h)$ ;

D- Diffusivity of the substance (m<sup>2</sup>/h);

c<sup>n</sup> - Concentration of the substance (g/m<sup>3</sup>);

x - Coordinate direction in which mass diffuses (m).

The negative sign indicates that mass diffuses from high to low concentration. Diffusion coefficients of various chemicals are dependent on many parameters (temperature, ionic concentration, and phases) where diffusion is occurring. In this study, the substances of interest were ammonium ion (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) and phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). Fick's law was used in the mass balance on a differential volume to describe the transfer process in the simulated duckweed pond system. The mass balance equation was established by assuming no reaction in the differential volume and vertical transport of nutrients in the duckweed pond. To develop the controlling differential equation of the nutrients transfer for one dimensional diffusion and there is no mass generation nor consumption, the mass balance equation 6 becomes equation 31:

$$\frac{\partial c^{n}}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = J_{x} \Delta y \Delta z - J_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$$
 (31)

By dividing both sides of equation (31) by  $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)$  to get equation 32:

$$\frac{\partial c^{n}}{\partial t} = \frac{J_{x} - J_{x + \Delta x}}{\Delta x} \tag{32}$$

When  $\Delta x \rightarrow 0$  equation (32) becomes equation 33:

$$\frac{\partial c^{n}}{\partial t} = \frac{\partial J}{\Delta x} \tag{33}$$

By substitution the mass equation (30) in equation (33) and simplify the equation, the controlling equation of the nutrient diffusion becomes equation 34:

$$\frac{\partial c^{n}(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^{2} c^{n}(x,t)}{\partial x^{2}}$$
 (34)

For one-direction mass transfer, two boundary conditions must be considered, one at the bottom and another at the top of the culturing volume in the direction of mass transport. The first boundary condition in the duckweed pond system is defined at the water surface (x = h) where duckweed absorbs nutrients (equation 35):

$$k c^{n}(h,t) = -D \frac{\partial c^{n}(h,t)}{\partial x}$$
 (35)

The nutrients flux on the right hand side of equation 35 to the duckweed mat at the top must be identical to the duckweed nutrient mass uptake on right hand side of equation 35. The rate constant k (first order kinetics) ( $h^{-1}$ ) will be determined later by regression analysis for both of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

At the bottom of the volume (x = 0), which is the second boundary condition, where the mass flux was assumed to be zero, that is, there is no generation of nutrients through the bottom of the pond (equation 36):

$$-D \frac{\partial c^{n}(0,6)}{\partial x} = 0 \tag{36}$$

## 7.2. Experimental data and model design

Model results were tested compared to data collected from laboratory-scale duckweed batch tests. All experiments were carried out in a hand-made growth chamber which operated on continuous 16 hours daylight at an intensity of 140 μmol/m²/s. Temperature was constant at 25±1 °C during the period of the experiment. The culturing medium was taken from effluent biodigester working in Tomsk and then diluted with distil water at 20%, 40% and 60% without sterilization to simulate natural

system and observe the dynamics of other microorganisms, however the results of uptake rate represent mixed of duckweed, algae and bacteria. The initial ammonium and phosphate concentrations are shown in table 2. The prepared medium filled the batch reactors to 4.84 cm. Duckweed *L. minor* in the amount of 0.17 g (dry basis) was placed in each test to completely cover the surface. Every batch test has mixed for 1 minutes per day. Prior to the experiment, duckweed was preconditioned for one month in similar lighting and tap water medium with weekly medium replacement to minimize the lag phase that could potentially occur during the beginning of the experiment. Samples from triplicate batch tests were taken at two times a week and ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) and phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3</sup>-P) of each sample were analyzed. The results of the ammonium phosphate profiles were used to adjust the model, which yielded optimal values of h and c<sup>n</sup> of the duckweed pond system.

Three different pond depth 0.1, 0.2 and 0.3 m with range of hydraulic retention time for every point of depth as 7, 21, 35, 49 and 63 days.

The model was performed with the different initial concentrations of ammonium and phosphates as shown in table (5). These concentrations represent the first point after lag phase. Nutrients concentration profiles at every 14 days were generated from the outputs of the COMSOL Multiphysics computations. The sensitivity of the model to variations in the value of pond depth (h (m)) and concentration (c<sup>n</sup> g/m³) was tested to understand the concentration and depth effect on the operational scenario, new parameter pairs of depth-concentration were supposed to give better idea of the system dynamic. Values of depth and concentration were varied of magnitude and paired up H<sup>i</sup>-C<sup>n</sup><sub>j</sub> to yield a total of nine pairs for ammonium and phosphate individually, i.e. H<sup>0.1</sup>-C<sup>n</sup><sub>20%</sub>, H<sup>0.1</sup>

#### 7.3. Results and Discussion

#### 7.3.1. Calculation of First order Kinetics

By applying equation (22) and Regression analysis of the batch experimental data, a first-order uptake kinetics and coefficient of determination ( $R^2$ ) for three different initial concentrations of the nutrients were calculated as shown in table 5. The first-order coefficients, include duckweed and other microorganism activity except the settled and emitted matter. Chaiprapat et al. [100] reported  $0.906 \times 10^{-3}$  (m/h) first order uptake coefficient using different initial concentration of ammonium ( $63.1 \text{ g/m}^3$ ), and different species of duckweed (*Spirodela punctata* 7776), the concentration parameter have no effect on k value, however different duckweed species have potential effect on the k value. Appendix 11.2 shows a curve fitting of the experimental ammonium and phosphates concentration data using the first order kinetic model. As we can see in table 5 the values of K are almost equal with different concentration for both of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3</sup>, because k-value are not affected by concentration. Thus, k values have been considered as constant as the average of 20%, 40% and 60% concentration of k values. For ammonium of,  $7.53 \times 10^{-3}$  and phosphate of,  $3.73 \times 10^{-3}$  h<sup>-1</sup>.

Table 5- Regression analysis of the batch experimental data

	20% concentration	40% concentration	60% concentration	Average of K value
		$\mathrm{NH}_4^+$		
k (h <sup>-1</sup> )	6.4×10 <sup>-3</sup>	8.1×10 <sup>-3</sup>	8.1×10 <sup>-3</sup>	7.53×10 <sup>-3</sup>
$\mathbb{R}^2$	0.98	0.96	0.98	
$C_i (g/m^3)$	33.3	71.3	105.37	
		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		

k (h <sup>-1</sup> )	4.1×10 <sup>-3</sup>	3.2×10 <sup>-3</sup>	3.9×10 <sup>-3</sup>	3.73×10 <sup>-3</sup>
$\mathbb{R}^2$	0.91	0.94	0.92	
$C_i (g/m^3)$	8.15	14.56	16.39	

## 7.3.2. Ammonium profile for 20%, 40% and 60% concentration

The controlling equation 27 with the specified initial conditions was applied with constant values of k,  $7.53\times10^{-3}$  h<sup>-1</sup> and D,  $7.2\times10^{-6}$  m<sup>2</sup>/h for three high-nutrient solutions that have utilized in this study. The resulting ammonium ion concentration profile with H<sup>0.3</sup>-C<sub>20%</sub><sup>NH<sub>4</sub>+</sup> exhibits a sharp drop near the duckweed-covered surface shortly after the initial time (figure 30-a). This rapid fall of concentration is primarily due to the uptake of ammonium ions by duckweed at the surface, which is much faster than the diffusion rate of the ions to the surface. The concentration gradient was decreased with reducing the pond depth to 0.2 m (figure 30-b), and with more decreasing the pond depth to 0.1 m (figure 30- c) the concentration gradient was decreased more, which indicate that the uptake rate was faster and closer the diffusion coefficient. For all different point of pond depth, the concentration difference (gradient) was high near the surface and decrease with depth to the point below which the ion concentration is uniform, or in other words, the concentration gradient is zero.

In a multi-process system, the slower step controls the rate of the whole process, which is in this study is mass transfer (diffusion). The lower concentration near the duckweed surface specifies that the uptake of ammonium ions from the solution in this system is extremely dependent on diffusion. It is clear that ammonium transport in the duckweed pond system is restricted by diffusion which is mainly depend on the pond depth.

For other different concentration (40% and 60%), it was observed that the system has the same behavior with unremarkable difference of concentration gradient as shown in figure 31 and figure 32.

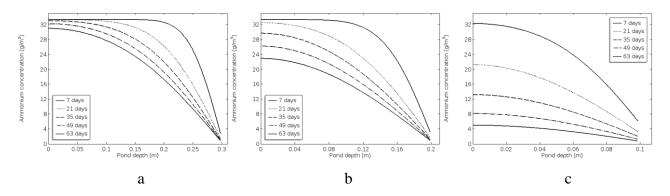


Figure 31- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 33.3 g/m $^3$  and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; and c - 0.3 m.

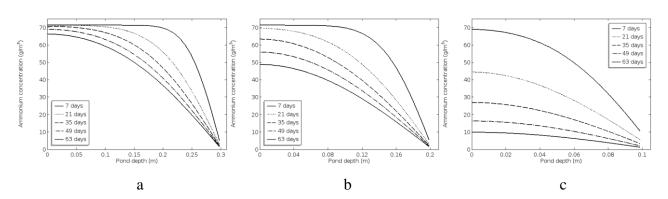


Figure 32- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 71.3 g/m³ and varied pond depth

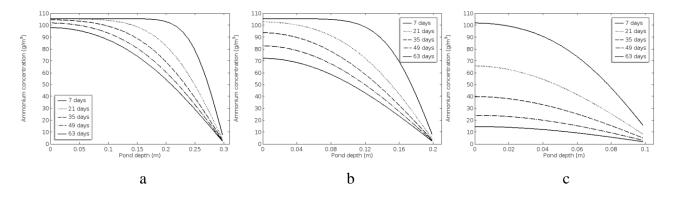


Figure 33- Ammonium concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 71.3 g/m $^3$  and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m.

# 7.3.3. Phosphate profile for 20%, 40% and 60% concentration

Simulations of Phosphate with D, 3.6×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/h, and k 3.73×10<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> for every concentration (table 5) also yielded similar concentration profiles, which support the conclusion of the diffusion-limited nature in this system. We can conclude from figure

33 that the concentration gradient of phosphate profile at different initial concentration and pond depth, have the same characteristics for ammonium profile.

The ratio of k/D was proposed to understand the similarity of ammonium and phosphates gradients on the operational scenario. The average values of k/D for ammonium and phosphate are  $1.042 \times 10^3$  and  $1.036 \times 10^3$  m<sup>-2</sup> respectively. Since the k/D value of ammonium is almost equal as of phosphate, which can explain the identical characteristics of concentration profiles of the nutrients with respect to time for all different initial concentrations and pond depths as shown in figures 34 and 35.

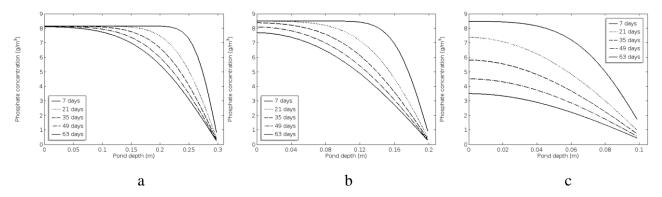


Figure 34- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of  $8.15 \text{ g/m}^3$  and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m.

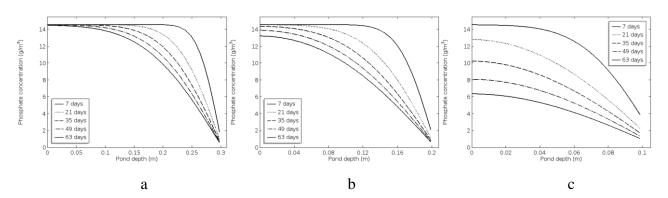


Figure 35- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of  $14.56 \text{ g/m}^3$  and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m

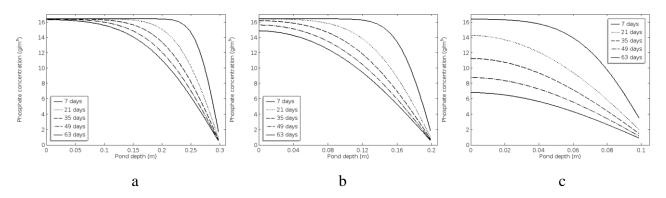


Figure 36- Phosphate concentration profiles in a simulated duckweed pond with initial concentration of 16.39 g/m $^3$  and varied pond depth: a - 0.3 m; b -0.2 m; c - 0.3 m

The simulation grapics for the ammonium and phospates with different initial concentrations and pond depth are illustrated in appendix (11.4.)

#### 7.4. Conclusion

Simulations of Pond depth – nutrients concentration pairs provide similar concentration profiles for both of ammonium and phosphate, which support the conclusion of the mass transfer-controlled system. Pond depth is the main parameter that control removal rate with respect to time, while initial concentration have almost no effect for such system. Diffusivity (D) are constant for the range of nutrients concentration that applied in this study, as well as that of calculated first-order kinetics parameters (k). However, the characteristics of the system could be manipulated by many parameters under natural conditions, as a result, values of k and D will be varied. Such factors include change in temperature (affecting both parameters), different strains of duckweed, pH and light intensity (affecting k), and bacterial activities that cause internal agitation by gas production as well as the ionic concentration of the pond liquid (affecting D).

Nutrients removal rate in duckweed pond system governed by the amount of mass transferred the surface and duckweed absorption rate. Model predicted results exhibited decreasing nutrients concentration close to the surface with respect to time, demonstrating that nutrients transport is the limiting step in duckweed pond system. Mass transfer-restricted conditions can be considered as the main principle of duckweed pond design, however nutrient transfer can be increased by mechanical

harvesting and water disturbance factors. For continuous duckweed harvesting system, the removal efficiency is mainly governed by the uptake and duckweed growth rate. In the case of dual application of duckweed pond system when high biomass productivity and efficient nutrients removal are anticipated, absorbing-restricted conditions can be considered the governing factor. For such system, pond depth must be optimized with duckweed pond surface area.

