

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий»

УДК 004.932.2:66-911.48:544.72

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

Со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта»)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Пушкаренко Алексей Борисович	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н., доцент		

По разделу, выполненному на иностранном языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Сидоренко Татьяна Валерьевна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суходоев Михаил Сергеевич	к.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Код компетенции ФГОС	Наименование компетенции ФГОС
Общекультурные компетенции	
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
ОК-3	Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК-3	Способность разрабатывать (на основе действующих стандартов) методические и нормативные документы, техническую документацию в области автоматизации технологических процессов и производств, в том числе жизненному циклу продукции и ее качеству, руководить их созданием
ОПК-4	Способность руководить подготовкой заявок на изобретения и промышленные образцы в области автоматизированных технологий и производств, управляя процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
Профессиональные компетенции	
ПК-1	Способность разрабатывать технические задания на модернизацию и автоматизацию действующих производственных и технологических процессов и производств, технических средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний, новые виды продукции, автоматизированные и автоматические технологии ее производства, средства и системы автоматизации, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством
ПК-2	Способность проводить патентные исследования с целью обеспечения патентной чистоты и патентоспособности новых проектных решений и определения показателей технического уровня проектируемой продукции, автоматизированных и автоматических технологических процессов и производств, средств их технического и аппаратно-программного обеспечения

ПК-3	Способность: составлять описание принципов действия и конструкции устройств, проектируемых технических средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний технологических процессов и производств общепромышленного и специального назначения для различных отраслей национального хозяйства, проектировать их архитектурно-программные комплексы
ПК-4	Способность разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты автоматизированных и автоматических производств различного технологического и отраслевого назначения, технических средств и систем автоматизации управления, контроля, диагностики и испытаний, систем управления жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизации проектирования, отечественного и зарубежного опыта разработки конкурентоспособной продукции, проводить технические расчеты по проектам, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектов, оценивать их инновационный потенциал и риски
ПК-5	Способность разрабатывать функциональную, логическую и техническую организацию автоматизированных и автоматических производств, их элементов, технического, алгоритмического и программного обеспечения на базе современных методов, средств и технологий проектирования
ПК-15	Способность разрабатывать теоретические модели, позволяющие исследовать качество выпускаемой продукции, производственных и технологических процессов, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления, проводить анализ, синтез и оптимизацию процессов автоматизации, управления производством, жизненным циклом продукции и ее качеством на основе проблемно-ориентированных методов
ПК-16	Способность проводить математическое моделирование процессов, оборудования, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления с использованием современных технологий научных исследований, разрабатывать алгоритмическое и программное обеспечение средств и систем автоматизации и управления
ПК-17	Способность разрабатывать методики, рабочие планы и программы проведения научных исследований и перспективных технических разработок, подготавливать отдельные задания для исполнителей, научно-технические отчеты, обзоры и публикации по результатам выполненных исследований
ПК-18	Способность осуществлять управление результатами научно-исследовательской деятельности и коммерциализацией прав на объекты интеллектуальной собственности, осуществлять ее фиксацию и защиту

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Основная часть	60
	Концепция стартап-проекта	20
	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суходоев Михаил Сергеевич	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Суходоев М.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна

Тема работы:

Разработка стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водо-масляных эмульсий»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	16.02.2022, № 47-10/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования являются водомасляные эмульсии и нефть, в частности. Объектом проектирования является стенд физического подобия «Исследование дисперсного состава водо-масляных эмульсий».
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Исследование методов синтеза эмульсии; Исследование ультразвукового метода разрушения эмульсий; Обзор методов измерения распределения глобул эмульсии по размерам; Разработка устройства для подготовки эмульсии; Разработка информационно-измерительной системы для проведения анализа дисперсного состава эмульсии; Разработка алгоритмов работы стенда; Проведение экспериментов с целью выявления оптимального режима работы стенда; Проведение экспериментов с целью получения статистической характеристики распределения глобул эмульсии по размерам.
Перечень графического материала	Структурная схема.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Концепция стартап-проекта	Пушкаренко Алексей Борисович, Доцент ШИП, к.т.н.
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна, Доцент ООД ШБИП, к.б.н.
Раздел, выполненный на английском языке	Сидоренко Татьяна Валерьевна, Доцент ОИЯ ШБИП, к.т.н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Выбор метода исследования дисперсного состава эмульсий и обзор аналогов (Choice of approach for measuring droplet size distribution and review device analogues)	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна

Школа	Информационных технологий и робототехники	Направление	15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
Уровень образования	магистратура		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	Продукт решает проблему повышения эффективности подготовки нефти, поскольку предназначен для проведения анализа дисперсного состава нефтяной эмульсии, на основе результатов которого можно интенсифицировать разрушение нефтяного флюида, путем подбора наиболее оптимального метода разрушения, а также параметров подобранного метода.
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Для разработанных программно-аппаратных решений оформлена заявка на патент на изобретение «Устройство для определения размеров глобул водомасляной эмульсии»
<i>Объем и емкость рынка</i>	Объем рынка в России составляет около 2 млрд рублей
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	Повышение эффективности и рентабельности подготовки нефти является одной из приоритетных задач нефтегазового сектора отечественной экономики. Однако научные достижения, имеющиеся в данной области, требуют дальнейшего развития: не решены вопросы недостатка входных данных для разработки достоверных математических моделей процессов разрушения нефтяной эмульсии. Решение данных проблем ведет к повышению скорости процесса подготовки нефти и уменьшению энергетических и временных затрат.
<i>Себестоимость продукта</i>	Себестоимость продукта составила 577 000 рублей, куда входят заработная плата на проектную работу, начисления на заработную плату, материальные затраты и оплата работ соисполнителей.
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Учет формы и положения глобул, использование технологии машинного зрения, возможность автоматического пробоотбора, относительно низкая стоимость технологии, наличие динамического режима работы.
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	Представленные на рынке анализаторы не дают представления о форме глобул или подходят для анализа дисперсного состава суспензий и сухих смесей и не пригодны для анализа размеров глобул эмульсий.
<i>Целевые сегменты потребителей</i>	- Нефтедобывающие компании, имеющие учебные

<i>создаваемого продукта</i>	центры и научные лаборатории; - производственные компании, занимающиеся производством и поставкой нефтяного и газового оборудования; - университеты и техникумы, имеющие нефтегазовые направления подготовки специалистов.
<i>Бизнес-модель проекта</i>	Модель по А. Остервальдеру
<i>Производственный план</i>	В первый год продаж планируется реализация 6 единиц продукта.
<i>План продаж</i>	В первый год продаж выручка при технологии коммерциализации производство и продажи продукта составит 20 млн рублей. При технологии коммерциализации лицензирование и продажа неисключительной лицензии составит 1 млн рублей.
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)</i>	Бизнес-модель по А. Остервальдеру, таблицы затрат.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Пушкаренко Алексей Борисович	доцент, к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 8ТМ01		ФИО Мигель Алёна Владимировна	
Школа	Информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Разработка стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий»	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> водомасляные эмульсии и нефть <i>Область применения:</i> подготовка нефти <i>Рабочая зона:</i> лаборатория <i>Размеры помещения:</i> 7*8 м <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> устройство для подготовки эмульсии, персональный компьютер, информационно-измерительная система <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> контроль исправности стенда, переключение режимов работы информационно-измерительной системы</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018); ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы: 1. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов. Вредные факторы: 1. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха 2. Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума);</p>

	<p>3. Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения;</p> <p>4. Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани тела человека переменного характера, связанного с наличием электромагнитных полей промышленных частот (порядка 50-60 Гц).</p> <p>Требуемые средства коллективной от выявленных факторов: защитные покрытия от электромагнитного излучения, устройства защитного заземления.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	<p>Воздействие на литосферу: утилизация бытовых отходов при поломке оборудования, а также масла и воды, использующихся в процессе работы стенда.</p> <p>Воздействие на атмосферу: выбросы углекислого газа в атмосферу, как следствие использования приборов, потребляющих электроэнергию.</p> <p>Воздействие на гидросферу: отсутствует</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	<p>Возможные ЧС: аварии на электроэнергетических объектах, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения, обрушение здания, пожар.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар.</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
01.03.2022	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 125 страниц, 35 рисунков, 23 таблицы, 63 источника литературы, 5 приложений.

Ключевые слова: эмульсия, машинное зрение, распределение размеров капель, оптическая микроскопия, ультразвуковое воздействие.

Объектом исследования является процесс анализа дисперсного состава скважинной жидкости.

Цель работы состоит в разработке стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий».

В результате исследования было проведено проектирование и конструирование стенда физического подобия «Исследование водомасляных эмульсий», разработано устройство для подготовки эмульсии, разработаны алгоритмы работы стенда в статическом и динамическом режиме, получены математические зависимости частоты собственных колебаний капель эмульсии от их размеров и поверхностного натяжения дисперсной фазы, получены статистические характеристики распределения глобул по размерам в статических и динамических образцах.

Полученные результаты могут быть использованы нефтесервисными компаниями для увеличения эффективности процессов подготовки нефти путем подбора оптимальных методов разрушения нефтяной эмульсии, а также ввода дополнительных контуров регулирования процессов подготовки нефти, с использованием в качестве входных данных результатов дисперсного анализа, полученных с помощью разработанной системы.

Для выполнения выпускной квалификационной работы использовались программные продукты Mathcad 15, AutoCad, MS Office.

Задание на ВКР выполнено в полном объеме, и разработка соответствует техническому заданию.

Содержание

Определения, сокращения, обозначения	15
Введение.....	16
1 Синтез и разрушение эмульсий	17
1.1 Нефтяные эмульсии	17
1.2 Методы синтеза эмульсий.....	18
1.2.1 Синтез эмульсий на промысле.....	19
1.3 Методы разрушения эмульсий	20
1.3.1 Разрушение эмульсий с помощью ультразвука	20
2 Выбор метода исследования дисперсного состава эмульсий и обзор аналогов	30
2.1 Ультразвуковая спектроскопия	30
2.2 Электрохимическая импедансная спектроскопия	32
2.3 Лазерная дифракция.....	33
2.4 Оптическая микроскопия	34
2.5 Анализ методов измерения распределения глобул дисперсной фазы по размерам.....	36
2.6 Аналоги разрабатываемого устройства	37
3 Разработка стенда физического подобия.....	42
3.1 Аппаратное обеспечение	42
3.1.1 Разработка устройства для подготовки эмульсии	42
3.1.2 Разработка информационно-измерительной системы	45
3.2.1 Алгоритмическое обеспечение	47
4 Выбор алгоритма сегментации для обработки микрофотографий	50
4.1 Детектор границ Кэнни	51
4.2 Оператор Собеля	51
	12

4.3	Оператор Превитта.....	52
4.4	Перекрестный оператор Робертса	53
4.5	Преобразование Хафа	54
4.6	Сравнение алгоритмов.....	55
5	Экспериментальная часть.....	57
5.1	Проведение экспериментов с целью выявления оптимального режима работы устройства для подготовки эмульсии	57
5.2	Проведение экспериментов с целью получения статистической характеристики распределения глобул эмульсии по размерам	59
6	Концепция стартап-проекта	63
6.1	Описание продукта	63
6.2	Интеллектуальная собственность.....	65
6.3	Объем и емкость рынка	65
6.4	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли	67
6.5	Планируемая стоимость продукта.....	69
6.6	Конкурентные преимущества и сравнение технико-экономических показателей с аналогами.....	73
6.7	Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта.....	74
6.8	Бизнес-модель проекта	75
6.8.1	Производственный план.....	75
6.8.2	Организационная структура и оплата труда	77
6.8.3	План продаж	78
6.9	Стратегия продвижения.....	80
7	Социальная ответственность	81
7.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	82
7.2	Производственная безопасность	84

7.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;	86
7.2.2 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха.....	87
7.2.3 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде.....	88
7.2.4 Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения.....	90
7.2.5 Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани тела человека переменного характера, связанного с наличием электромагнитных полей промышленных частот	92
7.3 Экологическая безопасность.....	93
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	94
7.5 Вывод по разделу социальная ответственность.....	96
Заключение	98
Список публикаций студента.....	99
Список использованных источников	100
Приложение А (обязательное) Choice of approach for measuring droplet size distribution and review device analogue.....	108
Приложение Б (обязательное) Структурная схема.....	121
Приложение В (обязательное) Материальные затраты.....	122
Приложение Г (обязательное) Заработная плата и начисления з	123
Приложение Д (обязательное) Бизнес-модель по А.Остервальдер	125

Определения, сокращения, обозначения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

дисперсный состав: количество частиц в установленных размерных группах, содержащихся в единице объема дисперсной фазы;

энергия Гиббса: это величина, изменение которой в ходе химической реакции равно изменению внутренней энергии системы;

скважинная жидкость: реальная жидкость, которая выходит из скважины, состоящая из нефти, воды, солей и механических примесей;

уравнение Навье-Стокса: система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости;

машинное зрение: технологии и способы получения информации, основанные на автоматизированном анализе изображений;

сегментация изображения: метод, при котором цифровое изображение разбивается на различные подгруппы, называемые сегментами изображения, что помогает уменьшить сложность изображения и упростить дальнейшую обработку или анализ изображения.

В данной работе применены следующие сокращения и соответствующие им расшифровки:

РКР – распределение капель по размерам;

ПАВ – поверхностно-активные вещества;

ИИС – информационно-измерительная система;

ЭИС – электрохимическая импедансная спектроскопия;

ПК – персональный компьютер.

Введение

Повышение эффективности и рентабельности процессов подготовки товарной нефти является одной из приоритетных задач нефтегазового сектора отечественной экономики, однако научные достижения, имеющиеся в данной области, требуют дальнейшего развития. В частности, не решены вопросы недостатка данных для разработки достоверных математических моделей процессов разрушения нефтяной эмульсии, а также входных сигналов для регулирования процессов управления аппаратами для подготовки нефти.

Нефть, добываемая на месторождениях, представляет из себя водомасляную эмульсию, то есть дисперсную систему, состоящую из двух и более несмешивающихся жидкостей, одна из которых распределена в другой в виде шаровых капель. Анализ дисперсного состава – это процесс получения статистических данных о размерах дисперсной фазы эмульсии. На сегодняшний день на промысле его производят порядка двух раз в месяц и вручную, тем временем распределение капель по размерам несет информацию о свойствах эмульсии в таких аспектах, как скорость деградации, долговременная стабильность, вязкость и другие [1]. Зная распределение капель по размерам конкретной нефтяной эмульсии, можно подобрать наиболее рациональные способы её разрушения и тем самым увеличить эффективность процессов подготовки нефти.

Объектом исследования являются водомасляные эмульсии и нефть, в частности. Объектом проектирования является стенд физического подобия, предназначенный для анализа дисперсного состава водомасляных эмульсий.

Таким образом, целью диссертационной является разработка стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий».

1 Синтез и разрушение эмульсий

1.1 Нефтяные эмульсии

Эмульсия представляет из себя неоднородную систему, состоящая из нескольких несмешивающихся жидкостей, одна из которых распределена в другой в виде глобул – маленьких капель. Жидкость, в которой распределяются глобулы называется дисперсной средой, а жидкость, которая распределяется в виде глобул – дисперсной фазой [2].

Водонефтяные эмульсии являются неустойчивыми, так как имеют высокий уровень свободной поверхностной энергии и стремятся его понизить, за счет процессов укрупнения капель и разделения эмульсии на нефть и воду [3].

Существует три основных типа эмульсий:

- эмульсия обратного типа – вода в нефти;
- эмульсия прямого типа – нефть в воде;
- множественная эмульсия – вода-нефть-вода или нефть-вода-нефть.

Распространенный тип эмульсии в нефтяной промышленности – вода в нефти – это эмульсия, состоящая из капель воды (дисперсной фазы), рассеянных в нефти, представляющей собой дисперсную среду. Эмульсия нефть в воде – это противоположность предыдущему типу эмульсии. Множественная эмульсия представляет собой относительно большие капли воды, распределенные в нефти, в которых распределены глобулы нефти и наоборот.

В современной промышленности эмульсии типа масло в воде и вода в масле находят наиболее широкое применение и встречаются чаще, чем множественные эмульсии. Последние являются наиболее неблагоприятными из-за сложности их разделения и применения.

Разрабатываемый стенд представляет из себя информационно-измерительную систему, предназначенную для анализа водомасляных эмульсий, в том числе нефти. Однако в условиях учебной аудитории исследование реального нефтяного флюида невозможно из соображений

безопасности. В связи с чем возникла потребность анализа и выбора методов подготовки эмульсии.

1.2 Методы синтеза эмульсий

Изменение свободной энергии Гиббса ΔG при образовании эмульсии из двух объемных жидкостей задается следующим уравнением:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (1)$$

где ΔH – изменение энтальпии;

T – температура;

ΔS – изменение энтропии.

Свободная энергия эмульгирования является положительной, и первым следствием этого является то, что эмульгирование редко является спонтанным процессом и, следовательно, требует ввода энергии [4].

Существует несколько методов создания эмульсий, их можно разделить на конденсационные и диспергационные.

Конденсационные методы заключаются в выращивании дисперсной фазы из малых центров каплеобразования:

- конденсация из паров: пар одной жидкости, которая является будущей дисперсионной фазой, подается под поверхность другой жидкости, которая является будущей дисперсионной средой. Далее следуют процессы перенасыщения и конденсации пара в виде капель;

- замена растворителя – вещество растворяют в «хорошем» растворителе.

Диспергационные методы заключаются в дроблении дисперсной системы, состоящей из несмешиваемых слоёв жидкостей:

- методы, в основе которых лежит взбалтывание;

- методы, в основе которых лежит перемешивание.

Для применения диспергационных методов, в основе которых лежит перемешивание существуют различные смесители: коллоидные мельницы, гомогенизаторы, смесители с мешалками пропеллерного и турбинного типов.

Гомогенизаторы — это устройства, в которых эмульгирование жидкостей достигается пропусканием одной из них через малые отверстия под высоким давлением. Простые лопастные мешалки подходят, когда требуемый размер капель превышает 10 мкм, но для получения более мелких капель обычно требуется более высокий сдвиг. Обычно используются роторно-статорные смесители с высоким сдвигом.

1.2.1 Синтез эмульсий на промысле

В пласте нефть и вода залегают в виде отдельных фаз, не смешанных друг с другом. На нефтяных месторождениях, которые находятся на поздней стадии эксплуатации, как правило, происходит прорыв пластовой воды в призабойную зону скважин [5].

Нефтяные эмульсии, как правило, синтезируются в местах интенсивного контакта фаз, где происходит перемешивание нефти и пластовой воды. В основном это происходит в местах, где нефть и пластовая вода претерпевают фазовые превращения с выделением из нефти растворенных газов и парафинов из-за непрерывно изменяющихся термобарических условий. Зачастую это происходит при подъеме от забоя до устья скважины [6]:

- в стволе скважины, где понижается давление и увеличивается интенсивность перемешивания нефтяной и водной фаз, а также увеличивается скорость движения продукции пласта, вследствие выделения газа;

- на подвижных частях насосного оборудования, штуцерах и запорной арматуре [7];

- в промысловом оборудовании при перепадах давления, пульсации газа, резкого изменения направления и диаметров технологических [8].

Было выявлено, что образование устойчивых водонефтяных эмульсий в призабойной зоне пласта происходит в результате фильтрации жидкости при наличии в породе мелкозернистого песка и глинистых фракций [9].

Таким образом, нефтяные эмульсии могут образовываться только при затратах энергии:

- 1) энергия расширения газа;
- 2) механическая энергия;
- 3) энергия силы тяжести.

Наиболее оптимальным и безопасным для реализации в лабораторных условиях является использование механической энергии, а именно мембранного погружного насоса, принцип работы которого заключается в перемещении двух мембран, соединенных валом. Перемещение происходит из-за воздействия попеременного нагнетания воздуха в камеры позади мембран. Одна из мембран создает разрежение при движении от стенки корпуса, вторая передает давление воздуха на жидкость, которая находится в корпусе, проталкивая ее к выпускному отверстию [10]. Установив заборное отверстие насоса на уровне жидкости, а выходное под углом к стенке, можно добиться получения эмульсий с различным дисперсным составом, который будет зависеть от режима работы насоса.

1.3 Методы разрушения эмульсий

Разрабатываемая установка может использоваться в качестве средства исследования влияния различных факторов на эмульсию в том числе для исследования методов интенсификации ее разрушения. Основой для таких исследований является эмульсия, генерируемая в емкости Е1, после подготовки которой возможен первичный отбор и анализ исходного образца, а затем воздействие каким-либо физическим фактором (ультразвук, электричество) и повторный пробоотбор. Таким образом уменьшается время проведения и увеличивается чистота эксперимента, поскольку дисперсный состав эмульсии меняется со временем.

1.3.1 Разрушение эмульсий с помощью ультразвука

Увеличение интенсивности процессов разрушения нефтяной эмульсии может быть достигнуто значительным изменением сил межмолекулярного взаимодействия дисперсной среды и дисперсной фазы эмульсии. Одним из

способов реализации интенсификации процессов подготовки нефти является применение акустических излучателей ультразвуковой частоты [11]. При воздействии на каплю колебаниями ультразвуковой частоты можно инициировать ее интенсивное разрушение. Тем временем известно, что высокоинтенсивное воздействие ультразвука приводит к дополнительному эмульгированию за счет диспергирования частиц смеси. Для разрушения эмульсии необходимо воздействовать на дисперсную систему механическими колебаниями ультразвуковой частоты с низкой интенсивностью, не допуская возникновения режима развитой кавитации [12].

Зная диаметр капли, частоту собственных колебаний и плотность дисперсной фазы можно рассчитать частоту собственных колебаний капли. При воздействии на каплю ультразвуковыми колебаниями с частотой, равной частоте её собственных колебаний можно инициировать её интенсивное разрушение. В качестве источника колебаний капли могут выступать пьезоэлементы. При приложении к пьезоэлектрической пластине переменного напряжения, она начинает сжиматься и расширяться с частотой прикладываемого напряжения, то есть генерирует колебания [13].

Эффективность данного метода была доказана рядом экспериментов, в ходе которых в двух емкостях были приготовлены эмульсии в одинаковых условиях. Во вторую емкость был помещен пьезоэлемент, подключенный к генератору, эмульсия во второй емкости разделялась только с помощью отстаивания. Процесс разделения фиксировался с помощью камеры, которая делала снимки в течение 24 часов с шагом в 10 минут. Более интенсивный процесс отделения происходил в емкости с пьезоэлементом (рисунок 1) [13].

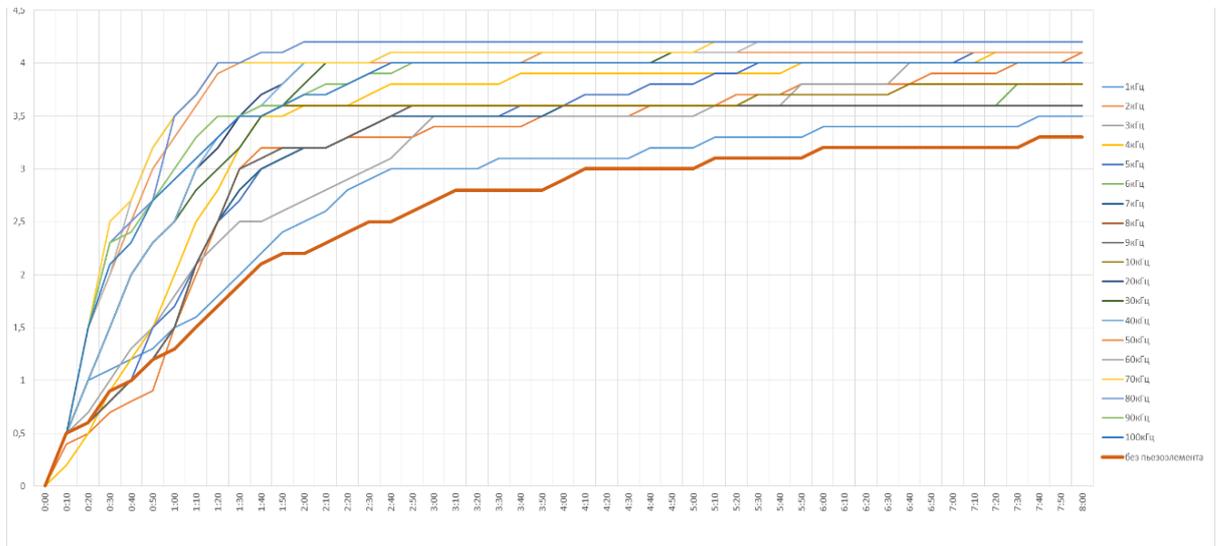


Рисунок 1 – Интенсивность разделения водомасляной эмульсии

Рассмотрим систему, состоящую из двух фаз: 1-вода, 2-масло и границы раздела между ними, которая представляет из себя шаровую поверхность Σ (рисунок 2).

