

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта

УДК 62-868:622.276.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Кузнецов Павел Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Данекер В.А.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Соруководитель ШИП	Хилько В.И.	–		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Фех А.И.	–		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

Результаты обучения
по основной образовательной программе подготовки магистров
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения
P1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчёта и анализа <i>электротехнических устройств, объектов и систем.</i>
P2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
P3	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, <i>объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
P4	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы</i> и их компоненты.
P5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
P6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
P7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
P8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчётов и обмена технической информацией в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
P9	Эффективно работать индивидуально в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
P10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учётом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

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

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП _____
_____ _____ Гарганеев А.Г.
(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
5АМ87	Кузнецову Павлу Андреевичу

Тема работы:

Электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.02.2020 г., №58-29/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020 г.
------------------------------------------	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материала изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду; энергозатраты, экономический анализ и т.д.).</i>	<p>Объектом исследования является электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта.</p> <p>В качестве исходных данных представлены:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Номинальное напряжение сети – 220 В;2. Геометрические размеры прибора;3. Количество модулей вибробработки – 8 шт.;4. Диаметр трубы корпуса прибора – 121 мм.

<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки, техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературных источников, содержащих описание существующих методов увеличения дебита скважин; 2. Разработка конструкции энерго-сберегающего вибратора для обработки призабойной зоны пласта; 3. Разработка математической модели вибратора; 4. Расчёт, анализ и оптимизация режимов работы вибратора; 5. Выбор элементов силовой схемы подключения вибратора; 6. Разработка рекомендаций по практическому применению вибратора.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Общий вид прибора; 2. Корпус прибора; 3. Электромагнит модуля виброобработки.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Концепция стартап-проекта	Хилько Виталий Игоревич
Социальная ответственность	Фех Алина Ильдаровна
Иностранный язык	Качалов Николай Александрович
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Основная часть, Концепция стартап-проекта, Социальная ответственность – русский язык.</p>	
<p>Литературный обзор – иностранный язык.</p>	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Данекер Валерий Аркадьевич	к.т.н.		29.01.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Кузнецов Павел Андреевич		29.01.2020 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Кузнецову Павлу Андреевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Перечень вопросов, подлежащих разработке:

Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, в результате выполнения научно-технического исследования (функциональное назначение, основные потребительские качества).	При длительной эксплуатации скважин имеет место снижение дебита вследствие загрязнения призабойной зоны отложениями различного рода. Метод виброобработки призабойной зоны с помощью электромагнитного вибратора способствует интенсификации притоков нефти и газа, повышению производительности и приемистости скважин, сокращению затрат, времени и средств на их освоение.
Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли.	Результаты расчётов показывают, что добыча нефти на крупнейших месторождениях не сократится до 2030 г. и достигнет пика в примерно 90 млн т.
Объем и емкость рынка.	Общий эксплуатационный фонд скважин России по состоянию на 2018 г. – 175 057 скважин. 14% из общего фонда – бездействующий фонд скважин, половина из них подлежит восстановлению.
Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта.	Нефтегазодобывающие компании России. Интересен рынок Казахстана.
Конкурентные преимущества создаваемого продукта.	Увеличение текущей нефтеотдачи до 15%. Снижение энергозатрат до 20%. Снижение вязкости нефтепродуктов и, как следствие, снижение нагрузки на ЭЦН.
Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами.	Аналоги и конкуренты в сфере применения отсутствуют.
Способы защиты интеллектуальной собственности.	Возможна подача заявки на получение патентов на изобретение и на промышленный образец.
Планируемая стоимость продукта.	Оптовая отпускная цена одного прибора составляет 1,27 млн. руб.
Производственный план и план продаж.	Производство ВС-3500 возможно организовать на экспериментально-производственной базе НИ ТПУ. Ориентировочный объём производства до 100 единиц в год.

Перечень графического материала:

При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)	Приложение А.
----------------------------------------------------------------------------------------	---------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

19.04.2020 г.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Соруководитель ШИП	Хилько Виталий Игоревич	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Кузнецов Павел Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Кузнецову Павлу Андреевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»

Характеристика объекта исследования и область его применения.	Объектом исследования является электромагнитный вибратор. Область применения прибора: нефтегазодобывающая промышленность (восстановление малодебитных скважин; увеличение нефтеотдачи пласта).
---------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</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. 	<ul style="list-style-type: none"> – Трудовой Кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ; – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы; – Приказу Минздравсоцразвития РФ от 12.04.2011 №302н; «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда»; – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>2. Производственная безопасность 2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов. 2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия.</p>	<p>Вредные факторы: – недостаточная освещенность рабочей зоны; – превышение уровня шума на рабочем месте; – повышенный уровень вибрации; – физические перегрузки; эмоциональные перегрузки; – неудовлетворительный микроклимат; – движущиеся механизмы, подвижные части производственного оборудования.</p> <p>Опасные факторы: – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.</p>
<p>3. Экологическая безопасность</p>	<p>– разработка мер по обеспечению экологической безопасности.</p>

<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</p>	<p>Возможные ЧС – разрушение здания, пожар (возгорание), взрыв и удар молнией. Наиболее типичная ЧС – пожар (возгорание) в здании.</p>
--------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	<p>11.02.2020 г.</p>
-------------------------------------------------------------	----------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель ООД ШБИП</p>	<p>Фех Алина Ильдаровна</p>	<p>–</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5AM87</p>	<p>Кузнецов Павел Андреевич</p>		

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»
 Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)
 Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020 г.
------------------------------------------	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.01.2020	Обзор и анализ литературных источников по исследуемой теме.	10
12.03.2020	Разработка конструкции вибратора.	20
05.04.2020	Разработка математической модели и анализ режимов работы вибратора.	30
05.05.2020	Выбор элементов силовой схемы подключения вибратора.	20
08.05.2020	Концепция стартап-проекта.	10
19.05.2020	Социальная ответственность.	10
29.05.2020	Оформление результатов и выводов по работе.	

Составил преподаватель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Данекер В.А.	к.т.н.		29.01.2020 г.

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		29.01.2020 г.

Реферат

Магистерская диссертация содержит 151 страницу, 46 рисунков, 33 таблицы, 55 источников, 12 приложений.

Ключевые слова: снижение дебита, увеличение нефтеотдачи, призабойная зона, продуктивный пласт, вибратор скважинный, модуль виброобработки, резонанс, вынуждающая сила, математическая модель, анализ режимов работы, силовая схема подключения.

Объект исследования – электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта.

Цель работы – разработка энергосберегающего электромагнитного вибратора для обработки призабойной зоны пласта.

В выпускной квалификационной работе разработана конструкция энергосберегающего электромагнитного вибратора для обработки призабойной зоны пласта, разработана математическая модель, позволяющая исследовать режимы работы вибратора, произведён выбор элементов электропривода, а также разработаны рекомендации по применению прибора.

Область применения – нефтегазодобывающая промышленность (повышение нефтеотдачи на начальном этапе заметного снижения дебита).

Работа выполнена с помощью пакета программ: Microsoft Word 2016, MathCAD 15, AutoCAD 2018.

Оглавление

Введение	13
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	17
1.1 Анализ существующих методов увеличения дебита	17
1.2 Волновые технологии интенсификации добычи нефти	21
1.3 Технология и оборудование ВСМА	26
1.4 Выводы.....	30
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА.....	31
2.1 Определение основных размеров активатора и сердечника магнитопровода	31
2.2 Расчёт количества единичных модулей виброобработки	36
2.3 Расчёт обмоточных данных электромагнита.....	37
2.4 Расчёт массы активатора	39
2.5 Расчёт жёсткости пружинного подвеса.....	40
2.6 Выводы.....	43
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОДУЛЯ ВИБРООБРАБОТКИ	44
3.1 Электрический контур модуля виброобработки.....	44
3.2 Механический контур модуля виброобработки.....	49
3.3 Система дифференциальных уравнений модуля виброобработки.....	50
3.4 Алгоритм расчёта системы дифференциальных уравнений	51
3.5 Выводы.....	52
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОДУЛЕЙ ВИБРООБРАБОТКИ	53
4.1 Анализ режимов работы при обработке нефти с низким показателем вязкости (механическое сопротивление $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с)	53
4.2 Анализ режимов работы при обработке нефти со средним показателем вязкости (механическое сопротивление $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с)	63
4.3 Выводы.....	73
ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОПРИВОД УСТАНОВКИ	74
5.1 Разработка схемы подключения ВС-3500.....	74
5.2 Выбор элементов электропривода ВС-3500.....	75

5.2.1	Выбор преобразователя частоты.....	76
5.2.2	Выбор диода	77
5.2.3	Аппаратура управления преобразователя частоты	77
5.2.4	Аппаратура защиты преобразователя частоты.....	77
5.2.5	Выбор автоматического выключателя	77
5.2.6	Выбор кабеля питания	78
5.3	Выводы.....	79
ГЛАВА 6. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА		80
ГЛАВА 7. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....		95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		112
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ		114
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		118

Список обозначений и сокращений

АВ	–	автоматический выключатель;
АСПО	–	асфальтосмолопарафинистые отложения;
АЧХ	–	амплитудно-частотная характеристика;
БВО	–	блок виброобработки;
БД	–	блок диодов;
ВС	–	вибратор скважинный;
ВЭМА	–	вибратор электромагнитный активационный;
ГРП	–	гидравлический разрыв пласта;
ВСМА	–	виброструйная магнитная активация;
ЖС	–	жидкая система;
КИН	–	коэффициент извлечения нефти;
КЗ	–	короткое замыкание;
МВО	–	модуль виброобработки;
МУН	–	методы увеличения нефтеотдачи;
НКТ	–	насосно-компрессорные трубы;
ПНГ	–	попутный нефтяной газ;
ПП	–	продуктивный пласт;
ППД	–	поддержание пластового давления;
ПЗП	–	призабойная зона пласта;
ПЗС	–	призабойная зона скважины;
ПЧ	–	преобразователь частоты;
ТРИЗ	–	трудноизвлекаемые запасы;
УЗ	–	ультразвуковой;
ШФЛУ	–	широкая фракция легких углеводородов;
ЭМП	–	электромагнитный преобразователь;
ЭП	–	электрический привод;
ЭТУ	–	электротехническое устройство;
ЭЦН	–	электроцентробежный насос.

Введение

Актуальность работы

На сегодняшний день все больший интерес к трудноизвлекаемым запасам проявляют крупные нефтегазодобывающие компании. Доля «трудной нефти» растёт с каждым годом и на данный момент составляет более 65 % от общего объёма [1]. Не трудно догадаться, что столь значительный процент получается за счёт истощения легко извлекаемых запасов. Вследствие этого поиск новых методов увеличения нефтеотдачи, а также дебита скважин является актуальной задачей, ведь сохранение объёмов добычи нефти крайне важно для поддержания экономики нашей страны на должном уровне.

В большинстве случаев оценка эффективности разработки нефтяного месторождения определяется состоянием ПЗП нагнетательных и добывающих скважин. В процессе длительной эксплуатации снижается проницаемость ПЗП, что в свою очередь приводит к ухудшению фильтрационных характеристик продуктивных пластов. ПЗП загрязняется, в частности, из-за скопления в порах коллектора парафина, смол, различных механических примесей, фильтрации бурового раствора при первичном вскрытии пласта, цементации обсадной колонны, фильтрации жидкостей глушения во время проведения ремонтных работ, а также при выпадении различных продуктов реакции после закачки химических реагентов. Для очистки и восстановления проницаемости породы ПЗП применяют метод виброобработки.

Вибрационные методы по степени воздействия можно разделить на:

- мощные (гидродинамический метод);
- щадящие (технология ВСМА).

Механизм вибровоздействия на ПЗП состоит в формировании в ПЗП больших перепадов давления на забое скважины фронта отраженных волн, интерференция которых приводит в результате резонансных явлений к возникновению в ПЗП мощных гидравлических ударов, вызывающих микрогидро разрывы пласта, образование в нём сети микротрещин [2-6].

Виброобработка ПЗП осуществляется с помощью генератора волн давления гидродинамического типа (вибратора), спускаемого на забой скважины на колонне НКТ, преобразующего часть энергии потока жидкости, закачиваемой в скважину насосными агрегатами, в гидродинамические волны давления широкого спектра частот и амплитуд, распространяющихся в глубь пласта на достаточно большое расстояние. Гидродинамические волны одновременно воздействуют как на породу пласта, так и на насыщающие пласт флюиды, что приводит:

- в колебательное движение частицы породы-коллектора, их смещению и, в конечном счёте, к разуплотнению и разрыхлению породы;
- к изменению реологических свойств пластовых жидкостей, увеличению их подвижности;
- к снижению гидравлических сопротивлений в ПЗП при закачке специальных технологических жидкостей в пласт (кислотных растворов, поверхностно-активных веществ, реагентов и др.);
- к интенсификации процессов разрушения водонефтяных эмульсий и других смесей;
- к замедлению процессов парафинизации, солеотложений и других негативных явлений в скважине и пласте.

Гидродинамический метод имеет ряд недостатков:

- при низком пластовом давлении, а также при наличии зон поглощений, использование гидродинамического вибратора для обработки скважин нецелесообразно и малоэффективно;
- при превышении давления нагнетания над пластовым происходит гидравлический разрыв пласта и дальнейший процесс закачки воды в пласт становится неуправляемым.

Технология ВСМА, в отличие от гидродинамического метода, не несет никаких разрушающих воздействий на породу пласта. В основном используется для профилактики на начальном этапе заметного снижения дебита в целях увеличения нефтеотдачи пласта.

Объект исследования – электромагнитный вибратор обработки ПЗП.

Предмет исследования – разработка конструкции, расчёт, анализ и оптимизация режимов работы прибора на основе построенной математической модели.

Цель работы – разработка энергосберегающего электромагнитного вибратора для обработки ПЗП.

Устройство должно обладать следующими параметрами:

1. Питание от сети переменного тока с возможностью регулирования частоты и величины напряжения;
2. Габариты прибора должны обеспечивать свободное конструктивное размещение в существующих скважинах;
3. Обеспечивать воздействие на большую часть толщи нефтеносного слоя.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

- разработка конструкции для погружения в скважину с диаметром трубы корпуса прибора 121 мм;
- разработка математической модели, проведение анализа режимов работы прибора для различных конструктивных решений;
- по результатам анализа режимов работы прибора на математической модели разработка практических рекомендаций по выбору элементов электропривода.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель, позволяющая анализировать режимы работы вибратора на стадии проектирования;
2. Предложен метод циклического и импульсного воздействия на ПЗП.

Практическая ценность

1. Разработана модульная конструкция электромагнитного вибратора, обеспечивающая снижение вязкости нефти и увеличение дебита скважин, за счёт работы прибора на резонансной частоте;
2. Разработаны практические рекомендации по применению вибратора для обработки ПЗП.