#### 8. Социальная ответственность

Комплексная система очистки сточных вод ряски с использованием перерабатываемых питательных веществ, энергии и воды может предоставить привлекательные возможности для управления окружающей средой и водными ресурсами. Хотя рециркуляция сточных вод практикуется на протяжении многих столетий, в этой области проводится много исследований и проектов, главным образом в развивающихся странах, сочетание экономичного процесса обработки с повторным использованием очищенных сточных вод может обеспечить существенные экономические мотивы, которые вносят вклад в осуществимость и устойчивость общей системы. Подход с одной целью, направленный исключительно на очистку сточных вод и защиту окружающей среды, не будет практичным для многих стран мира.

#### 8.1. Опасности для здоровья

Сточные воды с высоким содержанием питательных веществ использовались, как сырые, так и предварительно обработанные, для сельского хозяйства и аквакультуры. В зависимости от типа рециркуляции необходимо учитывать две проблемы для здоровья и безопасности [101]:

- 1) перенос микроорганизмов в пищевую цепь человека;
- 2) накопление химических веществ (тяжелых металлов, пестицидов и токсичных соединений), которые могут присутствовать в отходах (например, бытовые отходы, химические отходы, промышленные отходы).

Связанные с этим угрозы для здоровья затрагивают три основные категории людей: во-первых, персонал, который находится в прямом или косвенном контакте со сточными водами при эксплуатации и обслуживании системы очистки ряски, а также при обработке выходных продуктов системы, таких как биомасса, рыба или шлам. Во-вторых, потребители продуктов системы, которые загрязнены патогенами и могут содержать высокие концентрации токсинов из-за их биоаккумуляции в пищевой цепи. В-третьих, население, особенно дети, проживающие в районе лечебных прудов. Многие

люди принадлежат к более чем одной из вышеупомянутых групп, в некоторых случаях даже ко всем из них, и поэтому будут подвергаться повышенному риску [92].

Поскольку трудно полностью исключить непосредственный контакт со сточными водами в процессе работы, например, сбор урожая ряски, маркетирование и транспортировка, работники пруда относятся к категории высокого риска и особенно подвержены паразитарным инфекциям.

Willett D. [61] предложил множество методов уборки урожая, которые могут быть получены путем сбор биомассы ряски с поверхности пруда или путем проталкивания ряски по каналу на сборный лоток с помощью стрел или механических устройств. Использование сетки и вычерпывание ряски трудоемки и более подходят для небольших систем с небольшой шириной пруда, чтобы обеспечить доступ ко всей урожайности ряски с края пруда. Большие пруды нуждаются в самоходных устройствах.

Разработанный механический харвестер, показанный на рисунке 36, может использоваться для системы сбора ряски. Его можно контролировать с помощью пульта дистанционного управления в диапазоне от 9 до 15 м. Комбайн алюминиевой конструкции, чтобы спроектирован ИЗ поддерживать минимальный вес и сопротивление коррозии. Ряску собирают между двумя корпусами и перемещают в зону выдержки в точке, где ряска удаляется из пруда [102]. Существует много механических моделей для сбора ряски (рисунке 37, 38), и выбор соответствующего харвестера зависит от многих параметров: местоположение; общее состояние погоды конкретном В проектирование прудов; размеры пруда (площадь и глубина) и применение биомассы [103], [104], [105]. Эти технологии уборки могут защитить рабочих от патогенов, избегая прямого контакта со сточной водой или биомассой ряски. В дополнение к механической уборке, конструкция пруда должна позволять проводить работы по техническому обслуживанию и уходу с набережной пруда [92].



Рисунок 37- Механический комбайн для уборки ряски [102].



Рисунок 38- Малогабаритный механический харвестер [103].



Рисунок 39- Фиксированный комбайн со скоростью 700 галлонов/мин [105].

Передача патогенов и микроорганизмов из ряски продукту (рыбе и другому животному) может быть значительно уменьшена путем удаления кишечных органов, промывкой чистой водой и температурной обработкой. Физическое разделение ряски и выращивание рыбы в двухпалубной системе может снизить риск для здоровья, так как возможно только косвенное загрязнение патогенами рыбы через ряску [92]. Однако, из-за биоаккумуляции токсичных соединений, использование непрямых сточных вод не снижает риск загрязнения. Система ряски с высокоорганическими отходами должна быть построена вне муниципальной границы для защиты местных жителей и предотвращения их купания или использования для купания, приготовления пищи и других целей. Предупреждающие сообщения должны размещаться в прудах, прилегающих к дорогам, особенно если они не огорожены [106].

# 8.1.1. Высокоочищенные сточные воды в качестве кормовой аквакультуры

Дополнительная широко применяемая опция переработки — аквакультура. Выращивание рыбы в органических прудах сточных вод является важным источником высококачественных белковых продуктов для миллионов людей в развивающихся странах, особенно в Юго-Восточной Азии. Кроме того, прямое повторное использование органики в аквакультуре является традиционной практикой в ряде стран, включая Китай, Индию, Индонезию и Вьетнам. Этот тип

культивирования рыбы использовался для потребления человеком много лет назад, сточные воды или экскреты редко используются для культивирования водных растений или рыб для производства кормов для животных [107].

Крупнейшей системой органической сточной воды, питаюшейся аквакультурой в мире, является система заболоченных земель Калькутты, расположенная близко к востоку от города [108]. Система получает около 550 000 м<sup>3</sup>/сут необработанных сточных вод, которые вводятся в около 3000 га рыбоводных прудов. Система производит около 13000 тонн в год рыбы (главным образом карпа и тилапии), которая поставляется на рыбные рынки центральной Калькутты и потребляется в более широком регионе. Аналогичная система встречается в другом месте в Китае [109] и Вьетнаме [107]. Однако указанные выше системы не будут соответствовать действующим нормы всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) по аквакультуре, включая нулевые нематоды и менее 1000 фекальных колиформ (ФК) на 100 мл. Суммарный ФК во входящей системе Калькутты находился в диапазоне  $10^5$ - $10^6$  на 100 мл [110]. Однако регулирование ВОЗ для таких систем аквакультуры может быть легко достигнуто предварительной обработкой в стабилизационных прудах при 1дневном гидравлическом времени удерживания в анаэробных прудах, а затем в факультативном пруду в течение 5 дней [111].

## 8.1.2. Система ряски в качестве кормления аквакультуры

Утилизация (рециклинг использования) органических веществ в аквакультуре для производства рыбы в качестве пищи для людей социально неприемлема во многих странах. Это особенно справедливо во многих развивающихся странах, где антисанитария и голод сосуществуют. Для решения этой проблемы, а также для соблюдения правил ВОЗ, является косвенное повторное использование органических веществ и навоза. В этом случае питательные вещества используются для производства водных растений или рыб, которые впоследствии используются в качестве корма для животных в отдельной системе культивирования. Система, основанная на ряске, является

интересным вариантом, который следует учитывать в этом отношении, ряска обладает отличным качеством корма для скота, имеет высокие темпы роста и удобна в управлении (сбор урожая, обработка). Первое применение аквакультуры на основе ряски было на Тайване, где в 1985 году в городе Тайнань было разработано около 100 га прудов ряски для сточных вод [107].



Рисунок 40- Система очистки сточных вод на основе ряски в Мирзапуре, Банглалеш.

Позднее в 1993 году Бангладеш (система Мирзапура) также участвовала в систематическом культивирование рыбы с использованием ряски, выращенной на сточных водах, с притоком 5000 л/день, как показано на рисунке 39 [106], [112].

Впоследствии, пруды для очистки сточных вод ряской и рыбоводные пруды представляют собой две различные отделенные системы, и сточные воды из системы очистки сточных вод обычно не используются в пруду для рыб, что предполагает высокое микробиологическое качество по сравнению с прямой аквакультурой, питаемой сточными водами. Однако прямое кормление собранной ряской будет нести некоторые болезнетворные микроорганизмы в рыбные пруды.

#### 8.1.3. Накопление химических веществ

Промышленное загрязнение представляет собой более реальную опасность для здоровья человека, чем патогены и микроорганизмы. Многие промышленные объекты отводят широкий спектр химических веществ в водные ресурсы, включая высокотоксичные тяжелые металлы. Одним из примеров является сточная вода, которую использовали в рыбном пруде в Калькутте, включала 70% промышленных сточных вод [114].

Во многих развивающихся странах промышленные сточные воды сбрасываются непосредственно в окружающую среду (особенно в водные ресурсы) без обработки. Тем не менее, водоемы (которые используются как в быту, так и в сельском хозяйстве), близкие к загрязненному промышленными сточными водами источнику, будут загрязняться до степени, зависящей от расстояния от загрязненного источника. Эта проблема может быть решена либо путем применения надлежащего процесса обработки для улучшения качества сброшенных сточных вод, либо путем создания изолированных каналов для промышленных стоков, что гарантирует, что эти потоки отходов сохраняются отдельно от чистых водных объектов и которые в конечном итоге используются для бытовых и сельскохозяйственных целей [101].

Значительное количество накопленных металлов в сточных водах может быть удалено анаэробной системой прудов. Эффективность удаления зависит от количества сульфида. Сульфиды металлов будут осаждаться на дне пруда. Шлам из анаэробных прудов следует периодически проверять на концентрацию металлов перед повторным использованием для других целей. Культивирование сточных вод системы ряски с относительной концентрацией металлов может накапливаться в биомассе ряски. Сообщалось о накоплении многих металлов ряской [12]. Опасности накопления металлов Lemnaceae зависят от количества и качества металлов, присутствия секвестрантов и видов ряски.

Ряска может переносить и накапливать высокие концентрации тяжелых металлов и органических соединений при коэффициентах накопления в пределах от кратных  $10^2$  и  $10^5$  [92].

В 1995 году в Бангладеш ряд металлов в ряске из системы очистки сточных вод (Рb, Cd, Hg, Cc, Cu, Ni, Zn и As) были проанализированы Больничным Комплексом Кумудини. Концентрации, указанные для всех металлов, были приняты, кроме As. Результаты показали, что ряска может накапливать мышьяк до 4,8 промилле (мг/кг сухого веса). Концентрация мышьяка в притоке собранной ряски может достигать даже 24 м.д. [101].

В 1987 году были определены допустимые уровни тяжелых металлов и пестицидов у рыб, выращенных в статических водоемах сточных вод [114]. В Университете Дакки несколько анализов мышьяка (с помощью атомноадсорбционного спектрофотометра) композиционных образцов рыб показали концентрацию мышьяка 0,017 м.д. Это значение довольно низкое и предполагает, что рыба, которую кормили рыбой, безопасна для потребления человеком [101]. Так как специфические белки могут связываться и реагировать с определенными тяжелыми металлами через процесс метаболизма рыб, возможная опасность для здоровья должна учитываться путем культивирования в сточных водах.

Много недавних исследований предполагают, что накопление металлов не вызвано поглощением ряски, а их абсорбцией на поверхности погруженной ряски [12], [115].

Пестициды являются гидрофобными соединениями, которые могут накапливаться в липидном слое клеточной мембраны. Коэффициенты накопления в *L.minor* от 800 и до 1200 для дихлордифенилтрихлорэтана и для гексахлорциклогексана соответственно [116].

#### 8.2. Экологическая безопасность

Безопасность и здоровье работников и общества должны быть приоритетными, поэтому для их защиты необходимо учитывать осторожность и безопасные условия труда в прудовой системе. По сравнению с природными водными ресурсами относительное количество лечебных водоемов незначительно. Тем не менее, лечебные пруды все еще являются источником

притяжения для отдыха людей. Во многих странах сообщалось об инцидентах на лодках, коньках, рыбалке и даже плавании в прудах. Возможность заражения или заражения патогенными организмами существует, когда человек контактирует со сточными водами в пруду, таким образом, следует предотвращать использование развлекательных прудов и поощрять меры предосторожности по многим важным причинам.

Люди могут утонуть в лечебных прудах. Глины и синтетические покрытия, используемые в уплотнительных прудах, будут очень вязкими в рабочем состоянии. Если человек упадет в пруд, присутствие такого покрытия сделает его чрезвычайно опасным и будет мешать выбраться. Чтобы препятствовать использованию прудов для отдыха, вся территория должна быть огорожена и установлены предупреждающие знаки [117].

Еще одним фактором следует считать наличие комаров и насекомых. Согласно исследованиям Службы Общественного Здравоохранения США, плотность популяции комаров прямо пропорциональна степени роста сорняков в водоеме [117]. Там, где рост сорняков в прудах и вдоль водопроводных дамб незначителен и где воздействие ветра на водоем не чрезмерно ограничено, вероятность размножения москитов низка. Однако в системе пруда ряски водная поверхность будет изолирована покровом ряски, поэтому комары в этом случае обычно не являются проблемой.

# 8.2.1. Техническое обслуживание и меры безопасности ряски

Все условия безопасности и гигиены труда в системе очистки сточных вод, которые перечислены в текущем исследовании, сообщаются Агентством по Охране Окружающей Среды (АООС) (2011) [117].

Ниже перечислены общие условия труда и безопасности для обслуживания и эксплуатации прудовых систем:

• Поддерживайте высокий уровень домашнего хозяйства. Не допускайте попадания на пол, стены и оборудование грязи, смазки и мусора. Храните инструменты надлежащим образом, когда они не используются.

- Держите дорожки чистыми и свободными от скользких веществ. Если лед образуется при ходьбе, нанесите соль или песок или накройте землей или золой, которые можно удалить позже.
- Будьте особенно осторожны при работе с электрической распределительной системой и соответствующими устройствами. Никогда не работайте с электрооборудованием и проводом с влажными руками или в мокрой одежде или обуви. Всегда надевайте соответствующие защитные перчатки для работы с электрооборудованием. Никогда не используйте распределительную коробку в качестве коммутатора.
- Соблюдайте все правила безопасности персонала, регулярно проводя тренировки. Соблюдайте инструкции по технике безопасности, которые размещены в соответствующих местах. Такие инструкции должны включать информацию о том, как связаться с ближайшим медицинским центром и пожарной станцией, методами спасения, реанимацией и методами оказания первой помощи.
- Удостоверьтесь, что достаточное количество обученного и опытного персонала с соответствующим оборудованием назначается и присутствует, когда это необходимо для выполнения любой опасной работы.
- Сотрудники должны пройти обучение технике безопасности на лодках. Спасательные средства должны использоваться, когда персонал находится в лодке на лечебных прудах. По крайней мере два человека должны работать вместе вокруг прудов из-за опасности утонуть и других несчастных случаев. Обучение технике безопасности для оператора пруда должно включать навыки спасения жизни, включая способность плавать не менее 30 м в обычной рабочей одежде.
- Достаточное количество огнетушители должны быть размещены в легкодоступных местах.