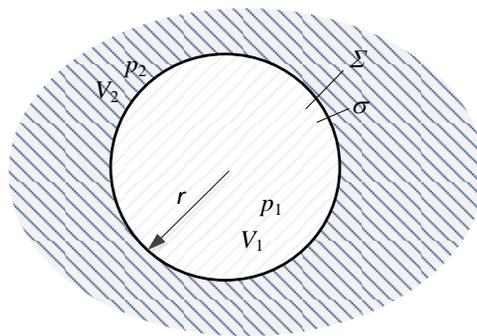


Рисунок 2 – Двухфазная среда с границей раздела фаз в виде шаровой поверхности

Результирующая свободная энергия системы состоит из суммы свободных энергий каждой фазы и поверхностного слоя [14-16]:

$$F = F_1 + F_2 + F_{\text{поверх}} = -ST - p_1 V_1 - p_2 V_2 + \sigma \Sigma, \quad (2)$$

где F – результирующая свободная энергия системы, Дж;

F_1 – свободная энергия водной фазы, Дж;

F_2 – свободная энергия масляной фазы, Дж;

$F_{\text{поверх}}$ – свободная энергия поверхностного слоя, Дж;

S – энтропия системы, Дж/К;

T – температура системы, К;

p_1 – давление в водной фазе, Па;

V_1 – объем воды, м³;

p_2 – давление в масляной фазе, Па;

V_2 – объем масла, м³;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

Σ – площадь поверхности границы раздела фаз, м².

Любая термодинамическая система стремится к минимуму свободной энергии $dF = 0$. Учитывая, что суммарный объем системы равен:

$$V_1 + V_2 = V, \quad T = const \quad (3)$$

и, что система находится в положении равновесия при температуре T , которая одинакова для обеих фаз, найдем минимум свободной энергии системы. Учитывая, что свободная энергия F , является термодинамическим потенциалом, собственными переменными которой являются величины V , Σ и T , с учетом (2) получаем

$$dF = -(p_1 - p_2)dV_1 + \sigma_1 d\Sigma_1 = 0 \quad (4)$$

Последнее выражение можно записать в виде:

$$p_1 - p_2 = \sigma \frac{d\Sigma}{dV_1}. \quad (5)$$

Учитывая, что площадь поверхности и объем определяются выражениями (6), можно записать (7):

$$\Sigma = 4\pi r^2, \quad V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (6)$$

где r – радиус шаровой поверхности, м.

$$\frac{d\Sigma}{dV_1} = \frac{d(4\pi r^2)}{d\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)} = \frac{2rdr}{\frac{1}{3}3r^2 dr} = \frac{2}{r}. \quad (7)$$

Таким образом, получаем выражение, связывающее давления сред и поверхностное натяжение:

$$p_1 - p_2 = \frac{2\sigma}{r}, \quad (8)$$

Внутри шаровой поверхности давление больше, чем снаружи на величину поверхностного давления, которое вызвано поверхностным натяжением.

Вода – это жидкость, которая имеет высокую плотность и является несжимаемой. Поэтому капля воды не может сжиматься при воздействии на нее некоего акустического возмущения звуковой или ультразвуковой частоты, однако при этом происходит деформация капли, что инициирует изменение формы её поверхности. Поверхность капли отклоняется от своей сферической формы и её радиус r не сохраняется, а выражение (8) переходит в выражение (9):

$$p_1 - p_2 = 2\sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (9)$$

где r_1 – радиус кривизны поверхности водной фазы;

r_2 – радиус кривизны поверхности масляной фазы.

Здесь радиусы кривизны поверхности r_1 и r_2 расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях [17,18].

Рассмотрим левую часть уравнения (6). Будем рассматривать отклонения давления от положения равновесия, то есть отклонения давления от давления на поверхности $p = p_2 - p_1$, тогда можно записать уравнение Навье-Стокса для капиллярной волны без учета влияния гравитационных сил и уравнение непрерывности. (Здесь мы учитываем, что плотность воды не меняется, так как вода не сжимаемая) [18]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + (v\nabla)v = -\nabla \frac{p}{\rho}, \\ \operatorname{div} v = 0 \end{cases} \quad (10)$$

где v – скорость движения жидкости, м/с;

t – время, с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Для упрощения решения введем понятие потенциала скорости ψ и перепишем уравнение непрерывности (11):

$$\begin{cases} v = \nabla\psi = grad(\psi) \\ divv = \nabla\nabla\psi = \Delta\psi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Заметим, что потенциал скорости удовлетворяет уравнению Лапласа. Таким образом, уравнение (10) может быть переписано в виде выражения, связывающего давление и потенциал скорости (12):

$$\frac{\partial \nabla\psi}{\partial t} + \nabla\psi\Delta\psi = -\nabla\frac{p}{\rho} \rightarrow p + \rho\frac{\partial\psi}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Теперь рассмотрим правую часть уравнения (9), а точнее сомножитель при поверхностном натяжении $\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$. Поскольку в рассматриваемом случае происходит отклонение от сферической поверхности, разложим это выражение в окрестности поверхности сферы учитывая, что отклонения будут небольшими, тогда раскладывая в ряд Тейлора, в сферических координатах, получаем выражение (13):

$$\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = \frac{2}{r_0} - \frac{2\zeta}{r_0^2} - \frac{1}{r_0^2} \left\{ \frac{1}{\sin^2(\theta)} \frac{\partial^2\zeta}{\partial\varphi^2} + \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial}{\partial\theta} \zeta \right) \right\}, \quad (13)$$

где ζ – координаты отклонения от фиксированного значения радиуса шара;

θ – угол между осью OZ и вектором r_0 ;

φ – угол между осью OX и вектором r_0 ;

Смысл величин входящих в уравнение (13) приведен на рисунке 3.

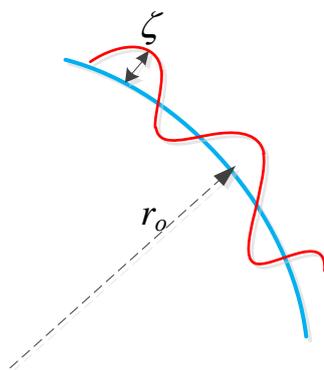


Рисунок.3 – ζ - искажения поверхности шара, вызванные влиянием внешних возмущений

Соберем теперь левые и правые части уравнения (9). С учетом (12) и (13) получаем:

$$\rho \frac{\partial \psi}{\partial t} + \sigma \left[\frac{2}{r_o} - \frac{2\zeta}{r_o^2} - \frac{1}{r_o^2} \left\{ \frac{1}{\sin^2(\theta)} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \right) \right\} \right] = 0, \quad (14)$$

Производная по времени от координаты отклонения ζ от фиксированного значения радиуса шара есть радиальная составляющая скорости (15):

$$v_r = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (15)$$

С другой стороны, учитывая выражение скорости через потенциал, получаем (16):

$$v_r = \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (16)$$

Продифференцируем выражение (14) по времени, в результате получаем волновое уравнение (17):

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\sigma}{r_o^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[2\psi + \left\{ \frac{1}{\sin^2(\theta)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) \right\} \right] = 0 \quad (17)$$

Найдем решение этого уравнения в виде стоячей волны в факторизованном виде:

$$\psi(t, r, \varphi, \theta) = e^{-j\omega t} f(r, \varphi, \theta), \quad (18)$$

где ω – частота собственных колебаний, Гц.

Подставим последнее решение (18) в уравнение (17) и производя сокращение на экспоненциальный сомножитель $e^{-j\omega t}$ получим:

$$\rho \omega^2 f + \frac{\sigma}{r_o^2} \left[2 \frac{\partial}{\partial r} f + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\sin^2(\theta)} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) \right\} \right] = 0. \quad (19)$$

Примем во внимание, что функция f удовлетворяет уравнению Лапласа, и решения этой функции можно искать в виде комбинаций объемных шаровых функций Лапласа и радиального множителя (20):

$$f(r, \varphi, \theta) = r^l Y_{l,m}(\varphi, \theta) \quad (20)$$

Шаровые функции Лапласа $Y_{l,m}(\varphi, \theta)$ выражаются через известные присоединенные полиномы Лежандра [19]:

$$Y_{l,m}(\varphi, \theta) = P_l^m(\cos(\theta))e^{im\varphi}, \quad P_l^m(\cos(\theta)) = \sin^m(\theta) \frac{d^m P_l(\cos(\theta))}{d(\cos \theta)^m}, \quad (21)$$

где $P_l(\cos(\theta))$ – полиномы Лежандра l -того порядка.

Как известно, l пробегает все целые положительные числа, включая нуль, m пробегает при фиксированном l значения $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. Шаровые функции Лапласа являются собственными функциями углового оператора [19]:

$$\frac{1}{\sin^2(\theta)} \frac{\partial^2 Y_{l,m}}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial Y_{l,m}}{\partial \theta} \right) = -l(l+1)Y_{l,m} \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в (19) с учетом (20), получаем (23):

$$\omega^2 Y_{l,m} r^l + \frac{\sigma}{r_o^2} (2 - l(l+1)) Y_{l,m} l r^{l-1} = 0 \quad (23)$$

На границе $r = r_o$ получаем (24):

$$\rho \omega^2 + \frac{\sigma}{r_o^3} (2 - l(l+1)) = 0 \quad (24)$$

Таким образом, получаем выражение для резонансной частоты (25)

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho r_o^3} (2 - l(l+1)) = \frac{\sigma}{\rho r_o^3} l(l+2)(l-1) \quad (25)$$

Значения параметра l отражают сферические пульсации капли (сжатие по радиусу) и сдвиг как поступательное перемещение капли. Такие значения не являются интересными, так как жидкость несжимаема. При $l = 2$ получаем (26):

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho r_o^3} 2(2+2) = \frac{8\sigma}{\rho r_o^3} \quad (26)$$

Таким образом, резонансная частота зависит от поверхностного натяжения σ , плотности ρ и радиуса капли r_o . На рисунке 4 представлены три первых колебания при $l = 2$, $l = 4$, $l = 6$.

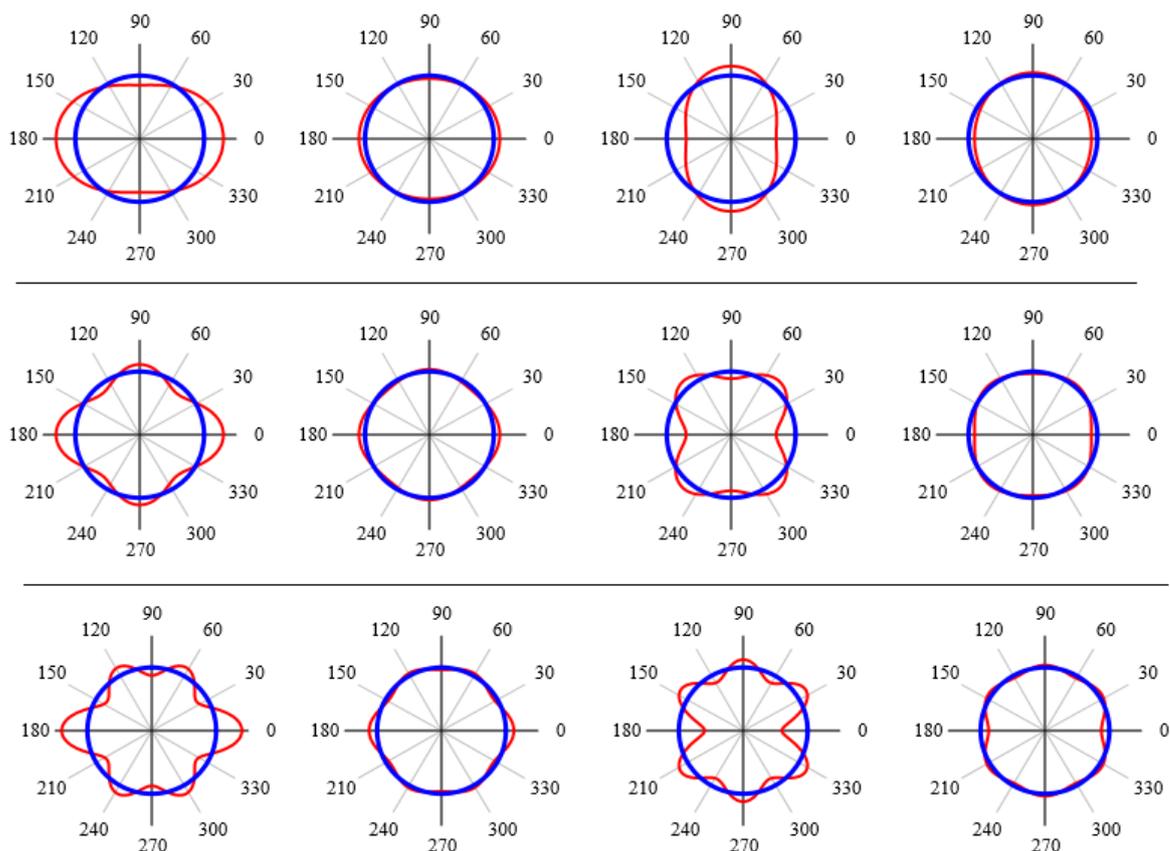


Рисунок 4 – Три первых колебания шаровой капли при $l = 2, 4, 6$

Рассчитаем графические зависимости частоты от радиуса (рисунок 5) и частоты, от поверхностного натяжения (рисунок 6), основываясь на графической зависимости поверхностного натяжения воды от температуры, заимствованной из литературы [15].

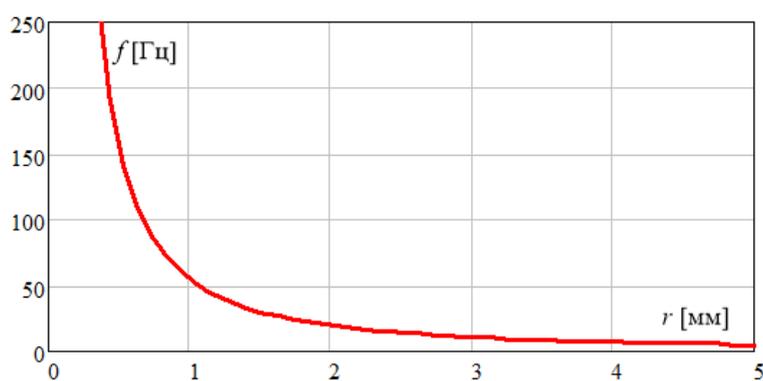


Рисунок 5 – Зависимость частоты колебаний от радиуса капли, при температуре $t=23^{\circ}\text{C}$

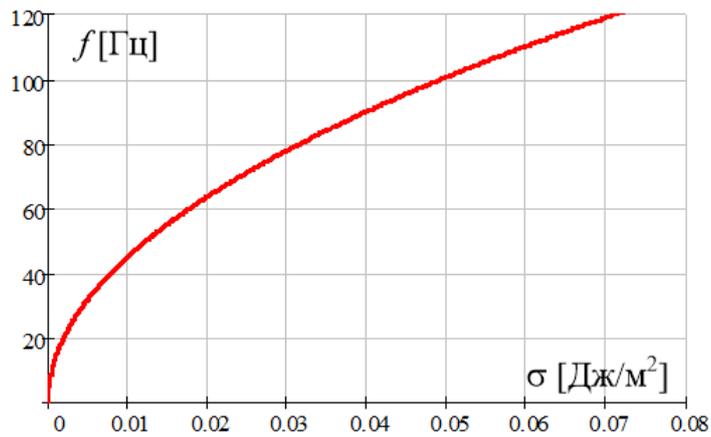


Рисунок 6 – Зависимость частоты колебаний от поверхностного натяжения

Таким образом, была получена зависимость резонансной частоты водной капли от поверхностного натяжения σ , радиуса капли r_0 , и плотности ρ , что позволяет определить частоту внешнего воздействующего акустического импульса на водную каплю с целью её разрушения, или с целью определения распределения капель воды по размерам в масляной среде. Приведенные графические зависимости показывают необходимый диапазон частотной полосы настройки воздействующего импульса.

2 Выбор метода исследования дисперсного состава эмульсий и обзор аналогов

Распределение капель по размерам (РКР) влияет на свойства эмульсии в таких аспектах, как скорость разложения, долговременная стабильность, устойчивость к расслаиванию, текстура и внешний вид, вязкость, физиологическая эффективность и химическая активность [20].

Одним из распространенных способов характеристики распределения эмульсий по размерам является использование таких параметров как как средний размер капель, диаметр Саутера и диаметр наибольшего стабильного размера капель. Они имеют широкую применимость, однако являются недостаточными для характеристики параметров эмульсии. Для точного определения наиболее характерных параметров эмульсий (суммарного распределения капель по поверхности, объему или массе) возникает необходимость оценки РКР эмульсии.

В данной главе были рассмотрены различные методы анализа дисперсного состава эмульсии, такие как: электрохимическая импедансная спектроскопия, ультразвуковая спектроскопия, лазерная дифракция и оптическая микроскопия, а также проведен анализ, по итогам которого были выявлены основные недостатки и преимущества рассматриваемых методов измерения распределения капель по размерам.

2.1 Ультразвуковая спектроскопия

Ультразвуковая спектроскопия — это быстрый неразрушающий метод измерения распределения капель по размерам в концентрированных эмульсиях. Измеряется диапазон частот и коэффициент затухания колебаний глобул эмульсии, а затем используется теория многократного рассеяния для преобразования этих измерений в распределение капель по размерам. Измеряя ультразвуковые свойства эмульсий в достаточно широком диапазоне частот (от 0,1 МГц до 200 МГц), можно определить размеры капель в диапазоне от

0,01 нм до 1000 нм [21]. При этом размер капель нефтяной эмульсии варьируется от 0,2 мкм до 100 мкм.

Как правило, ультразвуковой анализ основан на измерении скорости ультразвука и коэффициента затухания материала. Ультразвуковая скорость – это расстояние, которое ультразвуковая волна проходит за единицу времени, тогда как коэффициент затухания – это мера уменьшения амплитуды ультразвуковой волны на единицу расстояния, пройденного через материал. Ультразвуковые свойства материалов связаны с их физико-химическими свойствами, поэтому ультразвук можно использовать для получения важной информации о свойствах материалов, как только эта взаимосвязь установлена.

Существует два этапа определения распределения капель эмульсии по размерам с помощью ультразвуковой спектроскопии. Первый этап заключается в измерении скорости ультразвука или коэффициента затухания эмульсии в зависимости от частоты (предпочтительно в как можно более широком диапазоне). Второй этап заключается в сравнении полученных экспериментальных измерений с теоретическими значениями ультразвуковых свойств эмульсии, и определении распределение капель по размерам, которое дает наилучшее соответствие между теорией и экспериментом.

Таким образом, принцип работы систем ультразвуковой спектрометрии заключается в определении частотной зависимости акустического затухания и скорости с целью определения распределения частиц по размерам и реологических свойств концентрированных дисперсий. Звуковые импульсы передаются через образец. Затухание этих импульсов измеряется в широком диапазоне ультразвуковых частот (от 1 до 100 МГц) с использованием зазоров разного размера между ультразвуковым преобразователем и приемником (рисунок 7).

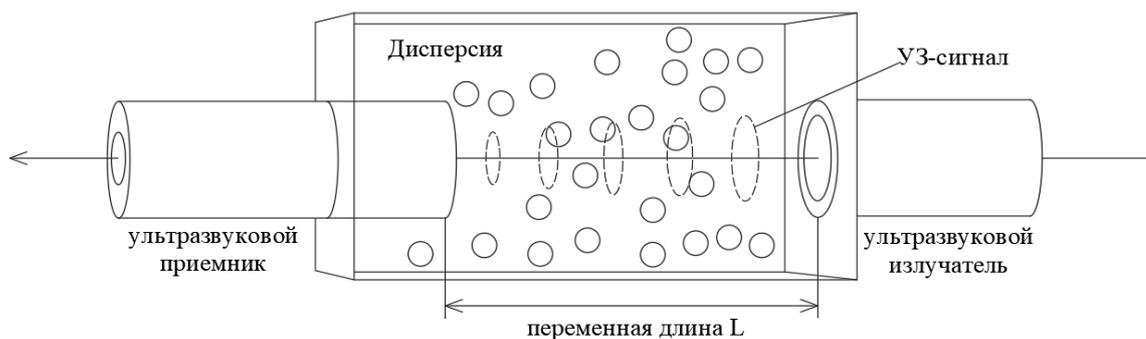


Рисунок 7 – Схема измерения распределения размеров частиц с помощью ультразвуковой спектроскопии

Немногие методы определения концентрации и размера частиц или распределения по размерам позволяют характеризовать высококонцентрированные дисперсии без необходимости разбавления. Эта особенность дает ультразвуковой спектроскопии одно существенное преимущество для измерения размера частиц и концентрации гетерогенных систем. Многие сложные жидкости оптически непрозрачны, что не позволяет использовать методы оптического анализа без модификации образца [22]. Кроме того, ультразвуковые методы имеют такие преимущества как быстрый отклик для онлайн-измерений, неинвазивные и неразрушающие измерения. С другой стороны, метод имеет некоторые ограничения, такие как чувствительность к пузырькам воздуха, которые могут мешать ультразвуковым измерениям и необходимость измерения большого количества теплофизических свойств дисперсной фазы эмульсии для полного описания теоретических ультразвуковых спектров [23].

2.2 Электрохимическая импедансная спектроскопия

Еще одним методом определения распределения капель по размерам является электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС). ЭИС может измерять капли размером до 100 микрон. Электрохимическая импедансная спектроскопия — это исследование дисперсных систем с помощью приложения синусоидального электрического потенциала с переменной частотой. Этот электрический потенциал индуцирует синусоидальный ток,

фазовый угол и изменения тока в зависимости от приложенного потенциала. Таким образом, сущность метода импедансной спектроскопии состоит в изучении сигнала на выходе, при подаче возмущающего сигнала малой амплитуды на исследуемую систему.

Методы ЭИС имеют низкие сопутствующие расходы и могут быть легко реализованы и имеет высокую экспериментальную эффективность. Метод ЭИС универсален, так как может применяться в диэлектрической среде с высоким электрическим сопротивлением, например, в сырой нефти и эмульсиях вода-в-масле. Основным недостатком этого метода является влияние на результат анализа различных примесей, а также использование в этом методе потенциала, который может нарушить дисперсную систему [24].

2.3 Лазерная дифракция

Принцип работы метода лазерной дифракции заключается в получении данных о распределении размеров частиц с помощью измерения интенсивности светорассеяния и определения ее зависимости от длины волны, угла рассеяния и поляризации света. Данный метод является абсолютным и не требует калибровки.

Анализ распределения частиц по размерам начинается с того, что твердотельный лазер испускает луч монохроматического света, который проходит через несколько оптических компонентов и превращается в толстый коллимированный пучок. Этот световой пучок направляется на частицы и рассеивается ими в так называемом рассеивающем объеме. При этом формируются уникальные формы углового светорассеяния, регистрируемые многоэлементной детекторной матрицей. Фототоки, возникающие в детекторной матрице, оцифровываются и анализируются с построением диаграммы интенсивностей и оценкой распределения частиц по размерам (рисунок 8).