Методы исследования – в работе использовались численные методы решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты. Математическое моделирование осуществлялось в программной среде MathCAD 15.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением допущений при математическом моделировании, использованием известных методов решение систем дифференциальных уравнений.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Анализ существующих методов увеличения дебита

В начале работы целесообразно провести обзор современных методов увеличения дебита и способов снижения вязкости нефтепродуктов.

К наиболее часто применяемым физическим методам относятся:

- гидравлический разрыв пласта;
- бурение горизонтальных скважин;
- электромагнитное воздействие;
- волновое воздействие на пласт.

Гидравлический разрыв пласта. При ГРП происходит создание трещин в горных породах, прилегающих к скважине, за счёт давления на забое скважины в результате закачки в породы вязкой жидкости (рисунок 1.1.1) [7].

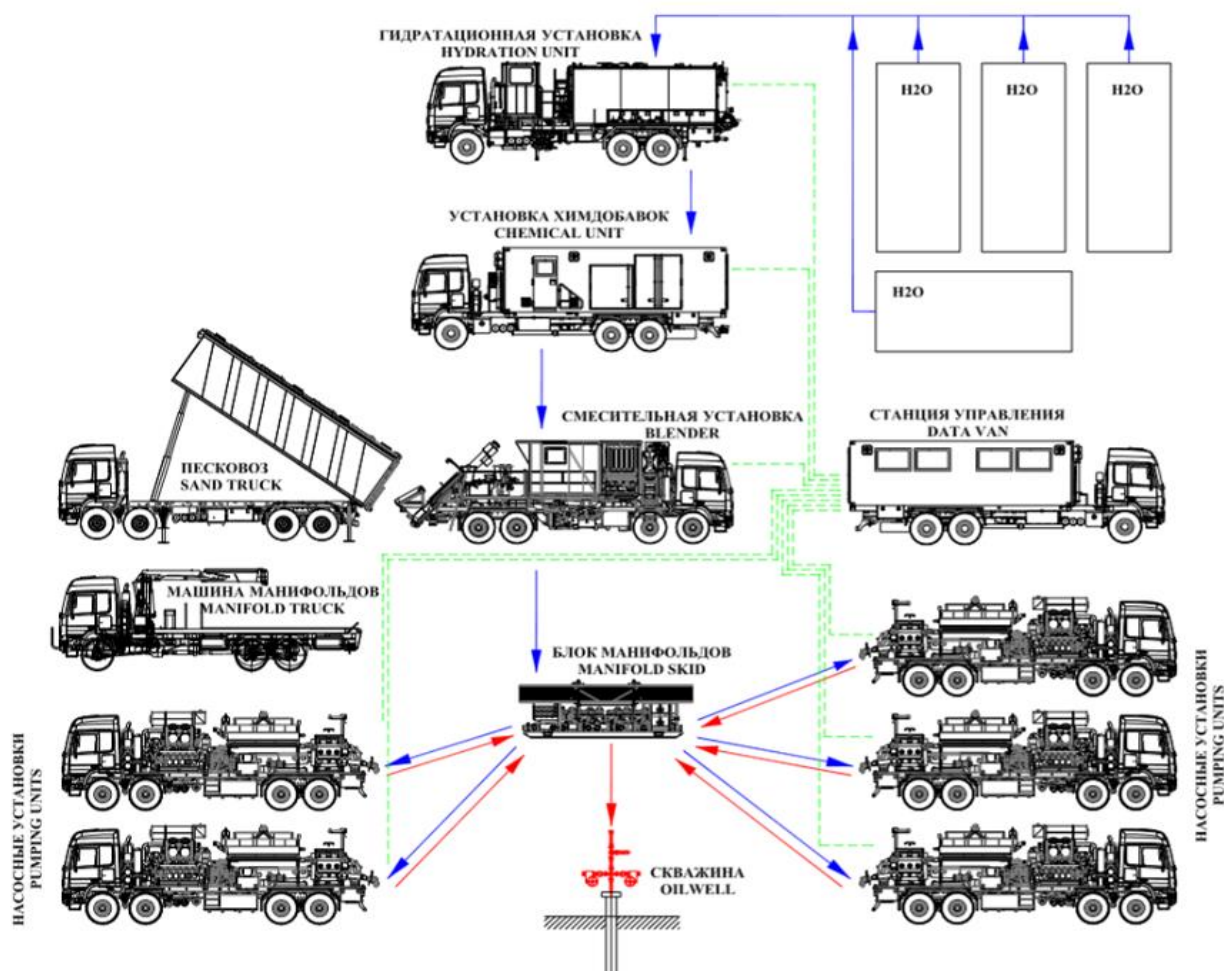


Рисунок 1.1.1 – Схема проведения ГРП

Преимущества ГРП:

– производительность скважины после проведения ГРП может увеличиться иногда в десятки раз. Это свидетельствует о том, что образованные трещины соединяются с существовавшими ранее, и приток жидкости к скважине происходит из отдаленных, изолированных до применения ГРП зон.

Недостатки:

– основными недостатками «вертикального» ГРП считают малую толщину продуктивных слоёв и связанное с этим практически необратимое проникновение вершин трещин в зоны водо- и газонефтяного контактов, что зачастую приводит к быстрому обводнению продукции и/или прорыву газов.

Бурение горизонтальных скважин. Технология повышения нефтеотдачи методом строительства горизонтальных скважин зарекомендовала себя в связи с увеличением количества нерентабельных скважин с малодебитной или обводненной продукцией и бездействующих аварийных скважин по мере перехода к более поздним стадиям разработки месторождений, когда обводнение продукции или ППД на многих разрабатываемых участках (особенно в литологически неоднородных зонах нефтеносных пластов с ТРИЗ) опережает выработку запасов при существующей плотности сетки скважин (рисунок 1.1.2). Увеличение нефтеотдачи происходит за счёт обеспечения большей площади контакта ПП со стволом скважины [7].

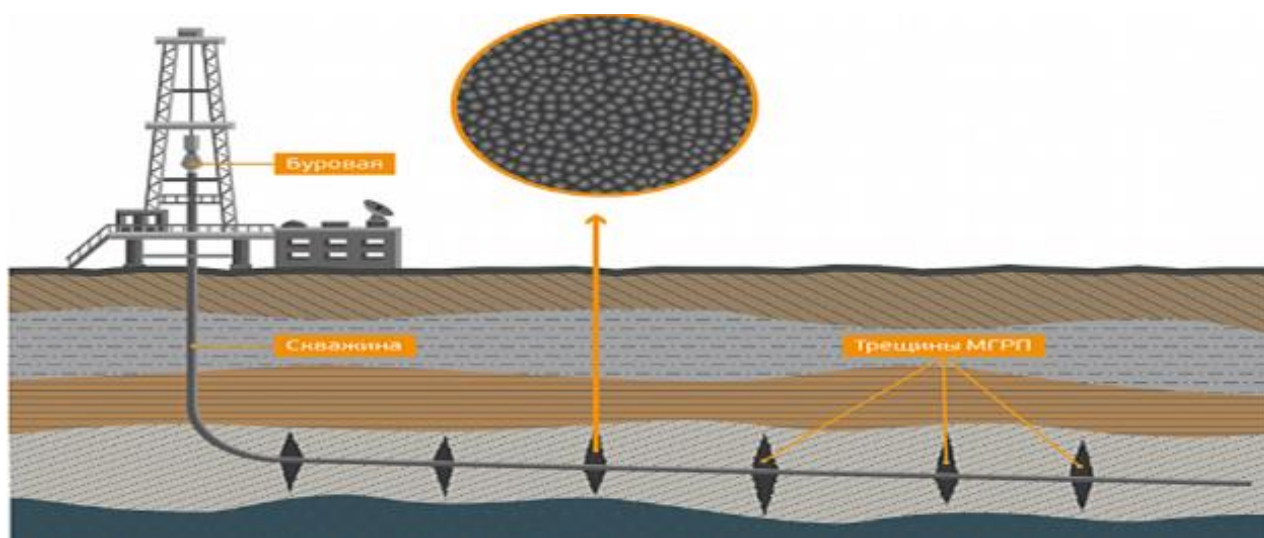


Рисунок 1.1.2 – Метод горизонтального бурения направленных скважин

Преимущества:

- уменьшение суммарного количества скважин на месторождении;
- рост уровня извлечения нефти;
- привлечение в разработку новых залежей нефтяных пластов и высоковязкой нефти.

Недостатки:

- строительство горизонтальных скважин затратнее на 10-15%, чем вертикальных;
- посредством бурения горизонтальных скважин может быть дренирован только один нефтенасыщенный пласт.

Электромагнитное воздействие. Метод основан на использовании внутренних источников тепла, возникающих при воздействии на пласт высокочастотного электромагнитного поля. Зона воздействия определяется способом создания (в одной скважине или между несколькими), напряжения и частоты электромагнитного поля, а также электрическими свойствами пласта. Помимо тепловых эффектов, электромагнитное воздействие приводит к деэмульсации нефти, снижению температуры начала кристаллизации парафина и появлению дополнительных градиентов давления, за счёт силового воздействия электромагнитного поля на пластовую жидкость (рисунок 1.1.3) [7].

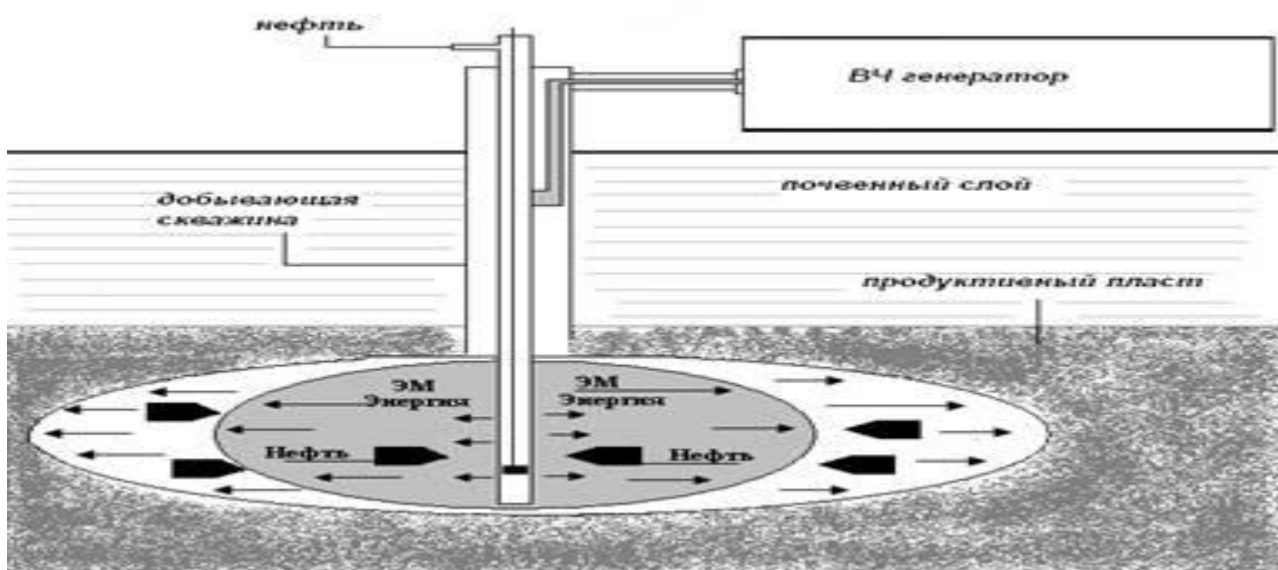


Рисунок 1.1.3 – Схема электромагнитного воздействия на пласт

Преимущества:

- электромагнитные волны распространяются до затухания на большое расстояние вглубь объекта воздействия;
- благодаря воздействию электромагнитного поля возникает рассеивание энергии, которая провоцирует распределение источников давления, сил, тепла, что приводит к улучшению фильтрационных характеристик ПП.

Недостатки:

- требует чёткого взаимодействия двух подсистем – наземной и погружной, сложного алгоритма настройки и, соответственно, обеспечения приемлемого и надежного канала связи: скважина – поверхность.

Волновое воздействие на пласт. Известно множество способов волнового и термоволнового (вибрационного, ударного, импульсного, термоакустического) воздействия на нефтяной пласт или на его призабойную зону.

Основная цель технологии – ввести в разработку низкопроницаемые зоны пласта, слабо реагирующие на системы ППД. Воздействие осуществляется упругими волнами, затухающими в высокопроницаемых участках пласта, но распространяющимися на значительное расстояние и с достаточной интенсивностью.

Применением таких методов можно достичь заметной интенсификации фильтрационных процессов в пластах и повышения их нефтеотдачи в широком диапазоне АЧХ [7].

Остановимся на волновом воздействии на ПП подробнее. Проанализируем имеющиеся разработки, патенты и оборудование, касающиеся этой тематики.

1.2 Волновые технологии интенсификации добычи нефти

Технология импульсно-волнового воздействия на нефтяной пласт через ПЗС разработана в компании ЗАО «НТС-Лидер» [8]. Оборудование, способное генерировать низкочастотные колебания в пласте, крепится на устье скважины и использует для этого энергию сжатого газа (азота). Такое воздействие, по мнению авторов, изменяет смачиваемость флюида к стенкам пор, приводит к увеличению скорости фильтрации в пласте и принудительной фильтрации нефти через перфорационные отверстия. В течение пяти лет обработано 107 нагнетательных и 60 добывающих скважин в Западной Сибири, эффективность применения составила 80%.

В научном центре нелинейной волновой механики и технологии РАН [9] разработана технология волнового воздействия на пласт. Опытно-промышленные испытания были проведены на Лугенецком месторождении (Томская область). Генератор обрабатывал ПЗП в течение 8 часов, что привело к увеличению дебита флюида не только в обрабатываемой скважине, но и в соседних, причём эффект обработки сохранялся в течение нескольких месяцев.

В научно-производственной фирме «Ойл-Инжиниринг» разработаны и внедрены гидродинамические скважинные генераторы с амплитудой колебания давления 3-6 МПа в диапазоне частот 20-300 Гц в зависимости от модификации [10].

В работе [11] сопоставили результаты виброударного воздействия на ПЗП на Самотлорском месторождении с эффектом последствия локальных землетрясений (магнитуды 5,4-7,2 балла) на месторождении ЛостХилс (США). Дополнительный прирост нефти после обработки 48 скважин составил примерно 12-15%.

Вибрационный метод обработки ПЗП забойным источником, питающимся от наземного источника, излучающим в широком спектре низких частот и способным настроиться в резонанс с пластовыми колебаниями, реализован в работе [12]. При этом область обработки достигает 25 км² охвата

пласта, что приводит к увеличению нефтедобычи и уменьшению обводнённости флюида.