### 8.2.2. Меры предосторожности при инфекциях тела и заболеваниях

Обращайтесь со всеми порезами, ссадинами и подобными травмами в кратчайшие сроки. При работе со сточными водами небольшая ссадина или царапина потенциально опасны и должны быть немедленно очищены и обработаны 2-процентным раствором настойки йода. Кроме того, персонал должен:

- Получитье медицинскую помощь при всех травмах.
- Пройти курс первой помощи.
- Прививаться к болезням, передающимся через воду, в частности брюшным тифам и паратифулярной лихорадке.
- Вести учет всех прививок в истории болезни сотрудников.
- Ежегодно просматривать записи о необходимых сигнальных средствах и новых средствах защиты.

В лаборатории всегда используйте подходящее лабораторное оборудование и расходные материалы, а также избегайте любых загрязнений рта. Не принимайте лабораторную посуду для личного пользования. Бумажные чашки должны быть предоставлены в лабораториях для питья. Никогда не готовьте или ешьте пищу в лаборатории.

## 8.2.3. Вредные газы, взрывоопасные смеси и кислородный дефицит

Основными опасностями для воздуха, связанными с очисткой сточных вод, являются скопления канализационного газа и его смеси с другими газами или воздухом, которые могут стать причиной смерти или травмы вследствие взрыва или удушья в результате дефицита  $O_2$ . Термин «канализационный газ» обычно применяется к смеси газов в коллекторе и люках, содержащих высокие проценты  $CO_2$ , в различных количествах  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$  и низких процентах  $O_2$ . Такие смеси иногда накапливаются в коллекторах и смотровых колодцах, где органическое вещество откладывается и подвергается разложению. Фактические опасности, вытекающие из канализационного газа, являются результатом взрывчатого

количества  $CH_4$ ,  $H_2S$  или недостатка  $O_2$ . Сероводород является токсичным при очень низких концентрациях, и чувствительность человека к запаху быстро притупляется.

Хлорный газ, раздражающий глаза, дыхательные пути и другие слизистые оболочки, может оседать в низинных неподвижных областях. Газ образует кислоту в присутствии влаги. Газ может протекать из цилиндров и линий подачи и диффундировать и оседать в этих местах.

#### 8.3. Спасательное оборудование для очистки сточных вод

Оборудование для очистки сточных вод должно иметь следующие типы оборудования для обеспечения безопасности:

- Оборудование для обнаружения (для газов и недостатков О2)
- Респираторы (комплекты автономных дыхательных аппаратов для устранения недостатков O<sub>2</sub>)
- Ремни безопасности, линии и подъемники
- Правильная защитная одежда, обувь и головной убор
- Вентиляционное оборудование
- Неискрящие инструменты
- Оборудование связи
- Переносные воздуходувки
- Взрывозащищенный фонарь и другое безопасное освещение
- Предупреждающие знаки и барьеры
- Аптечки первой помощи
- Надлежащие огнетушители
- Глазные мойки и душевые станции в лабораториях
- Защитные очки для работы в лабораториях и других опасных зонах.

## 8.4. Общие причины несоответствия стоков пруда

В этом разделе будет рассказано о нарушении стоков, об испытаниях и результатах поиска неисправностей и о возможных решениях этой проблемы. Нарушения сточных вод пруда могут быть вызваны органической перегрузкой, закорачиванием, условиями разрастания водорослей, аккумуляцией и нитрацией осадка или частичной нитрификацией.

### 8.4.1. Органическая перегрузка

Органическая перегрузка обычно вызвана воздействием органических ударных нагрузок или повышенной органической нагрузки без соответствующего увеличения мощности очистных сооружений. Это состояние вызывает низкие концентрации растворенного кислорода (<1,0 мг/л) и ингибирует лечение. Это можно проверить, вычисляя скорость скорость биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>/день) и сравнивая его с расчетной мощностью. Тест на растворение кислорода (РКТ) следует запускать в разное время дня, чтобы проверить, есть ли непрерывное низкое состояние растворенного кислорода.

Диагностические исследования по выявлению неисправностей будут демонстрировать высокий уровень  $\mathrm{Б\Pi K}_5$ , высокий химический и биологический потребления кислорода ( $\mathrm{X}\mathrm{Б\Pi K}_5$ ), высокий уровень растворимости  $\mathrm{Б\Pi K}_5$ , низкий уровень РКТ, низкое содержание общего взвешенного твердого вещества (ОТВ) и  $\mathrm{Б\Pi K}_5$  с высоким  $\mathrm{NH}_3$ . Непосредственным решением является увеличение мощности органической очистки за счет увеличения аэрации. В долгосрочной перспективе должна быть разработана и внедрена программа предварительной обработки с мониторингом системы сбора данных тех районов, которые подозреваются в создании больших органических нагрузок.

## 8.4.2. Короткое замыкание

Короткое замыкание обычно происходит, когда необработанные или частично очищенные сточные воды не имеют достаточного времени пребывания в системе для полной обработки. Это может быть вызвано температурным

расслоением в ячейках, плохой конструкцией впускных и/или выпускных отверстий, недостаточным отношением длины к ширине ячейки или формой ячейки, или плохим смешиванием и неправильным размещением аэратора. Выполнение теста профиля РКТ в установленной сетчатой системе при регистрации как РКТ, так и температуры с шагом 0,3 м от поверхности до днища должно проверять условие короткого замыкания. Оператор будет учитывать изменения в РКТ и температуры, указывающие температурную стратификацию и/или плохое перемешивание. Диагностический тест на выявление неисправностей будет указывать на высокий уровень БПК<sub>5</sub>, высокий уровень растворимого БПК<sub>5</sub>, умеренный ОТВ и высокий уровень NH<sub>3</sub>. Это условие должно быть подтверждено микроскопическим исследованием стоков.

Возможными решениями являются перемещение аэраторов, добавление направленных аэраторов или смесителей, добавление перегородок, рециркуляция для улучшения перемешивания, а также изменение конструкции входных и выходных структур за счет включения коллекторов или перемещающихся структур.

#### 8.4.3. Перерождение водорослей

Разрастание водорослей распространено в районах, где в течение года наблюдается большое количество солнечных дней. Это условие происходит преимущественно весной и летом. Длительное время задержания, неглубокие глубины пруда (1,2–1,8 м), обильные питательные вещества, теплая вода и солнечный свет способствуют росту водорослей. Результаты диагностического поиска неисправностей указывают на высокий уровень рН, высокий уровень БПК<sub>5</sub>, низкий уровень растворимости БПК<sub>5</sub>, высокое

OTB, высокое отношение ОТВ к БПК $_5$ , низкое РКТ (раннее утро) и умеренно высокие концентрации  $NH_3$ .

В течение ночи водоросли и аэробные бактерии будут использовать  $O_2$ , потенциально истощая РКТ в клетках до восхода солнца. Недостаток  $O_2$  приведет к неполному обращению, что может привести к нарушению разрешения. Пробный прогон профиля РКТ при восходе солнца обычно проверяет отсутствие  $O_2$  в ячейках. Микроскопическое исследование сточных вод и подсчет водорослей подтвердит состояние разрастания.

Возможные решения включают увеличение времени работы аэратора в ночное время. Оператор может решить сократить время работы аэратора в течение дня, чтобы водоросли могли сконцентрироваться на поверхности клеток. Высокая концентрация водорослей на поверхности уменьшит проникновение солнечного света и может замедлить рост водорослей. Вытягивание сточных вод с различных глубин под поверхностью также будет удерживать водоросли в клетках, обеспечивая при этом выпуск высококачественной воды. Добавление плавающих крышек будет блокировать солнечный свет и, с поддержанием адекватных уровней внутриклеточного РКТ, производить более качественный сток. Добавление физического затенения, такого как тепличная ткань, подвешенная над поверхностью клеток, или химические вещества или фотосиний, используемые в соответствии с инструкциями реестра АООС.

# 8.4.4. Накопление осадка в прудах

Шлам будет накапливаться в нижней части прудовых камер в течение многих лет эксплуатации. Растворимые органические вещества выделяются из этих донных осадков и оказывают наибольшее влияние на пруды весной этого года. Результаты

диагностических исследований по выявлению неисправностей будут указывать на высокий уровень  $X \in \Pi K_5$ , высокий растворимый  $E \cap K_5$ , от низкого уровеня до умеренного OTB, низкое отношение OTB к  $E \cap K_5$ , низкие концентрации PKT и высокие концентрации NH<sub>3</sub>. Это состояние можно

проверить с помощью микроскопического исследования. Увеличение времени работы аэратора может предложить временное решение. В конечном итоге необходимо будет удалить осадок со дна прудовых клеток. Оператор должен соблюдать все государственные и федеральные нормы и должен заботиться о защите лайнера пруда во время процесса.

### 8.4.5. Нитрификация или частичная нитрификация

Нитрификация в прудах будет происходить при надлежащих условиях окружающей среды (при более высоких температурах воды и адекватном РКТ) и наиболее распространена в конце весны и лета. Полная нитрификация будет указана с помощью низких уровней БПК<sub>5</sub>, низкого уровня ХБПК<sub>5</sub>, низких до средних значений ОТВ, умеренного РКТ, низкого уровня NH<sub>3</sub> и умеренных уровней NO<sub>3</sub>.

Частичная нитрификация распространена в прудах в конце весны и лета, когда адекватные уровни РКТ не поддерживаются для полного лечения. Диагностические тесты для выявления неисправностей будут демонстрировать высокий уровень БПК $_5$ , низкий уровень ХБПК $_5$ , низкий уровень растворимого БПК $_5$ , низкое и умеренное ОТВ, низкое отношение ОТВ к БПК $_5$ , низкий РКТ и умеренные концентрации NH $_3$ .

Увеличенная аэрация (время работы аэратора) или, в некоторых случаях, увеличенная мощность аэрации может увеличить нитрификацию.

#### 8.5. Заключение

Человек не может быть заражен переданным микроорганизмом из ряски, при ловле рыбы в качестве пищи для человека, любые патогены, связанные с продуктом, стерилизуются путем нагревания в процессе приготовления. Любая система культивирования с очисткой сточных вод или очищенной воды (в начальной точке) будет загрязнена многими патогенами, а концентрация живых организмов будет одинаковой при установившемся состоянии.

Руководители подвергаются воздействию загрязненных сточных вод во время уборки, технического обслуживания и эксплуатации. Таким образом, для сведения к минимуму прямого контакта со сточными водами следует учитывать разработанные технологии и лучший дизайн пруда для новой системы прудов ряски.

Мышьяковый анализ проб сточных вод в пяти различных местах показал низкие концентрации As, что ниже норм для орошения [101].

В дополнительных исследованиях в будущем следует исследовать накопление тяжелых металлов, пестицидов и других токсичных соединений в сточных водах и продуктах (биомассе и рыбе) в системе прудов ряски.

Постоянно контролируются многие параметры и концентрация химических веществ на станциях дистанционного зондирования со специфическими датчиками. Эта технология может сэкономить рабочую силу и затраты на управление системой.

# 9. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Научное исследование прикладного характера оценивается в итоге коммерческой ценностью разработки. Исследование очистки сбросной воды с помощью ряски и получение биомассы которая может быть с успехом использована на кормовые цели современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, так как позволяет утилизировать биохимические загрязнители с производством ценного продукта.

## 9.1. Предпроектный анализ

## 9.1.1. Потенциальные потребители

Рациональная организация переработки продуктов метаболизма сельскохозяйственных животных является актуальным вопросом в сфере экологии. Хранение отходов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных на площадках складирования приводит к вымыванию атмосферными осадками в почву и грунтовые воды большого количества органических веществ, а также к неконтролируемым выбросам метана в атмосферу в результате их разложения. Ежедневно, например корова, производит отходов до 68 кг/день [86]. При анаэробной переработке данных отходов в метантенках получается биогаз и сточные воды, обогащенные питательными веществами. Эффективное извлечение питательных веществ из полученных сточных вод, и, как следствие, их очистку, можно осуществить с помощью ряски. Целевой рынок результатов исследований В выполненной работе это организации, занимающиеся вопросами: очистки сточных вод, загрязнённых азотными соединениями в аммиачной форме и полифосфатами; производством растительных кормов.

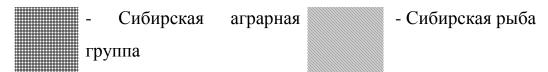
К отраслям, в которых может быть использована ряска, относятся сельское животноводство и рыбоводство.

На рисунке 41 представлена карта сегментирования рынка производства ряски.

		Биоочистка стоков	Производство сочных кормов	Производство комбикормов
ромышленн	Животноводство			
Промы	Рыбоводство			

Рисунок 41- Карта сегментирования рынка переработки ряски

Где



# 9.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Очистка сточных вод животноводческих предприятий осуществляется на очистных сооружениях совокупностью приемов, каждый из которых ориентирован на работу с той или иной группой веществ.

Все эти приемы условно можно разделить на несколько групп:

- механические и физические (очистка от относительно крупных загрязнений):
  - Отстаивание;
  - Фильтрование и процеживание;
- физико-химические (укрупнение мелкодисперсных загрязнений):
  - Коагуляция;
  - Флотация;
  - Ионообмен
- химические:
  - Нейтрализация;
  - Окисление;
  - Восстановление;
- биологические и биохимические:

- Биофильтры;
- Аэрофильтры;
- Аэротенки.