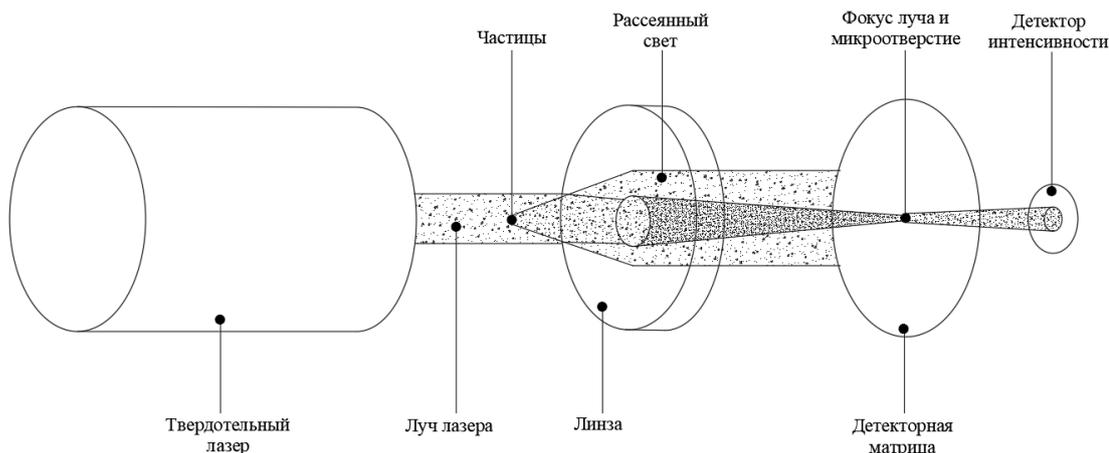


Рисунок 8 - Схема измерения распределения размеров частиц с помощью лазерной дифракции

Во время анализа происходит циркуляция пробы, что способствует вращению измеряемых частиц. Благодаря этому происходит сглаживание эффектов рассеяния на углах и краях промышленных частиц, которые не являются сферичными. Это позволяет применять к системам с одним параметром, который представляет из себя диаметр, теорию Ми и теорию Фраунгофера.

Лазерная дифракция обладает рядом преимуществ, включая простоту и быстроту измерений, высокую воспроизводимость и широкий динамический диапазон размеров, охватывающий почти пять порядков величины: от нанометров до миллиметров. Используя этот метод, можно проводить измерения размера капель на месте в реальном времени в широком диапазоне объемных долей дисперсной фазы. Лазерная дифракция используется для измерения размера частиц в диапазоне от 0,8 до 1000 нм [25].

Лазерная дифракция позволяет только примерно оценить размеры частиц и результаты, получаемые большинством методов могут сильно отличаться от реальных характеристик.

2.4 Оптическая микроскопия

Классическим методом определения дисперсного состава эмульсий является оптическая микроскопия. Оптический микроскоп является

оптической системой с двумя ступенями увеличения – объективом и окуляром. Принципиальная схема микроскопа приведена на рисунке 9.

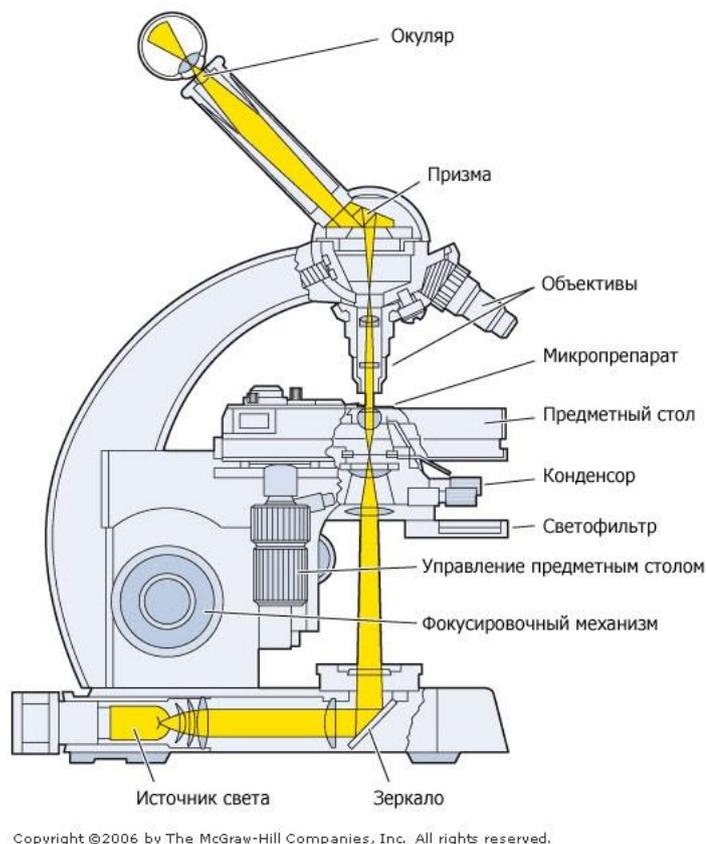


Рисунок 9 – Принципиальная схема микроскопа

Объект освещается источником света через оптическую систему коллектор-конденсор, которая используется в оптическом приборе для освещения рассматриваемого предмета. Конденсор собирает, усиливает и превращает световой поток в пучок равномерных параллельных лучей в границах всей площади конденсора. Световой поток рассчитан для освещения площади исследуемого предмета. Конденсор направляет на предмет лучи от источника света, в том числе и те, что в его отсутствие проходят сквозь рассматриваемый предмет, в результате чего происходит уплотнение светового потока и резкий рост освещенности предмета. Объектив создает действительное перевернутое и увеличенное изображение объекта, которое рассматривается через окуляр. Окуляр в данной системе используется для дополнительного увеличения и создания мнимого изображения [26].

Точность микроскопического анализа зависит от двух факторов: один из них - субъективные ошибки, другой обусловлен статистическим характером измерений. Достаточная точность измерений достигается при подсчете размера около 1000 капель каждой фракции. Поэтому точность определения размера крупных капель, которых обычно мало в поле микроскопа, как правило, невелика. В то же время, если капли имеют размер на границе разрешающей способности микроскопа или даже за нею, то определить их размер, а тем более содержание, практически невозможно. В этой связи для анализа эмульсий с каплями таких размеров применяют электронный микроскоп [27].

Этот метод имеет простейшую реализацию и обеспечивает распределение размеров капель эмульсии непосредственно по результатам измерений отдельных капель, без математической обработки полученных данных. Еще одним преимуществом является возможность исследовать непрозрачные и концентрированные системы без разбавления. Эти характеристики делают оптическую стандартной методикой анализа дисперсного состава, и результаты, полученные другими методами, обычно подтверждаются данным методом [28]. Однако данные, полученные с помощью оптической микроскопии, требуют дальнейшей обработки, что представляет из себя достаточно трудоемкий и длительный процесс, с учетом использования ручного труда.

2.5 Анализ методов измерения распределения глобул дисперсной фазы по размерам

По итогам обзора был выполнен анализ методов измерения распределения глобул дисперсной фазы по размерам, представленный в таблице 1.

Исходя из проведенного анализа, наиболее подходящим является метод оптической микроскопии, поскольку он позволяет измерить диапазон размеров, характерных для полидисперсной нефтяной эмульсии, не требует

сложной математической обработки и обеспечивает распределение размеров капель эмульсии непосредственно по результатам измерений отдельных капель, не несет разрушительного воздействия на исследуемую дисперсную систему и дает представление о форме капель, которая является крайне важным фактором для проведения дальнейших исследований.

Таблица 1 – Анализ методов измерения распределения размеров глобул по размерам

Метод	Ультразвуковая спектроскопия	Электрохимический импеданс	Лазерная дифракция	Оптическая микроскопия
Скорость измерения	высокая	высокая	высокая	низкая
Диапазон измерений	(0,01-1000) нм	(0,01-100) мкм	(0,01-1000) мкм	(0,5 – 300) мкм
Разрушительное воздействие	нет	есть	нет	нет
Информация о форме капель	нет	нет	нет	есть
Влияние примесей на анализ	есть	есть	есть	нет
Математическая обработка	требуется	требуется	требуется	не требуется

Единственным выявленным недостатком метода оптической микроскопии является низкая скорость анализа, обусловленная отсутствием автоматизации процесса. Предлагаемое решение для уменьшения времени анализа и увеличения эффективности оптического метода - использование информационно-измерительной системы на основе системы машинного зрения и наличие динамического режима работы системы.

2.6 Аналоги разрабатываемого устройства

Можно выделить четыре основных аналогов предлагаемого стенда:

- анализатор размеров частиц Mastersizer 2000;

- устройство для измерения размера частиц ANALYSETTE 22 NeXT Nano;

- анализатор размеров частиц Микросайзер 201;

- анализатор размеров и формы частиц Camsizer P4.

Анализатор размеров частиц Mastersizer 2000 от компании Malvern Instruments (рисунок 10) предназначен для анализа дисперсного состава эмульсий, суспензий и сухих порошков. Принцип работы данного анализатора основан на использовании метода лазерной дифракции. Mastersizer 2000 имеет модульную реализацию и может включать различные автоматические диспергаторы с кюветами кассетного типа. Точность и воспроизводимость устройства реализуется посредством интегрированной системы стандартизированных протоколов измерений. Измерение размера частиц с помощью данного устройства возможно в диапазоне размеров от 0.02 мкм до 2000 мкм. Все измерительные параметры автоматически протоколируются в измерительном файле, для возможности последующей проверки полученного результата [29].



Рисунок 10 - Анализатор размеров частиц Mastersizer 2000

Принцип работы анализатора частиц ANALYSETTE 22 NeXT Nano от компании Fritsch (рисунок 11) также основан на лазерной дифракции. Анализатор имеет систему дополнительных детекторов, что позволяет измерять размеры частиц в диапазоне от 0,01 до 3800 мкм с высокой точностью. Время измерения одного образца, как правило, не превышает одной минуты до готовности к проведению нового измерения. Полный анализ

распределения размера частиц происходит автоматически. Результаты выводятся на экран компьютера по завершении анализа. Оператор анализатора может сохранить и распечатать отчет, составленный в требуемой форме. ANALYSETTE 22 NeXT Nano также может регистрировать дополнительные параметры, такие как температура и величина водородного показателя [30].



Рисунок 11 - Анализатор размеров частиц ANALYSETTE 22 NeXT Nano

Анализатор размеров частиц Микросайзер 201 от компании ВА Инсталт (рисунок 12), который так же, как и ранее рассмотренные аналоги, является лазерным, позволяет производить анализ различных объектов, таких как порошки металлов, пигменты и порошковые краски, сухие сыпучие продукты питания и другие мелкодисперсные системы, содержащие частицы размерами от 0,2 до 600 мкм.



Рисунок 12 - Анализатор размеров частиц Микросайзер 201

Анализатор имеет следующий принцип измерения. Суспензия частиц прокачивается через кювету, освещенную лазерным пучком. Излучение,

рассеянное частицами, регистрируется под разными углами с помощью высокочувствительной фотодиодной матрицы. По полученным измерениям получают зависимость интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния, на основе которой рассчитывается распределение частиц по размерам [31].

Анализатор размеров и формы частиц Camsizer P4 (рисунок 13) от компании Microtrac предназначен для анализа размера и формы частиц сухих сыпучих материалов, размеры которых находятся в диапазоне от 20 мкм до 30 мм. Анализатор имеет следующий принцип работы. Программно управляемый загрузочный желоб транспортирует образец в зону измерения, обеспечивая равномерную подачу образца и последовательные условия анализа. Поток частиц проходит через сверхяркий плоский светодиодный стробоскопический источник света. Полученные теневые проекции захватываются с помощью системы камер и оцениваются программным обеспечением. Camsizer P4 обеспечивает четкие изображения и определяет различные параметры размера и формы для каждой обнаруженной частицы. Анализ большого количества частиц гарантирует получение результатов с высокой точностью. Типичное время измерения составляет от 1 до 3 минут, при этом в реальном времени оцениваются 60 изображений в секунду [32].



Рисунок 13 - Анализатор размеров частиц Camsizer P4

По итогам обзора был проведен анализ аналогов разрабатываемого стенда (таблица 2).

Таблица 2 – Анализ аналогов

Модель	Malvern Mastersizer 2000	Fritsch Analysette 22 NeXT Nano	Микросайзер 201	Microtrack Camsizer P4
Диапазон измерения	(0,02-2000) мкм	(0,01-3800) мкм	(0,2-600) мкм	(20-3000) мкм
Принцип работы	Лазерная дифракция	Лазерная дифракция	Лазерная дифракция	Оптический
Учет формы глобул	нет	нет	нет	да
Анализ эмульсий	да	да	нет	нет
Типичное время измерения, мин	-	1	2	1-3
Встроенный диспергатор	да	нет	да	нет
Стоимость	Более 8 млн руб	Более 9 млн руб	Более 6,5 млн руб	Более 10 млн руб

Недостатками анализаторов Mastersizer 2000, ANALYSETTE 22 NeXT Nano и Микросайзер 201 являются недостатки их принципа работы, а именно отсутствие возможности анализа по формы частиц, а также возможности сравнения результатов с данными, полученными при использовании других методов определения состава. Кроме того, зачастую лазерный анализаторы подходят только для твердых частиц, модификации с возможностью исследования эмульсий (микросайзер, mastersizer 2000) стоят значительно дороже.

К недостаткам анализатора частиц Camsizer P4 можно отнести возможность анализа только суспензий и сухих смесей, что делает устройство непригодным для анализа эмульсий.

3 Разработка стенда физического подобия

3.1 Аппаратное обеспечение

Аппаратная часть представлена устройством для подготовки эмульсии и информационно-измерительной системой. Структурная схема стенда «Исследование водомасляных эмульсий» представлена в приложении Б.

Разрабатываемый стенд предназначен для анализа водомасляных эмульсий, при этом наибольший интерес представляет нефтяная эмульсия, использование которой в условиях учебной аудитории невозможно из соображений безопасности, что является обоснованием необходимости разработки устройства для подготовки эмульсии.

3.1.1 Разработка устройства для подготовки эмульсии

Схема устройства для подготовки эмульсии представлена на рисунке 14.

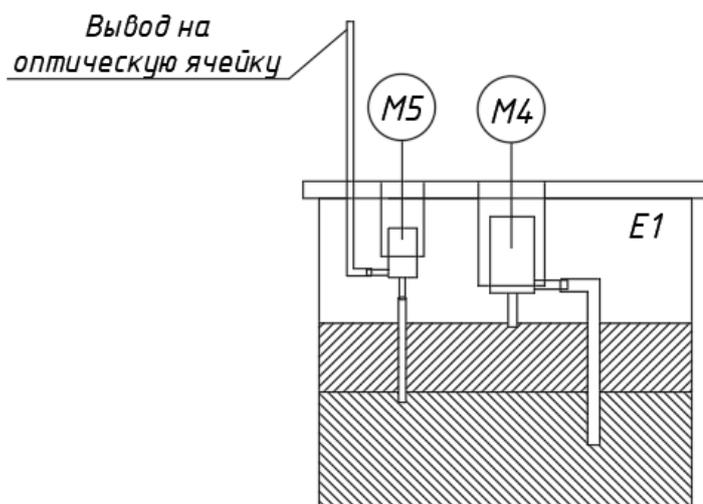


Рисунок 14 - Схема устройства для подготовки эмульсии

Здесь E1 – емкость для подготовки эмульсии, M4 – насос для подготовки эмульсии, M5 – насос для подачи эмульсии в оптическую ячейку.

Основным конструктивным элементом устройства для подготовки эмульсии является насос TSSP370-B воздушно-водяной мембранного типа. Производительность насоса составляет (200-350) л/мин при напряжении питания (6-12) В.

Процесс подготовки включает в себя непосредственно налив смешиваемых жидкостей в емкость для подготовки эмульсии и их смешивания. Для захвата всего объема масла необходимо, чтобы заборный патрубок насоса располагался на уровне жидкости в емкости, а выходной в нижней части емкости. Для обеспечения необходимого положения насоса, а также исключения брызг была разработана крышка, устанавливаемая на емкость для подготовки эмульсии (рисунок 15).

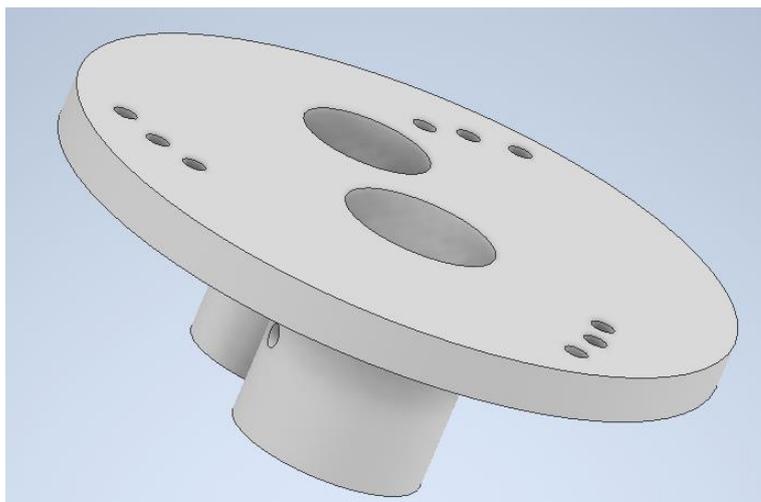


Рисунок 15 – 3Д-модель крышки

Отверстия на поверхности крышки предусмотрены для установки упоров по размерам емкости. Также в крышке располагаются крепления для насоса подачи эмульсии и его вывода на оптическую ячейку. В качестве насоса для подготовки эмульсии используется миниатюрная водяная помпа RS-360SH, производительность которой составляет (70 – 100) л/час. Полученное устройство для подготовки эмульсии представлено на рисунке 16.



Рисунок 16 – Устройство для подготовки эмульсии

Питание на насосы подается с программируемого источника питания Rigol DP832 (рисунок 17).



Рисунок 17 – Устройство для подготовки эмульсии, подключенное к источнику питания

В качестве емкости для подготовки эмульсии был использован мерный стакан объемом 1 литр. Крышка была напечатана на 3Д-принтере на основе разработанной 3Д-модели, представленной на рисунке 15.

Данная конфигурация устройства позволяет получать разнообразные по размерам дисперсной фазы эмульсии за счет регулирования таких параметров

как время непрерывной работы насоса для подготовки эмульсии: (3 – 30) мин, производительность насоса: (200 – 350) л/час, процентное содержание объема дисперсной фазы: (3 – 20) %.

3.1.2 Разработка информационно-измерительной системы

Основным конструктивным элементом информационно-измерительной системы (ИИС) стенда является микроскоп с вмонтированной в него камерой (рисунок 18).

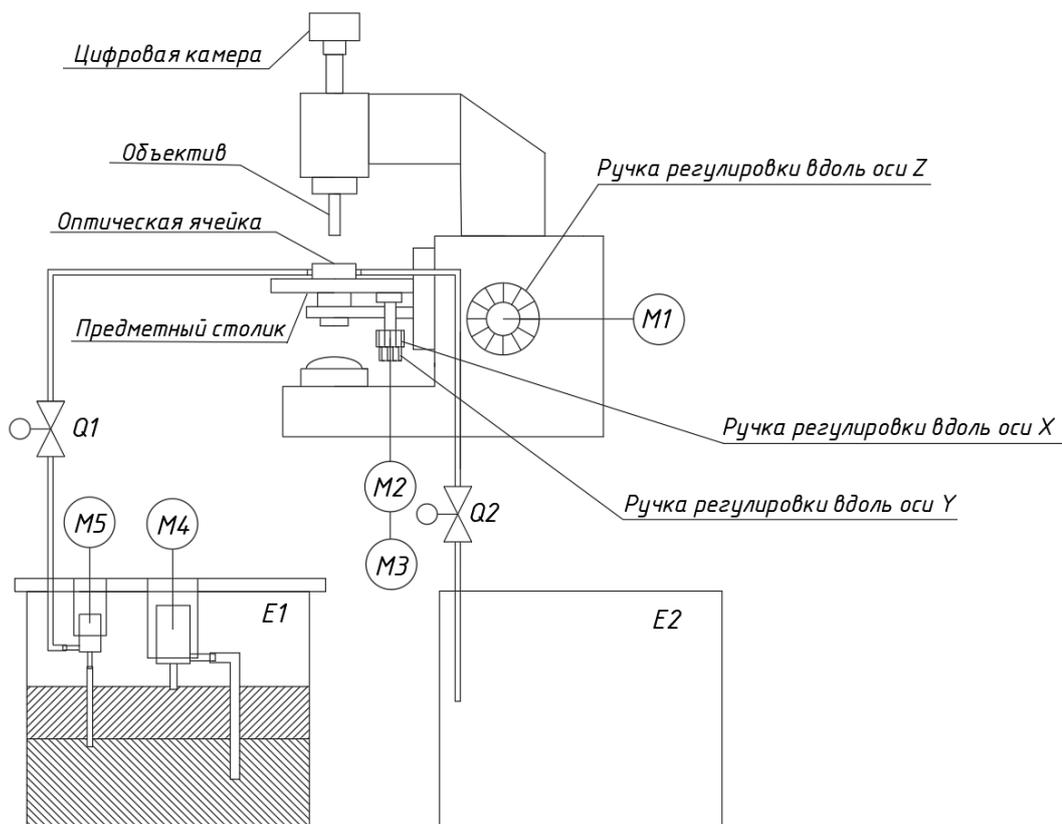


Рисунок 18 – Конструкция стенда

Камера делает снимки с определенной периодичностью, они обрабатываются программно и в зависимости от величины поступающих на предметный столик капель дисперсной фазы эмульсии происходит регулирование фокусного расстояния и положения столика по осям X и Y с помощью приводов M1, M2 и M3 соответственно.

Собранная система представлена на рисунке 19.

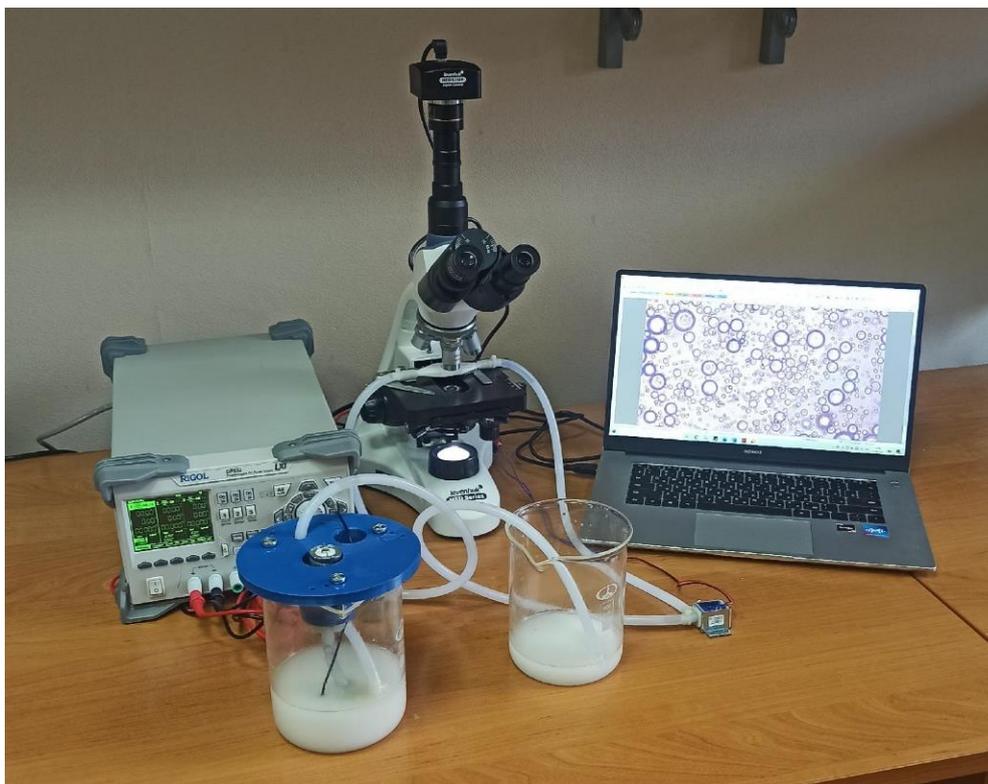


Рисунок 19 – Стенд физического подобию «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий»

Для удобства использования ИИС была смоделирована оптическая ячейка (рисунок 20). По полученной модели был изготовлен корпус оптической ячейки (рисунок 21).