Известно, что УЗ обработка эффективно разгазирует флюид, что подтверждается результатами физического моделирования в работе [13], причём, чем выше газовый фактор, тем эффективнее этот процесс, а значит и процесс несмешивающегося вытеснения нефти. В работе [14] экспериментально определены рациональные временные режимы обработки ПЗС.

Согласно [15] УЗ обработка ПЗС увеличивает текучесть и проницаемость флюида, вследствие раскольматации каналов коллектора от АСПО, бурового раствора, частиц песка и др. Высокочастотный УЗ метод использует поля частотой 18-35 кГц с интенсивностью до 1 Вт/см², причём рабочая резонансная частота разработанных скважинных излучателей равна 18-24 кГц, при этом интенсивность УЗ на оси скважины достигает 0,1 Вт/см², на расстоянии 1 м от оси скважины составляет примерно 0,02 Вт/см².

Известны способы интенсификации добычи, которые используют для волнового воздействия также электрический способ доставки энергии на забой скважины и преобразование её в необходимую для этого форму, например, в виде высоковольтного импульсного разряда, который возбуждает циклические волны сжатия, пульсирующую парогазовую полость [16].

Изобретение [17] относится к нефтедобывающей промышленности и может быть использовано для повышения нефтеотдачи добывающих скважин при многократном гидроимпульсном воздействии на пласт.

Техническим результатом изобретения является повышение эффективности и надежности устройства для многократного гидроимпульсного воздействия на ПЗП и возможности его использования на горизонтальных и наклонных скважинах (рисунок 1.2.1).

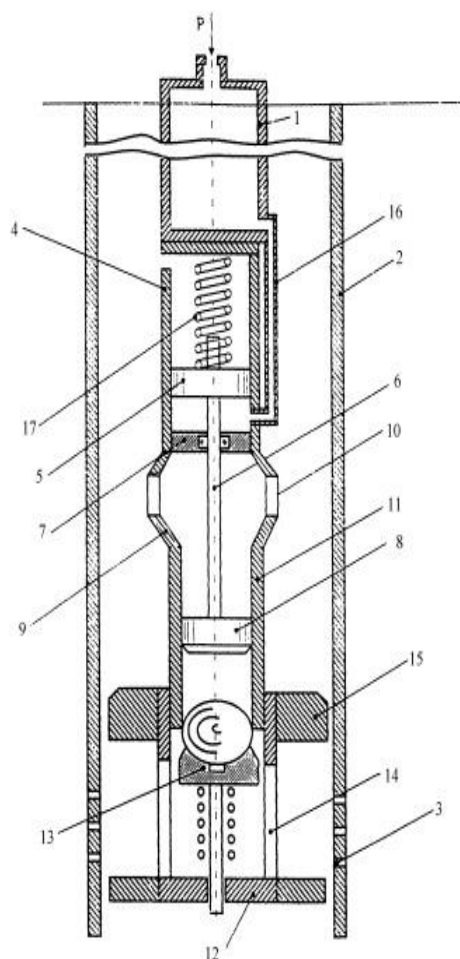


Рисунок 1.2.1 – Устройство для гидроимпульсного воздействия на ПЗП

Устройство (рисунок 1.2.1) для воздействия на ПЗП включает колонну НКТ 1, имплозионную камеру 11 с размещённым в ней плунжером 8, верхний конец которой соединён с расширенным патрубком 9, имеющим окна 10, а её нижний конец снабжён подпружиненным клапаном 11, установленным в корпусе 12, имеющем окна 14 и концентраторы давления 15, кроме того, устройство снабжено гидроцилиндром 4 с расположенным внутри поршнем 5, жёстко связанным с, как уже было сказано ранее, плунжером 8 имплозионной камеры 11 и подпружиненным сверху возвратной пружиной 17, при этом бесштоковая полость гидроцилиндра имеет сообщение с затрубным пространством, а его штоковая полость оснащена трубопроводом 16 для подвода рабочей жидкости из колонны НКТ 1.

Изобретение [18] относится к нефтегазодобывающей промышленности, а также к технике генерации упругих колебаний. Скважинное оборудование для

поличастотной волновой обработки ПЗП (рисунок 1.2.2) включает струйный насос 1 с обратным сопловым клапаном 2 и гидроаккумулятором 3, размещёнными над пакером 4, установленные под пакером клапан-реле 5 с обратным гидроклапаном 6, а также гидромеханический излучатель упругих колебаний 7, генератор низкочастотных релаксационных автоколебаний расхода 8 в варианте размещения упругой полости 9 между рессорами подвески подпружиненного центратора 10.

Оборудование спускается в скважину на НКТ 11 и 12 внутри обсадной колонны 13 таким образом, чтобы генератор и гидромеханический излучатель располагались в интервале пласта. На устье устанавливается арматура с центральным вентиляем В1 и межтрубным вентиляем В2. Для удобства работы рационально использовать блок из вентиляей В3, В4, В5 и В6, к которому подключаются насосный агрегат 14 и сливная линия с сепаратором 15 циклонного типа, закреплённого в технологической емкости 16 в противоположной стороне от приема насосного агрегата. Циклонный сепаратор служит для отделения газа, в качестве гасителя энергии потока при нефтегазопроявлениях, а также для уменьшения бурления рабочей жидкости, чтобы обеспечить более спокойное осаждение выносимых из пласта взвешенных частиц на дно технологической емкости 16.

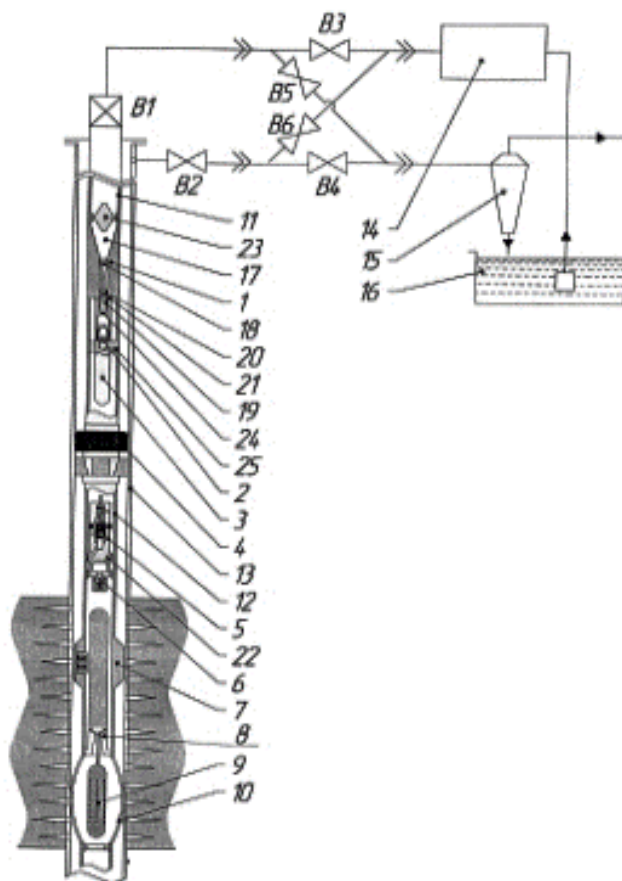


Рисунок 1.2.2 – Схема оборудование для поличастотной волновой обработки ПЗП

Процесс обработки ПЗП включает две основные стадии работы скважинного оборудования – волновое воздействие и депрессионное воздействие. По необходимости могут производиться дополнительные стадии, например, теплового воздействия, закачки реагентов с различным функциональным назначением, а также операции по репрессии, депрессионно-репрессии и другим воздействиям на ПЗП.

Технический результат изобретения – увеличение нефтеотдачи пласта за счет комплексного подхода к достижению максимальной эффективности генерирования релаксационных автоколебаний расхода, основными моментами которого являются рациональное использование свойств закрученных потоков, улучшение их взаимодействия.

1.3 Технология и оборудование ВСМА

Известна технология виброструйной магнитной активации ЖС, позволяющая производить магнитную обработку растворов.

Технология ВСМА – это способ многокомпонентного физико-химического воздействия на сложные ЖС, применяемый для изменения их реологических свойств и получения требуемых параметров. ВЭМА предназначен для активации (перемешивания, разжижения, диспергации) нефтепродуктов, содержащих парафины, асфальтены, и других высоковязких жидкостей, обладающих тиксотропными свойствами [19].

В основе технологии лежит применение ЭМП с низким энергопотреблением, способных работать в резонансном режиме (рисунок 1.3.1), что способствует достижению максимальных амплитуд колебаний рабочего органа в ЖС.

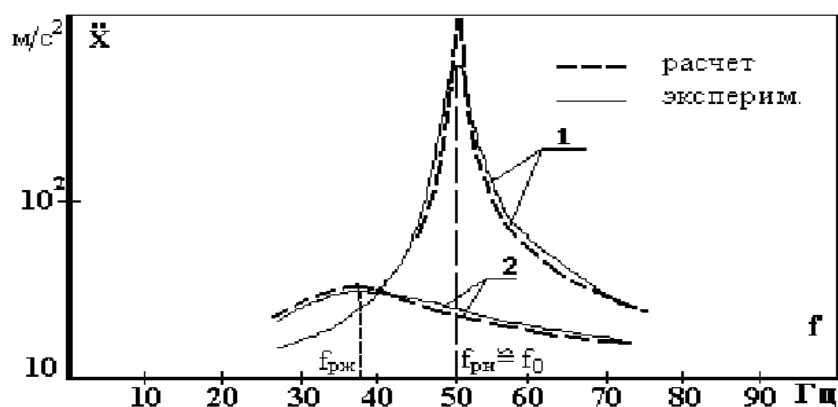


Рисунок 1.3.1 – АЧХ активатора (1 – на воздухе; 2 – в жидкости)

Использование в данном техническом решении для обработки ЖС колебательного движения рабочего органа имеет существенные преимущества, заключающиеся в возможности получения максимальных амплитуд колебаний рабочего органа в режиме резонанса [20].

Основными конструктивными элементами ЭМП являются электромагнитный привод, электрическая часть которого размещена в герметичном корпусе, рабочий орган устройства – активатор ВСМА и упругий подвес рабочего органа. Наличие других элементов обусловлено

необходимостью крепления ЭМП в общей конструкции технологического оборудования. Вся конструкция устройства ВСМА должна быть погружена в среду ЖС. Рабочий орган электромагнитного привода должен совершать колебательные движения непосредственно в среде ЖС. На рисунке 1.3.2 представлен основополагающий принцип построения конструкции устройств ВСМА. Как было указано выше, устройство ВСМА содержит электромагнитный привод на основе тягового электромагнита, формирующего пульсирующую возмущающую силу, действующую между сердечником тягового электромагнита и якорем, роль которого выполняет рабочий орган устройства ВСМА. Учитывая агрессивные свойства и электропроводность большинства ЖС, электрическая часть электромагнитного привода должна быть изолирована от среды ЖС. Как правило, это достигается тем, что электрические части тягового электромагнита помещаются в герметичном металлическом корпусе. Подбором соответствующих численных значений массы рабочего органа и жёсткости упругого подвеса можно обеспечить работу устройства ВСМА на определённой резонансной частоте. При формировании возмущающей силы, изменяющейся с частотой, равной резонансной частоте колебательной системы ЭМП, обеспечивается максимальная амплитуда колебаний рабочего органа устройства ВСМА. При колебаниях рабочего органа в среде ЖС формируется затопленная струя. Затопленная струя обеспечивает постоянную циркуляцию ЖС во всём объёме. Таким образом, весь объём ЖС многократно проходит через пространство, определяемое размерами рабочего органа устройства ВСМА [20].

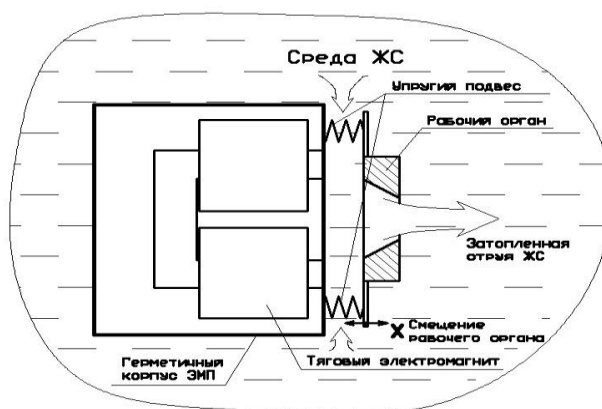


Рисунок 1.3.2 – Принцип построения устройства ВСМА

Устройство ВСМА имеет ряд параметров, отвечающих за производительность, к ним относятся:

- скорость затопленных струй;
- сдвиговая скорость слоёв;
- ускорение рабочего органа;
- перепад давления в зоне активации;
- магнитная индукция;
- частота воздействий;
- напряжённость электрического поля.

Оригинальная конструкция рабочих органов оборудования ВСМА обеспечивает наличие в среде замкнутых потоков жидкости, которые, в свою очередь, создают условия для многократного попадания отдельных порций нефти в зону активации.

Способ ВСМА технически перспективен для:

- создания виброактивационных скважинных снарядов для обработки ПЗП, в том числе для увеличения нефтеотдачи;
- создания установок утилизации нефтешламов;
- создания высокорентабельных установок предварительной обработки нефти для увеличения выхода светлых фракций;
- создания приборов для очистки НКТ без их демонтажа;
- создания компактных мобильных установок подготовки товарной нефти.

Как было указано выше, технология ВСМА заключается в создании замкнутого потока ЖС и многократном прохождении ограниченных порций ЖС через зону активации. Зона активации характеризуется действием в ней подавляющего большинства из перечисленных ранее физических воздействий на ЖС. Сама зона активации оборудования ВСМА формируется рабочим органом, совершающим колебательные движения, и элементами корпуса ЭМП. В таблице 1.3.1 приведены виды и предельные уровни действующих факторов зоны активации технологии ВСМА. Предельные уровни воздействующих факторов в

зоне активации установлены на основе анализа действующих образцов оборудования ВСМА [20].

Таблица 1.3.1 – Параметры физических воздействий зоны активации технологии ВСМА

Фактор воздействия	Уровень предельных значений
Скорость затопленных струй, м/с	20
Сдвиговая скорость слоёв, с ⁻¹	1,5·10 ⁴
Ускорение рабочего органа, g	100
Перепад давления в зоне активации, атм	3
Магнитная индукция, Тл	0,9
Частота воздействий, Гц	до 70
Напряжённость электрического поля, В/м	20

Следует отметить тот факт, что предельные значения воздействующих факторов в зоне активации оборудования ВСМА, находятся на уровнях, не меньших, чем в известных образцах технологического оборудования, а в ряде случаев и превышают аналогичные параметры.

Принимая во внимание вышеизложенные показатели технологии и оборудования ВСМА, логичным является предположение о перспективности этой технологии для обработки ПЗП, её отчистки от отложений и, как следствие, увеличение дебита скважины.