В результате применения соответствующих методов очистки и (или) их сочетаний, сбросные воды животноводческих предприятий, вода избавляется от токсичных веществ, но насыщается фосфором и аммонийным азотом.

Для удаления азота и фосфора применяют известкование. При этом рН увеличивается до 10 — 11 единиц, образуется аммиак, который отдувают воздухом в градирнях. Фосфор образует выпадающие в осадок соединения. Иногда для этого дополнительно вводят соли алюминия и железа.

Наряду с химическим, используют биологический метод, который осуществляется поэтапно: сначала нитрификация очищаемой воды при помощи особых бактерий в аэротенке, затем денитрификация в герметично закрытой емкость без доступа воздуха.

Анализ трех конкурирующих технологий по очистке сточных вод от биозагрязнений провели с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 6.

Таблица 6- Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы Конкурентоспособно		бность			
		$oldsymbol{F}_{\Phi}$	$\mathbf{F}_{\kappa 1}$	Б <sub>к2</sub>	$K_{\varphi}$	$K_{\kappa 1}$	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические крит	Технические критерии оценки ресурсоэффективности						
Удобство в эксплуатации	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
Надёжность	0,1	4	2	4	0,4	0,2	0,4

Простота технологии	0,15	3	2	4	0,45	0,3	0,6
Отсутствие расходных материалов	0,15	5	2	1	0,75	0,3	0,15
Энергоэкономичность	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Экономические	Экономические критерии оценки эффективности						
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
Срок жизни технологии	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
Цена	0,1	4	2	3	0,4	0,2	0,3
Наличие патента	0,15	5	5	1	0,75	0,75	0,15
итого	1				3,9	3,0	2,7

где  $\mathsf{F}_{\varphi}$  – проектируемая разработка;  $\mathsf{F}_{\mathsf{K}1}$  – [118] и  $\mathsf{F}_{\mathsf{K}2}$  – [119].

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле 37:

$$K = \sum_{i} B_{i} \, F_{i} \tag{37}$$

Где К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $\overline{b}_i$  – балл і-го показателя.

Для проектируемой разработки суммарный балл конкурентоспособности максимальный. Это обусловлено тем, что применяемый нами способ очистки сточных вод является инновационным.

# 9.1.3. Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) - это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей,

инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления [120].

На рисунке 42 представлена причинно-следственная диаграмма Исикавы применительно к процессу очистки воды с помощью ряски и низкий по сравнению с известными в литературе выход ряски.

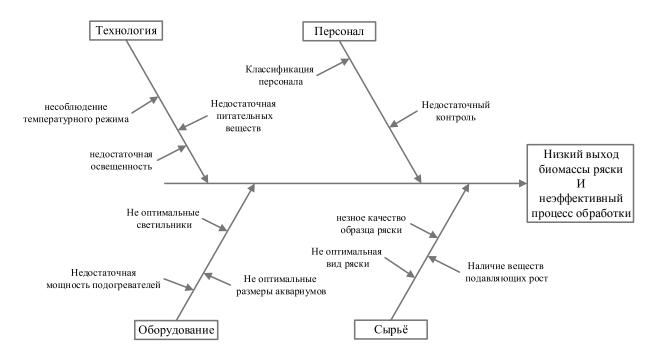


Рисунок 42- Причинно-следственная диаграмма низкого выхода ряски

## 9.1.4. Оценка готовности разработки к коммерциализации

Проведем оценку степень готовности разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 7).

Таблица 7- Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного	Уровень имеющихся знаний у
		проекта	разработчика

1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научнотехнического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	5
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4

11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на	3	2
	зарубежный рынок		
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	49	46

Полученные значения итоговых балов позволяют говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В результате подсчета баллов выяснили, что перспективность разработки выше среднего. Следовательно, можно сделать вывод, что разработчику недостает компетенций в области маркетинговых исследований, поэтому предлагается привлечение требуемых специалистов в данной области в команду проекта. Необходимо также проработать вопрос финансирования коммерциализации научной разработки и вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот [121; [122].

# 9.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для продвижения на рынок полученного продукта выберем методы коммерциализации научной разработки. Применительно к исследуемому процессу подходят такие методы коммерциализации, как инжиниринг.

Предполагается предоставление на основе договора *инжиниринга* одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта водоочистки с помощью ряски в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов водоочистки вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

### 9.2. Инициация проекта

Составим Устав проекта, который состоит из трех основных пунктов.

# 9.2.1. Цели и результат проекта.

Данный раздел содержит информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 8.

Таблица 8- Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Животноводческие предприятия	Решается экологическая проблема очистки водных стоков с ферм и получение высококачественного корма.

Рыборазводческие предприятия	Решается экологическая проблема очистки водных стоков с рыборазводного завода и получение высококачественного корма.
Общественность	Решается экологическая проблема стоков.

В таблице 9 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 9- Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработать методику очистки сточных вод с использованием ряски.  Разработать технологию выращивания биомассы ряски с использованием в получении кормов.
Ожидаемые результаты проекта:	<ol> <li>Очистка воды от аммиачного азота и фосфора до допустимых концентраций.</li> <li>Достижение максимального выхода биомассы ряски.</li> </ol>
Критерии приемки результата проекта:	<ol> <li>Решение экологической проблемы сточных вод загрязнённых аммиачным азотом и фосфором.</li> <li>Проведение очистки должно быть рентабельным и по стоимости быть не выше, чем традиционные способы очистки.</li> <li>Выход ряски должен быть соизмерим с урожаями других кормовых культур с такой же площади.</li> </ol>
Требования к результату проекта:	Требования:  Минимальное участие обслуживающего персонала в процессе выращивания ряски.  Максимальный выход ряски.  Достижение при очистке воды ряской ПДВ.

# 9.2.2. Организационная структура проекта.

Организационная структура проекта и роль каждого участника в данном проекте представлена в таблице 10.

Таблица 10- Рабочая группа проекта

<b>№</b> п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час
1.	Тихонов В.В., НИ ТПУ, доцент, к.т.н.	руководитель проекта	отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта, осуществляет продвижение проекта на рынок	100
2.	Криницына 3.В., НИ ТПУ, доцент, к.т.н.	эксперт проекта	проводит консультации в области финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения	2
3.	Раденков Т. А., НИ ТПУ, Ассистент	_	проводит консультации в области социальной ответственности, безопасности жизнедеятельности и экологической безопасности	2
4.	Игна О. Н., НИ ТПУ, Доцент	_	проводит консультации по иностранной части проекта	2
5.	А. А. Аль Кассаб, НИ ТПУ, ИФВТ, магистрант	исполнитель по проекту	проводит эксперименты по выращиванию ряски, подбирает аналитический контроля процесса очистки	1000

воды, выполняет химические	
анализы на различном	
оборудовании, обрабатывает	
полученные данные, выдает	
результат	

# 9.2.3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта — это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта [121]; [123]. В таблице 11 представлены ограничения проекта по выращиванию ряски.

Таблица 11- Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения				
Бюджет проекта					
Источник финансирования	Поставка сырья и реактивов выполняются собственными силами и из собственного бюджета, оборудования для проведения процесса предоставляет НИ ТПУ, ИФВТ, кафедра ОХХТ				
	Сроки проекта				
Дата утверждения плана управления проектом	01.09.2015 г.				
2.2. Дата завершения проекта	30.05.2017 г.				
Прочие ограничения и допущения					
Ограничения количества сырья	Выращивание ряски осуществляется в количествах не более 500 гр. единовременно				

Ограничения по выполнению химического анализа на	Отсутствие оборудования	собственного	аналитического
оборудовании			

#### 9.3. Планирование управления научно-техническим проектом

Составим план управления научным проектом, который включает в себя следующие элементы:

#### 9.3.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) — детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 43 представлена иерархическая структура работ по проекту очистки сточных вод от аммиачного азота и фосфора с помощью ряски.



Рисунок 43- Иерархическая структура работ по проекту переработке ряски

# 9.3.2. Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определим ключевые события проекта, определим их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты (таблица 12)

Таблица 12- Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Анализ и исследование процессов очистки стоков фермы в установке метантенк.	10.2015	Отчет по научно- исследовательской работе
2	Изучение литературы по выращиванию ряски в искусственных условиях	02.2016	Отчет по научно- исследовательской работе
3	Проектирование и изготовление установки по выращиванию ряски в искусственных условиях	05.2016	Отчет по научно- исследовательской практике
4	Изучение кинетики очистки воды от азота и фосфора ряской	10.2016	Отчет по научно- исследовательской работе
5	Изучение процесса переработки ряски на кормовые цели в КемТИПП	05.2017	Отчет по научно- исследовательской практике
6	Защита магистерской диссертации по теме «системный подход к комплексной переработке ряски»	14.06.2017	Магистерская диссертация

# 9.3.3. План проекта

В рамках планирования научного проекта построили календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представлен в таблице 13.

Таблица 13- Календарный план проекта

Код (ИСР)	Название	Длительн ость, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.	утверждение проекта	72	01.09.2015	11.11.2015	Тихонов В.В.
1.1.	утверждение научного руководителя	30	01.09.2015	30.09.2015	Тихонов В.В.
1.2	утверждение темы проекта	42	1.10.2015	11.11.2015	Тихонов В.В
2.	литературный обзор по утвержденной теме	34	12.11.2015	25.12.2015	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
2.1.	методы выращивания ряски	10	12.11.2015	22.11.2015	Аль Кассаб А. А.

2.2.	методы анализа аммиачного азота и фосфора	10	23.11.2015	2.12.2015	Аль Кассаб А. А.
2.3.	технологический расчёт установки по искусственному выращиванию ряски	24	3.12.2015	25.12.2015	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
3.	проектирование и изготовление установки по искусственному выращиванию ряски	141	8.01.2016	29.05.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
3.1.	отработка условий проведения процесса	43	8.01.2016	20.02.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
3.2.	выбор типа ряски	30	21.02.2016	28.03.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
3.3.	изучение влияния кинетики очистки воды ряской	68	29.03.2016	29.05.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
4.	изучение кинетики роста ряске	241	1.06.2016	28.03.2017	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.

4.1.	изучение сушки ряски	80	1.06.2016	18.10.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
4.2.	определение содержания белков в ряске	81	19.10.2016	31.12.2016	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
4.3.	определение содержания крахмала в ряске	80	8.01.2017	28.03.2017	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
5.	представление полученных данных	87	29.03.2017	23.06.2017	Аль Кассаб А. А. Тихонов В.В.
5.1.	выступление на конференциях по теме проекта	64	29.03.2017	31.05.2017	Аль Кассаб А. А.
5.2.	защита магистерской диссертации по теме проекта	23	14.06.2017	23.06.2017	Аль Кассаб А. А.

#### 9.3.4. Диаграмма Ганта

это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [123]. На основе таблицы 13 построим календарный план-график (Рисунок 44). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

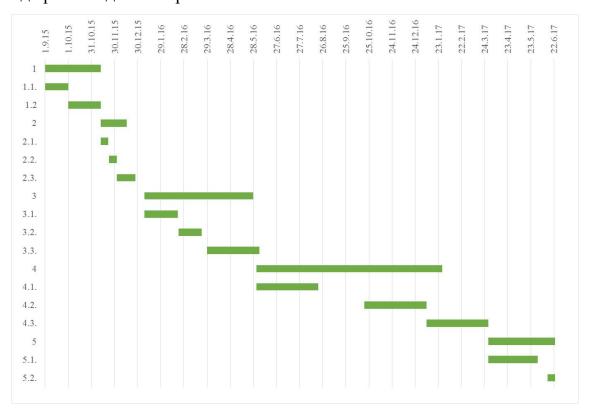


Рисунок 44- График проекта (Диаграмма Ганта)

# 9.3.5. Сетевой график

графическое отображение комплекса работ по теме с установленными между ними взаимосвязями. Составление сетевого план-графика основывается на методе критического пути [121]; [122].

Параметры сетевого графика рассчитали графическим способом (рисунок 45). Данные, полученные при расчете параметров сети, свели в таблицу 14.

Таблица 14- Параметры сетевого графика

Название работы	№.раб	Ткал	t <sub>рн</sub>	tpo	tпн	tπo	R <sub>II</sub>	Rc
Утверждение проекта	1	72	0	72	72	0	72	
Литературный обзор по утвержденной теме	2	34	72	106	106	72	34	72
Изучение кинетики поглощения ряской азота и фосфора	3	141	106	247	247	106	141	34
Изучение кинетики роста ряски	4	241	247	488	488	247	241	141
Представление полученных данных	5	87	488	575	575	488	87	241
Итого:	5	575						

Резерв времени полного пути  $R(L_n) = 575$ 

Критический путь  $T_{\kappa p} = 575$ 

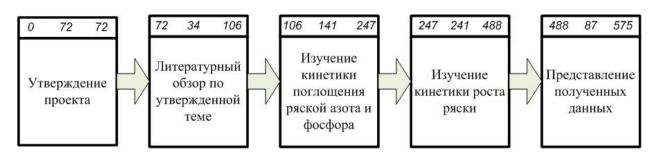


Рисунок 45- Сетевой план-график выполнения НИР

# 9.3.6. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых-расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 15.

Таблица 15- Группировка затрат по статьям

Статья затрат	Сумма (Руб.)
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	5700
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	24015
Основная заработная плата	252740
Дополнительная заработная плата	133952.2
Отчисления на социальные нужды	116007.7
Научные и производственные командировки	105000
Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	37000
Накладные расходы	309353.9
Итого плановая себестоимость	983768.9

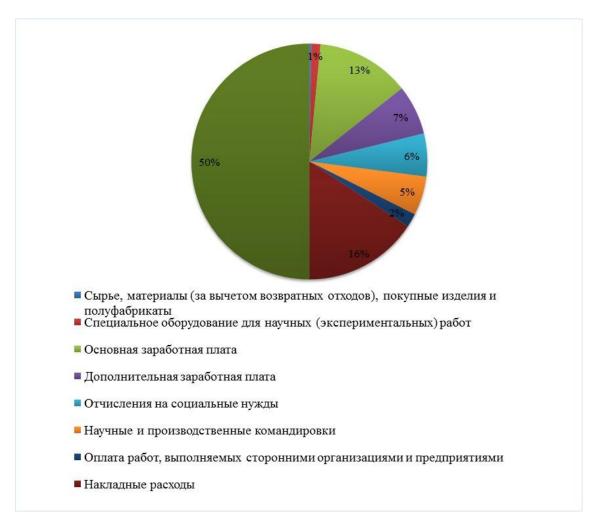


Рисунок 46- Распределение бюджета НТИ по статьям, %

# Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат представлен в таблице 16

Таблица 16- Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, форма	Кол-во	Цена за	Сумма
			единицу	(руб.)
			(руб.)	