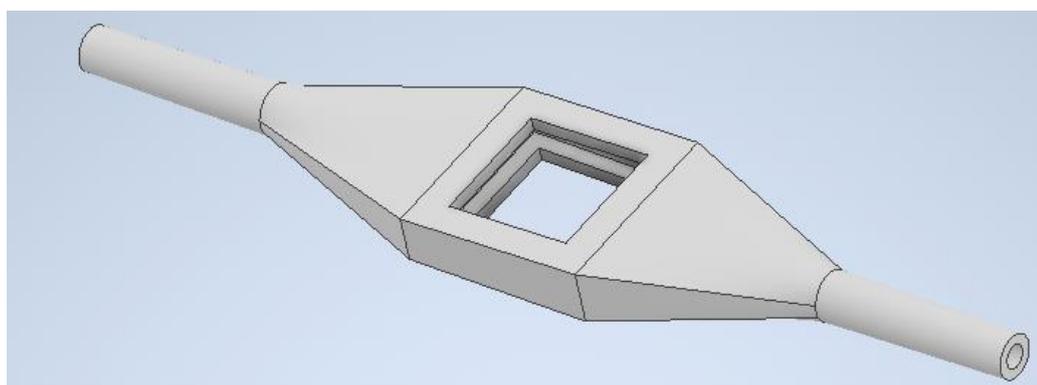


Рисунок 20 – 3Д-модель оптической ячейки

Оптическая ячейка выполнена из пластика с помощью 3Д-принтера, а также из предметного и покровного стекол. Основная камера ячейки имеет переменную толщину, это необходимо для охвата всего диапазона размеров глобул. Площадь сечения переходников от трубок к основной камере ячейки

изменяется плавно, это необходимо для обеспечения ламинарного потока эмульсии.

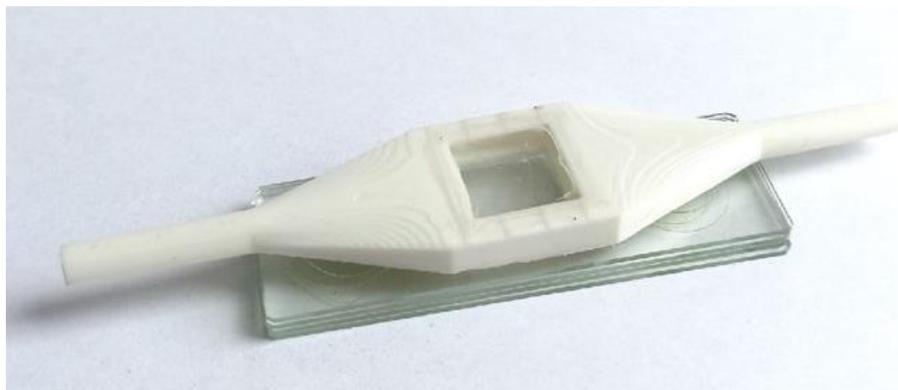


Рисунок 21 –Оптическая ячейка

Для реализации работы модуля линейного перемещения оптической системы стенда были выбраны шаговые двигатели NEMA 17 42НМ40-1684, поскольку они позволяют фиксировать положение оптической системы с необходимой точностью. Всего использовано 3 электродвигателя с наименьшим возможным углом поворота ротора, приводящие в действие модули линейного движения на каждую из степеней свободы. Для установки двигателей был разработан модуль линейного перемещения (рисунки 25-26).

Сконструированная система для проведения анализа дисперсного состава скважинной жидкости имеет следующие характеристики: габаритные размеры 700*500*400, диапазон измерения (0,1 – 300) мкм, возможность реализации статического и динамического режима работы, скорость потока эмульсии в динамическом режиме 3 л/час, точность позиционирования предметного столика микроскопа 10 мкм.

3.2.1 Алгоритмическое обеспечение

Предусмотрено два режима работы системы – статический и динамический.

В статическом режиме (рисунок 22) работа системы должна осуществляться следующим образом. На первом этапе происходит подготовка эмульсии. Далее небольшая порция эмульсии подается на предметный столик

микроскопа через оптическую ячейку с помощью насоса М4 и клапана Q1. Затем происходит настройка положения предметного столика относительно микроскопа. Далее происходит процесс создания и анализа фотографий. После чего эмульсия удаляется в емкость Е2.



Рисунок 22 – Блок-схема статического режима работы

В динамическом режиме работы (рисунок 23) также происходит подготовка эмульсии, затем на предметный столик микроскопа подается медленный поток эмульсии с помощью насоса М4. После прохождения через оптическую ячейку эмульсия удаляется в техническую емкость Е2. Процесс создания и анализа фотографий, а также настройки положения предметного столика относительно микроскопа производится в условиях прогона потока эмульсии через предметные стекла.

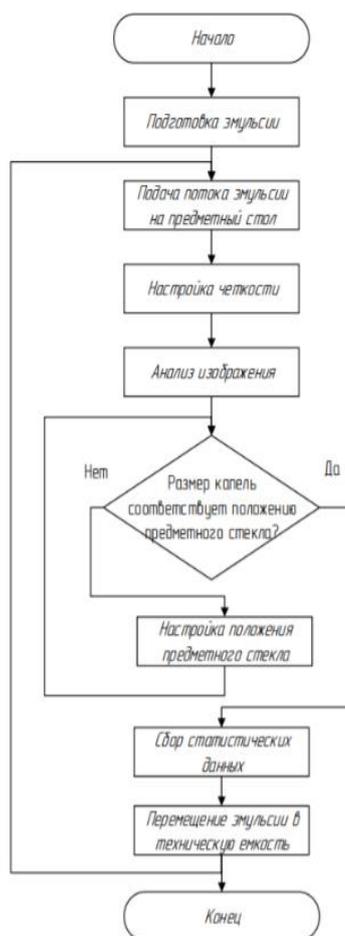


Рисунок 23 – Блок-схема динамического режима работы

Таким образом, статический режим работы обеспечивает анализ порции эмульсии, динамический режим работы обеспечивает работу системы в условиях прогона потока эмульсии через микроскоп. В дальнейшем промышленную версию системы можно будет использовать на промысле в качестве модуля автоматизированного пробоотбора и анализа дисперсного состава эмульсии – небольшое количество нефтяной эмульсии можно будет отбирать для анализа, а затем возвращать в общий поток.

4 Выбор алгоритма сегментации для обработки микрофотографий

Как было выявлено, основным недостатком оптического метода является низкая скорость проведения анализа. Предлагаемое решение данной проблемы - использование информационно-измерительной системы на основе системы машинного зрения.

Машинное зрение – это технология, используемая для обеспечения автоматического контроля и анализа изображений для таких областей применения, как автоматический контроль, управление процессами и управление роботами. Общий процесс применения машинного зрения включает детальное планирование требований и проекта. Использование машинного зрения включает формирование изображения, за которым следует автоматический анализ изображения и извлечение необходимой информации. Извлекаемая информация может быть простым сигналом или более сложным набором данных, таких как идентичность, положение и ориентация каждого объекта на изображении.

Таким образом стоит вопрос обработки цифровых изображений, а именно сегментация. В цифровой обработке изображений и компьютерном зрении сегментация изображения – это процесс разделения цифрового изображения на несколько сегментов изображения, также известных как области изображения или объекты изображения (наборы пикселей). Цель сегментации состоит в том, чтобы упростить или изменить представление изображения во что-то более осмысленное и легко анализируемое.

Сегментация является сложным процессом в обработке и анализе изображений, поскольку зачастую на изображениях присутствуют шумы, искажения, текстурные области, схожие с областями, принадлежащими исследуемому объекту. Все это затрудняет процесс распознавания объектов, поэтому при сегментировании используют алгоритмы обнаружения границ. Рассмотрим наиболее популярные алгоритмы выделения границ на изображениях.

4.1 Детектор границ Кэнни

Алгоритм детектора границ Кэнни состоит из следующих этапов:

- сглаживание, используемое с целью уменьшения количества шумов во избежание появления ложных границ;
- нахождение градиентов яркости и выделение границ в местах максимального значения градиент;
- удаление слабых границ, лежащих вблизи границы максимума градиента;
- двойная пороговая фильтрация, во время которой потенциальные границы определяются порогами;
- итоговое определение границ путём подавления всех краёв, несвязанных с определенными границами [33].

В алгоритме детектора границ Кэнни используется нижний и верхний порог. Пиксель, значение которого превышает верхний порог, принимает максимальное значение и контур считается достоверным. Пиксель, который имеет значение меньше нижнего порога, подавляется. В случае, когда значение пикселя попадает в диапазон, его принадлежность к точке границы принимается во время трассировки области неоднозначности.

Детектор границ Кэнни имеет низкий уровень ошибок, правильную локализацию и минимизацию откликов на одну границу. Таким образом, при правильной настройке, детектор не выявляет шумы в качестве ложных границ, правильно и целиком определяет линию границы и реагирует на каждую границу один раз.

4.2 Оператор Собеля

Оператор Собеля выделяет области, имеющие высокую пространственную частоту, которые соответствуют краям, используя двухмерное измерение пространственного градиента изображения. Он вычисляет градиент яркости в каждой точке на изображении, с помощью чего находит величину изменения яркости и ее направление. Результат показывает

изменения яркости изображения в каждой точке, то есть вероятность нахождения точки на границы, а также ориентацию. Обычно он используется для нахождения приблизительной абсолютной величины градиента в каждой точке входного изображения в градациях серого.

Результат оператора в точке, которая находится в постоянной яркости – это нулевой вектор. А точки, находящиеся в границе с различной яркостью – это вектор, который пересекает границу в направлении возрастания яркости.

Оператор Собеля использует фильтрацию изображения на основе свертки по горизонтали и вертикали, поэтому он легко вычисляется. Оператор использует матрицу 3×3 , благодаря которой свертывает исходное изображение для дальнейшего вычисления приближенных производных по горизонтальным и вертикальным направлениям [34].

4.3 Оператор Превитта

Данный алгоритм работает по принципу определения максимального отклика на множестве используемой матрицы для обнаружения локальной ориентации границ в каждом пикселе. Для этого используются различные матрицы. Из одной матрицы можно получить восемь, переставляя ее коэффициенты.

Оператор Превитта используется для обнаружения границ изображения. Оператор Превитта обнаруживает оба типа ребер, а именно:

- горизонтальные края или вдоль оси X;
- вертикальные края или вдоль оси Y.

Везде, где происходит внезапное изменение интенсивности пикселей, оператор обнаруживает край. Поскольку край определяется как изменение интенсивности пикселей, его можно рассчитать с помощью дифференцирования. Маска Превитта является производной маской первого порядка. В графическом представлении результата Превитта-маски ребро представлено локальными максимумами или локальными минимумами.

Как первая, так и вторая производная маски следуют этим трем свойствам:

- больший вес означает большее обнаружение краев;
- в маске должен присутствовать противоположный знак;
- сумма значений маски должна быть равна нулю.

Этот метод еще называют подстановкой шаблонов границ. Изображению сопоставляется набор шаблонов, каждый из которых показывает расположение границ. Тогда расположение границы в пикселе формируется шаблоном, который больше всех соответствует близлежащему в окрестности пикселю [34].

Основное отличие от оператора Собеля, придающего меньшее значение точкам, удаленным от центрального пикселя, состоит в том, что фильтр Превитта использует одинаковый вес для всех пикселей, попадающих под маски [35].

4.4 Перекрестный оператор Робертса

Перекрестный оператор Робертса также выполняет измерение двухмерного пространственного градиента на изображении. В наиболее распространенном использовании входные данные для оператора представляют собой изображение в градациях серого, как и выходные данные. Значения пикселей в каждой точке выходных данных представляют предполагаемую абсолютную величину пространственного градиента входного изображения в этой точке.

Теоретически оператор состоит из пары ядер свертки 2×2 . Эти ядра, предназначенные для максимального реагирования на края, расположены под углом 45° к пиксельной сетке, по одному ядру для каждой из двух перпендикулярных ориентаций. Ядра можно применять отдельно к входному изображению, чтобы произвести отдельные измерения компонента градиента в каждой ориентации. Затем их можно объединить вместе, чтобы найти

абсолютную величину градиента в каждой точке и ориентацию этого градиента.

Основная причина использования оператора Робертса заключается в том, что он очень быстро вычисляется. Необходимо проверить только четыре входных пикселя, чтобы определить значение каждого выходного пикселя, и в расчетах используются только вычитания и сложения. Кроме того, нет никаких параметров для установки. Его основные недостатки заключаются в том, что, поскольку он использует такое маленькое ядро, он очень чувствителен к шуму. Он также дает очень слабую реакцию на подлинный край, если только они не очень острые. Оператор Собеля в этом отношении работает намного лучше [36].

4.5 Преобразование Хафа

Преобразование Хафа — это метод, который можно использовать для выделения элементов определенной формы на изображении. Поскольку требуется, чтобы желаемые признаки были заданы в некоторой параметрической форме, классическое преобразование Хафа чаще всего используется для обнаружения правильных кривых, таких как линии, окружности, эллипсы и другое. Обобщенное преобразование Хафа может использоваться в приложениях, где простое аналитическое описание признаков невозможно. Несмотря на свои доменные ограничения, классическое преобразование Хафа сохраняет множество применений, поскольку большинство анализируемых изображений содержат границы признаков, которые можно описать регулярными кривыми. Основное преимущество метода преобразования Хафа заключается в том, что он терпим к пробелам в описании границ признаков и относительно не зависит от шума изображения.

Преобразование Хафа можно использовать для определения параметров кривой, которые лучше всего соответствуют набору заданных граничных точек. Это описание ребра обычно получают с помощью оператора

обнаружения признаков, такого как детектор Робертса, Собеля или Кэнни. Оно может быть зашумленным, то есть может содержать несколько фрагментов ребер, соответствующих одному целому признаку. Более того, поскольку выходные данные детектора границ определяют только то, где на изображении находятся признаки, работа преобразования Хафа состоит в том, чтобы определить, каковы эти признаки, то есть обнаружить признаки, для которых он имеет параметрическое описание сколько из них существуют на изображении.

Идея, лежащая в основе метода Хафа для обнаружения линий, заключается в том, что каждое входное измерение, например, координатная точка, указывает свой вклад в согласованное в глобальном масштабе решение, такое как, например, физическая линия, дающая начало этой точке изображения [37].

4.6 Сравнение алгоритмов

Из выполненного обзора существующих алгоритмов сегментации, можно сделать вывод, что они работают по-разному для различных задач. Для задачи распознавания глобул на микрофотографии были выделены следующие критерии сравнения: точность, скорость работы алгоритма, наличие готовых решений и простота использования.

Для выбора оптимального алгоритма сегментации для решения поставленной задачи был произведен сравнительный анализ ранее рассмотренных алгоритмов. Оценка производилась с использованием шкалы от 1 до 5 (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение алгоритмов сегментации

Алгоритм	Скорость	Точность	Подавление шумов	Простота реализации
Оператор Кэнни	5	3	5	4
Преобразование Хафа	5	4	4	5

Продолжение таблицы 3 – Сравнение алгоритмов сегментации

Алгоритм	Скорость	Точность	Подавление шумов	Простота реализации
Оператор Собеля	2	4	5	3
Оператор Превитта	2	3	5	3
Оператор Робертса	5	2	1	2

После проведенного сравнительного анализа можно сказать о наибольшей эффективности оператора Хафа, который представляет из себя вычислительный алгоритм, применяемый для параметрической идентификации геометрических элементов растрового изображения. Глобулы эмульсии на микрофотографии, как правило, представляют из себя окружности, таким образом, оператор Хафа применим для их сегментации.

5 Экспериментальная часть

5.1 Проведение экспериментов с целью выявления оптимального режима работы устройства для подготовки эмульсии

Оптимальным считается режим, обеспечивающий весь диапазон частиц в одном образце. Нефтяные эмульсии могут быть грубодисперсными – с глобулами размером от 50 до 100 мкм, среднедисперсными – с глобулами размером от 20 до 50 мкм, и мелкодисперсными – с глобулами размером от 1 до 20 мкм [38]. Таким образом в одной пробе должны быть частицы размером от 1 до 100 мкм. Для нахождения оптимального режима работы устройства для подготовки эмульсии было проведено порядка 50 экспериментов, в ходе которых изменялось процентное соотношение объемов воды и масла, время работы насоса, производительность насоса.

При высокой доле объема масла (от 20 до 15 %) получаются высококонцентрированные эмульсии, расстояния между оболочками глобул минимальные или отсутствуют, сегментирование изображений таких эмульсий с помощью классических методов затруднительно (рисунок 24).



Рисунок 24 – Водомасляная эмульсия с содержанием 20 % масла при увеличении 10х

При содержании масла (1 – 3) % наблюдается обратная картина, при этом значительно уменьшается средний размер глобул (рисунок 25).

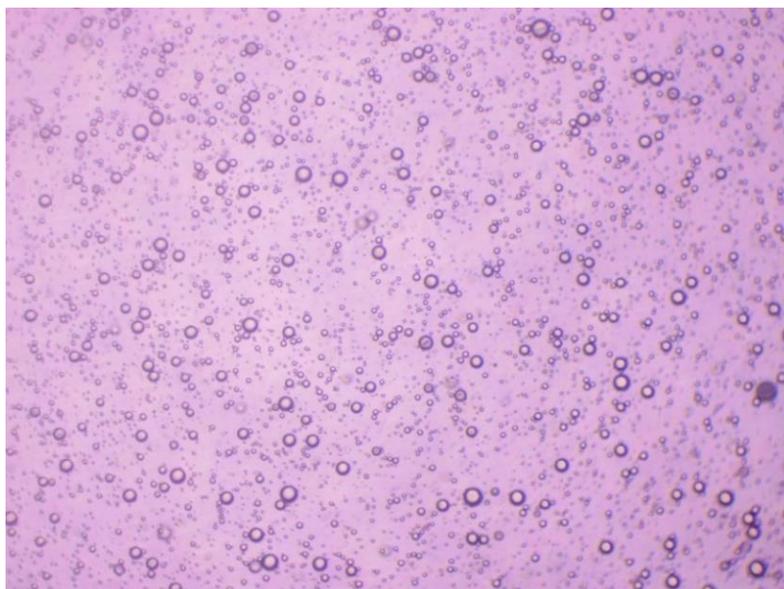


Рисунок 25 – Водомасляная эмульсия с содержанием 3% масла при увеличении 10х

Наиболее однородная картина наблюдается при наибольшем времени работы (10 минут) и максимальной производительности насоса (350 л/час) – размер глобул дисперсной фазы в таком случае составляет (1 – 15) мкм (рисунок 26). Нам же необходимо решить обратную задачу – получить как можно более неоднородную эмульсию.

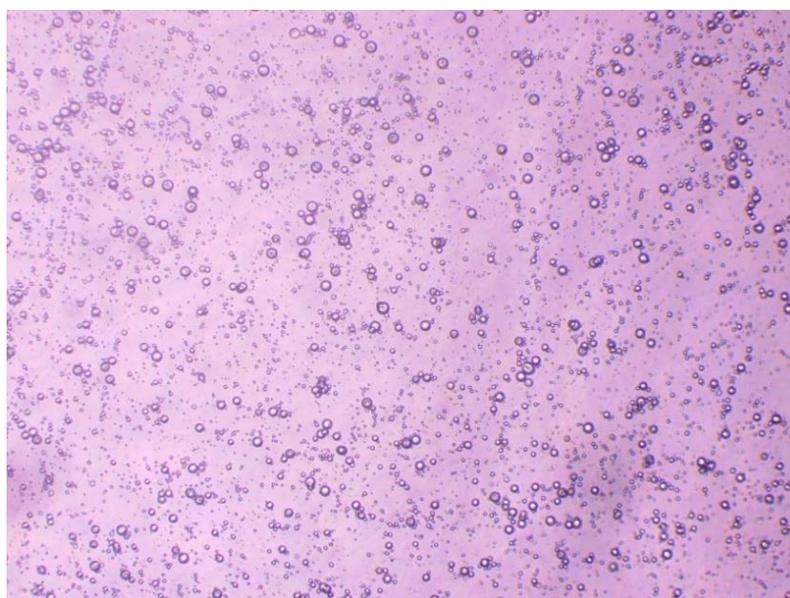


Рисунок 26 – Водомасляная эмульсия с содержанием 5 % масла при увеличении 10х

Микрофотография глобул, полученных в оптимальном режиме работы представлена на рисунке 27. Максимальный размер глобул эмульсии,

приготовленной в оптимальном режиме, составил 110,34 мкм, минимальный 0,97 мкм.

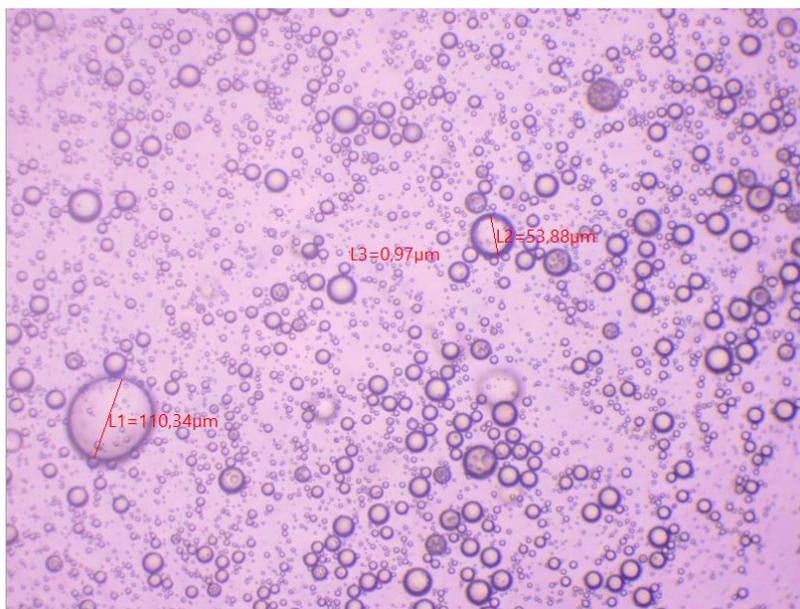


Рисунок 27 – Водомасляная эмульсия с содержанием 5 % масла при увеличении 40х

Оптимальный режим имеет следующие параметры: время замешивания – 4 минуты, производительность насоса 225 л/час, соотношение объемов воды и масла – 95 и 5.

5.2 Проведение экспериментов с целью получения статистической характеристики распределения глобул эмульсии по размерам

Исследование дисперсного состава эмульсии в статических и динамических образцах с целью получения статистической характеристики распределения капель дисперсной фазы по размерам.

В статическом режиме на ячейку подается порция эмульсии, затем происходит процесс создания и анализа микрофотографий. Анализ микрофотографии представляет из себя распознавание и сегментирование глобул эмульсии. Было выявлено, что наиболее подходящим для этого алгоритмом является преобразование Хафа – вычислительный алгоритм, применяемый для параметрической идентификации геометрических элементов растрового изображения. Программная реализация данного

алгоритма на языке Python представлена на рисунке 28. Результат анализа микрофотографии эмульсии с помощью выбранного алгоритма в статическом режиме представлен на рисунке 29.

```
sizes = []
default_file = 'smarties.png'
filename = argv[0] if len(argv) > 0 else default_file
# Loads an image
src = image
# Check if image is loaded fine
if src is None:
    print ('Error opening image!')
    print ('Usage: hough_circle.py [image_name -- default ' + default_file + '] \n')
    return -1

gray = cv.cvtColor(src, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
gray = cv.GaussianBlur(gray,(11,11),1)
rows = gray.shape[0]
circles = cv.HoughCircles(gray, cv.HOUGH_GRADIENT_ALT, 2, 10,
                           param1=300, param2=0.8,
                           minRadius=0, maxRadius=70)

if circles is not None:
    circles = np.uint16(np.around(circles))
    for i in circles[0, :]:
        center = (i[0], i[1])
        # circle center
        cv.circle(src, center, 2, (0, 100, 100), 2)
        # circle outline
        radius = i[2]
        cv.circle(src, center, radius, (255, 0, 255), 2)
        sizes.append(radius)
```

Рисунок 28 – Программная реализация преобразования Хафа

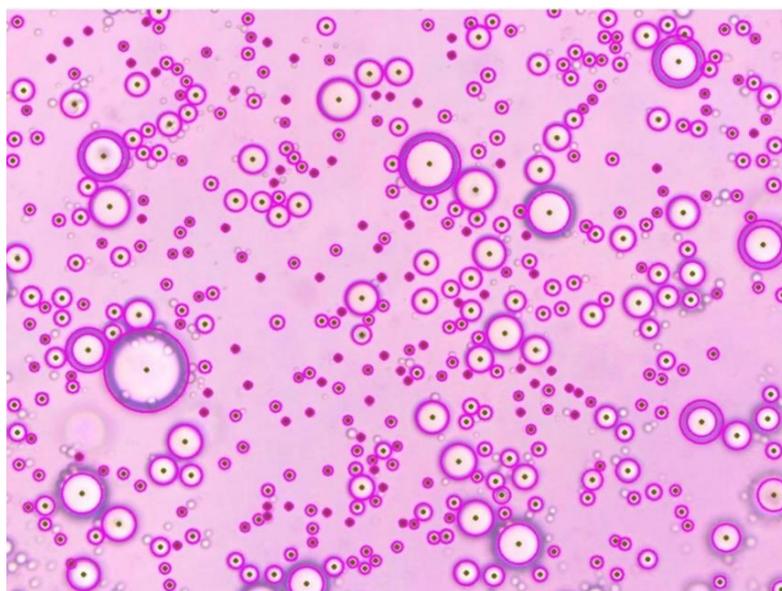


Рисунок 29 – Сегментирование глобул эмульсии в статическом режиме

Как видно из рисунка, алгоритм справляется с распознаванием порядка 91 % глобул и при этом охватывает все размеры глобул. Статистическая характеристика распределения размеров глобул эмульсии в статическом режиме представлена на рисунке 30. Программный код, реализующий построение статистической характеристики представлен на рисунке 31.