1.4 Выводы

Приведённый аналитический обзор основных методов увеличения дебита, патентов и оборудования для интенсификации добычи нефти, позволяет сделать следующие выводы:

- существующие методы увеличения дебита имеют ряд отдельных недостатков, при которых их применение затруднено (сложность оборудования, энерго- и капиталоемкость компонентов, времязатратность подготовки, вероятность недостижения планируемого эффекта, неэффективность метода на большой глубине, малая продолжительность эффекта);

- отличительной особенностью технологии ВСМА является то, что при работе МВО в режиме резонанса возможно генерировать и передавать в глубь пласта на значительное расстояние без массопереноса достаточно высокие градиенты давления, необходимые для приведения в движение нефти в застойных зонах, снижения её вязкости, а также увеличения проницаемости ПЗП;

- преимущества технологии ВСМА обусловлены высокими удельными характеристиками всего комплекса физических воздействий на обрабатываемую среду, что даёт основание для устранения недостатков существующих устройств и методов увеличения дебита.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА

Основными элементами МВО, как было сказано ранее, являются электромагнит и подвижный якорь, выполняющий роль механического активатора. Массогабаритные размеры каждого из этих элементов в значительной степени будут влиять на режимы работы вибратора.

Возможность работы МВО на разных резонансных частотах воздействия на ПЗП расширяют область его применения, поэтому при разработке конструкции вибратора необходимо обеспечивать такие режимы работы. Достигается это путём расчёта соответствующей жёсткости пружинного подвеса при неизменной конструкции активатора.

2.1 Определение основных размеров активатора и сердечника магнитопровода

Наиболее целесообразным при разработке конструкции вибратора для обработки ПЗП применять модульный подход, который позволяет оптимально решать задачи, поставленные в работе:

- габариты прибора должны обеспечивать свободное конструктивное размещение в существующих скважинах;
- обеспечение воздействия на большую часть толщи нефтеносного слоя.

При определении размеров активатора необходимо учитывать то обстоятельство, что при больших габаритах, соответственно, будет расти и его масса. Для обеспечения резонансного режима работы устройства при большой массе активатора потребуется обеспечивать и соответствующее большое значение жёсткости пружинного подвеса. Высокие значения жёсткости могут сказаться на увеличении габаритов узла подвеса активатора, что не всегда является приемлемым [20].

В общем случае, как это было отмечено ранее, активатор может выполняться прямоугольной или круглой формой. С позиции технологии

изготовления активатора, размещаемого в трубном пространстве, предпочтительным является активатор прямоугольного сечения.

Существующая в настоящее время практика эксплуатации устройств для обработки ЖС позволяет сформулировать следующую рекомендацию: величина внешнего диаметра активатора МВО не должна превышать 250 мм. Для активатора прямоугольного типа данная рекомендация относится к приведённому диаметру. Указанное значение диаметра активатора рекомендуется выбирать для МВО, работающего в ЖС, имеющей низкое значение вязкости и плотность не более 1000 кг/м^3 . Для ЖС со средними показателями вязкости и плотностью до 2000 кг/м^3 следует использовать активатор с условным диаметром не более 150 мм. Для высоковязких ЖС с плотностью более 2000 кг/м^3 активатор должен выполняться диаметром 90-100 мм. Данные рекомендации относятся к устройствам промышленного применения [20].

Разрабатываемый прибор – ВС-3500. МВО является основной частью вибратора, и осуществляет непосредственное излучение магнитных и механических воздействий в ЖС. Принципиальное конструктивное решение общего вида МВО приведено на рисунке 2.1.1.

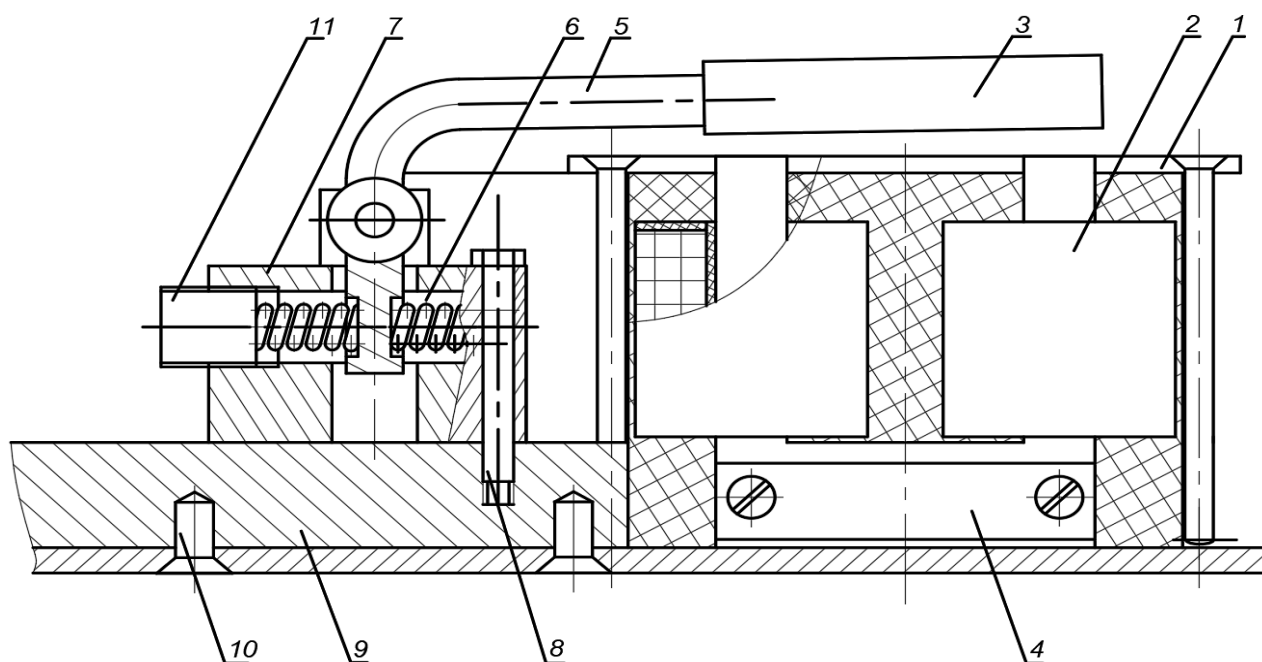


Рисунок 2.1.1 – Конструкция модуля виброобработки

МВО (рисунок 2.1.1) состоит:

- 1 – корпус;
- 2 – электромагнит;
- 3 – активатор;
- 4 – сердечник;
- 5 – коромысло;
- 6 – пружины;
- 7 – стойка;
- 8 – винты крепления стойки;
- 9 – каркас стойки;
- 10 – винты крепления каркаса;
- 11 – винт регулировки воздушного зазора.

Корпус МВО 1 предназначен для размещения электромагнита 2 в объеме, изолированном от воздействия среды, и поэтому он должен быть герметизирован. Пространство корпуса, не занятое электромагнитом, заливается компаундом для обеспечения лучшего рассеивания тепла от обмоток и магнитопровода.

Электромагнит 2 предназначен для создания возмущающей силы в колебательной системе. Электромагнит жёстко связан с корпусом, поэтому в этой конструкции колебания совершает активатор прямоугольного сечения 3, являющийся якорем электромагнита. Сердечник электромагнита 4 изготовлен из листов электротехнической стали П-образной формы, набранных в пакет. Обмотки расположены на обоих стержнях сердечника для экономии провода. Активатор 3 спрессован из магнитопроводящего порошка и прикреплен к коромыслу 5.

Возвращающую силу колебательной системы МВО формируют упругости 6, представляющие из себя цилиндрические пружины, расположенные в стойке 7. Стойка закреплена винтами 8 к каркасу 9. Каркас стойки закреплён винтами 10. Зазор между активатором 3 и корпусом 1 регулируется винтом 11.

Принцип действия

Принцип комплексного физического воздействия на ЖС заключается в следующем: при подаче напряжения на МВО по обмоткам магнитопровода протекает ток, создающий электромагнитную силу притяжения активатора к полюсам стержней магнитопровода. Активатор при этом движется в сторону стенки МВО. Жидкость, находящаяся в пространстве между основанием активатора и стенкой МВО «выдавливается», образуя пульсирующую затопленную струю жидкости. При этом пружина сжимается, запасая кинетическую энергию. При снятии напряжения с обмоток электромагнитная сила притяжения становится равной нулю и за счёт кинетической энергии, запасённой в пружине, активатор начинает двигаться в обратном направлении – от стенки МВО. При питании обмоток напряжением переменной частоты и использовании диода активатор совершает гармонические колебания с частотой, равной частоте питающего напряжения. Учитывая, что при работе ЭМП в различных жидкостях сопротивление движению активатора будет изменяться, возникает необходимость регулировать частоту питающего напряжения, для обеспечения резонансного режима. Регулирование частоты питающего напряжения осуществляется с помощью преобразователя частоты.

Для обеспечения резонансного режима работы МВО необходимо произвести соответствующий подбор массы колеблющихся элементов и жёсткости. Исходными данными для определения значения жёсткости пружин является масса активатора и собственная частота колебательной системы, значение которой предварительно может быть выбрано из условия обеспечения резонанса при работе МВО в ЖС на частоте близкой к 50 Гц.

Режим работы МВО на воздухе соответствует колебаниям активатора на собственной частоте, так как потери на вязкое трение среды практически отсутствуют. В таком случае, при известной массе активатора и частоте колебаний, можно расчётным путём определить жёсткость пружины.

Практикой разработки подобных приборов установлено, что частота собственных колебаний ЭМП должна находиться в пределах от 60 до 70 Гц [20].

Предварительно принимаем значение собственной частоты колебательной системы равной 65,5 Гц. Масса активатора определяется из его геометрических размеров. Размеры активатора выбирается исходя из размеров магнитопровода. Общий вид сердечника магнитопровода МВО с обмотками представлен на рисунке 2.1.2.

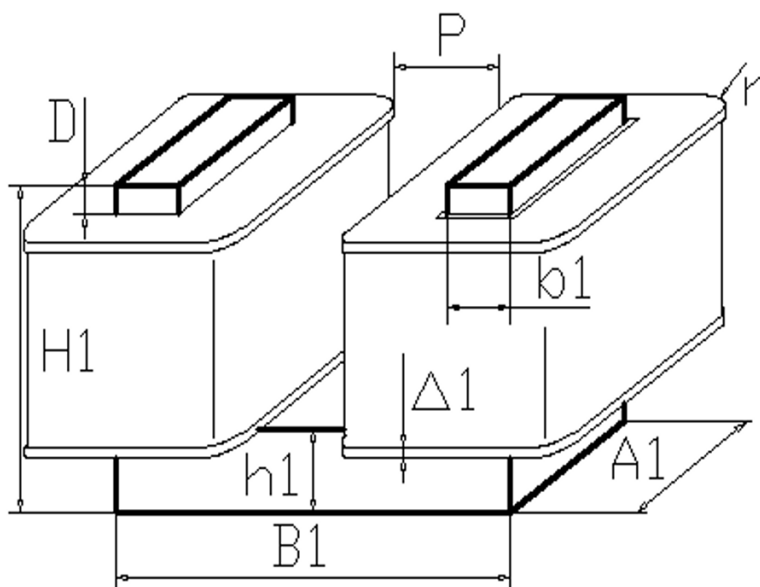


Рисунок 2.1.2 – Общий вид конструкции магнитопровода

Предварительные размеры магнитопровода, определенные из условия его размещения в трубе корпуса вибратора диаметром 121 мм, представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Размеры магнитопровода

Расстояние между обмотками	$P = 1 \text{ мм}$
Зазор между обмоткой и стенкой корпуса	$D = 4 \text{ мм}$
Высота ярма индуктора	$h1 = 23 \text{ мм}$
Высота стержня индуктора	$H1 = 91 \text{ мм}$
Ширина полюсного наконечника индуктора	$b1 = 15 \text{ мм}$
Длина полюсного наконечника индуктора	$A1 = 0,35 \cdot B1 = 29 \text{ мм}$
Длина ярма индуктора	$B1 = 84 \text{ мм}$
Толщина каркаса обмотки электромагнита	$\Delta 1 = 2 \text{ мм}$

Размеры активатора, соответствующие размерам магнитопровода, представлены в таблице 2.1.2.

Таблица 2.1.2 – Размеры активатора

Длина	$A = 84$ мм
Ширина	$B = 86$ мм
Высота	$H_a = 18$ мм
Радиус скругления	$R = 60,5$ мм

Эскизный чертёж активатора приведен на рисунке 2.1.3.

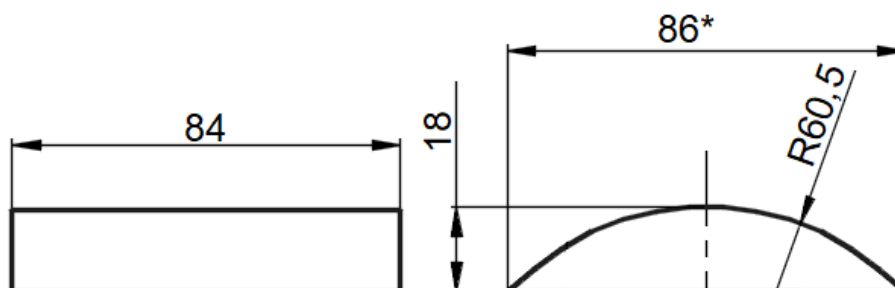


Рисунок 2.1.3 – Эскизный чертёж активатора

2.2 Расчёт количества единичных модулей виброобработки

При выборе количества МВО необходимо исходить из следующий соображений:

- ВС-3500 должен обеспечивать объёмное воздействие на пласт. Другими словами, устройство должно воздействовать на пласт как по его высоте, так и по всей длине окружности, и во всех направлениях. Поэтому МВО должны распределяться по высоте конструкции прибора с определённым сдвигом по окружности. Кроме этого, при спуске в скважину не должно происходить заклинивание прибора.

- Размещение МВО сопровождается вырезом отдельных окон в трубной конструкции, следовательно, не должно происходить ослабление механической прочности конструкции. Вследствие этого окна, в которые будут помещаться МВО, должны быть расположены на некотором расстоянии друг от друга по высоте.

Принимая всё вышесказанное во внимание, выбираем длину ВС-3500 не более 4 метров, а при сдвиге МВО по длине прибора на расстояние 150-200 мм

расчётное количество модулей принимаем $N = 8$ штук. При таком сдвиге (на 90 градусов) МВО воздействуют попарно в каждом направлении по кругу.

Сборочный чертёж ВС-3500 представлен в Приложении А.

Общий вид конструкции корпуса ВС-3500 с вырезами по длине для размещения МВО представлен в Приложении Б.

Чертёж активатора представлен в Приложении В.