Полимерные банки	Полипропилен	110 шт	35	3850
объёмом 500 мл.				
Бутылки ПЭТ 500	ПЭТ	100 шт.	15	1500
МЛ				
Всего за матер	5350			
Транспортно-з	350			
Затраты на офс	0			
Итого по стать	5700			

# Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме (таблица 17).

Таблица 17- Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц	Цена единицы оборудования, (руб.)	Общая стоимость оборудования, (руб.)
1	Аквариум стеклянный 0,1 м <sup>3</sup>	2	2500	5000
2	Контейнер полимерный $0.05 \text{ m}^3$	6	500	3000
3	Компрессор аквариумный	1	1500	1500
4	Светильники ЛПО-01- 2x36-002	4	439	1756

5	Лампы Fluora L 30W/77 G13	6	727	4362
6	Кабель саморегулируемый греющий SRL 30-2	10 м. п.	210	2100
7	Пенопласт 2000x1000x50	1	170	170
8	Реле времени УТ24-Н.Р	1	3245	3245
9	Реле регулятор ТРМ	2	1181	2362
	Всего за оборудование	23495		
	Затраты по доставке и мог	520		
	Итого:	4015		

#### Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и работников, рабочих инженерно-технических производств, опытных непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов ПО заработной плате определяется исходя трудоемкости ИЗ выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда) [121]; [122].

Основная заработная плата ( $3_{\text{осн}}$ ) лаборанта, инженера рассчитывается по следующей формуле 38:

$$3_{\text{och}} = 3_{\text{III}} T_{\text{p}} \tag{38}$$

Где 3<sub>осн</sub> - основная заработная плата одного работника;

 $T_{p}$  - продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 18);

3<sub>дн</sub> – Среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 39:

$$3_{\rm дH} = \frac{3_{\rm M} \,\mathrm{M}}{\mathrm{F}_{\scriptscriptstyle \Pi}} \tag{39}$$

Где  $3_{M}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

M — количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня M =11,2 месяца, 5-дневная неделя;

 $F_{\pi}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 18- Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней 730	730	730
Количество нерабочих дней	132	132
- выходные дни 104		
- праздничные дни 28		
Потери рабочего времени	60	60
- отпуск 48		
- невыходы по болезни 12		
Действительный годовой фонд рабочего времени	538	538

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 19.

Таблица 19- Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</sub> (руб.)	kпр	kд	<b>k</b> <sub>p</sub>	3 <sub>м</sub> (руб.)	З <sub>дн</sub> (руб.)	Т <sub>р</sub> , (раб. дн.)	З <sub>осн</sub> за 2015-2017 гг (руб.)
Руководитель	5302	0.1	0.2	1.3	8483	353.2	538	190020
Магистрант	1750	0.1	0.2	1.3	2800	116.6	538	62720
Итого Зосн							252740	

# Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 — 15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы по формуле 40:

$$3_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} 3_{\text{осн}} \tag{40}$$

Где  $3_{доп}$  — дополнительная заработная плата одного работника, руб.;

 $k_{\mbox{\scriptsize доп}}$  - коэффициент дополнительной зарплаты;

 $3_{\text{осн}}$  - основная заработная плата работника, руб.

В таблице 20 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы. ( $C_{3\pi}$ )

Таблица 20- Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата Ит	ого:
---------------------	------

Основная зарплата	252740.1
Дополнительная зарплата (53 %)	133952.2
Итого по статье $C_{3\Pi}$	386692.3

#### Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды. Рачет производят по формуле 41:

$$C_{\text{двнеб}} = k_{\text{внеб}} \left( 3_{\text{осн}} + 3_{\text{доп}} \right) \tag{41}$$

Где  $k_{внеб}$  — коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 21- Отчисления на социальные нужды

Заработная плата	Итого:
Итого по статье $C_{3\Pi}$	386692.3
Отчисления на соц. нужды (30 %)	116007.7

# Научные и производственные командировки

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10 % от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы или по факту.

Таблица 22- Научные и производственные командировки (руб.)

	Итого:
Итого по статье С <sub>зп</sub>	386692.3
Расходы на командировки	105000

#### Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

На эту статью относится стоимость контрагентных работ, т.е. работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном НТИ. Кроме того, на эту статью расходов относят оплату консультаций, использование Internet и т.д. Величина этих расходов определяется по договорным условиям.

Таблица 23- Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями (руб.)

	Итого:
Итого по статье $C_{3\Pi}$	386692.3
Стоимость контрагентных работ	37000

#### Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле 42:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \left( 3_{\text{осн}} + 3_{\text{доп}} \right) \tag{42}$$

Где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости проекта по применению ряски для очистки воды по форме, приведенной в таблице 24.

Таблица 24- Накладные расходы (руб.)

	Итого:
Итого по статье С <sub>зп</sub>	386692.3
Накладные расходы (80 %)	309353.9

#### 9.3.7. Организационная структура проекта

Для разрабатываемого проекта характерна проектная организационная структура проекта (рисунок 46).



Рисунок 47- Структура проекта

#### 9.3.8. Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (таблица 25).

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом

- Ответственный (O)— лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.
- Исполнитель (И) лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта.
- Согласующее лицо (C) лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

Таблица 25- Матрица ответственности

Этапы проекта	Тихонов В.В., руководитель	Криницына З.В., консультант части «Финансовый менеджмент, ресурсоэфективность и ресурсосбережение»	Раденков Т. А., консультант части «Социальная ответственност»	Игна О. Н., консультант по иностранной части проекта	Аль Кассаб А. А., инженер
Утверждение проекта	О				
Литературный обзор по утвержденной теме	И, О			О	И, О
Изучение кинетики поглощения ряской азота и фосфора	И, О				И, О
Изучение роста ряски	И, О				И, О

Представление полученных данных	O, C	O, C	O, C	O, C	И, О	
---------------------------------	------	------	------	------	------	--

# 9.3.9. План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 26).

Таблица 26- План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта		
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Руководителю	Ежедневно
3.	Документы и информация по проекту	Руководитель проекта		
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

# 9.3.10. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать

последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты [121]; [122]. Информация по данному разделу представлена в таблице 27.

Таблица 27- Реестр рисков

Риск	Вероятнос ть наступлен ия риска (1-5)	Влиян ие риска (1-5)	Урове нь риска	Способы смягчения риска	Условия наступлени я
1. Низкая степень очистки раствора ряской	3	5	высок ий	проработка технологии	несоблюдени е технологиче ских параметров
2.Незаинтересова нность разрабатываемой технологией потенциальными заказчиками	2	5	средни й	Изучение рынка сбыта, выявление свободной ниши на рынке	Разработка конкурентам и схожих более эффективны х технологий
3. Нехватка материальных и технических ресурсов для выполнения проекта	1	5	высок ий	Работа с оборудован ием строго по плану	Поломка оборудовани я, превышен лимит

# 9.3.11. План управления контрактами и поставками

План закупок проекта представлен в таблице 28.

Таблица 28- План закупок проекта

Наименование Количество Поставщик
-----------------------------------

Аквариум стеклянный 0,1 м <sup>3</sup>	2	Магазин аквариумов «ЗооАкваЛенд»
Контейнер полимерный $0,05$ $m^3$	6	Торговый центр «Строй парк»
Компрессор аквариумный	1	Торговый центр «Строй парк»
Светильники ЛПО-01-2x36- 002	2	ООО «Сибавтоматика+»
Лампы Fluora L 30W/77 G13	6	ООО «Сибавтоматика+»
Кабель саморегулируемый греющий SRL 30-2	10 м.п.	ООО «Сибавтоматика+»
Пенопласт 2000х1000х50	1	Торговый центр «Строй парк»
Реле времени УТ24-Н.Р	1	ООО «Сибавтоматика+»
Реле регулятор ТРМ	2	ООО «Сибавтоматика+»

# 9.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения [121]; [122].

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Оценка сравнительной эффективности исследования. Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [121]; [122].

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения [121]; [122].

**Интегральный финансовый показатель** разработки определяется по формуле 43:

$$I_{\phi \mu \mu p}^{\text{ucn.i}} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}} \tag{43}$$

Где  $I_{\text{финр}}^{\text{ucn.i}}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

 $\Phi_{pi}$  - стоимость і-го варианта исполнения;

 $\Phi_{\text{max}}$  — максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разах (значение больше единицы), либо соответствующее численное

удешевление стоимости разработки в разах (значение меньше единицы, но больше нуля).

**Интегральный показатель ресурсоэффективности** вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле 44:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^{j} a_i b_i$$
 (44)

Где  $I_{pi}$  — интегральный показатель ресурсоэффективности для і-го варианта исполнения разработки;

а; - весовой коэффициент і-го варианта исполнения разработки;

 $b_i$  — бальная оценка i-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

ј – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице

Таблица 29- Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект Исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог
1. Степень очистки воды удовлетворяет потребителя	0,10	5	5	5
2. Получаемая в результате очистки воды субстанция пригодна в качестве корма	0,35	5	5	1
3. Энергосбережение	0,15	4	3	3

4. Простота проведения процесса	0,25	5	3	3
5. Материалоемкость	0,15	4	2	4
ИТОГО	1			
$I_{pi}$		4,7	3,75	2,65

$$I_{TT} = 5 \times 0.1 + 5 \times 0.35 + 4 \times 0.15 + 5 \times 0.25 + 4 \times 0.15 = 4.7$$

$$I_{AHAJIOT} = 5 \times 0,1 + 5 \times 0,35 + 3 \times 0,15 + 3 \times 0,25 + 2 \times 0,15 = 3,75$$

$$I_{A\text{HAJO}} = 5 \times 0.1 + 1 \times 0.35 + 3 \times 0.15 + 3 \times 0.25 + 4 \times 0.15 = 2.65$$

Интегральный показатель эффективности разработки (  $I^p_{\text{финр.}}$ ) и аналога ( $I^a_{\text{финр.}}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле 45:

$$I_{\phi \text{инр}}^{p} = \frac{I_{\text{T}}^{p}}{I_{\phi}^{p}}$$
,  $I_{\phi \text{инр}}^{a} = \frac{I_{\text{T}}^{a}}{I_{\phi}^{a}}$  и т.д. (45)

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\Theta_{cp}$ ) рассчитывается по формуле 46:

$$\beta_{\rm cp} = \frac{I_{\rm \phi uhp}^p}{I_{\rm \phi uhp}^a} \tag{46}$$

Где  $Э_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;

 $I^p_{\mathrm{финр}}$  - интегральный показатель разработки;

 $I^a_{\varphi u h p}$  - интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 30- Сравнительная эффективность разработки

<b>№</b> п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель	1,00	0,8	0,56
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,7	3,75	2,65
3	Интегральный показатель эффективности	4,7	4,69	4,73
4	Сравнительная эффективность проекта относительно собственной разработки	1,00	0,99	1,01
	Итого:	11,4	10,23	8,95

# 9.5. Вывод

Представленные расчеты показывают, что с позиции финансовой и ресурсной эффективности, более эффективным вариантом решения технической задачи, поставленной в магистерской диссертации, является собственная разработка, так как в совокупности интегральные показатели данного исполнения выше, чем у аналогов.

#### 10. Список использованных источников

- 1. Williams P. E. V. Animal production and European pollution problems //Animal feed science and technology. 1995. T. 53. №. 2. C. 135-144.
- Bergmann B. A. et al. In vitro selection of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation //Bioresource Technology. 2000b. T. 73. №. 1. C. 13-20.
- 3. Landesman L. et al. Modeling duckweed growth in wastewater treatment systems //Livestock Research for Rural Development. 2005. T. 17. №. 6. C. 1-8.
- 4. Cheng J. et al. Nutrient removal from swine lagoon liquid by Lemna minor 8627 //Trans. ASAE. 2002b. T. 45. №. 4. C. 1003-1010.
- 5. Cheng J. J., Stomp A. M. Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed //Clean–Soil, Air, Water. 2009. T. 37. №. 1. C. 17-26.
- 6. Edwards P. et al. Cultivation of duckweeds in septage-loaded earthen ponds //Bioresource technology. − 1992. − T. 40. − № 2. − C. 109-117.
- 7. Oron G., de-Vegt A., Porath D. Nitrogen removal and conversion by duckweed grown on waste-water //Water Research. − 1988. − T. 22. − № 2. − C. 179-184.
- 8. Oron G. Economic considerations in wastewater treatment with duckweed for effluent and nitrogen renovation //Research Journal of the Water Pollution Control Federation. 1990. C. 692-696.
- 9. Cheng J. Biological process for ethanol production //Biomass to renewable energy processes. 2010. C. 209-270.
- 10.Linke B. Country report: Germany //International Energy Association Bioenergy Task. 2011. T. 37. C.13-15.