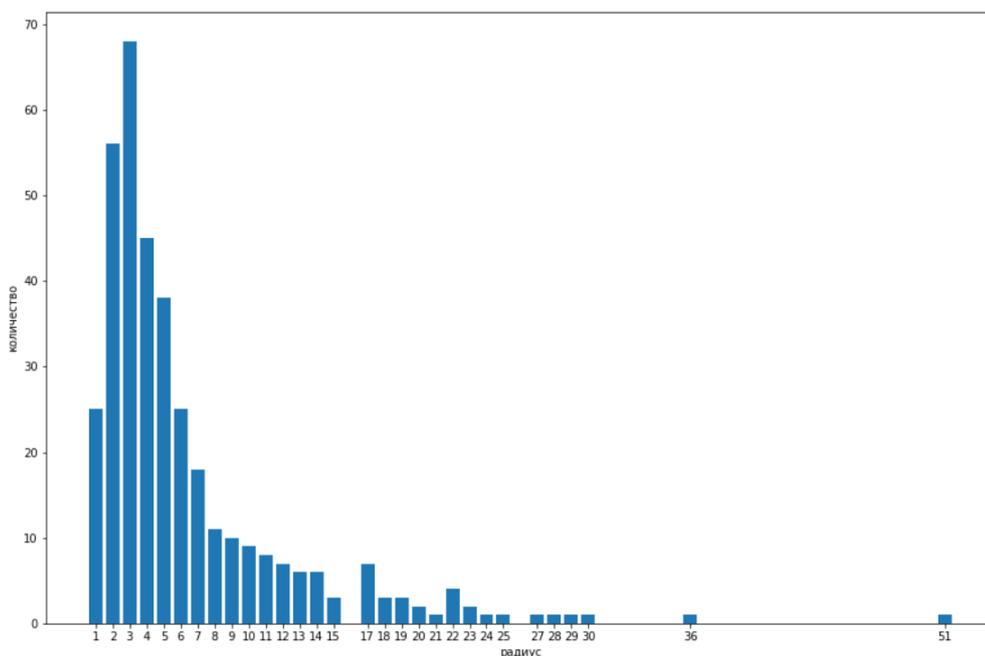


Рисунок 30 – Распределение размеров глобул эмульсии, полученное в статическом режиме работы системы

```
a = set(sizes[1])
a = list(a)

b = np.zeros(len(a))
for i in sizes[1]:
    index = a.index(i)
    b[index] += 1

b
matplotlib.pyplot.figure(figsize = (15,10))
matplotlib.pyplot.bar(a,b)
matplotlib.pyplot.xlabel("радиус")
matplotlib.pyplot.ylabel("количество")
matplotlib.pyplot.xticks(a)
```

Рисунок 31 – Программный код, реализующий построение распределения размеров глобул

В динамическом режиме работы происходил захват видеокадров. Скорость съемки видео – 6 кадров в секунду, в динамическом режиме порция

эмульсии в оптической ячейке полностью обновляется каждые 2 секунды, таким образом, для анализа видеоряда использовался каждый 12 кадр. Результаты статистического анализа видеоряда длительностью 10 секунд представлены на рисунке 32.

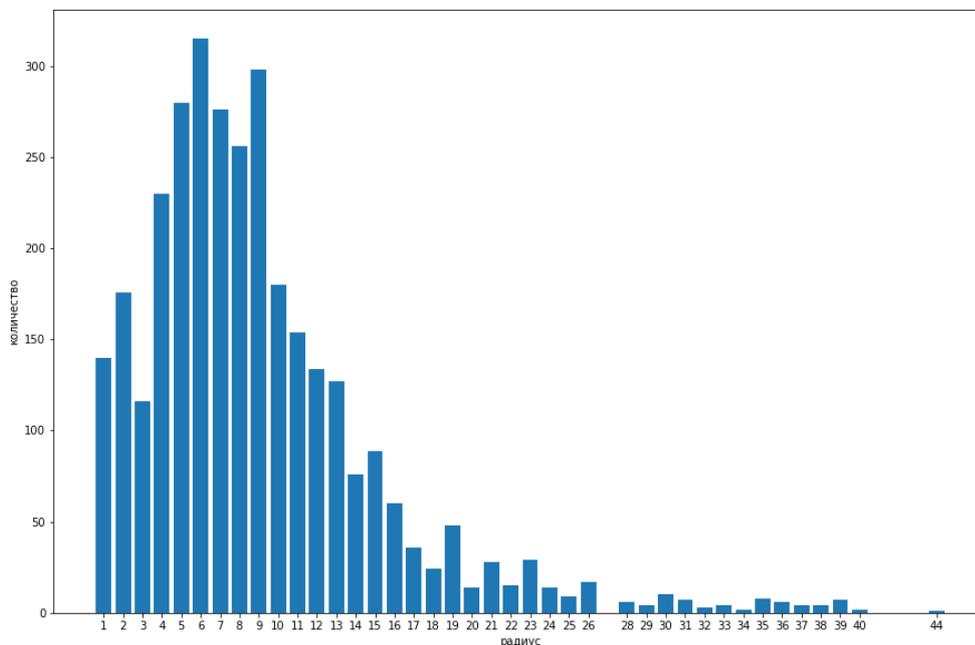


Рисунок 32 – Распределение размеров глобул эмульсии, полученное в статическом режиме работы системы

Статический режим дает неполную картину о дисперсном составе эмульсии, однако его использование оптимально для наблюдения за такими свойствами эмульсии как скорость деградации и долговременная стабильность, помимо этого данный режим можно использовать для исследования различных воздействий на глобулы – воздействовать возможно на эмульсию, находящуюся в оптической ячейке и в режиме реального времени наблюдать физические эффекты, происходящие с глобулами. Динамический режим работы дает более полную картину о размерах дисперсной фазы, поскольку для анализа используется значительно больший объем анализируемых образцов. Данный режим целесообразно использовать непосредственно для получения данных о дисперсном составе эмульсии.

6 Концепция стартап-проекта

Объектом разработки является автоматизированный оптический анализатор размеров глобул нефтяной эмульсии.

Система включает в себя аппаратную и программную часть. Аппаратная часть включает в себя моторизированный микроскоп, цифровую камеру, модуль для подготовки эмульсии и блок управления. Программная часть осуществляет управление положением предметного столика относительно объектива микроскопа, распознавание глобул эмульсии, сбор данных и формирование отчетов.

Область применения системы - лабораторные и учебные организации, осуществляющие исследования в области подготовки нефти.

6.1 Описание продукта

Продуктом является анализатор размеров глобул эмульсии, который представляет из себя систему, производящую анализ дисперсного состава с помощью машинного зрения.

Основным элементом конструкции разрабатываемой системы (рисунок 33) является микроскоп с вмонтированной в него камерой. Разрешающая способность оптического микроскопа составляет порядка (0,2-0,3) мкм. Также система включает в себя устройство для подготовки эмульсии, с которого жидкость подается на предметный стол микроскопа с помощью насоса.

К основным техническим характеристикам анализатора размеров глобул эмульсии можно отнести следующие:

- содержание дисперсной фазы в анализируемом образце от 5 до 50 %;
- минимальный размер анализируемых частиц 1 мкм;
- максимальный размер анализируемых частиц 100 мкм;
- исполнение настольное, габариты 600*700*700 мм;
- метод измерения дисперсного состава анализируемых образцов - оптический;

- возможность измерения статического и динамического образца;
- скорость движения потока эмульсии в динамическом режиме не более 0,01 м/с;
- частота измерений в динамическом режиме не менее 0,1 Гц.

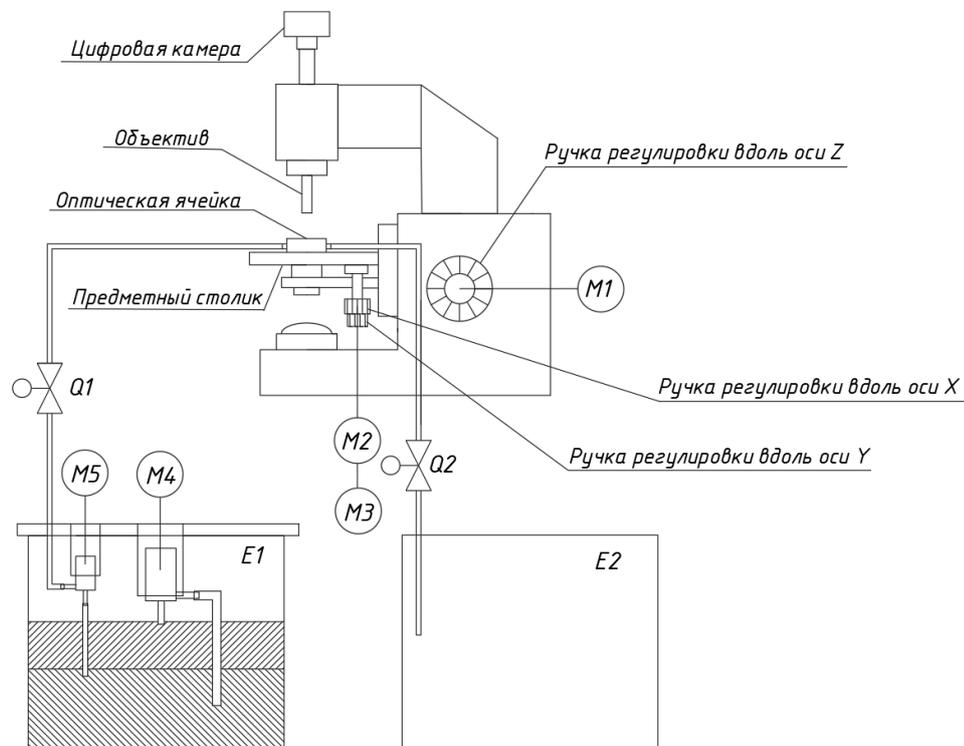


Рисунок 33 – Конструкция стенда

Здесь E1 – емкость для подготовки эмульсии, E2 – техническая емкость, M1 – электропривод для перемещения предметного столика вдоль оси OX, M2 – электропривод для перемещения предметного столика вдоль оси OY, M3 – электропривод для перемещения предметного столика вдоль оси OZ, M4 – насос для подготовки эмульсии, M5 – насос для подачи эмульсии в оптическую ячейку, Q1, Q2 – клапаны.

Предусмотрено два режима работы системы – статический и динамический.

В статическом режиме работа системы должна осуществляться следующим образом. На первом этапе происходит подготовка эмульсии. Далее небольшая порция эмульсии подается на предметный столик микроскопа через предметные стекла с помощью насоса M4 и клапана Q1. Затем происходит настройка положения предметного столика относительно

микроскопа. Далее происходит процесс создания и анализа фотографий. После чего эмульсия удаляется в емкость Е2. Динамический режим работы системы обеспечивает работу системы в условиях прогона эмульсии через микроскоп.

6.2 Интеллектуальная собственность

Подготовлена заявка на результат интеллектуальной деятельности – патент на изобретение «Устройство для определения размеров глобул водомасляных эмульсий», а также производится комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию описанной системы. Заявка на регистрацию прав на результаты интеллектуальной деятельности подана в Федеральный институт промышленной собственности 18.04.22.

6.3 Объем и емкость рынка

На сегодняшний день анализ размеров глобул нефтяной эмульсии на промыслах проводится вручную, (1-2) раза в месяц. Автоматизированные анализаторы размеров частиц на данный момент в нефтяной промышленности не используются. Таким образом, рынок нефтяной промышленности для данного продукта является новым.

Роль нефтяной промышленности в экономике России определяется значимостью в формировании экспортных и бюджетных доходов, а также большой кооперацией с другими секторами и отраслями национальной экономики. Российская нефтепромышленность имеет объективные конкурентные преимущества на мировом рынке — это мощная ресурсная база и развитая инфраструктура. Объем добычи нефти в России по 9 крупнейшим компаниям за 2019-2021 годы представлен в таблице 4 [39].

Таблица 4 – Объем добычи нефти в 2019-2022 гг.

№ п/п	Наименование компании	Объем добычи в 2019 г. млн. тонн	Объем добычи в 2020 г. млн. тонн	Объем добычи в 2021 г. млн. тонн
1	«Роснефть»	195,11	179,96	170,73
2	«Лукойл»	82,12	73,43	75,73
3	«Сургутнефтегаз»	60,76	54,75	55,45
4	«Газпром нефть»	39,15	38,92	38,57
5	«Татнефть»	29,8	26,01	27,83
6	«Башнефть»	18,67	12,93	13,77
7	"Славнефть"	13,97	8,04	9,85
8	"НОВАТЭК"	8,41	9,71	8,05
9	"РуссНефть"	7,12	6,4	6,68

Как можно заметить, существует тенденция уменьшения объемов добычи нефти в силу того, что с каждым годом запасы исчерпываются, продуктивные горизонты становятся более глубокими, что существенно усложняет условия добычи.

Повышение эффективности и рентабельности является одной из приоритетных задач нефтегазового сектора отечественной экономики. Однако научные достижения, имеющиеся в данной области, требуют дальнейшего развития. В частности, не решены вопросы недостатка входных данных для разработки достоверных математических моделей процессов разрушения нефтяной эмульсии, потребность в которых может закрыть разрабатываемый продукт.

6.4 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

На сегодняшний день ситуация на рынке нефтегазового оборудования отличается значительной неопределенностью. Эксперты полагают, что сокращение объема рынка нефтегазового оборудования в новых экономических условиях неизбежно, а темпы его восстановления будут определяться скоростью возвращения мировой экономики к нормальному функционированию.

По мнению аналитиков MegaResearch, производство оборудования для нефтегазовой промышленности в 2020 году потеряет от 3 до 9 % в зависимости от темпов выхода экономики из рецессии, вызванной пандемией коронавируса и связанными с ней ограничениями. В рамках базового прогноза аналитики маркетингового агентства закладывают снижение объема рынка на (5 – 6) % в 2020 году и постепенный восстановительный рост до докризисного уровня к концу 2022 года — началу 2023 года [40].

Несколько лет назад в перечне российских производителей оборудования для ТЭК, по данным Минэнерго России, числилось 300 предприятий, но их реальный потенциал был недостаточным для закрытия потребностей отрасли. К 2015 году зависимость нефтегазового комплекса от импорта дошла до критической черты, в связи с чем был утвержден план мероприятий по импортозамещению. В 2020 году, по данным Минпромторга, каждая вторая единица нефтегазового оборудования на российском рынке стала производиться в РФ. На сегодняшний день стоит вопрос о полном импортозамещении.

В последние десять лет нефтегазовые компании активно развивают инвестиционные проекты в сфере добычи и переработки нефти и газа. Общая стоимость инвестиционных программ крупнейших представителей отрасли в 2019 году составила 8,96 млрд. рублей, что на 4,6 % меньше аналогичного показателя 2018 года. В 2020 году многие нефтегазовые компании пересмотрели собственные инвестиционные программы, их сокращение

составило порядка 35 %. Компании предпочли вкладываться в модернизацию имеющихся установок и другого оборудования, вместо того чтобы приобретать новое [41].

Реализация крупных инвестиционных проектов в нефтегазовой отрасли не способствует интенсивному росту производства нефтегазового оборудования. Одна из причин заключается в отсутствии достаточных производственных мощностей [42].

В производстве нефтегазового оборудования инвестиционных проектов немного, большинство из них связаны с модернизацией действующих производств. Строительство новых заводов, выпускающих оборудование, идет темпами, недостаточными для обеспечения импортозамещения. Несмотря на то, что крупное оборудование, используемое отечественными компаниями для добычи нефти и газа, в основном производится в России, в остальных сегментах рынка высока доля импорта.

Сегодня все больший интерес к запасам трудноизвлекаемой нефти проявляют правительство и крупные нефтедобывающие компании. В России доля «трудной» нефти растет, и на данный момент она превышает 65 % от общего объема [43]. Добыча и подготовка нефти в ряде регионов (Среднее Поволжье, Южный Урал) имеет специфику, связанную с высокой степенью обводнённости скважин. Все это обуславливает поиск новых способов автоматизированного управления технологическим процессом разрушения нефтесодержащей смеси. В процессе подготовки нефти необходимо обеспечить производительность (количество выходного продукта в единицу времени), а также качество товарной нефти, определяемое по ГОСТ Р 51858 – 2002. Обеспечение максимальной производительности при сохранении качества товарной нефти является серьёзной проблемой, требующей новых научных подходов и технических решений.

6.5 Планируемая стоимость продукта

Для определения планируемой стоимости продукта произведем расчет затрат на разработку. Текущие затраты, связанные с производством измерительной системы представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Текущие переменные затраты

№	Вид затрат	Стоимость, руб.	Доля, %
1	Заработная плата на проектную работу	1 620 000	58.6 %
2	Начисление на заработную плату	486 000	17.6 %
3	Оборудование, технологии, материалы, сырье, комплектующие	543 600	19.7 %
4	Оплата работ соисполнителей и сторонних организаций	20 000	0.7 %
5	Прочие общехозяйственные расходы	93 000	3.4 %
	ИТОГО	2 762 600	100.0 %

Самая большая доля затрат на разработку стенда приходится на заработную плату – 58,6 %. Расходы на оплату труда рассчитаны исходя из должности и опыта членов команды (таблица 6).

Таблица 6 – Затраты на оплату труда

Должность	Ставка	Оклад в мес., руб.	ФОТ в мес., руб.	НДФЛ (13 %), руб.	Заработная плата (на руки), руб.	ФОТ в год, руб.
Руководитель проекта	1	50 000	50 000	6 500	43 500	600 000
Научный руководитель	0.5	50 000	25 000	3 250	21 750	300 000
Программист	0.5	50 000	25 000	3 250	21 750	300 000
Инженер	1	35 000	35 000	4 550	30 450	420 000
Итого			130 000	16 900	113 100	1 560 000

Расходы на заработную плату труда рассчитаны с учетом длительности разработки 1 год. На заработную плату необходимо начислять отчисления в

следующие социальные фонды: пенсионный фонд, фонд социального страхования, федеральный фонд обязательного медицинского страхования. Отчисления на заработную плату составили 17,6 % (таблица 7).

Таблица 7 – Отчисления в социальные фонды

Должность	ФОТ в мес., руб.	ПФР (22 %), руб.	ФСС (2,9 %), руб.	ФФОМС (5,1 %), руб.	Взносы в мес., руб.	Взносы в год, руб.
Руководитель проекта	50 000	11 000	1 450	2 550	15 000	180 000
Научный руководитель	25 000	5 500	725	1 275	7 500	90 000
Программист	25 000	5 500	725	1 275	7 500	90 000
Инженер	35 000	7 700	1 015	1 785	10 500	126 000
ИТОГО	135 000	29 700	3 915	6 885	40 500	486 000

Затраты на оборудование, технологии, материалы, сырье и комплектующие составили 19,7 % (приложение В).

Обращение к сторонней организации обусловлена необходимостью изготовления деталей стенда с помощью 3Д-принтера. Оплата работ сторонних организаций составляет 0,7 % (таблица 8).

Таблица 8 - Оплата работ сторонних организаций

Наименование работы	Соисполнитель	Стоимость, руб.
3-Д печать	ГК "Центр 3d технологий"	20 000

Прочие общехозяйственные расходы составили 3,4 % (таблица 9).

Таблица 9 – Прочие общехозяйственные расходы

№	Наименование расходов	Стоимость в мес., руб.	Стоимость в год, руб.
1	Услуги банков по обслуживанию банковского счета	750	9 000
2	Бухгалтерское обслуживание	5 000	60 000

Продолжение таблицы 9 - Прочие общехозяйственные расходы

№	Наименование расходов	Стоимость в мес., руб.	Стоимость в год, руб.
3	Приобретение канцелярских товаров	1 000	12 000
4	Транспортные услуги по доставке сырья, материалов, комплектующих	1 000	12 000
	Итого	7 750	93 000

Таким образом, были произведены расчеты на разработку опытного образца продукта. Для того, чтобы рассчитать стоимость самого продукта, необходимо определиться с технологией коммерциализации.

В качестве технологии коммерциализации были выбраны производство и продажи разрабатываемого продукта, а также стратегия лицензирования технологии, которая подразумевает владение правами и обслуживание патента или технологии автором или собственником с передачей прав на ее использование по лицензионному договору третьим лицам. В данном случае возможно условие получения регулярных платежей за пользование интеллектуальной собственностью. Это также относительно низкозатратный путь коммерциализации, требующий лишь грамотной поддержки патентов. Стратегия наиболее подходящая и удобная для университетов как собственников всех разработок, реализуемых учеными [44].

Для стратегии лицензирования наиболее выгодным является вариант оформления неисключительной лицензии с периодическими выплатами, которые будут представлять из себя 5 % от стоимости продажи каждого продукта.

Оценим себестоимость продукта, она будет отличаться от стоимости разработки, поскольку заработная плата на разработку сильно отличается от заработной платы при производстве одной единицы продукта. В таблице 10 приведен расчет на оплату труда, рассчитанный из того, что для сборки одной системы привлекаются монтажник и инженер-технолог по договору ГПХ.

Таблица 10 – Затраты на оплату труда

Категория работников	Кол-во человек	Форма оплаты труда		
		Договор ГПХ, руб. за день	Количество дней для сборки 1 ед.	Итого, руб.
Монтажник	1	2000	2	4000
Инженер-технолог	1	3000	2	6000
Итого				10000

Привлекая рабочих по договору ГПХ, необходимо начислять отчисления в пенсионный фонд и фонд обязательного медицинского страхования (таблица 11).

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетный фонды

Фонд	Оплата труда, руб.	Процент, отчисляемый во внебюджетный фонд, %	Итого, руб.
ПФР	10000	22	2200
ОМС		5.1	510
Итого			2710

Таким образом, себестоимость продукта составляет 576 310 рублей (таблица 12).

Таблица 12 – Затраты на производство единицы продукции

№	Вид затрат	Стоимость, руб.	Доля, %
1	Заработная плата на проектную работу	10 000	1.74 %
2	Начисление на заработную плату	2 710	0.47 %
3	Оборудование, сырье, комплектующие	543 600	94.32 %
4	Оплата работ соисполнителей и сторонних организаций	20 000	3.47 %
	Итого	576 310	100.00 %

Исходя из себестоимости продукта и стоимости аналогов, рыночная цена может составлять не менее 4 000 000 рублей. Это связано с

необходимостью получения прибыли предприятием, а также сложным и дорогостоящим процессом лицензированием лабораторного оборудования.

6.6 Конкурентные преимущества и сравнение технико-экономических показателей с аналогами

В таблице 13 представлены аналоги разрабатываемой системы.