2.3 Расчёт обмоточных данных электромагнита

Основой для расчёта обмоточных данных являются размеры магнитопровода, определённые ранее (таблица 2.1.1). Логично, что обмотка может быть размещена в межсердечниковом пространстве магнитопровода.

Рассчитаем площадь сечения окна сердечника магнитопровода для размещения обмоток:

$$S_{\text{окн}} = (B1 - 2b1 - 2\Delta l - P) \cdot (H1 - h1 - 2\Delta l - D). \quad (2.3.1)$$

Принимаем $\Delta l = 0,002$ м; $P = 0,001$ м; $D = 0,004$ м.

$$S_{\text{окн}} = (0,084 - 2 \cdot 0,015 - 2 \cdot 0,002 - 0,001) \cdot (0,091 - 0,023 - 2 \cdot 0,002 - 0,004) = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Тогда расчётное количество витков в обмотке магнитопровода:

$$W_p = \frac{2 \cdot S_{\text{окн}} \cdot k_{\text{зап}}}{\pi \cdot d_{\text{пр.и}}^2}. \quad (2.3.2)$$

Принимаем коэффициент заполнения окна сердечника магнитопровода обмоточным проводом $k_{\text{зап}} = 0,55$ (при автоматизированной намотке) [20]. Исходя из технологических соображений, для обмоток рекомендуется выбирать обмоточный провод диаметром в диапазоне от 0,3 до 1,5 мм [20].

Выбираем обмоточный провод марки ПЭТВ диаметром жилы $d_{\text{пр}} = 0,85$ мм. Диаметр провода в изоляции $d_{\text{пр.и}} = 0,94$ мм [21].

$$W_p = \frac{2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,55}{3,14 \cdot 0,00094^2} = 951.$$

Принимаем количество витков $W_p = 950$.

Допустимая толщина слоёв обмотки:

$$\Delta t = \frac{B1 - 2b1 - 2\Delta l - P}{2} = \frac{0,084 - 2 \cdot 0,015 - 2 \cdot 0,002 - 0,001}{2} = 0,02 \text{ м}. \quad (2.3.3)$$

Расчётное количество слоёв обмотки:

$$N_{\text{сл}} = \frac{\Delta t}{d_{\text{пр.и}}} = \frac{0,02}{0,00094} = 21,277. \quad (2.3.4)$$

Принимаем $N_{\text{сл}} = 21$.

Количество рядов обмотки:

$$N_{\text{ряд}} = \frac{W_{\text{р}}}{N_{\text{сл}}} = \frac{950}{21} = 45,238. \quad (2.3.5)$$

Принимаем $N_{\text{ряд}} = 45$.

Высота обмотки:

$$h_{\text{об}} = k_{\text{зап}} \cdot N_{\text{ряд}} \cdot d_{\text{пр.и}} + 2\Delta l = 1,1 \cdot 45 \cdot 0,00094 + 2 \cdot 0,002 = 0,051 \text{ м}. \quad (2.3.6)$$

Расчётное значение длины среднего витка обмотки:

$$l_{\text{ср}} = 2(b1 + A1 + 2\Delta l) + 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{скр.об}} = 2(0,015 + 0,029 + 2 \cdot 0,002) + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,01 = 0,162 \text{ м}, \quad (2.3.7)$$

где $r_{\text{скр.об}}$ – средний радиус закругления углов обмотки.

Средний радиус закругления углов обмотки:

$$r_{\text{скр.об}} = \frac{(N_{\text{сл}} + 1) \cdot d_{\text{пр.и}}}{2} = \frac{(21 + 1) \cdot 0,00094}{2} = 0,01 \text{ м}, \quad (2.3.8)$$

Умножая длину среднего витка обмотки на количество витков, получим расчётную длину обмоточного провода, необходимого для изготовления одной обмотки.

Расчётное значение длины провода обмотки:

$$l_{\text{пр.об}} = W_{\text{р}} \cdot l_{\text{ср}} = 950 \cdot 0,162 = 153,9 \text{ м}. \quad (2.3.9)$$

По полученным расчётным значениям основных размеров магнитопровода и обмоток выполняется чертёж электромагнитной части МВО (Приложение Г, Приложение Д). В ходе конструирования электромагнита необходимо предусмотреть элементы его крепления в общей конструкции ВС-3500.

2.4 Расчёт массы активатора

Определение массы активатора производится по ранее определённым геометрическим размерам (таблица 2.1.2). Активатор выполнен из магнитопроводящей стали плотностью 7800 кг/м^3 . Объём активатора, занимаемый стальной частью, будет вычисляться исходя из площади основания активатора, умноженного на его длину.

Площадь основания активатора:

$$S_{\text{осн}} = R^2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{H_a}{R}\right) - (R - H_a) \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot H_a - H_a^2}, \quad (2.4.1)$$

где R – радиус скругления активатора, м;

H_a – высота активатора, м.

$$S_{\text{осн}} = 0,0605^2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{0,018}{0,0605}\right) - (0,0605 - 0,018) \cdot \sqrt{2 \cdot 0,0605 \cdot 0,018 - 0,018^2} = 1,069 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Объём активатора:

$$V_a = S_{\text{осн}} \cdot B, \quad (2.4.2)$$

где B – длина активатора, м.

$$V_a = 1,069 \cdot 10^{-3} \cdot 0,084 = 8,977 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Масса активатора:

$$M_a = \rho \cdot V_a, \quad (2.4.3)$$

где $\rho = 7800$ – плотность стали, кг/м^3 .

$$M_a = 7800 \cdot 8,977 \cdot 10^{-5} = 0,7 \text{ кг}.$$

Далее необходимо определить значение присоединенной массы ЖС. По условиям задания ВС-3500 предназначен для обработки ПЗП. Поэтому среднее значение объёмной плотности нефти можно принять равным 850 кг/м^3 [20].

Расчёт присоединённой массы ЖС для активатора прямоугольного сечения с размерами основания $A \cdot B$ производится по выражению:

$$M_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot A^2 \cdot B^2}{4 \sqrt{A^2 + B^2}} \left(1 - 0,425 \frac{A \cdot B}{A^2 \cdot B^2}\right), \quad (2.4.4)$$

где $\rho = 850$ – среднее значение плотности нефти, кг/м^3 ;

A – ширина активатора, м.

$$M_{\text{пр}} = \frac{3,14 \cdot 850 \cdot 0,086^2 \cdot 0,084^2}{4\sqrt{0,086^2 + 0,084^2}} \left(1 - 0,425 \frac{0,086 \cdot 0,084}{0,086^2 \cdot 0,084^2} \right) = 0,228 \text{ кг.}$$

Таким образом, общая масса подвижных частей механической части МВО:

$$M = M_a + M_{\text{пр}} = 0,7 + 0,228 = 0,928 \text{ кг.} \quad (2.4.5)$$

2.5 Расчёт жёсткости пружинного подвеса

При работе МВО на воздухе можно предположить, что данный режим соответствует колебаниям активатора на собственной частоте, так как потери практически отсутствуют. В этом случае, если известны собственная частота колебаний и масса активатора, то можно расчётным путём определить жёсткость.

Так как количество модулей МВО $N = 8$ шт., то, соответственно, необходимо рассчитать жёсткости пружин для каждого модуля. При этом расчёт жёсткости производится из условий обеспечения резонансного режима работы каждого МВО на собственной частоте колебательного контура.

Приведём пример расчёта жёсткости для МВО, работающего на частоте 50 Гц при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с.

Угловая частота:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 65,5 = 411,55 \text{ с}^{-1}. \quad (2.5.1)$$

где f_0 – собственная частота колебательной системы, Гц.

Расчётное значение жёсткости пружинного подвеса МВО:

$$q_{\text{пр}} = \omega_0^2 \cdot M_a = 411,55^2 \cdot 0,928 = 1,18 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}. \quad (2.5.2)$$

Расчётное значение жёсткости одной пружины:

$$q_{\text{п}} = \frac{q_{\text{пр}}}{2} = \frac{1,18 \cdot 10^5}{2} = 5,9 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}. \quad (2.5.3)$$

Расчётное значение собственной угловой частоты работы МВО в ЖС:

$$\omega_{0\text{ж}} = \sqrt{\frac{q_{\text{пр}}}{M_a + M_{\text{пр}}}} = \sqrt{\frac{1,18 \cdot 10^5}{0,7 + 0,228}} = 356,54 \text{ с}^{-1}. \quad (2.5.4)$$

Частота собственных колебаний активатора в жидкости:

$$f_{0ж} = \frac{\omega_{0ж}}{2 \cdot \pi} = \frac{356,54}{2 \cdot 3,14} = 56,75 \text{ Гц.} \quad (2.5.5)$$

Производим расчёт жёсткости пружины с помощью выражения:

$$q = \frac{E \cdot d_{пр}^4}{8 \cdot n \cdot D^3}, \quad (2.5.6)$$

где $E = 78,5 \cdot 10^9$ – модуль сдвига, ГПа (пружинная сталь);

$d_{пр}$ – диаметр пружинной проволоки, мм;

n – число витков в пружине;

D_1 – наружный диаметр пружины, мм;

$D = (D_1 - d_{пр})$ – средний диаметр пружины, мм.

Путём перебора значений диаметра пружинной проволоки и числа витков выбираются такие их значения, которые обеспечивают требуемое значение жёсткости пружинного подвеса.

В результате перебора вариантов останавливаемся на следующем:

- диаметр пружинной проволоки $d_{пр} = 2,8$ мм согласно [22];
- наружный диаметр пружины $D_1 = 17$ мм;
- средний диаметр пружины $D = 14,2$ мм;
- количество рабочих витков пружины $n = 4$.

Расчётное значение жёсткости для выбранной пружины составляет:

$$q = \frac{78,5 \cdot 10^9 \cdot 2,8^4}{8 \cdot 4 \cdot 14,2^3} = 5,9 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

При колебаниях активатора максимальная деформация пружины должна составлять с учётом расчётного воздушного зазора не менее 2,3 мм [20]. Помимо этого, пружина должна быть предварительно сжата для обеспечения её работы с нагрузкой в зоне без знакопеременных деформаций. Предварительное сжатие при этом должно быть не менее, чем деформация при колебаниях активатора. Выбираем величину предварительного сжатия 3 мм [20].

В этом случае высота пружины в свободном состоянии:

$$H_{пр} = k \cdot n \cdot d_{пр} + 2,3 + 3 = 1,5 \cdot 4 \cdot 2,8 + 2,3 + 3 = 22,1 \text{ мм,} \quad (2.5.7)$$

где k – коэффициент упругости.

Для остальных модулей расчёт жёсткости пружин производится аналогичным образом.

Результаты расчёта жёсткости пружин представлены в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 – Жёсткости пружин отдельных МВО

№ модуля	1	2	3	4
Собственная частота колебаний, Гц	65,5			
Частота питающего напряжения, Гц	30	35	40	45
Диаметр пружинной проволоки $d_{пр}$, мм	2,5	2,5	2,8	2,8
Наружный диаметр пружины D , мм	17	17	17	17
Средний диаметр пружины $D_{ср.пр}$, мм	14,5	14,5	14,2	14,2
Количество рабочих витков пружины n	4	4	4	4
Расчетная жесткость пружинного подвеса активатора $q_{лр}$, Н/м	$5,23 \cdot 10^4$	$6,754 \cdot 10^4$	$8,33 \cdot 10^4$	$1,002 \cdot 10^5$
Расчетное значение жесткости для выбранной пружины $q_{л}$, Н/м	$2,615 \cdot 10^4$	$3,377 \cdot 10^4$	$4,165 \cdot 10^4$	$5,01 \cdot 10^4$
Высота пружины в свободном состоянии $H_{пр}$, мм	20,3	20,3	22,1	22,1
№ модуля	5	6	7	8
Собственная частота колебаний, Гц	65,5			
Частота питающего напряжения, Гц	50	55	60	65
Диаметр пружинной проволоки $d_{пр}$, мм	2,8	3,0	3,0	3,2
Наружный диаметр пружины D , мм	17	17	17	17
Средний диаметр пружины $D_{ср.пр}$, мм	14,2	14	14	14
Количество рабочих витков пружины n	4	4	4	4
Расчетная жесткость пружинного подвеса активатора $q_{лр}$, Н/м	$1,18 \cdot 10^5$	$1,382 \cdot 10^5$	$1,612 \cdot 10^5$	$1,845 \cdot 10^5$
Расчетное значение жесткости для выбранной пружины $q_{л}$, Н/м	$5,9 \cdot 10^4$	$6,91 \cdot 10^4$	$8,06 \cdot 10^4$	$9,225 \cdot 10^4$
Высота пружины в свободном состоянии $H_{пр}$, мм	22,1	23,1	23,1	24,5

Таким образом, определены все необходимые размеры активатора, электромагнита и соответствующих пружин. Эти данные будут использованы для составления математической модели МВО и анализа режимов его работы.

2.6 Выводы

В результате выполнения второй главы:

- определены основные размеры активатора и сердечника магнитопровода;
- определено количество единичных МВО $N = 8$ шт.;
- рассчитаны обмоточные данные электромагнита МВО;
- рассчитана масса активатора $M_a = 0,7$ кг; присоединённая масса ЖС равна $M_{пр} = 0,228$ кг; общая масса подвижных частей механической части МВО $M = M_a + M_{пр} = 0,7 + 0,228 = 0,928$ кг;
- рассчитаны жёсткости пружин единичных МВО для обеспечения работы на различных резонансных частотах.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОДУЛЯ ВИБРООБРАБОТКИ

Разрабатываемый прибор ВС-3500 колебательного типа представляет собой ЭТУ, состоящее из электрического и механического контуров. Работу этих контуров при известных параметрах можно проанализировать на основе соответствующих дифференциальных уравнений. Решая же систему дифференциальных уравнений контуров ВС-3500, в целом можно оценить эффективность принимаемых на стадии проектирования решений.

3.1 Электрический контур модуля виброобработки

Электрическая часть единичного МВО представляет собой основной электрический контур, который включает в себя два последовательно включенных электромагнита (индуктивности L_1 и L_2 , активные сопротивления катушек R_1 и R_2 , и диод VD). Энергия распространения колебаний в пространстве, как известно, зависит от частоты возмущающей силы. Причём, чем выше частота, тем меньше радиус распространения энергии в среде колебаний. При подаче на электромагнит частоты промышленной сети 50 Гц, возмущающая сила будет изменяться с частотой в два раза выше – 100 Гц. Следует отметить, что в этом случае величина коэффициента жёсткости, будет достаточно большой. Технологически изготовить цилиндрическую пружину с высоким значением коэффициента жёсткости представляется не всегда практически возможным. Использование диода в цепи питания VD позволило обеспечить частоту возмущающей силы 50 Гц при частоте питающего напряжения 50 Гц.