- 11.Hillman W. S., Culley D. D. The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming //American Scientist. − 1978. − T. 66. − №. 4. − C. 442-451.
- 12.Landolt E., Kandeler R. Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae) (vol. 4) //The family of Lemnaceae-a monographic study. 1987. T. 2. C. 211-34.
- 13. Yamamoto Y. T. et al. Genetic transformation of duckweed Lemna gibba and Lemna minor //In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. 2001. T. 37. № 3. C. 349-353.
- 14.Oron G., Wildschut L. R., Porath D. Waste water recycling by duckweed for protein production and effluent renovation //Water science and technology. 1985. T. 17. №. 4-5. C. 803-817.
- 15. Culley Jr D. D., Epps E. A. Use of duckweed for waste treatment and animal feed //Journal (Water Pollution Control Federation). 1973. C. 337-347.
- 16.Pedersen F., Petersen G. I. Variability of species sensitivity to complex mixtures //Water Science and Technology. − 1996. − T. 33. − №. 6. − C. 109-119.
- 17. Wang W. Literature review on duckweed toxicity testing //Environmental Research. − 1990. − T. 52. − №. 1. − C. 7-22.
- 18.Caicedo J. R. et al. Effect of anaerobic pretreatment on environmental and physicochemical characteristics of duckweed based stabilization ponds //Water science and technology. -2002. -T. 45. -N0. 1. -C. 83-89.
- 19.Classen J. J. Lemna gibba growth and nutrient uptake in response to different nutrient levels.--p. 40-45. En: Animal, agricultural and food processing wastes: proceedings of the eighth international symposium.--Michigan, US: American Society of Agricultural Engineers, 2000.

- 20.Cheng J. et al. Nutrient recovery from swine lagoon water by Spirodela punctata //Bioresource technology. − 2002a. − T. 81. − №. 1. − C. 81-85.
- 21. Alaerts G. J., Mahbubar R., Kelderman P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon //Water Research. − 1996. − T. 30. − №. 4. − C. 843-852.
- 22. Culley D. D. et al. Production, chemical quality and use of duckweeds (Lemnaceae) in aquaculture, waste management, and animal feeds //Journal of the World Aquaculture Society. − 1981. − T. 12. − № 2. − C. 27-49.
- 23.Oron G. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production //Agricultural water management. − 1994. − T. 26. − №. 1-2. − C. 27-40.
- 24. Van der Steen P., Brenner A., Oron G. An integrated duckweed and algae pond system for nitrogen removal and renovation //Water science and Technology. 1998. T. 38. №. 1. C. 335-343.
- 25.Landolt E. Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae) //Biosistematische Untersuchungen in der Familie der Wasserlinsen (Lemnaceae). 1980. T. 1. C. 1-7.
- 26.Bergmann B. A. et al. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed //Transactions of the ASAE. 2000a. T. 43. №. 2. C. 263-269.
- 27.Xu J., Shen G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production //Bioresource Technology. 2011a. T. 102. №. 2. C. 848-853.
- 28.Mohedano R. A. et al. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds //Bioresource Technology. 2012. T. 112. C. 98-104.

- 29.Monselise E. B. I. et al. 15N Nuclear Magnetic Resonance Study of Ammonium Ion Assimilation by Lemna gibba L //New phytologist. − 1987. − T. 107. − №. 2. − C. 341-345.
- 30.Monselise E. B. I., Kost D. Different ammonium-ion uptake, metabolism and detoxification efficiencies in two Lemnaceae //Planta. − 1993. − T. 189. − №. 2. − C. 167-173.
- 31. Scherr C. et al. Test system stability and natural variability of a Lemna gibba L. bioassay //PLoS One. − 2008. − T. 3. − № 9. − C. e3133.
- 32. Chaiprapat S. et al. Modeling nitrogen transport in duckweed pond for secondary treatment of swine wastewater //Journal of Environmental Engineering. 2003. T. 129. № 8. C. 731-739.
- 33.Underwood G. J. C., Baker J. H. The effect of various aquatic bacteria on the growth and senescence of duckweed (Lemna minor) //Journal of Applied Microbiology. 1991. T. 70. № 3. C. 192-196.
- 34.Landesman L. et al. Effectiveness of duckweed to recycle nutrients from wastewater //Proc. WEF 72nd Annual Conference and Exposition. 1999.
- 35.Boniardi N. et al. Removal of water pollutants by Lemna gibba //The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. − 1994. − T. 54. − №. 2. − C. B41-B48.
- 36. Vatta G. et al. Dynamic modelling of waste-water treatment plants based on Lemna gibba //The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. 1995. T. 57. №. 3. C. B37-B48.
- 37. Caicedo J. R. et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (Spirodela polyrrhiza) //Water Research. 2000. T. 34. №. 15. C. 3829-3835.

- 38.Zuberer D. A. Nitrogen fixation (acetylene reduction) associated with duckweed (Lemnaceae) mats //Applied and environmental microbiology. − 1982. − T. 43. − №. 4. − C. 823-828.
- 39.Crites R. W., Middlebrooks E. J., Bastian R. K. Natural wastewater treatment systems. CRC Press, 2014.
- 40.Al-Nozaily F., Alaerts G., Veenstra S. Performance of duckweed-covered sewage lagoons—II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity //Water Research. 2000. T. 34. №. 10. C. 2734-2741.
- 41. Hymowitz T. et al. Relationship between the content of oil, protein, and sugar in soybean seed //Agronomy Journal. 1972. Vol. 64. N 5. P. 613-616.
- 42.Mosse J. Nitrogen to protein conversion factor for ten cereals and six legumes or oilseeds. A reappraisal of its definition and determination. Variation according to species and to seed protein content // J. Agric. Food Chem. 1990. Vol. 38. N 1. P. 18-24.
- 43.Robinette H. R., Brunson M. W., Day E. J. Use of duckweed in diets of channel catfish [*Ictalurus punctatus*, *Lemnaceae*] // Proceedings of the Annual Conference-Southeastern Association of Fish and Wildlife Agencies (USA). 1980.
- 44.Hassan M. S., Edwards P. Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla* and *Spirodela polyrrhiza*) as feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) // Aquaculture. 1992. Vol. 104. N 3-4. P. 315-326.
- 45. Skillicorn P., Spira W., Journey W. A New Aquatic Farming System for Developing Countries // The World Bank Group. 1993.
- 46.Haustein A. T. et al. Performance of broiler chickens fed diets containing duckweed (*Lemna gibba*) // The Journal of Agricultural Science. 1994. Vol. 122. N 2. P. 285-289.

- 47.Leng R. A., Stambolie J. H., Bell R. Duckweed-a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish // Livestock Research for Rural Development. 1995. Vol. 7. N 1. P. 36.
- 48. Appenroth K. J. et al. Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food // Food chemistry. 2017. Vol. 217. P. 266-273.
- 49. Tang J. et al. Survey of duckweed diversity in Lake Chao and total fatty acid, triacylglycerol, profiles of representative strains // Plant Biology. 2015. Vol. 17. N 5. P. 1066-1072.
- 50.Paul M., Ma J. K. C. Plant-made pharmaceuticals: Leading products and production platforms // Biotechnology and applied biochemistry. 2011. Vol. 58. N 1. P. 58-67.
- 51.Horn M. E., Woodard S. L., Howard J. A. Plant molecular farming: systems and products // Plant cell reports. 2004. Vol. 22. N 10. P. 711-720.
- 52.Stomp A. M. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing // Biotechnology Annual Review. 2005. Vol. 11. P. 69-99.
- 53.Popov S. V. et al. Characterisation of the oral adjuvant effect of lemnan, a pectic polysaccharide of *Lemna minor* // Vaccine. 2006. Vol. 24. N 26. P. 5413-5419.
- 54.Rival S. et al. *Spirodela* (duckweed) as an alternative production system for pharmaceuticals: a case study, aprotinin // Transgenic research. 2008. Vol. 17. N 4. P. 503-513.
- 55.Kim Y., Wyslouzil B. E., Weathers P. J. Secondary metabolism of hairy root cultures in bioreactors // In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. 2002. Vol. 38. N 1. P. 1-10.
- 56. Weathers P. J., Towler M. J., Xu J. Bench to batch: advances in plant cell culture for producing useful products //Applied Microbiology and Biotechnology. 2010. Vol. 85. N 5. P. 1339-1351.

- 57.Xu J., Ge X., Dolan M. C. Towards high-yield production of pharmaceutical proteins with plant cell suspension cultures // Biotechnology advances. 2011b. Vol. 29. N 3. P. 278-299.
- 58.Reddy K. R., DeBusk W. F. Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water: I. Water hyacinth, water lettuce, and pennywort //Economic Botany. 1984. T. 38. №. 2. C. 229-239.
- 59. Chaiprapat S. et al. Role of internal nutrient storage in duckweed growth for swine wastewater treatment //Transactions of the ASAE. 2005. T. 48. №. 6. C. 2247-2258.
- 60.Zimmo O. R. et al. Process performance assessment of algae-based and duckweed-based wastewater treatment systems //Water Science and Technology. − 2002. − T. 45. − № 1. − C. 91-101.
- 61.Willett D. Duckweed-based wastewater treatment systems: design aspects and integrated reuse options for Queensland conditions. 2005.
- 62.Clark P. B., Hillman P. F. Enhancement of anaerobic digestion using duckweed (Lemna minor) enriched with iron //Water and Environment Journal. 1996. T. 10. №. 2. C. 92-95.
- 63. Vines H. M., Wedding R. T. Some effects of ammonia on plant metabolism and a possible mechanism for ammonia toxicity //Plant Physiology. − 1960. − T. 35. − №. 6. − C. 820.
- 64.Farrell J. B. Duckweed uptake of phosphorus and five pharmaceuticals: microcosm and wastewater lagoon studies. 2012.
- 65.Driever S. M., van Nes E. H., Roijackers R. M. M. Growth limitation of Lemna minor due to high plant density //Aquatic Botany. − 2005. − T. 81. − №. 3. − C. 245-251.

- 66.Landesman L., Fedler C., Duan R. Plant nutrient phytoremediation using duckweed //Eutrophication: causes, consequences and control. Springer Netherlands, 2010. C. 341-354.
- 67.Kesaano M. Sustainable management of duckweed biomass grown for nutrient control in municipal wastewaters. 2011.
- 68. Öbek E., Hasar H. Role of duckweed (Lemna minor L.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents //Fresenius Environmental Bulletin. 2002. T. 11. №. 1. C. 27-29.
- 69.Frédéric M. et al. Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (Lemna minor) growth under controlled eutrophication //Water research. 2006. T. 40. №. 15. C. 2901-2910.
- 70.Landolt E. Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae) (vol. 2.) Veroff //Geobot. Inst., Rubel. 1986. T. 1. №. 71. C. 566p.
- 71.Zirschky J., Reed S. C. The use of duckweed for wastewater treatment //Journal (Water Pollution Control Federation). 1988. C. 1253-1258.
- 72.Roijackers R., Szabó S., Scheffer M. Experimental analysis of the competition between algae and duckweed //Archiv für Hydrobiologie. 2004. T. 160. №. 3. C. 401-412.
- 73.Szabó S. et al. The strength of limiting factors for duckweed during algal competition //Archiv Für Hydrobiologie. − 2005. − T. 164. − №. 1. − C. 127-140.
- 74.Rejmankova E., Blackwell M., Culley D. D. Dynamics of fungal infection in duckweeds (Lemnaceae) //Veroff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rubel, Zurich. 1986. T. 87. C. 178-189.
- 75.Bugbee B. Nutrient management in recirculating hydroponic culture //South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC 648. 2003. C. 99-112.

- 76.ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. М: Стандартинформ, 2009, 7 с.
- 77. Casal J. A., Vermaat J. E., Wiegman F. A test of two methods for plant protein determination using duckweed // Aquatic Botany. 2000. Vol. 67. N 1. P. 61-67.
- 78. Dewanji A., Matai S. Nutritional evaluation of leaf protein extracted from three aquatic plants // Journal of Agricultural and food Chemistry. 1996. Vol. 44. N 8. P. 2162-2166.
- 79. Shen G. et al. Nitrogen removal pathways in shallow-water duckweed-based wastewater treatment systems // Journal of Ecology and Rural Environment. 2006. Vol. 22. N 1. P. 42-47.
- 80.Bonomo L., Pastorelli G., Zambon N. Advantages and limitations of duckweed-based wastewater treatment systems // Water Science and technology. 1997. Vol. 35. N 5. P. 239-246.
- 81.Xu J. et al. Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol // Biosystems engineering. 2011. Vol. 110. N 2. P. 67-72.
- 82.Hood E. E. From green plants to industrial enzymes // Enzyme and microbial technology. 2002. Vol. 30. N 3. P. 279-283.
- 83. Twyman R. M. et al. Molecular farming in plants: host systems and expression technology // TRENDS in Biotechnology. 2003. Vol. 21. N 12. P. 570-578.
- 84.Chen M. et al. Modification of plant N-glycans processing: The future of producing therapeutic protein by transgenic plants // Medicinal research reviews. 2005. Vol. 25. N 3. P. 343-360.
- 85.Bhanthumnavin K., MCGARRY M. G. *Wolffia arrhiza* as a possible source of inexpensive protein // Nature. 1971. Vol. 232. N 5311. P. 495-495.

- 86.Standard A. D384. 2, Manure production and characteristics; March 2005; ASABE St //Joseph, Michigan.
- 87. Selvarajah N. Farm dairy effluent management regulations in the Waikato region //New Zealand Soil News. 1999. T. 47. C. 5-11.
- 88.Drapcho C. M., Nhuan N. P., Walker T. H. Biofuels engineering process technology. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008. C. 334-335.
- 89. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, ECOFYS (Firm). Planning and Installing Bioenergy Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers.

   Earthscan, 2005. T. 1.
- 90.Pettygrove G. S., Heinrich A. L., Eagle A. J. Dairy manure nutrient content and forms. University of California Cooperative Extension. Manure technical bulletin series. 2010.
- 91. Moss M. E. Economics and feed value of integrating duckweed production with a swine operation: дис. Texas Tech University, 1999.
- 92.Iqbal S. Duckweed aquaculture //Potentials, possibilities and limitations for combined wastewater treatment and animal feed production in developing countries. SAn-DEC Report. 1999. № 6/99.
- 93.Shaffer K. A., Walls F. Livestock manure production rates and nutrient content //North Carolina Agric Chem Man. 2005.
- 94.Metcalf E., Eddy H. P. Wastewater Engineering: Treatment //Disposal, and Reuse. 1991. T. 3.
- 95. Hammer D. A. (ed.). Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural. CRC Press, 1989.
- 96. Wikipedia the free encyclopedia [В Интернете] // Logarithmic spiral. 2017 г. 19 05 2017 г. <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Logarithmic\_spiral">https://en.wikipedia.org/wiki/Logarithmic\_spiral</a>.