Таблица 13 – Конкурентный анализ

Модель	Диапазон измерения	Принцип измерения	Цена	Учет формы глобул	Анализ эмульсий
Malvern Mastersizer 2000	(0,01-3500) мкм	Лазерная дифракция	Более 7 млн руб	нет	да
Fritsch Analysette 22 NeXT Nano	(0,01-2100) мкм	Лазерная дифракция	Более 6,5 млн руб	нет	да
Микросайзер 201	(0,2-600) мкм	Лазерная дифракция	Более 9 млн руб	нет	да
Microtrack CAMSIZER P4	(20-3000) мкм	Оптический	Более 10 млн руб	нет	нет

На сегодняшний день на рынке представлены, как правило, лазерные анализаторы размера частиц. К недостаткам метода лазерной дифракции можно отнести невозможность анализа по форме частиц, также невозможно сравнение результатов с данными, полученными при использовании других методов определения состава, такими как оптическая микроскопия, ситовой анализ, кроме того, зачастую лазерный анализаторы подходят только для твердых частиц, модификации с возможностью исследования эмульсий (Микросайзер, Mastersizer 2000) стоят значительно дороже.

Классическим методом определения дисперсного состава эмульсий является оптическая микроскопия. Этот метод имеет простейшую реализацию и обеспечивает распределение размеров капель эмульсии непосредственно по результатам измерений отдельных капель, без математической обработки полученных данных. Еще одним преимуществом является возможность

исследовать непрозрачные и концентрированные системы без разбавления. Эти характеристики делают оптическую стандартной методикой анализа дисперсного состава, и результаты, полученные другими методами, обычно подтверждаются этим методом.

Представленные на рынке оптические анализаторы подходят для анализа дисперсного состава суспензий и сухих смесей и не пригодны для анализа размеров глобул эмульсий.

Конкурентными преимуществами разрабатываемого оптического анализатора являются:

- учет формы и положения глобул;
- использование технологии машинного зрения;
- возможность автоматического пробоотбора;
- относительно низкая стоимость технологии;
- наличие динамического режима работы.

6.7 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта

Основными потребителями разрабатываемого продукта являются:

- нефтедобывающие компании, имеющие учебные центры и научные лаборатории;
- производственные компании, занимающиеся производством и поставкой нефтяного и газового оборудования;
- университеты и техникумы, имеющие нефтегазовые направления подготовки специалистов.

Проведем оценку возможного объема обозначенного рынка. Результаты анализа объема рынка приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Возможный объем рынка

Характеристики	Нефтяные и газовые компании	Производственные компании	Университеты, техникумы
Местонахождение	РФ	РФ	РФ

Продолжение таблицы 14 – Возможный объем рынка

Характеристики	Нефтяные и газовые компании	Производственные компании	Университеты, техникумы
Решаемая проблема	Низкая эффективность подготовки нефти	Неудовлетворенный спрос нефтяных компаний	Недостаточная квалификация кадров
Количество	300	93	108

Оценим объем сегмента «нефтедобывающие компании, имеющие учебные центры и научные лаборатории» по количеству научно-исследовательских лабораторий: в России их число составляет около 300. Сегмент «производственные компании, занимающиеся производством и поставкой нефтяного и газового оборудования» и «университеты и техникумы, имеющие нефтегазовые направления подготовки специалистов» оценим по их количеству на территории Российской Федерации.

6.8 Бизнес-модель проекта

Для успешной реализации проекта выработка бизнес-модели является ключевой, особенно для описания бизнес-плана и дальнейшего продвижения на рынке. В приложении Г описана бизнес-модель по А.Остервальдеру.

6.8.1 Производственный план

В таблице 15 указаны оборудование и материалы, необходимые для разработки анализатора на основе машинного зрения и первого года продаж. Таблица 15 – Оборудование, технологии, ПО, доступ к сервисам, материалы, сырье, комплектующие

№	Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	1 год		2 год	
				Кол-во	Стоимость, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
1	Микроскоп	шт	200 000	1	200 000	6	1 200 000
2	Насос мембранный	шт	1 000	1	1 000	6	6 000

Продолжение таблицы 15 – Оборудование, технологии, ПО, доступ к сервисам, материалы, сырье, комплектующие

№	Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	1 год		2 год	
				Кол-во	Стоимость, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
3	Насос-помпа	шт	500	1	500	6	3 000
4	Ноутбук	шт	65 000	1	65 000	6	390 000
5	Источник питания программируемый	шт	80 000	1	80 000	6	480 000
6	Емкость для подготовки эмульсии	шт	500	2	1 000	12	6 000
7	Трубки ПВХ	м	500	10	5 000	60	30 000
8	Предметное стекло	шт	300	1	300	6	1 800
9	Хомуты d12	шт	50	6	300	36	1 800
10	Герметик	шт	700	1	700	6	4 200
11	Шаговые двигатели NEMA 17	шт	30 000	3	90 000	18	540 000
12	Драйвер шагового двигателя	шт	5 000	3	15 000	18	90 000
13	Муфта соединительная гибкая	шт	20 000	3	60 000	18	360 000
14	Смазка силиконовая SILICOT универсальная	шт	500	2	1 000	12	6 000
15	Отладочная плата STM32F411 Nucleo-64	шт	7 000	1	7 000	6	42 000
16	Подшипник радиальный	шт	400	2	800	12	4 800
17	Филамент PETG TM	шт	3 000	2	6 000	12	36 000
18	Блок питания 24В	шт	3 000	1	3 000	6	18 000
19	Соединительные провода	шт	500	2	1 000	12	6 000
20	Концевые выключатели	шт	2000	3	6 000	18	36 000
	ИТОГО				543 600		3 261 600

В таблице 16 указана оплата работы соисполнителя – компании ГК "Центр 3d технологий", производящей 3-Д печать.

Таблица 16 – Оплата соисполнителей и сторонних организаций

Вид расходов	Цена, руб.	1 год		2 год	
		Кол-во	Стоимость, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
3-Д печать	20 000	1	20000	6	120000

В таблице 17 указаны прочие (административные и хозяйственные) расходы.

Таблица 17 – Прочие расходы

№	Наименование расходов	Стоимость в мес., руб.	1 год	2 год
1	Услуги банков по обслуживанию банковского счета	1 500	18 000	216 000
2	Бухгалтерское обслуживание	20 000	240 000	2 880 000
3	Приобретение канцелярских товаров	2 000	24 000	288 000
4	Аренда помещения и коммунальные услуги	50 000	0	600 000
5	Транспортные услуги по доставке сырья, материалов, комплектующих	1 000	12 000	72 000
	ИТОГО	74 500	294 000	4 056 000

Текущие затраты, включающие в себя оборудование, технологии, ПО, доступ к сервисам, материалы, сырье, комплектующие, оплату работы соисполнителей и прочие расходы составили 7 437 600 рублей.

6.8.2 Организационная структура и оплата труда

Организационная структура компании представлена на рисунке 34. Согласно разработанной структуре, компания состоит из четырех отделов, которые находятся в подчинении генерального директора. Отдел программирования состоит из главного программиста и специалиста по машинному зрению и предназначен для разработки алгоритмов, созданию и внедрению программного обеспечения стенда. Отдел по сбору аппаратной части, состоящий из инженера-технологов и монтажников, предназначен для

сборки конструкции стенда. Отдел научно-исследовательской работы, предназначенный для поиска новых инженерных решений и модернизации продукта, состоит из руководителя НИР и находящегося у него в подчинении инженера-разработчика. Отдел продаж состоит из менеджера по продажам, который занимается поиском покупателей и оформлением сделок купли-продажи.

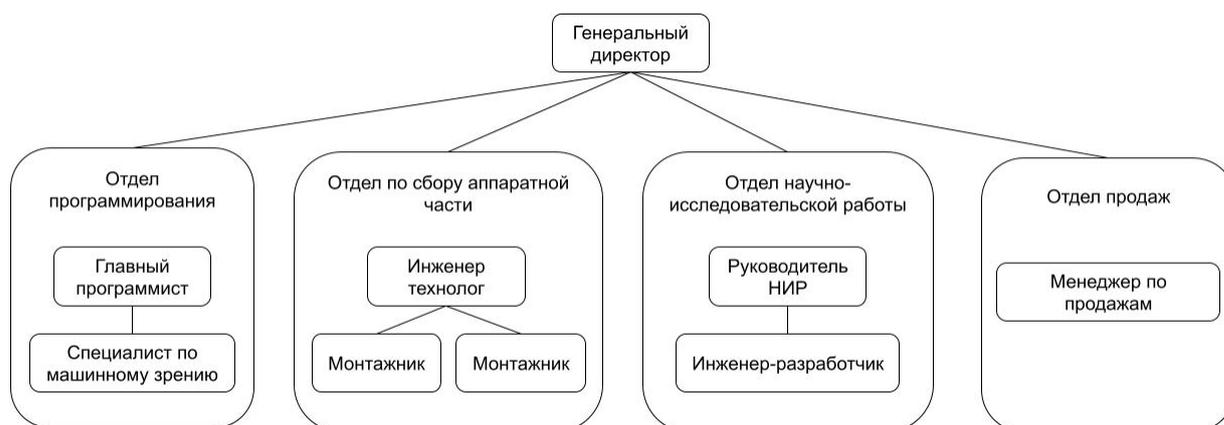


Рисунок 34 – Организационная структура

Во время этапа НИОКР организационная структура представляет из себя руководителя проекта и подчиненных ему руководителя НИР, технического специалиста и инженера. Их роли равнозначны генеральному директору, руководителю НИР, инженеру-разработчику и инженеру-технологу соответственно. Заработная плата за первые два года и начисления на заработную плату представлены в приложении Д.

Заработная плата и начисления на заработную плату за первые два года составили 3 510 000 рублей.

6.8.3 План продаж

После окончания этапа НИОКР, в первый год запуска производства планируется продажа продукта «Оптический анализатор размеров глобул». План продаж на 8 лет в случае технологии коммерциализации производство и продажи разрабатываемого продукта представлен в таблице 18.

Согласно плану продаж, после этапа НИОКР, во время второго года планируется продать 6 единиц продукта. После их успешного внедрения

ожидается увеличение продаж. Таким образом к окончанию восьмого года планируется повышение цены до 5 млн рублей и продажа 30 единиц продукта.

При этом показатели эффективности за первые два года составят:

- рентабельность продаж – 66 %;
- срок окупаемости проекта – 2 года;
- чистый дисконтированный доход – 2 544 313 рублей;
- рентабельность инвестиций – 1,92 руб/руб.

Таблица 18 – План продаж

	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год	7 год	8 год
Продукт	Оптический анализатор размеров глобул							
Количество	0	6	10	20	23	25	27	30
Цена, млн руб.	0	4	4	4,5	4,5	5	5	5
Выручка от П1, млн руб.	0	20	40	90	104	125	135	150

План продаж на 8 лет в случае технологии коммерциализации стратегия лицензирования технологии представлен в таблице 19.

Таблица 19 – План продаж

	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год	7 год	8 год
Продукт	Оптический анализатор размеров глобул							
Количество	5	7	10	20	30	40	40	5
Цена, тыс. руб.		200	200	225	225	250	250	250
Выручка от П1, млн руб.	0	1	1	1,575	2,25	5	7,5	7,5

При этом показатели эффективности за 8 лет года составят:

- рентабельность продаж – 79 %;
- срок окупаемости проекта – 6,98 года;
- чистый дисконтированный доход – 11 001 471 рублей;
- рентабельность инвестиций – 4,98 руб/руб.

Таким образом стратегия коммерциализации производство и продажи разрабатываемого продукта является более выгодной, однако более сложной в реализации и требующей больших вложений. Стратегия лицензирования технологии менее перспективна с точки зрения получения дохода, однако в этом случае трудности могут возникнуть только при получении лицензии, кроме того, данная стратегия может быть крайне актуальной в долгосрочной перспективе.

6.9 Стратегия продвижения

Продвижение продукта возможно, если покупатель готов приобрести продукт, который ему действительно нужен,

Цель продвижения продукта – доказать, что разрабатываемая система лучше других аналогов, так как принцип её работы основан на оптическом методе, реализуемом с помощью системы машинного зрения, что позволяет учитывать форму и положение глобул в эмульсии, а также реализовать автоматический пробоотбор и возможность динамического режима работы.

Можно выделить следующие способы продвижения продукта:

- расширение партнерских связей;
- участие в выставках газового и нефтяного оборудования;
- создание статей, видео для привлечения внимания к использованию системы;
- обучение пользования оборудованием;
- создание сайта.

7 Социальная ответственность

Разработка и эксплуатация объектов нефтегазовой промышленности неизбежно связаны с возможностью появления опасных производственных факторов, которые, в свою очередь, могут повлечь за собой аварийные ситуации. Поэтому невозможно отрицать важность рассмотрения безопасности эксплуатации оборудования. Данный раздел разработан с целью выявления технологических опасностей, возникновение которых возможно в процессе работы стенда, а также факторов, оказывающих негативное влияние на здоровье человека во время работы с оборудованием проектируемого стенда. Кроме того, необходимо определить пути исключения или ослабления выявленных опасных факторов и опасностей.

Стенд предназначен для получения статистических характеристик, а именно распределения по размерам глобул водомасляной эмульсии, а также для изучения физических свойств дисперсных систем и влияния различных воздействий на дисперсный состав водомасляных эмульсий и нефти, в частности. Таким образом, создание данного стенда способствует увеличению информационной базы для дальнейших исследований, а также экономии значительных средств на рассматриваемом этапе подготовки нефти.

Пользователями разработанной системы могут быть научно-исследовательские институты, а также образовательные учреждения, осуществляющие исследования в области подготовки нефти.

Стенд рассчитан на эксплуатацию одним человеком (оператором). Оператор подает на вход необходимые данные, выбирает режим работы, а также следит за показателями, выводимыми на экранных формах, и контролирует процесс работы стенда.

Рабочее место оператора представляет собой помещение, где располагается стенд физического подобия информационно-измерительной системы и ПК для управления работой стенда. Технологический процесс заключается во вводе входных данных, контроле основных параметров, а именно размеров дисперсной фазы и положения предметного столика

микроскопа, а также в формировании отчетов о распределении размеров глобул. Система, управляющая процессом подготовки эмульсии и проведения анализа состоит из насосов, клапанов, электроприводов, камеры микроскопа и ПК.

В данном разделе будут рассмотрены выявление и предупреждение наиболее характерных для проектируемого стенда опасных и вредных факторов, а также правовые вопросы регулирования трудовых отношений.

7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Права и обязанности работника и работодателя, вопросы охраны труда, профподготовки, переподготовки и повышения квалификации, трудоустройства, социального партнерства устанавливаются Трудовым кодексом Российской Федерации [45]. Также в кодексе закреплены правила оплаты и нормирования труда, порядок разрешения трудовых споров.

Согласно Трудовому кодексу, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Также статья 100 ТК РФ говорит о том, что режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели [45]. Для преподавателей и студентов ТПУ правила внутреннего распорядка организации устанавливают шестидневную рабочую неделю с одним выходным днем.

Разработка проектируемого стенда включает в себя использование клапанов и насосов, то есть технологического оборудования, которое, согласно статье 215 ТК РФ, должно соответствовать нормативным требованиям охраны труда. Это требование должно быть реализовано еще на стадии разработки проектной документации на эти объекты и затем — на стадии строительства, изготовления, модернизации.

Так как разработка стенда физического подобия «Исследование водомасляных эмульсий» проводилась с использованием компьютера (проектирование 3-д моделей, просмотр и обработка экспериментальных

значений), то рабочая зона должна быть оборудована в соответствии с требованиями для рабочих мест с ПЭВМ.

Продолжительность рабочего времени, а именно начало и его окончание определена по соглашению сторон работодателя и работника в соответствии с главой 16 ст. 102 ТК РФ «Работа в режиме гибкого рабочего времени» [45].

При работе с персональным компьютером большое внимание уделяется организации рабочего места сотрудника. В данном случае работа выполняется сидя. Эргономические требования к такому рабочему месту регламентируются соответствующим международным стандартом [46]. Согласно данному стандарту, конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и другое) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы. При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели работающего. Оптимальное положение рабочего достигается регулированием и высоты рабочей поверхности [46].

Взаимное расположение элементов рабочего места регламентируется ГОСТ 22269-76. Данный нормативный документ регламентируют рабочую позу человека оператора, пространство для его размещения, возможность обзора элементов рабочего места и пространства за его пределами, возможность ведения записей, размещения документации и материалов, используемых человеком-оператором. Взаимное расположение элементов рабочего места должно способствовать оптимальному режиму труда и отдыха, снижению утомления оператора, предупреждению появления ошибочных действий [47].

Поскольку проведение рассматриваемого исследования предполагает обработку данных, необходимо рассмотреть требования к рабочим местам с дисплеями. Основные требования согласно ГОСТ Р 50923-96 следующие [48]:

1) конструкция рабочего стола должна обеспечивать возможность размещения на рабочей поверхности необходимого комплекта оборудования и документов с учетом характера выполняемой работы;

2) размеры рабочей поверхности стола должны быть: глубина - не менее 600 (800) мм, ширина - не менее 1200 (1600) мм;

3) рабочий стул (кресло) должен обеспечивать поддержание физиологически рациональной рабочей позы оператора в процессе трудовой деятельности, создавать условия для изменения позы с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, а также для исключения нарушения циркуляции крови в нижних конечностях;

4) дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову;

5) освещенность рабочего места оператора на рабочем столе в горизонтальной плоскости от общего искусственного освещения должна быть от 300 до 500 лк;

б) для освещения зоны расположения документов допускается установка светильников местного освещения;

7) отношение яркостей в зоне наблюдения (экран, документ, поверхность стола) должно быть не более 10:1.

7.2 Производственная безопасность

Для анализа вредных и опасных факторов необходимо воспользоваться ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

Возможные опасные и вредные факторы перечислены в таблице 20 в качестве их источников может выступать все вышеперечисленное оборудование [49].

Таблица 20 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;	СанПиН 256.1325800.2016 Электроустановки жилых и общественных зданий; ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
2. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха	СанПиН 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха;
3. Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности; СанПиН 51.13330.2011 Защита от шума;
4. Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения;	СанПиН 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение;
5. Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани тела человека переменного характера, связанного с наличием электромагнитных полей промышленных частот (порядка 50-60 Гц).	СанПиН 1.2.3685-21. 21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

7.2.1 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 поражение электрическим током относится к опасным производственным факторам. Электрический ток способен привести к острому поражению или мгновенному воздействию относительно высокоинтенсивного воздействия, приводящий к летальному исходу [49].

Главной причиной поражения электрическим током в данной системе может быть прямой контакт с электрическими приборами, питающимися из промышленной сети. Именно питание от промышленной сети вызывает наибольшую опасность для персонала. Оборудование стенда питается как от переменного напряжения в 220 В, так и постоянного от 6 до 12 В.

Согласно ГОСТ Р 12.1.019-2017 все оборудование, которое питается от промышленной сети необходимо сопроводить предупреждающими знаками, чтобы персонал не делал ошибочных действий и движений.

Все токоведущие части стенда и ПК должны быть изолированы. Все оборудование должно быть заземлено. Значение сопротивления между заземляющим зажимом и каждой доступной прикосновению металлической частью, которая может оказаться под напряжением, не должно превышать 0,1 Ом [50].

Согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок, утвержденным приказом Минтруда России от 15.12.2020 N 903н, управлять стендом «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий», то есть пользоваться ПК для анализа параметров установки и проведения экспериментов может пользоваться персонал, имеющий I группу электробезопасности. При этом обслуживать стенд, производить подключения и любые манипуляции с оборудованием стенда он не может. Для присвоения I группы электробезопасности достаточно пройти инструктаж со стороны

специально назначенного лица с группой допуска не ниже III и ответить на контрольные вопросы [51].

Обслуживать стенд может персонал со II квалификационной группой, но без возможности производства подключений и под присмотром персонала с III группой и выше. Персонал может быть аттестован на вторую группу допуска при отсутствии специального образования и при минимальном стаже работы в электроустановках по первой группе.

Персонал, единолично обслуживающий стенд, должен иметь группу по электробезопасности не ниже третьей. III группа электробезопасности присваивается по результатам аттестации в комиссии предприятия или отделения Ростехнадзора [51].

Проверка знаний электротехнического персонала, работающего непосредственно со стендом физического подobia «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий» должна проводиться ежегодно.

7.2.2 Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха

Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. К показателям микроклимата относятся температура воздуха и поверхностей, относительная влажность, скорость движения воздуха и интенсивность теплового облучения. Оптимальные значения вышеперечисленных показателей зависят от сезона и категории физической тяжести работ. Работа оператора стенда «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий» относится к категории Iб – работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением [52].

Оптимальные показатели микроклимата для данной категории тяжести в теплый и холодный период года приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории Ib

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Теплый	(20 – 28)	(19 – 29)	(15 – 75)	(0,1-0,3)
Холодный	(19-24)	(18-25)	(15-75)	(0,1-0,2)

Поддержание оптимальных показателей микроклимата обеспечивает создание благоприятных условий труда и способствует повышению его производительности. Для этого должны быть предусмотрены следующие средства: центральное отопление, вентиляция (искусственная и естественная), искусственное кондиционирование.

7.2.3 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

Воздействие шума на организм человека негативно сказывается на нервной системе, оказывая значительное психологическое воздействие. Длительное воздействие шумов уровня (70-90) дБ может привести к заболеваниям нервной системы. Кроме того, воздействие шума способствует развитию сердечно-сосудистых заболеваний.

Основными источниками шума в проектируемом стенде являются насосы и ПК. Произведем расчет ожидаемого уровня шума. В процессе работы возможны разные комбинации оборудования, находящегося в рабочем режиме, сделаем расчет для максимального возможного количества одновременно работающих устройств. В динамическом режиме работы стенда возможна одновременная работа мешалки, двух насосов, компрессора и ПК. Используемые в установке насосы обладают уровнем шума 65 и 60 дБ(А), ПК – 40 дБ(А).

При нескольких источниках шума определяется разность двух максимальных уровней, затем – соответствующую этой разности добавка.

Далее добавка суммируется с максимальным уровнем и полученный уровень сравнивается со следующим и так далее [53]:

$$L_1 - L_2 = 65 - 60 = 5 \text{ дБ(А)}, \quad (27)$$

где L_1 – уровень шума первого насоса, дБ(А);

L_2 - уровень шума второго насоса, дБ(А).

Добавка при разности 5 дБ(А) составляет 1,2 дБ(А):

$$L_0 = 65 + 1,2 = 66,2 \text{ дБ(А)}, \quad (28)$$

$$L_0 - L_3 = 66,2 - 40 = 26,2 \text{ дБ(А)}, \quad (29)$$

где L_0 – ожидаемый уровень шума, дБ(А);

L_3 - уровень шума ПК, дБ(А).

Допустимые показатели звукового давления в помещениях для данного типа работ представлены в таблице 22 [54].

Таблица 22 – Допустимые уровни звука на рабочем месте оператора

Вид трудовой деятельности	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, ГЦ									Уровни эквивалентного звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая, научная деятельность	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Измерения, аналитические работы	93	84	79	70	68	57	55	52	49	60

Согласно расчетам, уровень шума превышает допустимый. Для его ослабления необходимо регулярно производить технического обслуживание оборудования: очищать от пыли, своевременно обрабатывать смазывающими веществами. Если данные меры окажутся недостаточно эффективными необходимо воспользоваться средствами индивидуальной защиты.

7.2.4 Производственные факторы, связанные с отсутствием или недостатком необходимого искусственного освещения

Согласно СП 52.13330.2016 отсутствие освещения или его нехватка классифицируется как вредный производственный фактор. Работа при недостаточном освещении может привести к переутомлению, усталости глаз, головным болям, что неизбежно приводит к снижению работоспособности. Управление оператором станда «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий» процессами с помощью ПК оценивается как зрительная работа очень высокой точности, при этом наименьший размер объекта различения ограничивается (0,15-0,3) мм (II разряд зрительной работы) [55].

В помещениях, предназначенных для работы с ПЭВМ, освещенность рабочей поверхности от систем общего освещения E_n должна быть не менее 300 лк. Коэффициент пульсации освещенности K_n не должен превышать 5 %, коэффициент естественной освещенности не должен превышать 2,1 % [52].