Расчётная схема замещения электрической части МВО с учётом вышеизложенного представлена на рисунке 3.1.1.

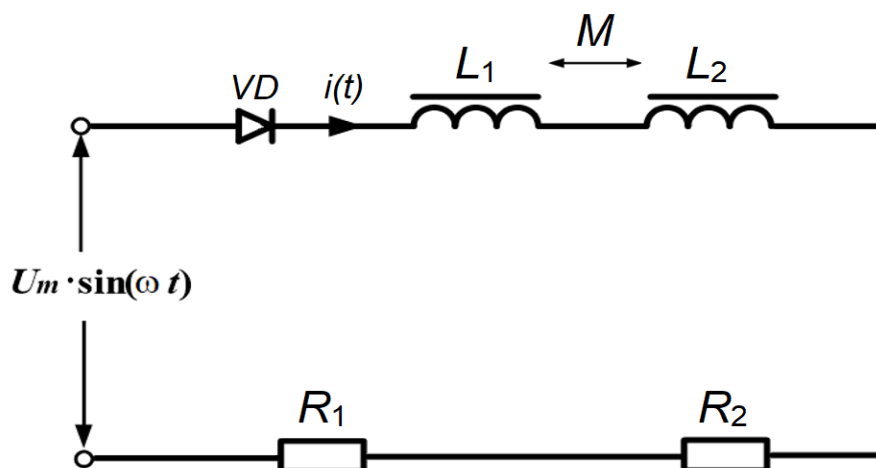


Рисунок 3.1.1 – Электрическая схема замещения МВО

Схема замещения (рисунок 3.1.1) включает в себя следующие элементы:

- L_1, L_2 – индуктивности катушек, Гн;
- R_1, R_2 – активные сопротивления катушек, Ом;
- M – взаимная индуктивность между катушками, Гн.

Рассчитаем параметры электрического контура.

Для известных значений длины провода обмотки, материала и диаметра обмоточного провода определяем величину активного сопротивления обмотки при нормальных условиях ($P = 101,3$ кПа; 760 мм рт. ст. и температурой $T = 293,15$ К ($t = 20$ °С)):

Активное сопротивление обмотки:

$$R_{об} = 4 \cdot \rho_M \cdot \frac{l_{пр.об}}{\pi \cdot d_{пр.и}^2} = 4 \cdot 0,0175 \cdot \frac{153,9}{3,14 \cdot 0,00085^2} = 4,74 \text{ Ом.} \quad (3.1.1)$$

где $\rho_M = 0,0175$ Ом·мм²/м удельное сопротивление меди.

Активное сопротивление обмотки в нагретом состоянии определяется с учётом нормальной температуры работы ЭТУ и усреднённой температуры в забое скважины на глубине 2 км:

$$R_{об.гор} = R_{об} \cdot (1 + \tau_M \cdot \Delta T) = 4,74 \cdot (1 + 0,0038 \cdot 110) = 6,72 \text{ Ом.} \quad (3.1.2)$$

где $\Delta T = (40 + 70) = 110$ °С – перепад температуры в обмотке МВО;

$\tau_M = 0,0038$ °С⁻¹, температурный коэффициент удельного сопротивления меди.

Для расчёта индуктивности обмотки МВО необходимо определить дополнительные данные:

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума (воздуха);

$\mu_{\text{сер}} = (1500 \div 1600)$ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника магнитопровода МВО. Сердечник магнитопровода выполняем из листов стали Ст.10 толщиной 0,5 мм. Указанные значения относительной магнитной проницаемости соответствуют ненасыщенному участку кривой намагничивания для стали Ст.10 [20].

Площадь поперечного сечения стержня сердечника магнитопровода:

$$S_{\text{сер}} = A1 \cdot b1 = 0,029 \cdot 0,015 = 4,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (3.1.3)$$

Расчётная длина средней линии замыкания магнитного потока электромагнита:

$$l_{\text{м}} = 2 \cdot (H1 - h1) + 2 \cdot (B1 - b1) = 2 \cdot (0,091 - 0,023) + 2 \cdot (0,084 - 0,015) = 0,274 \text{ м}. \quad (3.1.4)$$

где $\Delta t = 0,04$ – расчётная толщина слоёв обмотки электромагнита, м.

Расчётное выражение для определения собственной индуктивности одной обмотки с учётом особенностей магнитной системы МВО выглядит следующим образом:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{\text{сер}} \cdot W_{\text{р}}^2 \cdot S_{\text{сер}}}{k1 \cdot \left(\frac{\delta_0}{\sigma} \mu_{\text{сер}} + l_{\text{м}} \right) + 10 \cdot \Delta t}, \quad (3.1.5)$$

где $k1$ – конструктивный коэффициент;

σ – коэффициент, учитывающий рассеяние;

$\delta_0 = X_0 + 1 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}$ – величина воздушного зазора, м.

Расчётное значение индуктивности обмотки электромагнита при начальном зазоре $\delta_0 = 4$ мм, $k1 = 5$ и $\sigma = 10$:

$$L = \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 \cdot 950^2 \cdot 4,35 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot \left(\frac{0,004}{10} \cdot 1500 + 0,274 \right) + 10 \cdot 0,02} = 0,235 \text{ Гн}.$$

Расчётное значение взаимной индуктивности обмоток:

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{\text{ср}} \cdot W_p^2 \cdot S_{\text{ср}}}{k_2 \cdot \left(\frac{\delta_0}{\sigma} \cdot \mu_{\text{ср}} + l_m \right) + 10 \cdot \Delta t}, \quad (3.1.6)$$

где k_2 – конструктивный коэффициент, учитывающий взаимное расположение обмоток.

При $k_2 = 10$:

$$M = \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 \cdot 950^2 \cdot 4,35 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot \left(\frac{0,004}{10} \cdot 1500 + 0,274 \right) + 10 \cdot 0,02} = 0,118 \text{ Гн.}$$

По полученным ранее данным производим расчёт механического сопротивления колебания активатора в ЖС.

Принимаем для ЖС со средним значением вязкости величину $\Delta f = 10$ Гц.

При этом:

$$\omega_{\text{рж}} = 2 \cdot \pi \cdot (f_{0\text{ж}} - \Delta f) = 2 \cdot 3,14 \cdot (56,746 - 10) = 293,714 \text{ с}^{-1} \quad (3.1.7)$$

$$R_{\text{мех}} = \sqrt{2 \cdot (M_a + M_{\text{пр}}) \cdot (\omega_{0\text{ж}}^2 - \omega_{\text{рж}}^2)} = \sqrt{2 \cdot (0,7 + 0,228) \cdot (356,543^2 - 293,714^2)} = 265,336 \text{ кг/с.} \quad (3.1.8)$$

Принимаем $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с.

Уравнение равновесия напряжений для основного контура, получаемое из общих подходов к анализу ЭТУ, выглядит следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t) = i \cdot (R_1 + R_2) + \frac{d\Psi_{\Sigma i}}{dt}, \quad (3.1.9)$$

где $\Psi_{\Sigma i}$ – суммарное потокосцепление катушек L_1, L_2 , Вб;

i – ток в основной цепи МВО, А;

U_m – амплитуда питающего напряжения, В;

ω – угловая частота питающего напряжения, с^{-1} .

Суммарное потокосцепление основного контура МВО включает в себя потокосцепление каждой из обмоток, которые, в свою очередь, состоят из собственных потокосцеплений и потокосцеплений, образованных

взаимоиндуктивными связями с имеющимися другими индуктивными элементами:

$$\Psi_{\Sigma i} = \Psi_{1\Sigma} + \Psi_{2\Sigma}, \quad (3.1.10)$$

где $\Psi_{1\Sigma}$ – суммарное потокосцепление катушки L_1 , представляющее собой сумму потокосцеплений данной катушки, определяемую собственной индуктивностью и всеми возможными взаимоиנדуктивными связями;

$\Psi_{2\Sigma}$ – суммарное потокосцепление катушки L_2 , представляющее собой сумму потокосцеплений данной катушки, определяемую собственной индуктивностью и всеми возможными взаимоиנדуктивными связями.

Полное потокосцепление первой обмотки определяется как:

$$\Psi_{1\Sigma} = i \cdot L_1 + i \cdot M_{12}. \quad (3.1.11)$$

Полное потокосцепление второй обмотки определяется как:

$$\Psi_{2\Sigma} = i \cdot L_2 + i \cdot M_{21}. \quad (3.1.12)$$

Перепишем уравнение равновесия напряжений (3.1.9):

$$U_m \sin(\omega t) = i \cdot (R_1 + R_2) + \frac{d\Psi_{1\Sigma}}{dt} + \frac{d\Psi_{2\Sigma}}{dt}, \quad (3.1.13)$$

где потокосцепления $\Psi_{1\Sigma}$, $\Psi_{2\Sigma}$ будут равны:

$$\frac{d\Psi_{1\Sigma}}{dt} = \frac{d\Psi_{L_1}}{dt} + \frac{d\Psi_{M_{12}}}{dt} = \frac{i \cdot L_1}{dt} + \frac{i \cdot M_{12}}{dt}; \quad (3.1.14)$$

$$\frac{d\Psi_{2\Sigma}}{dt} = \frac{d\Psi_{L_2}}{dt} + \frac{d\Psi_{M_{21}}}{dt} = \frac{i \cdot L_2}{dt} + \frac{i \cdot M_{21}}{dt}. \quad (3.1.15)$$

Используя выражения (3.1.10), (3.1.11), (3.1.12), получим общую расчётную формулу:

$$U_m \sin(\omega t) = i \cdot (R_1 + R_2) + i \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} \right) + \frac{di}{dt} (L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21}). \quad (3.1.16)$$

Упростим уравнение (3.1.16), заменив дифференциал произведения суммой двух дифференциалов:

$$U_m \sin(\omega t) = U_m \sin(\omega t) - i \cdot (R_1 + R_2) - i(L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21}) = \frac{di}{dt} \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} \right). \quad (3.1.17)$$

3.2 Механический контур модуля виброобработки

Схема замещения механического контура МВО, учитывающая массу колебательной системы, жёсткость пружины и потери на вязкое трение представлена на рисунке 3.2.1.

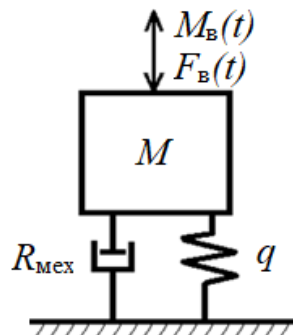


Рисунок 3.2.1 – Расчётная схема механической части МВО

Общий вид дифференциального уравнения, описывающего колебания для механической части МВО при линейных перемещениях якоря:

$$M \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + R_{\text{мех}} \cdot \frac{dx(t)}{dt} + q \cdot x(t) = F_B(t), \quad (3.2.1)$$

где $M = M_a + M_{\text{пр}}$ – общая масса всех подвижных частей колебательной системы, кг;

q – жёсткость пружинного подвеса, Н/м;

$R_{\text{мех}}$ – коэффициент механических потерь на вязкое трение, кг/с;

x – перемещение активатора, м;

$F_B(t) = i^2 \left(\frac{dL_{1(2)}}{dx} + \frac{dM_{12}}{dx} \right)$ – возмущающая сила, Н.

3.3 Система дифференциальных уравнений модуля виброобработки

Система дифференциальных уравнений, описывающая работу МВО, состоит из уравнения основного контура и механического контура.

Сгруппируем однородные члены выражения (3.1.9) для составления системы дифференциальных уравнений основного контура, удобной для решения численным методом:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega t) - 2i \cdot (R_1 + R_2) - i \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} \right)}{L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21}}. \quad (3.3.1)$$

Для удобства решения дифференциального уравнения механического контура (3.2.1) численным методом введем новую переменную:

$$\frac{dx}{dt} = y. \quad (3.3.2)$$

Перепишем уравнение механического контура (3.2.1) и получим:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{F(t)}{M} - \frac{R_{\text{мех}}}{M} y - \frac{qx}{M}, \quad (3.3.3)$$

где y – скорость колебаний активатора;

x – амплитуда колебаний активатора.

Система дифференциальных уравнений работы МВО, приведённых к виду удобному для решения численным методом, выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = \frac{U_m \cdot \sin(\omega t) - 2i \cdot \left(R + \frac{dL}{dx} y + \frac{dM_{12}}{dx} \right)}{2(L + M_{12})}; \\ \frac{dy}{dt} = \frac{F_B(t) - R_{\text{мех}} \cdot y - q_l \cdot x}{M}; \\ \frac{dx}{dt} = y. \end{array} \right. \quad (3.3.4)$$

3.4 Алгоритм расчёта системы дифференциальных уравнений

Система дифференциальных уравнений (3.3.4) не имеет аналитического решения, поэтому определение неизвестных следует производить одним из численных методов решения систем дифференциальных уравнений. Вполне удовлетворительные результаты показывает метод Рунге-Кутты третьего порядка.

Порядок расчёта представляет собой процесс итерационного расчёта трёх коэффициентов – K , S , C , которые в свою очередь определяются в зависимости от дискретного приращения соответствующих функций при изменении времени с минимальным шагом h .

$$\begin{aligned} K(t, I, x, y) &= \frac{k1(t, I, x, y) + 2 \cdot k2(t, I, x, y) + 3 \cdot k3(t, I, x, y) + k4(t, I, x, y)}{6}; \\ S(t, I, x, y) &= \frac{s1(t, I, x, y) + 2 \cdot s2(t, I, x, y) + 3 \cdot s3(t, I, x, y) + s4(t, I, x, y)}{6}; \\ C(t, I, x, y) &= \frac{c1(t, I, x, y) + 2 \cdot c2(t, I, x, y) + 3 \cdot c3(t, I, x, y) + c4(t, I, x, y)}{6}. \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

Матрица алгоритма расчёта неизвестных величин в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} t_{i+1} \\ I_{i+1} \\ x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{i+1} + h \\ \text{if } (I_i + K(t_i, I_i, x_i, y_i) \geq 0, I_i + K(t_i, I_i, x_i, y_i), 0 \\ y_i + S(t_i, I_i, x_i, y_i) \\ \text{if } (x_i + C(t_i, I_i, x_i, y_i) \geq \delta_0, \delta_0, x_i + C(t_i, I_i, x_i, y_i)) \end{pmatrix}. \quad (3.4.2)$$

Первая строка матрицы задаёт время расчёта с определённым шагом $t_i + h$. Вторая строка матрицы отражает расчёт тока I_i в основном контуре. При этом учитывается наличие диода в цепи питания введением соответствующего условия. Третья строка отражает расчёт скорости колебания активатора. Четвёртая строка отражает расчёт амплитуды смещения активатора относительно средней точки. Причём вводится условие, учитывающее ограничение амплитуды колебаний активатора до стенки корпуса.