- 97. Wikipedia the free encyclopedia [В Интернете] // Golden spiral. 2017 г. -19 5 2017 г. https://en.wikipedia.org/wiki/Golden\_spiral.
- 98. Perry R. H., Green D. W. Perry's chemical engineers' handbook. McGraw-Hill Professional, 1999.
- 99. Kioussis D. R., Kofinas P. Characterization of anion diffusion in polymer hydrogels used for wastewater remediation //Polymer. 2005. T. 46. №. 22. C. 9342-9347.
- 100. Chaiprapat S. et al. Modeling nutrient uptake process and growth kinetics of duckweed Spirodela punctata 7776 for nutrient recovery from swine wastewater. 2002.
- 101. Gijzen H. J., Ikramullah M. Pre-feasibility of duckweed based Wastewater treatment and Resource Recovery //Bangladesh, delft International Institute Infrastrctural, Hydraulic an environmental engineering and Bangladesh Project in agriculture, Rural Industry, science and Medicine (PRIsM), Bangladesh. 1999.
- 102. The University of Idaho [В Интернете] // Aquatic Weed Removal. 2017 г. 05 05 2017 г. <a href="http://mindworks.shoutwiki.com/wiki/Aquatic\_Weed\_Removal">http://mindworks.shoutwiki.com/wiki/Aquatic\_Weed\_Removal</a>.
- 103. Aquamarine [B Интернете] // The technological way of thinking. 2017 Γ. 05 05 2017 Γ. <a href="http://www.aquamarine.ca/aquatic-weed-harvesters/model-h7-aquatic-harvesters/">http://www.aquamarine.ca/aquatic-weed-harvesters/</a> model-h7-aquatic-harvesters/.
- 104. Aquarius systems [B Интернете] // A division of D&D products Inc. 2010 г. 05 05 2017 . <a href="http://www.aquarius-systems.com/Entries/View/440/mission\_one">http://www.aquarius-systems.com/Entries/View/440/mission\_one</a>, to fight scum.aspx.
- 105. YouTube B Интернете] // Duckweed in no much for river screen. 2013 г. 05 05 2017 г. <a href="https://www.youtube.com/watch?v=JZYu8jID-jA">https://www.youtube.com/watch?v=JZYu8jID-jA</a>.

- 106. НщгЕгиу [В Интернетеъ] // Agriquatics Mirzapur System. 2008 г. 06 05 2017 г. https://www.youtube.com/watch?v=M93HZDoqhsE.
- 107. Edwards P. Alternative excreta-reuse strategy for aquaculture; the production of high-protein animal feed //International Seminar on Wastewater Reclamation and Reuse for Aquaculture. 1988.
- 108. Edwards P., Pullin R. S. V. Wastewater-fed aquaculture //Environmental Sanitation Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 1990.
- 109. Ruddle K., Zhong G. Integrated agriculture-aquaculture in South China: the dike-pond system of the Zhujiang Delta. CUP Archive, 1988.
- 110. Pescod M. B. Wastewater treatment and use in agriculture. 1992.
- 111. Mara D. D. et al. A rational approach to the design of wastewater-fed fishponds //Water research. 1993. T. 27. №. 12. C. 1797-1799.
- 112. UNEP [В Интернетеъ] // Division of Technology, Industry and Economics. 06 05 2017 г. <a href="http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-15/2-9/9-3-3.asp">http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-15/2-9/9-3-3.asp</a>.
- 113. Edwards P. Wastewater-fed aquaculture systems: status and prospects //Naga, the ICLARM Quarterly. -1996. T. 19. No. 1. C. 33-35.
- 114. Krishnan S. B., Smith J. E. Public health issues of aquatic systems used for wastewater treatment. 1987.
- 115. Gijzen H. J. et al. Anaerobic Wastewater Treatment an Important Step in Rational Re-Use Strategies of Nutrients and Energy //Anaerobic Wastewater Treatment an Important Step in Rational Re-Use Strategies of Nutrients and Energy. International Institute for Hydraulic, Infrastructural and Environmental Engineering, 1996.

- 116. Врочинский К. К., Гриб И. В., Гриб А. В. Содержание хлорорганических инсектицидов в водных растениях//Гидробиологический журнал, том 6, с 107-109, 1970.
- 117. USEPA. Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers. Washington, DC Report. 2011. №. 11/088.
- 118. Использование Spirulina sp. для очистки анаэробно сброженных сточных вод / Джаянт Док, Кальян Раман В., В.С. Голе // Альгология. 2005. Т. 15, № 2. С. 254-259
- 119. Заявка: 2003107842/15, 22.08.2001.
- 120. Википедия свободная энциклопедия [В Интернетеъ] // Диаграмма Исикавы. 2016 г. 23 05 2016 г. <a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\_%D0%98%D1%81%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B2%D1%8B.">https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B0\_%D0%98%D1%81%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B2%D1%8B.</a>
- 121. Попова С.Н. Управление проектами. Часть І: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 121 с.
- 122. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утвержденоМинистерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электрон-ный ресурс]. Режим доступа. <a href="http://www.cfin.ru/">http://www.cfin.ru/</a>
- 123. Википедия свободная энциклопедия [В Интернетеъ] // Диаграмма Гантта. 2017 г. 23 05 2017 г. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\_%D0%93%D0%B0%D0%BD%D1%82%D1%82%D0%B0.

# 11. Приложения

# 11.1. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных

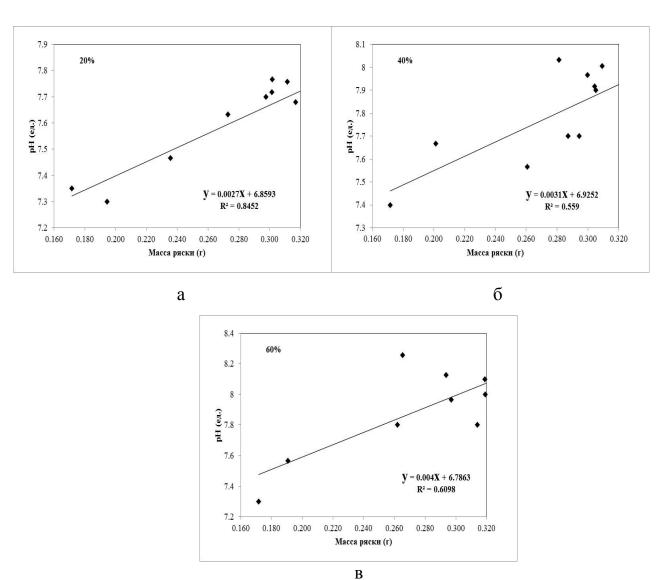
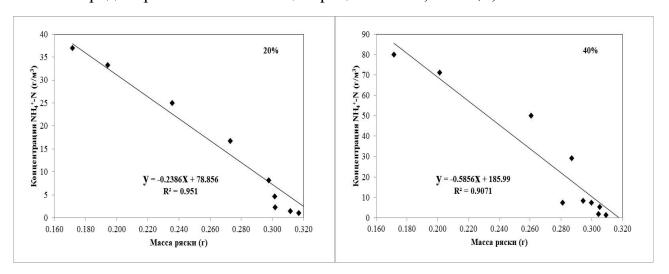


Рисунок 48- Зависимость между биомассой ряски и рН реакционной среды при начальной концентрации:  $a-37;\ 6-80,1;\ в-121\ г/м^3$ 



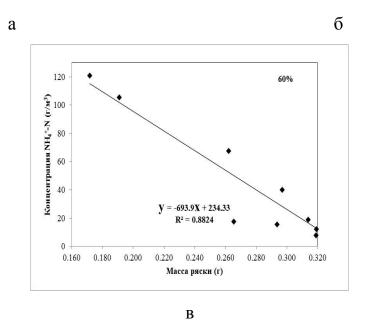
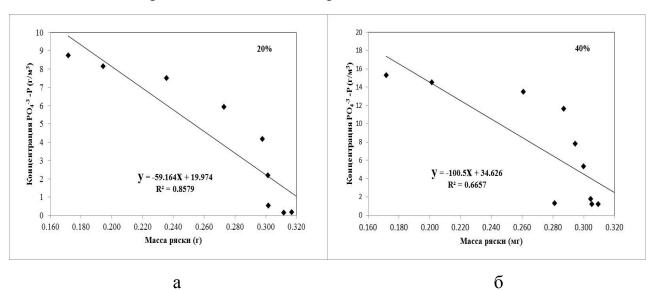


Рисунок 49- Зависимость между биомассой ряски и концентрацией ионов аммония при начальной концентрации:  $a-37; \, 6-80,1; \, B-121 \, \Gamma/M^3$ 



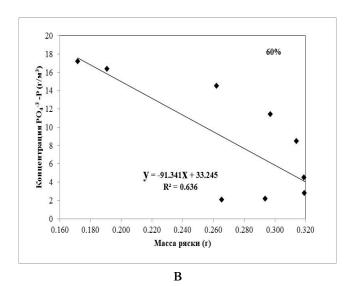


Рисунок 50- Зависимость между биомассой ряски и концентрацией ионов полифосфатов при начальной концентрации: a-37; б - 80,1; в -  $121\ {\mbox{г/м}}^3$ 

# 11.2. Регрессионный анализ экспериментальных данных

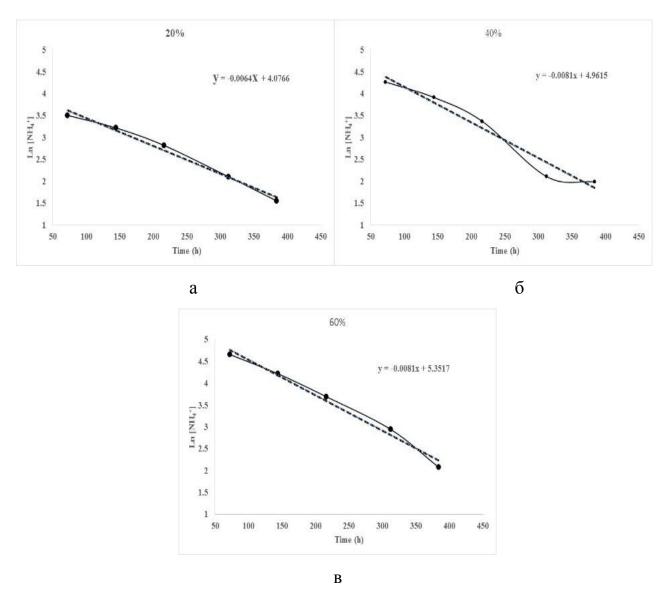


Рисунок 51- График кинетики первого порядка для экспериментальных данных аммония При начальной концентрации: а - 33,3; б - 71,3; в - 105,37 г/м $^3$ 

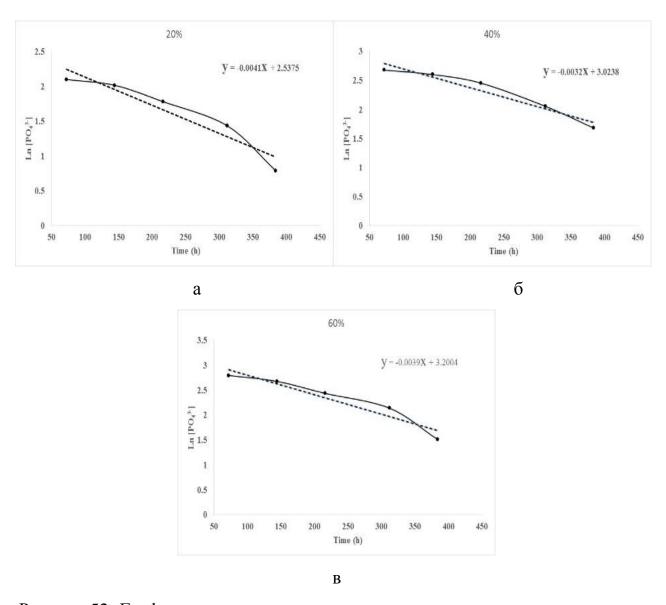


Рисунок 52- График кинетики первого порядка для экспериментальных данных о фосфатах При начальной концентрации: а - 8,15; б - 14,56; в - 16,39 г/м $^3$ 

# 11.3. Спиральные данные графического участка

Таблица 31- Спиральные данные графического участка

θ	r(0)	X	у
0	1	1	0
0.15708	1.049298	1.036379	0.164146
0.314159	1.101026	1.047138	0.340236
0.471239	1.155304	1.029383	0.524497
0.628319	1.212258	0.980737	0.712547
0.785398	1.27202	0.899454	0.899454
0.942478	1.334727	0.784533	1.079817
1.099557	1.400527	0.635826	1.247878
1.256637	1.46957	0.454122	1.397644
1.413717	1.542016	0.241224	1.523031
1.570796	1.618034	9.91E-17	1.618034
1.727876	1.6978	-0.26559	1.676897
1.884956	1.781497	-0.55051	1.694305
2.042035	1.869321	-0.84865	1.665578
2.199115	1.961475	-1.15293	1.586866
2.356194	2.058171	-1.45535	1.455347
2.513274	2.159635	-1.74718	1.269401
2.670354	2.2661	-2.01911	1.028788
2.827433	2.377814	-2.26144	0.734785
2.984513	2.495035	-2.46432	0.390309
3.141593	2.618034	-2.61803	3.21E-16
3.298672	2.747098	-2.71328	-0.42974