Расчет искусственного освещения для учебной аудитории:

- размеры помещения: $A = 7$ м; $B = 8$ м; $H = 3,7$ м; $S = 56$ м²;
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,7$ м;
- высота подвеса светильника над полом $h_c = 3,5$ м;
- высота светильника над рабочей поверхностью $h = 2,8$ м;
- коэффициент отражения стен $\rho_{ст} = 50$ %, при условии, что стены бетонные или побелены в серых помещениях;
- коэффициент отражения потолка $\rho_{п} = 70$ %, при условии, что потолки свежепобелены;
- коэффициент запаса для помещения с малым выделением пыли $K_3 = 1,5$;
- коэффициент неравномерности освещения $Z = 1,1$;
- параметр для светильника типа ОДР с защитной решеткой $\lambda = (1,1-1,3)$;
- световой поток одной лампы $\Phi_1 = 2500$ лм.

Для определения размещения светильников в помещении, рассчитаем расстояние между светильниками L по формуле (30):

$$L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,8 = 3,36. \quad (30)$$

Оптимальное расстояние от крайнего ряда до стены равно $L/3 = 1,12$ м. Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определим по формуле (31):

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{8 - \frac{2}{3} \cdot 3,36}{3,36} + 1 = 2,7. \quad (31)$$

Округляя число рядов, получаем $n_{\text{ряд}} = 3$. Количество светильников с люминесцентными лампами в ряду определим по формуле (32):

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{7 - \frac{2}{3} \cdot 3,36}{3,36} + 1 = 2,1. \quad (32)$$

Округляя число светильников, получаем $n_{\text{св}} = 2$. Общее количество светильников с люминесцентными лампами $N = 6$. Расположение светильников представлено на рисунке 35.

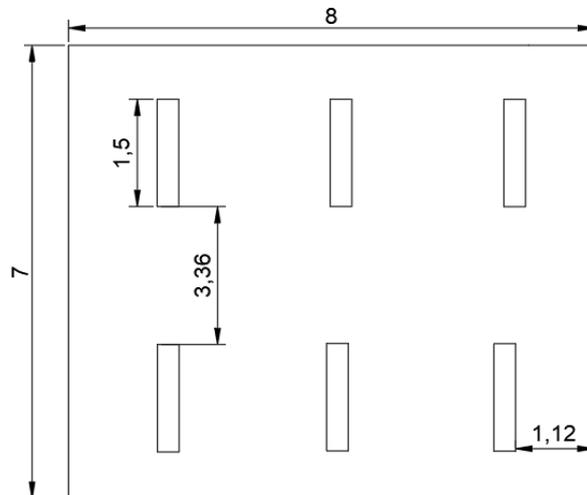


Рисунок 35 – Размещение светильник в помещении

Рассчитаем индекс помещения i по формуле (33):

$$i = \frac{S}{H \cdot (A + B)} = \frac{56}{3,7 \cdot (7 + 8)} = 1. \quad (33)$$

Исходя из значения индекса помещения коэффициент использования светового потока, зависящий цвета стен и потолка, $\eta = 49$ %. Учитывая, что в

каждом светильнике установлено 2 лампы, общее число ламп в помещении $N_{л} = 12$. Требуемый световой поток найдем по формуле (34):

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_{л} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 56 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,49} = 4714 \text{ лм.} \quad (34)$$

Выбираем ближайшую стандартную лампу –ЛХБ 80 Вт с потоком 5000 лм. Проверим полученное значение по формуле (35).

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{л.станд} - \Phi_{л.расч}}{\Phi_{л.станд}} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (35)$$

$$-10\% \leq 5,72\% \leq +20\% \quad (36)$$

Рассчитаем номинальную мощность системы по формуле (37):

$$P = N_{л} \cdot p_{л} = 12 \cdot 80 = 960 \text{ Вт} \quad (37)$$

Таким образом рассчитанный световой поток не выходит за пределы диапазона, соответственно корректировки числа светильников или высоты подвеса не требуется. Номинальная мощность системы составила 960 Вт.

7.2.5 Производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани тела человека переменного характера, связанного с наличием электромагнитных полей промышленных частот

Аппаратная часть установки состоит из насосов, электромагнитных клапанов, электроприводов, контроллера и ПК. Всё это оборудование создает электромагнитное излучение, которое возникает от любого устройства, потребляющего или создающего электроэнергию. Воздействие электромагнитного излучения наносит вред организму человека.

СанПиН 1.2.3685-21 устанавливает допустимые нормы электромагнитного излучения.

Проектирование системы предполагает, что рабочее помещение, в котором находится оператор стенда «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий», снабжено ПК, с помощью которого требуется контролировать процесс. Кроме того, периферийные устройства также создают электромагнитное поле. В результате продолжительной работы

персонала в зоне электромагнитного излучения оборудования, у людей появляется усталость, снижение реакции, ухудшение зрения.

Допустимые уровни магнитного поля и длительность пребывания персонала без средств защиты в электромагнитном поле представлены ниже в таблице 23 [52].

Таблица 23 – Допустимые уровни магнитного поля и длительность пребывания

Время пребывания, час	Допустимые уровни МП, [А/м] при воздействии	
	Общее воздействие	Локальное воздействие
1 и менее	1600	6400
2	800	3200
4	400	1600
8	80	800

Что касается способов защиты и уменьшения влияния электромагнитного излучения, то можно воспользоваться следующими действиями:

- смена должна длиться менее 8 часов в день;
- уменьшение времени нахождения человека в электромагнитном поле, а именно организация перерывов каждые (45 – 60) минут на (10 – 15) минут;
- увеличение расстояния от персонала до источника электромагнитных излучений.

Таким образом, воспользовавшись данными действиями дополнительные средства защиты окажутся не востребованными.

7.3 Экологическая безопасность

Атмосфера. Источником загрязнения является углекислый газ. Основным инструментом работы при разработке и эксплуатации является ПК и стенд, потребляющие электроэнергию. Для удовлетворения потребности в электроэнергии, в настоящее время приходится увеличивать мощность и

количество электростанций. Это приводит к нарушению экологической обстановки, так как электростанции в своей деятельности используют различные виды топлива, водные ресурсы, а также являются источником вредных выбросов в атмосферу.

Углекислый газ нетоксичен, однако при вдыхании его повышенных концентраций в воздухе по воздействию на воздуходышащие живые организмы его относят к удушающим газам. В соответствии с ГОСТом 12.1.007-76 диоксид углерода относится к вредным веществам IV класса опасности [56].

Литосфера. К отходам, производимым в помещении, можно отнести периодическую замену нефти и воды в стенде и вышедший из строя ПК. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 величина предельно допустимой концентрации (ПДК) нефти составляет 10 мг/м³ [57]. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 пункт 1.2 вещества, у которых ПДК рабочей зоны (1,1-10,0) мг/м³, относятся к веществам третьего класса опасности [56]. Утилизация отработанной нефти осуществляется в фирмах по утилизации отходов (масел) путем извлечения из нефтесодержащих отходов нефти или нефтепродуктов с применением физических методов, последующим использованием извлеченных нефтесодержащих продуктов и обезвреживанием вторичных отходов [58].

Вышедший из строя ПК и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации. Для оказания наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить специальную процедуру утилизации ПК и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки [59].

7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее характерной ЧС для проектируемого стенда является пожар, это обусловлено использованием нефти, которая является горючим веществом.

Для ослабления последствий пожара в здании должны находиться углекислотный огнетушитель, сухой песок и внутренние пожарные водопроводы находиться. Они предназначаются для своевременного тушения небольших локальных возгораний.

Чем больше оснащена установка автоматизированными элементами, тем более вероятен риск возникновения пожара, так как количество и функциональная сложность оборудования выше. Поэтому система совершенствуется таким образом, чтобы исключить возникновение искры в токопроводящих цепях. Для этого при достижении критических параметров, то есть предельных значений, включается аварийная сигнализация. Информация выводится на АРМ оператора, где принимаются действия по безопасной остановке технологического процесса.

Действия, которые можно предпринять для предотвращения пожара:

- организация обучения персонала правилам пожарной безопасности;
- разработка мероприятий по действиям персонала на случай возникновения пожара и организация эвакуации людей;
- назначение лица, ответственного за эвакуацию, которое должно следить за исправностью дверных проемов, окон, проходов и лестниц.

К эксплуатационным мероприятиям относятся:

- поддержание исправной изоляции проводников;
- поддержание свободного подхода к оборудованию;
- соблюдение противопожарных инструкций при прокладке электропроводок, эксплуатации оборудования, освещения.

Действия при пожаре на производстве регламентируются правилами обеспечения пожарной безопасности предприятия. Основой для подготовки инструкции по эвакуации служат Противопожарные правила, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 №1979 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации». Общие правила

же правила поведения при обнаружении пожара персоналом остаются неизменными [60]:

- немедленно сообщить в пожарную службу;
- сообщить руководству предприятия;
- включить сигнализацию, систему пожаротушения;
- оказать помощь в эвакуации людей и тушении пожара.

7.5 Вывод по разделу социальная ответственность

В ходе реализации данного раздела были рассмотрены организационные и правовые вопросы обеспечения безопасности, проанализированы нормативные документы, касающиеся проектирования, реализации и эксплуатации разрабатываемого стенда физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий».

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, которые также были продемонстрированы в данном разделе. Категория помещения по электробезопасности, согласно ПУЭ, соответствует первому классу – «помещения без повышенной опасности».

Согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал должен обладать I группой допуска по электробезопасности. Персонал, единолично обслуживающий стенд, должен иметь группу по электробезопасности не ниже третьей. Категория тяжести труда в лаборатории по СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" относится к категории Ib (работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся физическим напряжением).

Помещение лаборатории относится к категории помещения группы В, возможный класс пожара В. Характеристика веществ и материалов, находящихся в помещении: горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой,

кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они находятся (обращаются), не относятся к категории А или Б [62].

Рассмотренный объект, оказывающий незначительное негативное воздействие на окружающую среду, относится к объектам III категории [63].

Заключение

Результатом выполнения выпускной квалификационной стал спроектированный стенд физического подобия «Исследование дисперсного состава водомасляных эмульсий».

В рамках выполнения работы были осуществлены проектирование и сборка аппаратной части, а также разработка алгоритмического обеспечения системы: были разработаны алгоритмы динамического и статического режима работы стенда. Также были исследованы методы создания эмульсий и определен наиболее подходящий – использование механической энергии, а именно мембранного насоса.

В ходе обзора методов измерения распределения размеров глобул эмульсии по размерам было выявлено, что наиболее подходящим методом для решения поставленных задач, является оптическая микроскопия. Предлагаемое решение для уменьшения времени анализа и увеличения эффективности оптического метода – использование информационно-измерительной системы на основе системы машинного зрения и наличие динамического режима работы системы.

Кроме того, были рассмотрены алгоритмы сегментации для обработки микрофотографий и выявлен наиболее эффективный для решаемой задачи распознавания глобул на изображении алгоритм – преобразование Хафа.

В ходе выполнения работы были определены параметры оптимального режима работы устройства для подготовки эмульсии, а также проведен анализ дисперсного состава эмульсии в статических и динамических образцах, в ходе которого были получены статистические характеристики распределения капель дисперсной фазы по размерам.

Список публикаций студента

1. Мигель А.В., Филипас А.А., Исаев Ю.Н., Курганов В.В. Автоматизированная система для проведения экспресс-анализа дисперсного состава скважинной жидкости // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых– 2021. – С. 472-473.
2. Мигель А.В., Филипас А.А., Исаев Ю.Н., Семенов Н.М. Разработка автоматизированной системы для проведения анализа дисперсного состава скважинной жидкости // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. Часть 2 – 2021. – С. 169-171.
3. Мигель А.В., Филипас А.А., Исаев Ю.Н. Оптический анализатор размеров глобул скважинной жидкости // Актуальные проблемы и современные тенденции робототехники. Тезисы докладов I Всероссийской конференции. – 2021. – С. 38-40.
4. Мигель А.В., Филипас А. Определение резонансных частот шаровой капли воды в масляной среде // Бутаковские чтения. Материалы I Всероссийской с международным участием молодежной конференции. – 2021. – С. 35-47.

Список использованных источников

1. P. Fernandez, V. Andre, J. Rieger, A. Kuhnle. Nano-emulsion formation by emulsion phase inversion // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2004. – P. 53-58.
2. Кольцов Л.В., Лосева М.А. Эмульсии: получение, свойства, разрушение: учебно-методическое пособие. – М.: изд-во СамГТУ, 2017 г. – 20 с.
3. Типы эмульсий [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://info-neft.ru/index.php?action=full_article&id=577 – свободный (дата обращения 25.04.2022).
4. Приготовление и разрушение эмульсий физическими и комбинированными методами: статья/ Л.А. Кудишова, С. К. Мясников – Москва, 2010г.
5. Сахабутдинов Р.З., Губайдуллин Ф.Р., Исмагилов И.Х., Космачева Т.Ф. Особенности формирования и разрушения водонефтяных эмульсий на поздней стадии разработки нефтяных месторождений – М.: ВНИИОЭНГ, 2005. – 324 с.
6. Дунюшкин И.И., Сбор и подготовка скважинной продукции нефтяных месторождений – М.: изд-во Нефть и газ РГУ им. И.М. Губкина, 2006. – 320 с.
7. Байков Н.М., Позднышев Г.Н., Мансуров Р.И. Сбор и промысловая подготовка нефти, газа и воды – М.: Недра, 1981. – 24с.
8. Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство – М.: Дальнаука, 2011. – 288 с
9. Казымов Ш.П. Технология разрушения эмульсий в призабойной зоне скважин // Нефтепромысловое дело. – 2011. - №4. – С. 44-46.
10. Мембранные насосы - конструкция и применение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.labor-microscopes.ru/production/visualization/cifrovye-kamery-dlja-mikroskopov.html> – свободный (дата обращения 20.04.2022).

11. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 10. 50–58 Ануфриев Р.В., Волкова Г.И. Влияние ультразвука на структурномеханические свойства нефтей и процесс осадкообразования

12. Хмелев, В.Н., Кузовников Ю.М., Цыганок С.Н. Разрушение масляной эмульсии ультразвуковым воздействием //Научно –технический вестник Поволжья 2011. – № 5. – С.194 -198

13. Разработка стенда физического подобия "Трёхфазный сепаратор скважинной жидкости" / А. А. Филипас, А. В. Мигель // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 2020 г. — Томск: Томский политехнический университет, 2020. — [С. 216-217].

14. Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики М.: Изд-во Дом МЭИ. 2010. 250 стр.

15. Сычев В.В. Сложные термодинамические системы М.: Энергоатомиздат, 1986. 207стр.

16.. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Статистическая физика. М.: Физматгиз, 1962. 695 стр.

17. Позняк Э.Г., Шикин Е.В. Дифференциальная геометрия. М.: Изд-во МГУ. 1990. 384 стр.

18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т.5, Статистическая физика М.: Наука. 1988. 733 стр.

19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 799 стр.

20. Knezevic Z.D., Siler-Marinkovic S.S., Mojovic L.V. Kinetics of lipase catalyzed hydrolysis of palm oil in lecithin/isooctane reversed micelles // Applied Microbiology and Biotechnology, 1998.

21. McClements D.J., Coupland J.N. Theory of droplet size distribution measurements in emulsions using ultrasonic spectroscopy // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects – 1996. – P. 161-170.

22. Forrester D. M., Huang J., Pinfield V. J. Characterisation of colloidal dispersions using ultrasound spectroscopy and multiple-scattering theory inclusive of shear-wave effects // Chemical Engineering Research and Design 2016. – P. 69-78.

23. McClements D.J. Ultrasonic Measurements in Particle Size Analysis // Encyclopedia of Analytical Chemistry – 2000. – P. 8.

24. Perini N., Prado A.R., Sad C.M.S., Castro E.V.R., Freitas M.B.J.G. Electrochemical impedance spectroscopy for in situ petroleum analysis and water-in-oil emulsion characterization // Fuel – 2012. – P. 224-228.

25. Peter J. Dowding, James W. Goodwin, Brian Vincent. Factors governing emulsion droplet and solid particle size measurements performed using the focused beam reflectance technique // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects – 2001. – P. 5-13.

26. Гаврилова Н. Н., Назаров В. В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие /– М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.

27. Определение размера капель и характеристика распределения их по размерам. Микроскопия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://xumuk.ru/colloidchem/195.html> – свободный (дата обращения 05.05.2022).

28. Antoni M., Kragel J., Liggieri L., Miller R., Sanfeld A., Sylvain J.D. Binary emulsion investigation by optical tomographic microscopy for FASES experiments // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects – 2007. – P. 280-285

29. Анализатор размеров частиц Mastersizer 2000 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://granat-e.ru/mastersizer_2000.html – свободный (дата обращения 10.05.2022).

30. Анализатор размеров частиц ANALYSETTE 22 NeXT Nano [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://analitika.millab.ru/catalog/analiticheskoe-oborudovanie/analiz-razmera->

chastits/statisticheskoe-rasseyanie-sveta/analysette-22-next-nano/ – свободный (дата обращения 10.05.2022).

31. Анализатор размеров частиц Микросайзер 201 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mtspb.com/product/laboratorное-oborudovanie/lazernyy-analizator-mikrosayzer-201/lazernye-analizatory-razmerov-chastits-mikrosayzer-201/> – свободный (дата обращения 11.05.2022).

32. Анализатор размеров частиц Camsizer P4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [<https://www.microtrac.com/ru/products/particle-size-shape-analysis/dynamic-image-analysis/camsizer-p4/>] – свободный (дата обращения 11.05.2022).

33. Детектор границ Канни [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/114589/> – свободный (дата обращения 24.05.2022).

34. Алгоритмы выделения контуров изображений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/114452/> – свободный (дата обращения 24.05.2022).

35. Edge detection using Prewitt, Scharr and Sobel Operator [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/edge-detection-using-prewitt-scharr-and-sobel-operator/> – свободный (дата обращения 24.05.2022).

36. Roberts Cross Edge Detector Operator [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/roberts.htm> – свободный (дата обращения 24.05.2022).

37. Hough Transform [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm> – свободный (дата обращения 24.05.2022).

38. Нефтяные эмульсии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/burenie/148006-emulsiya/> – свободный (дата обращения 11.05.2022).

39. Добыча нефти в России [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Добыча_нефти_в_России – свободный (дата обращения 23.05.2022).

40. Возрождение рынка нефтегазового оборудования [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cdu.ru/tek_russia/articles/1/804/ – свободный (дата обращения 23.05.2022).

41. Красников А.В. О необходимости импортозамещения в топливноэнергетическом комплексе России //Материалы VII международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные науки сегодня», секция «Экономические науки», North Charleston, SC, USA, 2016. С. 161 – 164.

42. Бобылев Ю.Н. Развитие нефтяного сектора в России // Вопросы экономики, 2015. №6. С. 63 – 105. 2. Бушуев В.В., Конопляник А.А., Миркин и др. Цены на нефть: анализ, тенденции, прогноз: Монография. М.: ИД «Энергия», 2013. 344 с

43. Проект Стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2030 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/8743.html> – свободный (дата обращения 23.05.2022).

44. Сапир Е.В., Волкова А.И. Коммерциализация технологий в инновационном бизнесе: учебно-методическое пособие – Ярославль: ЯрГУ, 2017. – 60 с.

45. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (с изменениями на 5 апреля 2021 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901807664>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

46. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003913>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

47. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://docs.cntd.ru/document/1200012834>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

48. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200025975>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

49. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

50. ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200161238>, свободный (дата обращения 10.05.2022).

51. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 N 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/66987.html/>, свободный (дата обращения 7.05.2022).

52. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>, свободный (дата обращения 7.05.2022).

53. Суммарный уровень шума нескольких источников [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/3940278/page:4/>, свободный (дата обращения 6.05.2022).

54. Свод правил: СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084097>, свободный (дата обращения 12.05.2022).

55. Свод правил: СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – М.: Минстрой России, 2016. – 106 с.

56. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/5200233>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

57. ГОСТ 12.1.008-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

58. ГОСТ Р 56828.43-2018 Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. Показатели для идентификации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200159496>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

59. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200081740>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

60. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 №1979 об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565837297?marker=6520IM>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

62. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

63. Федеральный закон Об охране окружающей среды (с изменениями на 26 марта 2022 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901808297>, свободный (дата обращения 21.05.2022).

Приложение А
(обязательное)

Раздел 2

**Choice of approach for measuring droplet size distribution and review
device analogues**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ01	Мигель Алёна Владимировна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	доцент, к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Сидоренко Татьяна Валерьевна	доцент, к.пед.н.		

1 Choice of approach for measuring droplet size distribution and review device analogues

Emulsions are fundamental in many applications and industrial products. In specific, oil-in-water emulsions are used in industrial operations involving two immiscible fluids and emulsifier agents which allow emulsion formation and stabilization [22].

One common way to characterize the size distribution of the emulsions is the use of parameters that indicate the dispersion, such as median drop size, Sauter diameter, and diameter of the largest stable drop size. Although these are commonly used, they are not very suitable for characterizing emulsions because they fail to provide all the information of the system and thus provide only an approach. For an accurate determination of the most characteristic parameters of the emulsions (total distribution of droplet surface, volume or mass), it becomes necessary to evaluate the droplet size distribution (DSD) of an emulsion.

The droplet size distribution influences the properties of the emulsion in aspects such as degradation rates, long-term stability, resistance to creaming, texture and optical appearance, viscosity, physiological efficiency, and chemical reactivity.

Various methods of analyzing the dispersed composition of the emulsion were studied: electrochemical impedance spectroscopy, ultrasonic spectroscopy, focused beam reflectance and light microscopy. The main disadvantages and advantages of these methods were identified.

1.1 Ultrasonic spectroscopy

Ultrasonic spectroscopy is a rapid nondestructive method of measuring droplet size distributions in concentrated emulsions. The ultrasonic velocity and attenuation coefficient of an emulsion are measured over a range of frequencies, and then multiple scattering theory is used to convert these measurements to a droplet size distribution. By measuring the ultrasonic properties of emulsions in a fairly wide frequency range ((0.1-200) MHz), it is possible to determine the size of drops in

range (0,01-1000) nm. While the size of oil emulsion droplets varies in range (0,2-300) microns [23].

Ultrasonic analysis is based on measurements of the ultrasonic velocity and attenuation coefficient of a material. The ultrasonic velocity is the distance an ultrasonic wave travels in unit time, whereas the attenuation coefficient is a measure of the decrease in amplitude of an ultrasonic wave per unit distance travelled through a material. The ultrasonic properties of materials are related to their physicochemical properties (e.g. composition, physical state and structure), and so ultrasound can be used to provide valuable information about material properties once this relationship has been established.

There are two stages involved in the determination of the droplet size distributions of an emulsion using ultrasonic spectroscopy. Firstly, the ultrasonic velocity and/or attenuation coefficient of the emulsion is measured as a function of frequency (preferably over as wide a range as possible). Secondly, these experimental measurements are compared with theoretical predictions of the ultrasonic properties of the emulsion, and the droplet size distribution which gives the best fit between theory and experiment is determined.

The operating concept of ultrasonic spectrometry systems is to determine the frequency dependence of acoustic attenuation and velocity in order to determine the particle size distribution and rheological properties of concentrated dispersions. Sound pulses are transmitted through the sample. The attenuation of these pulses is measured over a wide range of ultrasonic frequencies ((1-100) MHz) using gaps of various sizes between the ultrasonic transducer and receiver (Figure 1).

Few techniques for the determination of particle concentration and size, or size distribution, allow the characterization of highly concentrated dispersions without the need of dilution. This feature gives ultrasonic spectroscopy one significant advantage for measuring the particle size and concentration of heterogeneous systems. Many complex fluids are optically opaque, precluding the use of optical analysis techniques without sample modification [24].