3.5 Выводы

В результате выполнения третьей главы:

- рассчитаны электрические и механические параметры схемы замещения МВО;
- составлена система дифференциальных уравнений электрического и механического контуров;
- на основании системы дифференциальных уравнений разработана математическая модель для анализа режимов работы МВО. Решение этой системы будет осуществляться методом Рунге-Кутты третьего порядка.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОДУЛЕЙ ВИБРООБРАБОТКИ

Основные задачи при анализе режимов работы МВО:

- определение токов в основном контуре МВО при наибольшей величине амплитуды колебаний;
- определение величины и частоты питающего напряжения МВО;
- уточнение начального воздушного зазора, обеспечивающего необходимую величину амплитуды колебаний активатора, при соблюдении ограничения тока в обмотках электромагнита МВО.

4.1 Анализ режимов работы при обработке нефти с низким показателем вязкости (механическое сопротивление $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с)

Основной целью расчётов при моделировании работы МВО является определение для разработанной конструкции и параметров обрабатываемой ЖС зоны резонанса, которая будет обеспечивать полную выборку воздушного зазора.

Проанализируем работу активатора, соблюдая условие ограничения допустимого тока в проводнике катушек, который составляет не более $I_{\text{доп}} = 1,36$ А. Расчёт будем производить с постоянным начальным зазором $X_0 = 4$ мм и собственной частотой системы $f_0 = 65,5$ Гц, при механическом сопротивлении $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с.

Учитывая тот факт, что принцип работы ВС-3500 резонансный, необходимо настроить каждый МВО на свою резонансную частоту. Настройка каждого МВО на свою частоту резонанса позволит добиться лучшего эффекта обработки ПЗП за счет ударного и концентрированного действия бегущей волны. При этом вибрационные воздействия на отложения будут распространяться по всей глубине их образования.

Принимаем, что каждый МВО будет работать на частотах от 30 до 65 Гц с шагом 5 Гц при соответствующих значениях питающего напряжения.

На рисунке 4.1.1 и 4.1.2 приведены характерные зависимости амплитуды колебаний, начального зазора, электромагнитной силы, тока в основной цепи от времени для МВО, работающего на частоте 50 Гц при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с.

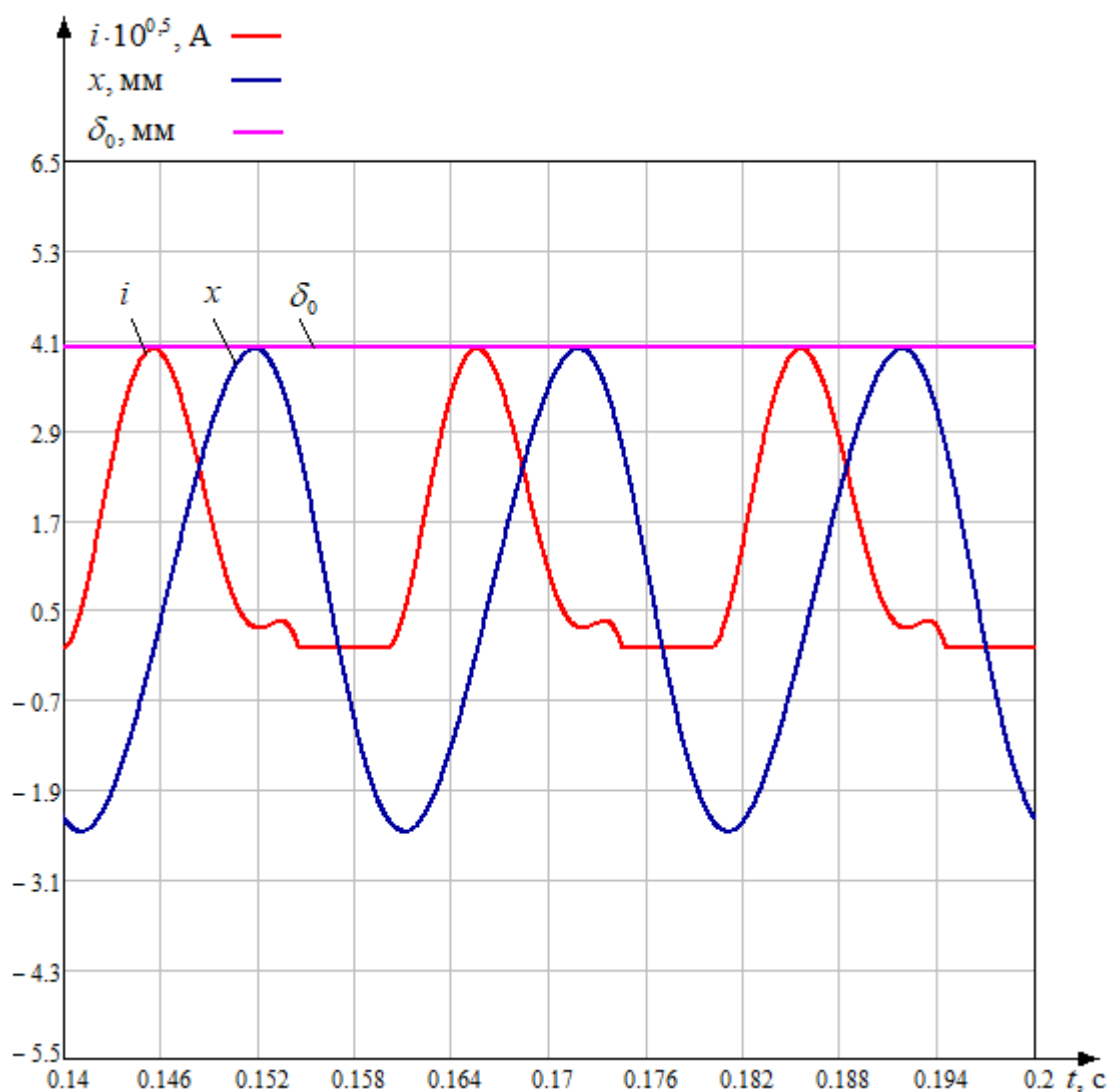


Рисунок 4.1.1 – Типичные диаграммы изменения расчётных параметров МВО при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с, $f = 50$ Гц, $U_d = 296$ В

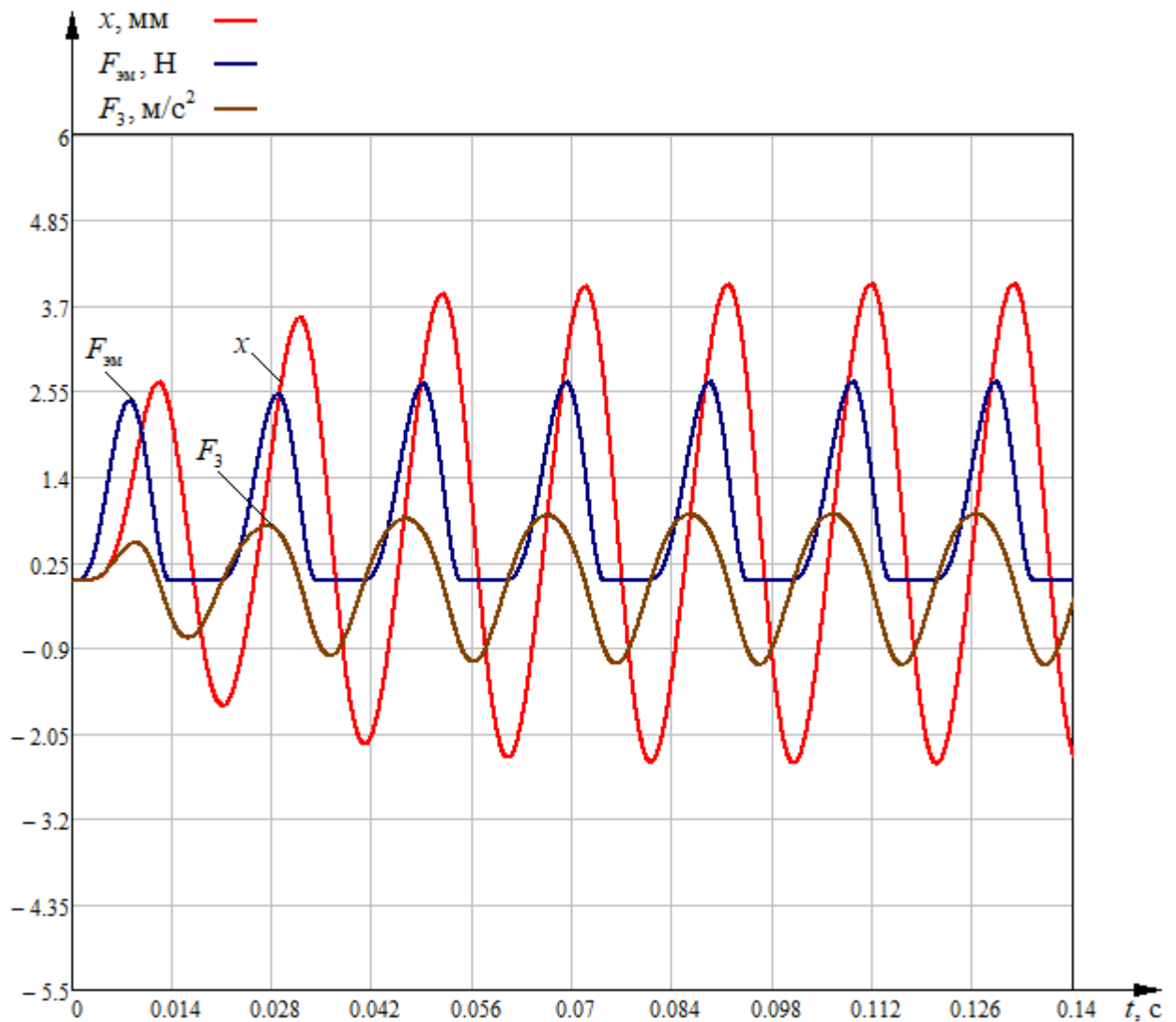


Рисунок 4.1.2 – Типичные диаграммы изменения расчётных параметров МВО при $R_{\text{мех}} = 100 \text{ кг/с}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $U_d = 296 \text{ В}$

где x – амплитуда колебаний активатора, мм;

$F_{\text{эм}}$ – электромагнитная сила, Н;

δ_0 – начальный зазор, мм;

i – ток в основной цепи, А;

F_3 – ускорение колебаний активатора, м/с^2 .

Из рисунка 4.1.1 следует, что при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц и напряжении $U_d = 296 \text{ В}$ амплитуда колебаний активатора практически соответствует начальному зазору $X_0 = 4 \text{ мм}$.

По рисунку 4.1.2 можно сказать, что в режиме пуска происходит плавное изменение параметров и через четыре периода МВО работает в установившемся режиме.

Построим амплитудно-частотную характеристику МВО, работающего на частоте 50 Гц. Полученные данные сведём в таблицу 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 50 Гц

f , Гц	48	49	50	51	52
I_d , А	0,565	0,589	0,615	0,643	0,674
U_d , В	284,16	290,08	296	301,92	307,84
x , мм	3,188	3,218	3,228	3,218	3,188

На основе полученных данных (таблица 4.1.1), построим АЧХ для МВО, работающего на частоте 50 Гц.

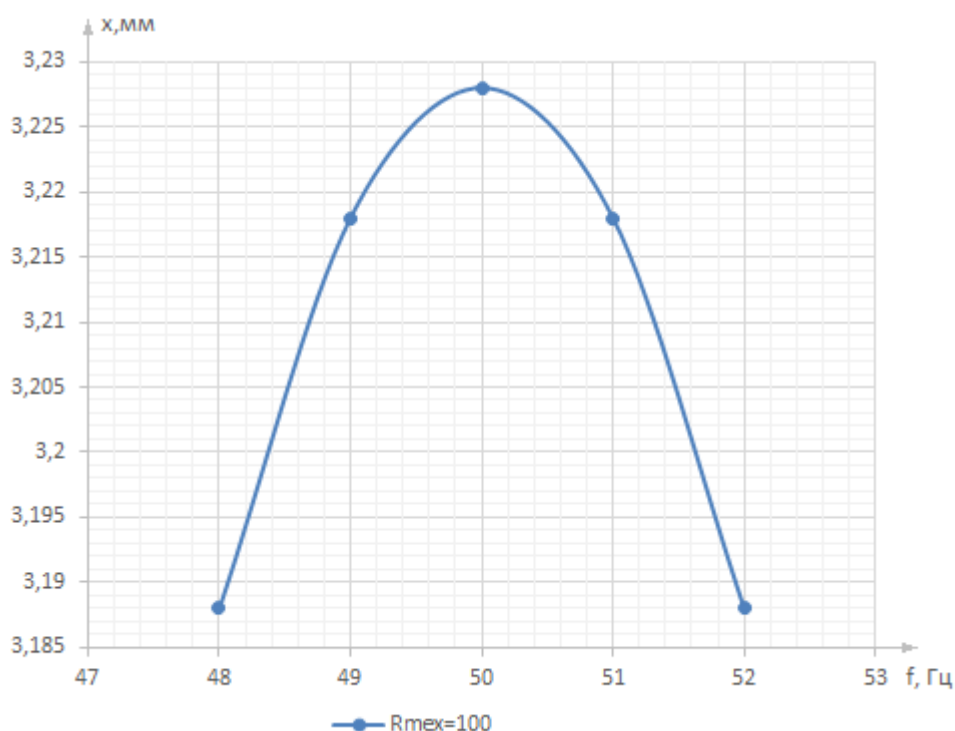


Рисунок 4.1.3 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения

$$f = 50 \text{ Гц}$$

Как видно из рисунка 4.1.3 при частоте $f = 50$ Гц и напряжении $U_d = 296$ В происходит резонанс. Значение амплитуды колебаний активатора составляет 3,228 мм. При этом значение тока в основном контуре равно $I_d = 0,615$ А и не превышает допустимого значения $I_{\text{доп}} = 1,36$ А.

Приведём результаты расчётов АЧХ для остальных модулей.