3.455752	2.882524	-2.74144	-0.89075
3.612832	3.024626	-2.69496	-1.37315
3.769911	3.173733	-2.5676	-1.86547
3.926991	3.330191	-2.3548	-2.3548
4.08407	3.494362	-2.05393	-2.827
4.24115	3.666627	-1.66461	-3.26699
4.39823	3.847383	-1.18891	-3.65908
4.555309	4.037051	-0.63153	-3.98735
4.712389	4.236069	-7.8E-16	-4.23607
4.869469	4.444898	0.695335	-4.39017
5.026548	4.664021	1.441262	-4.43575
5.183628	4.893947	2.221806	-4.36054
5.340708	5.135208	3.0184	-4.15447
5.497787	5.388363	3.810148	-3.81015
5.654867	5.653997	4.57418	-3.32334
5.811946	5.932727	5.286098	-2.6934
5.969026	6.225197	5.920515	-1.92369
6.126106	6.532086	6.451665	-1.02184
6.283185	6.854104	6.854104	-1.7E-15
6.440265	7.191996	7.10345	1.125076
6.597345	7.546546	7.177191	2.332011
6.754424	7.918574	7.055501	3.594957
6.911504	8.308942	6.722075	4.883874
7.068583	8.718555	6.164949	6.164949
7.225663	9.14836	5.377271	7.401179

7.382743	9.599354	4.358016	8.553087
7.539822	10.07258	3.112599	9.579594
7.696902	10.56914	1.653377	10.43901
7.853982	11.09017	3.4E-15	11.09017
8.011061	11.63689	-1.82041	11.49362
8.168141	12.21057	-3.77327	11.61294
8.325221	12.81252	-5.81676	11.41604
8.4823	13.44415	-7.90227	10.87655
8.63938	14.10692	-9.9751	9.975098
8.796459	14.80236	-11.9754	8.700608
8.953539	15.53208	-13.8392	7.051418
9.110619	16.29778	-15.5001	5.036291
9.267698	17.10123	-16.8907	2.675221
9.424778	17.94428	-17.9443	-1.2E-13
9.581858	18.82889	-18.5971	-2.94549
9.738937	19.75712	-18.7901	-6.10528
9.896017	20.7311	-18.4715	-9.41172
10.0531	21.7531	-17.5986	-12.7861
10.21018	22.82548	-16.14	-16.14
10.36726	23.95072	-14.0779	-19.3765
10.52434	25.13144	-11.4094	-22.3923
10.68142	26.37036	-8.14889	-25.0797
10.83849	27.67037	-4.3286	-27.3297
10.99557	29.03445	4.52E-13	-29.0345
11.15265	30.46579	4.765899	-30.0907
L	1	1	i

11.30973	31.96769	9.878558	-30.4031
11.46681	33.54362	15.22849	-29.8876
11.62389	35.19725	20.68842	-28.4752
11.78097	36.9324	26.11515	-26.1151
11.93805	38.75308	31.3519	-22.7785
12.09513	40.66353	36.23147	-18.4609
12.25221	42.66815	40.57982	-13.1852
12.40929	44.77159	44.22038	-7.00382
12.56637	46.97874	46.97874	1.15E-12
12.72345	49.29468	48.68779	7.711388
12.88053	51.7248	49.19321	15.98384
13.03761	54.27472	48.35913	24.64021
13.19469	56.95035	46.0738	33.47458
13.35177	59.75788	42.2552	42.2552
13.50885	62.70381	36.85637	50.72845
13.66593	65.79497	29.87029	58.62375
13.82301	69.03852	21.33408	65.65953
13.98009	72.44197	11.33242	71.55008
14.13717	76.0132	-2.5E-12	76.0132
14.29425	79.76048	-12.4773	78.7785
14.45133	83.6925	-25.8624	79.59629
14.60841	87.81835	-39.8687	78.24673
14.76549	92.14761	-54.163	74.54898
14.92257	96.69028	-68.3704	68.37035
15.07964	101.4569	-82.0804	59.63487
	1	I	

15.23672	106.4585	-94.8552	48.33115
15.3938	111.7067	-106.239	34.51926
15.55088	117.2136	-115.77	18.33624
15.70796	122.9919	-122.992	-5.2E-12
15.86504	129.0552	-127.466	-20.1887

# 11.4. Профили абсорбции питательных веществ

#### 11.4.1. Профили ионов аммония для концентрации 20%

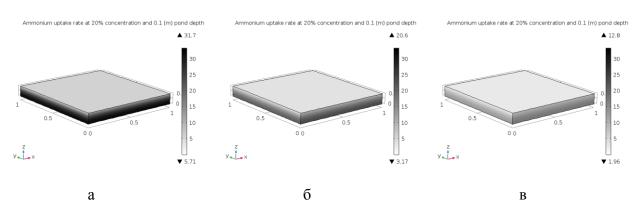


Рисунок 53- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м $^3$ , глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

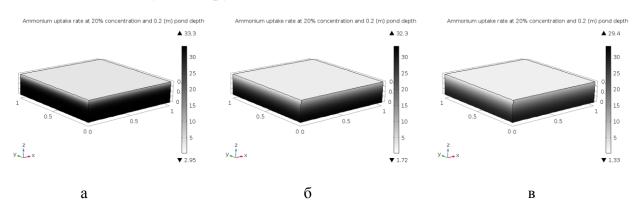


Рисунок 54- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м³, глубине пруда 0,2 м: a - 7 дней; 6 - 21 день; 8 - 35 дней

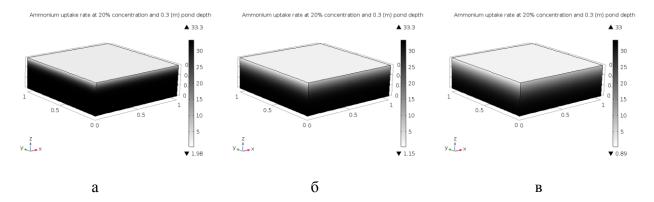


Рисунок 55- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 33,3 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

#### 11.4.2. Профили ионов аммония для концентрации 40%

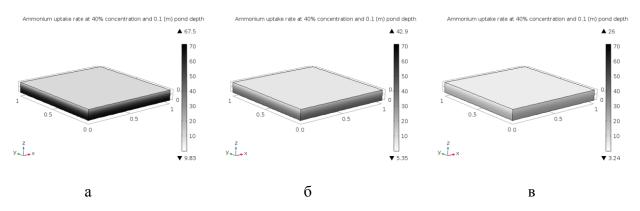


Рисунок 56- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

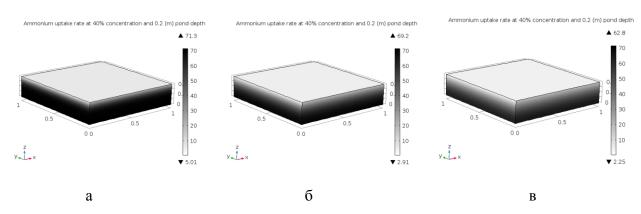


Рисунок 57- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м3, глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

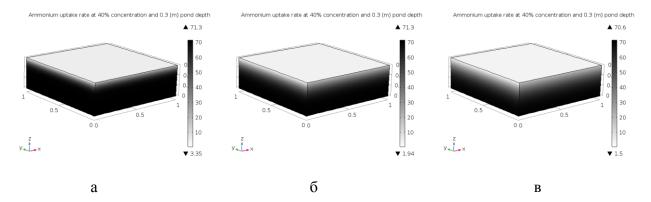


Рисунок 58- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации 71,3 г/м³, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

#### 11.4.3. Профили ионов аммония для концентрации 60%

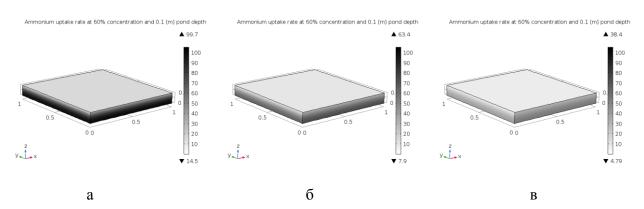


Рисунок 59- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации  $105,37 \text{ г/м}^3$ , глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

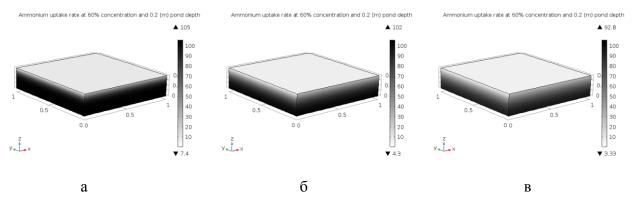


Рисунок 60- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации  $105,37\ {\rm г/m^3}$ , глубине пруда  $0,2\ {\rm m}$ : а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

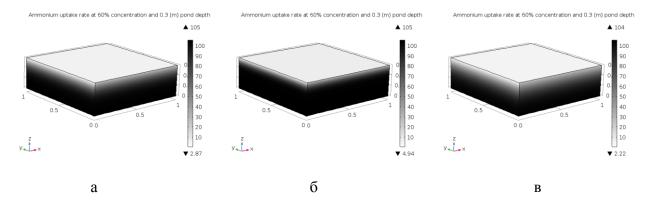


Рисунок 61- Скорость поглощения аммония при начальной концентрации  $105,37\ {\rm г/m^3},\ {\rm глубине}$  пруда  $0,3\ {\rm m}$ : а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

# 11.4.4. Профили фосфатов для концентрации 20%

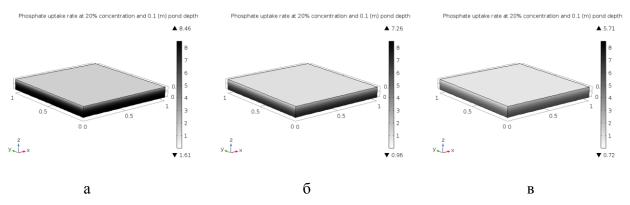


Рисунок 62- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 8,15 г / м<sup>3</sup>, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

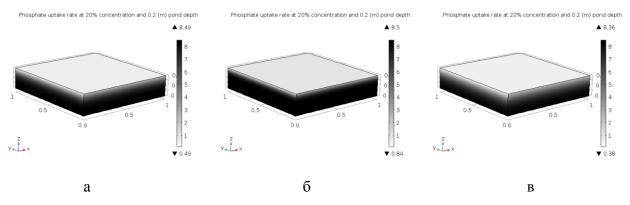


Рисунок 63- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации  $8,15\ {\mbox{г/}}\ {\mbox{м}}^3$ , глубине пруда  $0,2\ {\mbox{m}}$ : а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

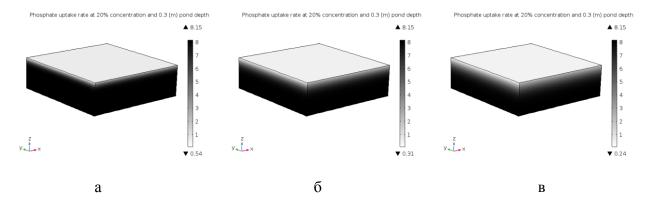


Рисунок 64- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 8,15 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

### 11.4.5. Профили фосфатов для концентрации 40%

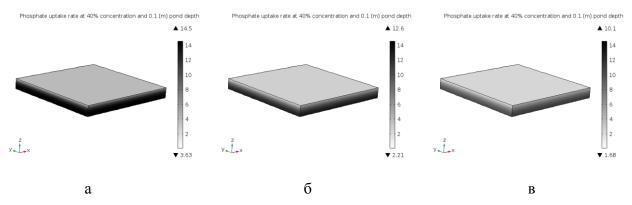


Рисунок 65- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 14,56 г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

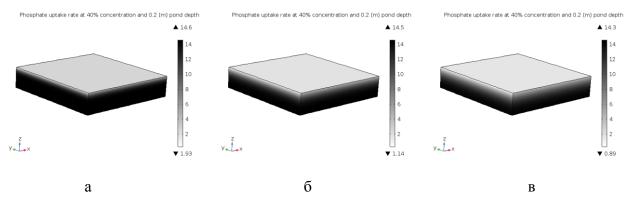


Рисунок 66- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 14,56 г/м3, глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

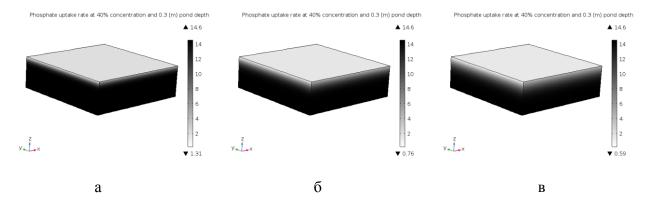


Рисунок 67- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 14,56 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

# 11.4.6. Профили фосфатов для концентрации 60%

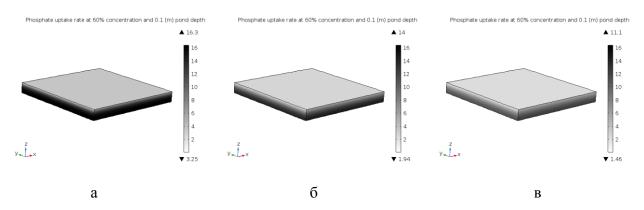


Рисунок 68- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 16,39 г/м3, глубине пруда 0,1 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

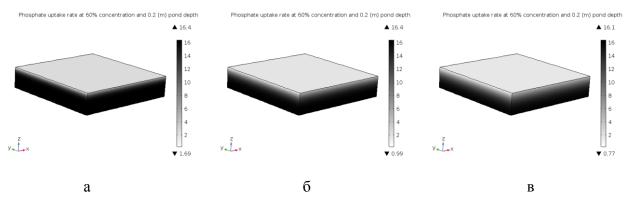


Рисунок 69- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 16,39 г/м³, глубине пруда 0,2 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней

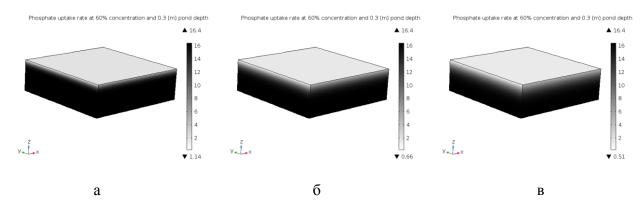


Рисунок 70- Скорость поглощения фосфата при начальной концентрации 16,39 г/м3, глубине пруда 0,3 м: а - 7 дней; б - 21 день; в -35 дней