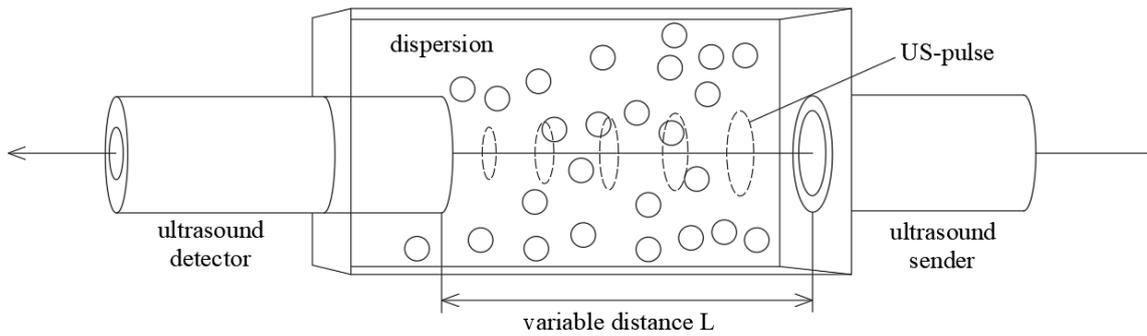


Figure 1 - Scheme for measuring droplet size distribution using ultrasonic spectroscopy

Furthermore, ultrasonic techniques offer several other desirable characteristics, such as fast response for online measurement, genuinely noninvasive and nondestructive measurements. On the other hand, the technique presents some limitations such as that the air bubbles can interfere with ultrasonic measurements and the need for a large amount of the thermophysical properties of the component phases for a full description of the theoretical ultrasonic spectra [25].

1.2 Electrochemical impedance spectroscopy

Another method for determining of droplet size distributions is electrochemical impedance spectroscopy (EIS). EIS can measure drops up to 100 microns. Electrochemical impedance spectroscopy is the study of interfaces and systems through the application of a sinusoidal electric potential with a variable frequency. This electrical potential induces a sinusoidal current, phase angle, and changes of the current in relation to the applied potential. The essence of the method of impedance spectroscopy consists in applying a disturbing signal of small amplitude to the system under study and studying the signal-response caused by it at the output.

EIS techniques have low associated costs and can be easily implemented. The EIS technique is versatile because it can be applied in a dielectric medium with high electrical resistance, as in crude oil and water-in-oil emulsions. The main disadvantage of this method is the influence of various impurities on the analysis

result, as well as the use of potential in this method, which can disrupt the system [26].

1.3 Laser diffraction

The operating concept of laser diffraction is to obtain information about the distribution of particles by size by measuring the intensity of light scattering and determining its dependence on the scattering angle, wavelength and polarization of light. This method is absolute and does not require calibration.

The analysis begins with a light source emitting a beam of monochromatic light that passes through several optical components and becomes a thick collimated beam. This light beam is directed to the particles and scattered by them in the scattering volume. In this case, unique forms of angular light scattering are formed, which are recorded by a multi-element photodetector matrix. The photocurrents arising in the matrix are digitized and analyzed with the construction of an intensity diagram and an estimate of the particle size distribution (Figure 2).

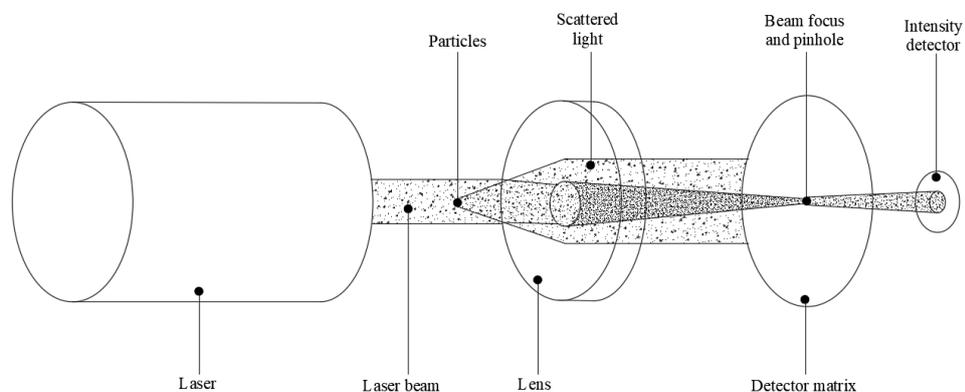


Figure 2 – Scheme for measuring droplet size distribution using laser diffraction

Some industrial particles are not spherical, but the effects of scattering at their corners and edges are smoothed out due to the rotation that occurs due to the circulation of the sample during measurement. This makes it possible to apply the Mie theory and the Fraunhofer theory to systems with one parameter, which is the diameter.

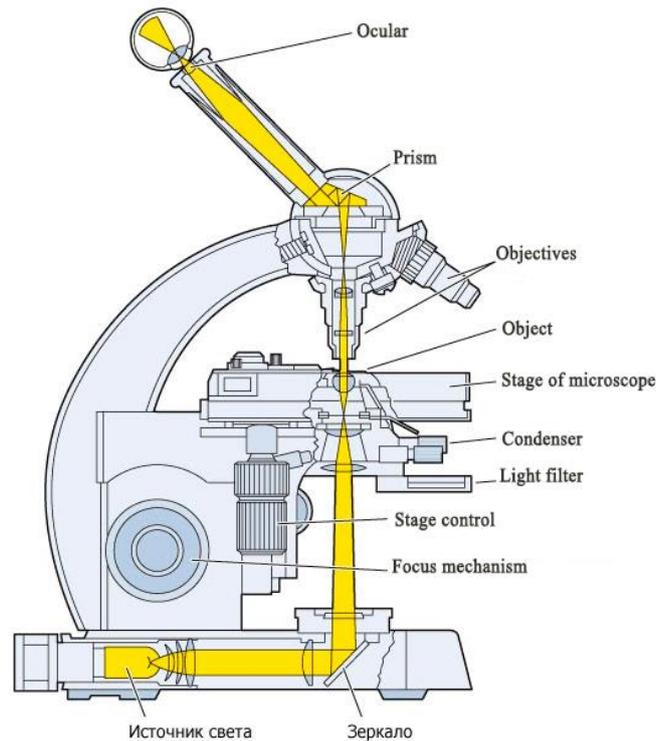
Laser diffraction has many advantages, including ease of use and high measurement speed, high reproducibility, and a wide dynamic size range spanning nearly five orders of magnitude from nanometers to millimeters. Using this method, it is possible to make in-situ, real-time particle/droplet size measurements over a wide range of droplet/particle volume fractions. FBRM is used for particle size measurements in the range of 0.8-1000 nm [27].

Laser diffraction does not provide information about the shape of droplets, it allows only an approximate estimate of particle sizes, and the results obtained by most methods (including laser diffraction) can differ greatly from the real characteristics. In addition, the data obtained using this method will vary depending on the impurities added to the test emulsion.

1.4 Optical microscopy

Optical microscopy is a classical method for measuring droplet size distribution. An optical or light microscope is an optical system with two stages of magnification – an objective and an eyepiece. The objective is the first stage of magnification. The schematic diagram of the microscope is shown in Figure 3.

An object is illuminated by a light source through a collector-condenser optical system, which is a lens system used in an optical device to illuminate an object. The condenser collects, amplifies and converts the light flow into a beam of uniform parallel rays within the boundaries of the entire area of the condenser, which is calculated to illuminate the area of the object. The condenser directs rays from the light source onto the object, including those that, in its absence, pass through the object. As a result of such a compaction of the light flow, the illumination of the object sharply increases. The lens creates a real inverted and enlarged image of the object, which is viewed through the eyepiece. The eyepiece is designed to create additional magnification and creates a virtual image [28].



Copyright ©2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

Figure 3 – The schematic diagram of the microscope

The measurement of particle size distribution of emulsion droplets using a microscope is one of the most traditional methods of analysis. The optical microscope method is limited to a particle size of $0.5 \mu\text{m}$ due to the fact that smaller particles no longer reflect light. Usually, a sample of a diluted test emulsion with surfactant additives is taken for microanalysis. The sample-powder is placed on a glass slide and the size of the droplets is measured using an eyepiece grid or scale. Typically, all droplets in the field of view are measured. The number of measured drops is determined by the specified accuracy of the analysis. Obviously, the more drops are characterized, the more accurate the result.

The accuracy of microscopic analysis depends on two factors: one of them is subjective errors, the other is due to the statistical nature of the measurements. Sufficient measurement accuracy is achieved by counting the size of about 1000 drops of each fraction. Therefore, the accuracy of determining the size of large drops, which are usually few in the microscope field, is usually low. At the same time, if the drops have a size at the limit of the microscope resolution or even beyond it, then it is practically impossible to determine their size, and even more so their content.

In this regard, an electron microscope is used to analyze emulsions with droplets of this size [29].

This method has a simple implementation and measures the size distribution of emulsion droplets directly from the results of measurements of separate droplets, without mathematical processing of the obtained data. Another advantage is the ability to test opaque and concentrated systems without dilution. These characteristics make optical a standard method for analyzing disperse composition, and results obtained by other methods are usually confirmed by this method [30]. However, the data obtained using optical microscopy require further processing, which is a rather laborious and lengthy process, taking into account the use of manual labor.

1.5 Analysis of methods for measuring droplet size distribution

The review examined the advantages and disadvantages of four methods for measuring droplet size distribution. Based on the results of the review, an analysis of the considered methods was carried out (Table 1)

Table 1 - Analysis of methods for measuring droplet size distribution

Method	Ultrasonic spectroscopy	Electrochemical impedance spectroscopy	Laser diffraction	Optical microscopy
Measuring rate	high	high	high	low
Measuring range	0,01-1000 nm	0,01-100 μm	0,01-1000 μm	0,1 – 300 μm
Destructive impact	no	yes	no	no
Drop shape Information	no	no	no	yes
Effect of impurities on analysis	yes	yes	yes	yes
Mathematical processing	required	required	required	no required

Based on the analysis of droplet size distribution measurement methods, the optical microscopy method is the most suitable, since it allows measuring the range

of sizes characteristic of a polydisperse oil emulsion, does not require complex mathematical processing and provides the emulsion droplet size distribution directly from the results of measurements of individual drops, does not have a destructive effect on the dispersed system under study and gives an idea of the droplet shape, which is an extremely important factor for further research.

The only identified disadvantage of the method is the low speed of analysis due to the lack of automation of the process. The proposed solution for reducing the analysis time and increasing the efficiency of the optical method is the use of a data-measuring system based on a machine vision system and the presence of a dynamic mode of operation of the system.

1.6 Review of analogues of the proposed stand

There are four main analogues of the proposed stand:

- particle size analyzer Mastersizer 2000;
- instrument for measuring particle size ANALYSETTE 22 NeXT Nano;
- particle size analyzer Микросайзер 201;
- particle size and shape analyzer Camsizer P4.

The Mastersizer 2000 particle size analyzer from Malvern Instruments (Figure 4) is designed to analyze the dispersed composition of emulsions, suspensions and dry powders. The principle of operation of this analyzer is based on the use of the laser diffraction method. Mastersizer 2000 has a modular implementation and can include various automatic dispersers with cassette type cuvettes. The accuracy and reproducibility of the device is realized through an integrated system of standardized measurement protocols. Particle size measurement with this device is possible in the size range from 0.02 μm to 2000 μm . All measurement parameters are automatically logged in the measurement file, for the possibility of subsequent verification of the result [31].



Figure 4 - Mastersizer 2000 particle size analyzer

The operating concept of the Fritsch ANALYSETTE 22 NeXT Nano particle analyzer (Figure 5) is also based on laser diffraction. The analyzer has a system of additional detectors, which makes it possible to measure particle sizes in the range of (0.01-3800) μm with high accuracy. The time of measurement of one sample, as a rule, does not exceed one minute until it is ready for a new measurement. Calculation of the particle size distribution occurs automatically with the output of the results on the computer screen. The operator can also save and print the report in the format you require. ANALYSETTE 22 NeXT Nano can also record additional parameters such as temperature and pH value [32].



Figure 5 - Particle size analyzer ANALYSETTE 22 NeXT Nano

Particle size analyzer Microsizer 201 from VA Install (Figure 6), which, like the previously considered analogues, is a laser one, allows the analysis of various objects, such as metal powders, pigments and powder paints and other finely dispersed systems containing particles with sizes from 0.2 to 600 μm . The analyzer has the following measurement principle. A suspension of particles is pumped

through a cuvette illuminated by a laser beam. The radiation scattered by the particles is recorded at different angles using a highly sensitive photodiode array. Based on the measurements obtained, the dependence of the scattered radiation intensity on the scattering angle is obtained, on the basis of which the particle size distribution is calculated [33].



Figure 6 - Particle size analyzer Microsizer 201

Particle size analyzer Camsizer P4 from Microtrac (Figure 7), is designed to analyze the size and shape of particles of dry bulk materials ranging in size from 20 μm to 30 mm. The analyzer has the following operating principle. A software-controlled loading chute transports the sample into the measurement area, ensuring uniform sample delivery and consistent analysis conditions. The particle stream passes through an ultra-bright flat LED strobe light source.



Figure 7 - Camsizer P4 particle size analyzer

The resulting shadow projections are captured by a camera system and evaluated by the software. Camsizer P4 provides clear images and determines different size and shape parameters for each detected particle. Analysis of a large number of particles guarantees highly accurate results. Typical measurement time is 1 to 3 minutes, with 60 images per second evaluated in real time [34].

Based on the results of the review, an analysis of the analogues of the developed stand was carried out (Table 2).

Table 2 - Analysis of analogues

Analyzer	Malvern Mastersizer 2000	Fritsch Analysette 22 NeXT Nano	Microsizer 201	Microtrack Camsizer P4
Measurement range	(0,02-2000) μm	(0,01-3800) MKM	(0,2-600) MKM	(20-3000) MKM
Operating concept	Laser diffraction	Laser diffraction	Laser diffraction	Optical
Information about the shape of the globules	no	no	no	yes
Emulsion analysis	yes	yes	no	no
Built-in dispersant	yes	no	yes	no
Measurement time, min	-	1	2	(1-3)
Price	more than 8 million rubles	more than 9 million rubles	more than 6,5 million rubles	more than 10 million rubles

The disadvantages of the analyzers Mastersizer 2000, ANALYSETTE 22 NeXT Nano and Microsizer 201 are the shortcomings of their principle of operation, namely the lack of the possibility of analyzing the shape of the particles, as well as the possibility of comparing the results with data obtained using other methods for determining the composition. In addition, often laser analyzers are suitable only for solid particles, modifications with the ability to study emulsions (Microsizer, Mastersizer 2000) are much more expensive.

The disadvantages of the Camsizer P4 particle analyzer include the ability to analyze only suspensions and dry mixtures, which makes the device unsuitable for analyzing emulsions.

The following competitive advantages of the developed physical similarity stand "Research of the dispersed composition of water-oil emulsions" can be distinguished:

1. Accounting for the shape and position of globules.
2. Use of machine vision technology.
3. Possibility of automatic sampling.
4. Relatively low cost of technology.
5. The presence of a dynamic mode of operation.

Summing up, we can say that the emulsion droplet size analyzers on the market are not suitable for solving the problems that the stand being developed solves.

Приложение Б (обязательное) Структурная схема

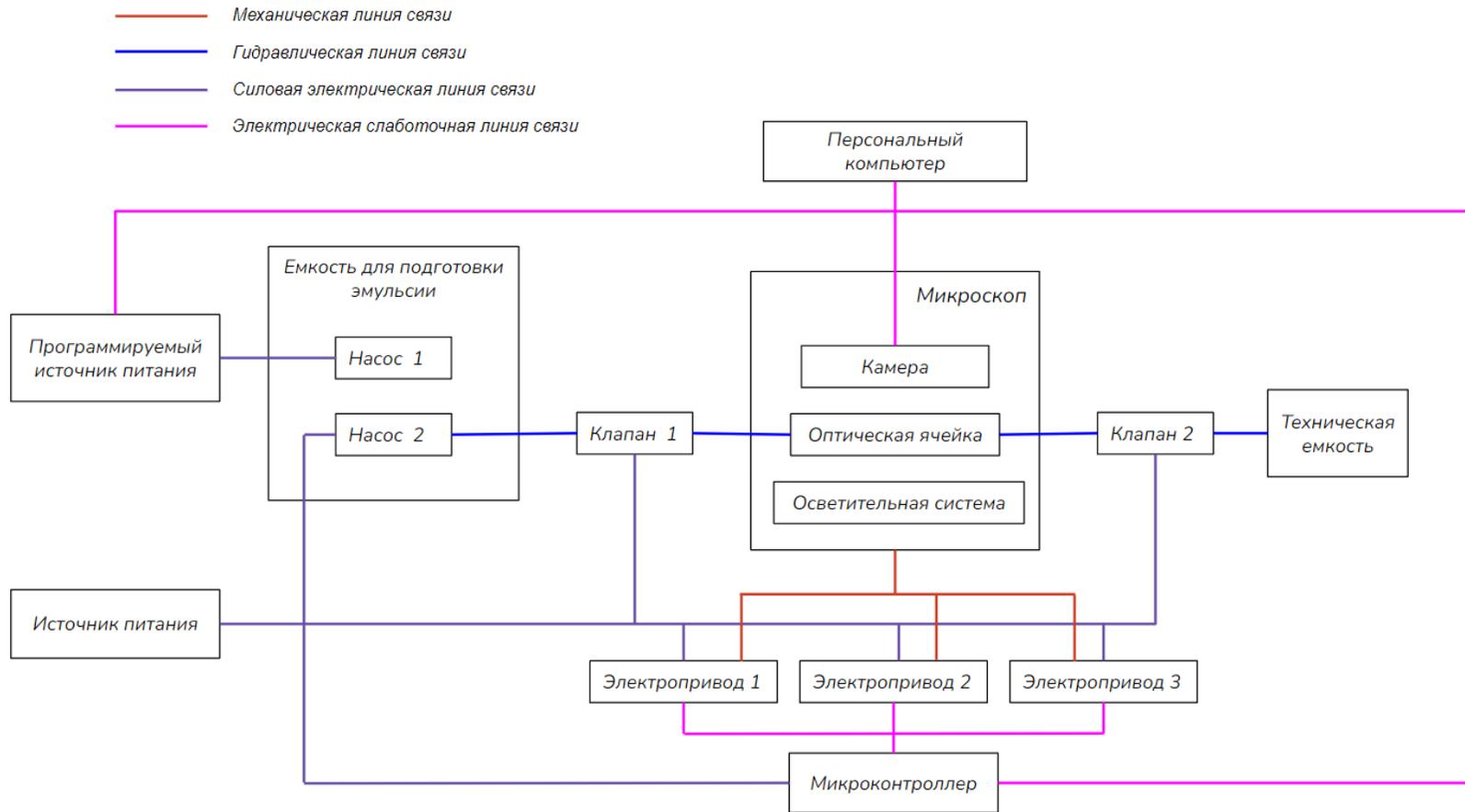


Рисунок Б1 – Структурная схема стенда физического подоби

Приложение В

(обязательное)

Материальные затраты

Таблица В1 – Материальные затраты

№	Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	Кол-во	Стоимость, руб.
1	Микроскоп	шт	200 000	1	200 000
2	Насос мембранный	шт	1 000	1	1 000
3	Насос-помпа	шт	500	1	500
4	Ноутбук	шт	65 000	1	65 000
5	Источник питания программируемый	шт	80 000	1	80 000
6	Мерный стакан, 1л	шт	500	2	1 000
7	Трубки ПВХ	м	500	10	5 000
8	Предметное стекло	шт	300	1	300
9	Хомуты d12	шт	50	6	300
10	Герметик	шт	700	1	700
11	Шаговые двигатели NEMA 17	шт	30 000	3	90 000
12	Драйвер шагового двигателя	шт	5 000	3	15 000
13	Муфта соединительная гибкая	шт	20 000	3	60 000
14	Смазка силиконовая универсальная	шт	500	2	1 000
15	Отладочная плата STM32F411 Nucleo-64	шт	7 000	1	7 000
16	Подшипник радиальный	шт	400	2	800
17	Филамент PETG ТМ Ecofil, 1,75 мм	шт	3 000	2	6 000
18	Блок питания 24В	шт	3 000	1	3 000
19	Соединительные провода	шт	500	2	1 000
20	Концевые выключатели	шт	2000	3	6 000
	ИТОГО			47	543 600

Приложение Г

(обязательное)

Заработная плата и начисления

Таблица Г1 – Заработная плата

№	Должность	Ставка	Средний оклад в мес., руб.	НДФЛ (13%), руб.	З/п (на руки), руб.	ФОТ в мес., руб.	ФОТ в год, руб.	1 год	2 год
1	Генеральный директор	1	50 000	6 500	43 500	50 000	600 000	600 000	600 000
2	Руководитель НИР	0.5	50 000	6 500	43 500	25 000	300 000	300 000	300 000
3	Менеджер по продажам	1	30 000	3 900	26 100	30 000	360 000	0	360 000
4	Инженер-разработчик	0.5	30 000	3 900	26 100	15 000	180 000	180 000	180 000
5	Программист	1	30 000	3 900	26 100	30 000	360 000	0	360 000
6	Инженер-технолог	1	35 000	4 550	30 450	35 000	420 000	420 000	420 000
7	Монтажник	2	20 000	2 600	17 400	40 000	480 000	0	480 000
	ИТОГО			31 850	213 150	225 000	2 700 000	1 500 000	2 700 000

Таблица Г2 – Начисления на заработную плату

№	Должность	ФОТ в мес., руб.	ПФР (22%), руб.	ФСС (2,9%), руб.	ФФОМС (5,1%), руб.	Взносы в мес., руб.	Взносы в год, руб.	1 год	2 год
1	Генеральный директор	50 000	11 000	1 450	2 550	15 000	180 000	180 000	180 000
2	Руководитель НИР	25 000	5 500	725	1 275	7 500	90 000	90 000	90 000
3	Менеджер по продажам	30 000	6 600	870	1 530	9 000	108 000	0	108 000
4	Инженер-разработчик	15 000	3 300	435	765	4 500	54 000	54 000	54 000
5	Программист	30 000	6 600	870	1 530	9 000	108 000	0	108 000
6	Инженер-технолог	35 000	7 700	1 015	1 785	10 500	126 000	126 000	126 000
7	Монтажник	40 000	8 800	1 160	2 040	12 000	144 000	0	144 000
	ИТОГО	225 000	49 500	6 525	11 475	67 500	810 000	450 000	810 000

Приложение Д

(обязательное)

Бизнес-модель по А.Остервальдеру

Таблица Д1 – Бизнес-модель по А.Остервальдеру

<i>Ключевые партнеры</i>	<i>Ключевые виды деятельности</i>	<i>Ценностные предложения</i>	<i>Взаимоотношения с клиентами</i>	<i>Потребительские сегменты</i>
<p>Стратегическое сотрудничество со следующими партнерами: поставщиками компонентов для производства системы; компаниями, которым готовый продукт проекта необходим для исследовательских целей; компаниями по производству оборудования</p>	<p>Производство. Разработка информационно-измерительной системы для проведения экспресс-анализа дисперсного состава скважинной жидкости.</p> <p>Разрешение проблем. Система позволяет получить статистические данные, которые могут использоваться в качестве входных параметров для систем управления процессами подготовки нефти, а также являться основанием для выбора оптимального метода разрушения нефтяной эмульсии.</p>	<p>1. Увеличить эффективность процессов подготовки нефти;</p> <p>2. Возможность создания эмульсии с заданными параметрами;</p> <p>3. Снижение энергозатрат процессов подготовки нефти;</p> <p>4. Получить данные для построения цифровых двойников систем.</p>	<p>1. Постоянная техническая и консультационная поддержка клиентов;</p> <p>2. Обратная связь;</p> <p>3. Участие в конференциях и выставках.</p>	<p>1. Нефтяные и газовые компании, имеющие учебные центры и научные лаборатории;</p> <p>2. Производственные компании, занимающиеся производством нефтяного оборудования;</p> <p>3. Университеты и техникумы, имеющие нефтегазовые направления подготовки специалистов.</p>
	<p><i>Ключевые ресурсы</i></p> <p>Комплектующие для системы</p>			
<p><i>Структура издержек</i></p> <p>Фиксированные издержки - заработная плата работникам, налоги, аренда, комплектующие. Переменные издержки – расходные материалы.</p>		<p><i>Потоки поступления доходов</i></p> <p>Генерирование дохода за счет:</p> <p>1. Масштабирования продукта. 2. Продажи лицензии на выпуск продукции с использованием данной технологии</p>		