Таблица 4.1.2 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 30 Гц

f , Гц	28	29	30	31	32
I_a , А	0,383	0,397	0,415	0,435	0,457
U_a , В	159,04	164,72	170,4	176,08	181,76
x , мм	2,867	2,938	2,955	2,939	2,867

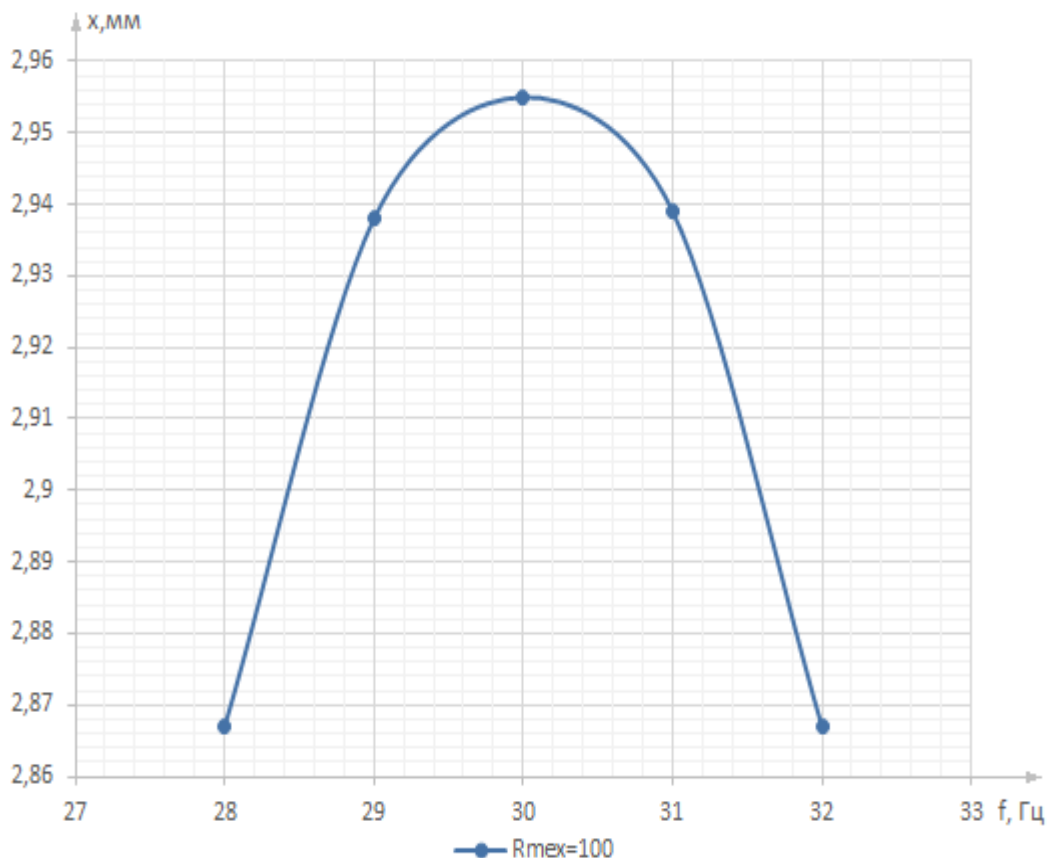


Рисунок 4.1.4 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 30$ Гц

Таблица 4.1.3 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 35 Гц

f , Гц	33	34	35	36	37
I_a , А	0,426	0,442	0,462	0,484	0,508
U_a , В	188,43	194,14	199,85	205,56	211,27
x , мм	2,96	3,004	3,016	3,003	2,96

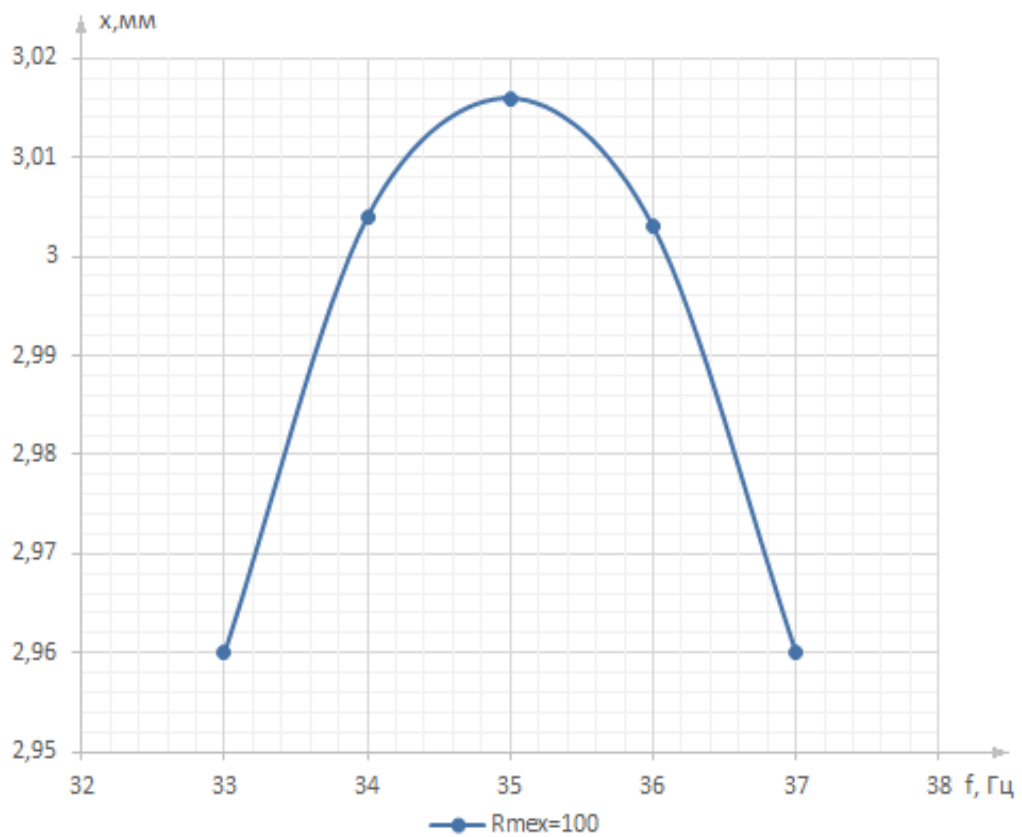


Рисунок 4.1.5 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения

$$f = 35 \text{ Гц}$$

Таблица 4.1.4 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 40 Гц

f , Гц	38	39	40	41	42
I_d , А	0,47	0,489	0,511	0,535	0,561
U_d , В	220,02	225,81	231,6	237,39	243,18
x , мм	3,069	3,103	3,113	3,103	3,069

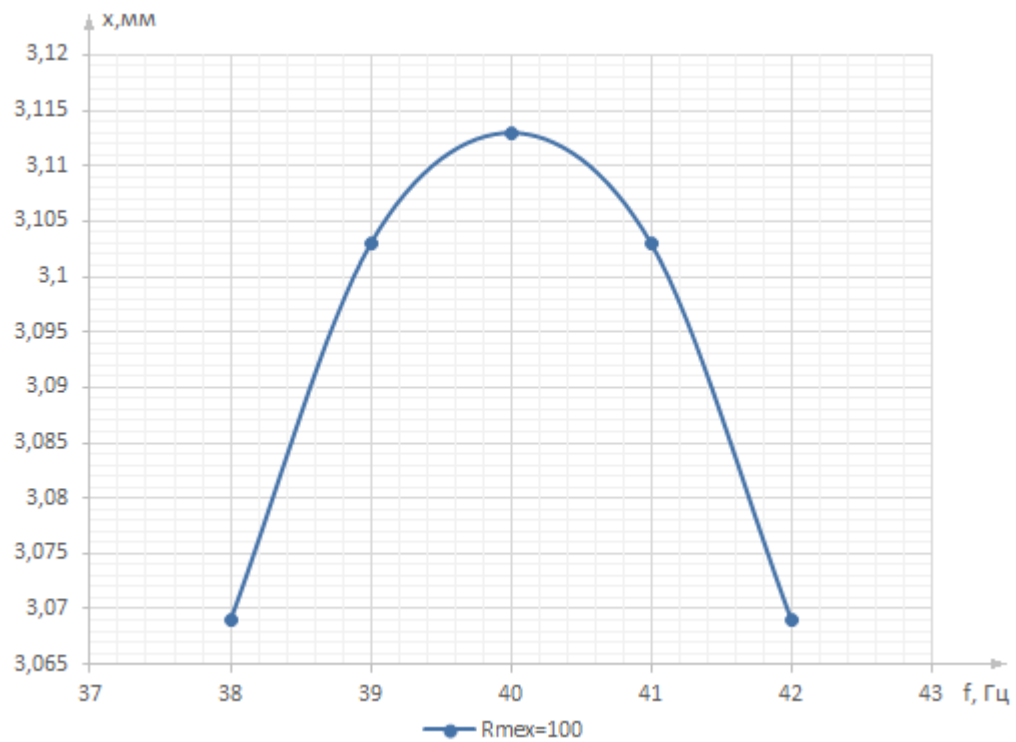


Рисунок 4.1.6 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 40$ Гц

Таблица 4.1.5 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 45 Гц

f , Гц	43	44	45	46	47
I_d , А	0,517	0,539	0,563	0,589	0,617
U_d , В	251,55	257,4	263,25	269,1	274,95
x , мм	3,127	3,158	3,168	3,158	3,127

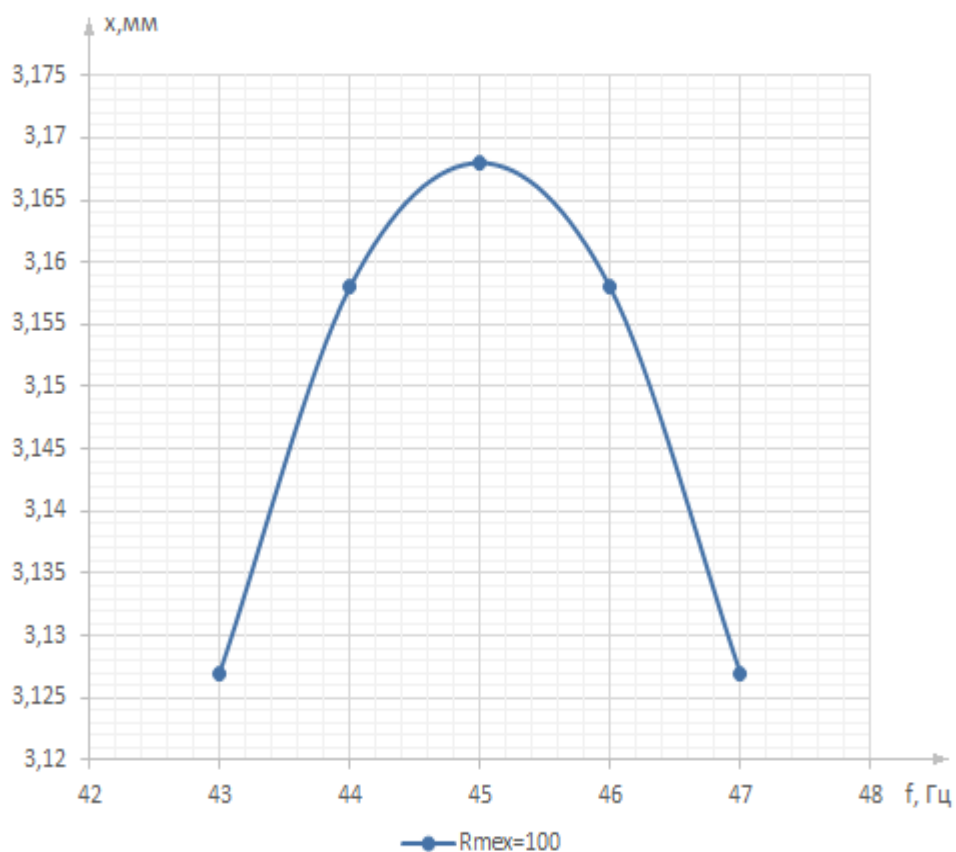


Рисунок 4.1.7 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 45$ Гц

Таблица 4.1.6 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 55 Гц

f , Гц	53	54	55	56	57
I_a , А	0,613	0,638	0,666	0,697	0,73
U_a , В	316,41	322,38	328,35	334,32	340,29
x , мм	3,22	3,251	3,261	3,25	3,22

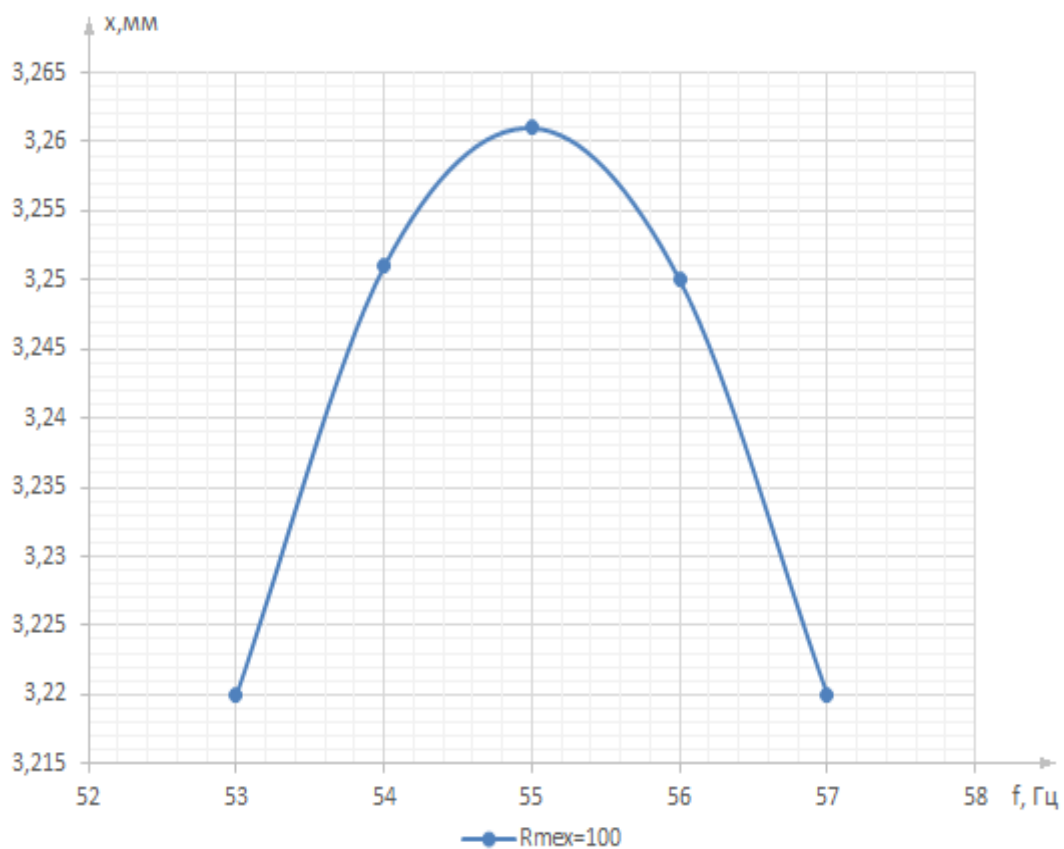


Рисунок 4.1.8 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 55$ Гц

Таблица 4.1.7 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 60 Гц

f , Гц	58	59	60	61	62
I_a , А	0,659	0,687	0,717	0,75	0,785
U_d , В	349,74	355,77	361,8	367,83	373,86
x , мм	3,261	3,293	3,304	3,293	3,261

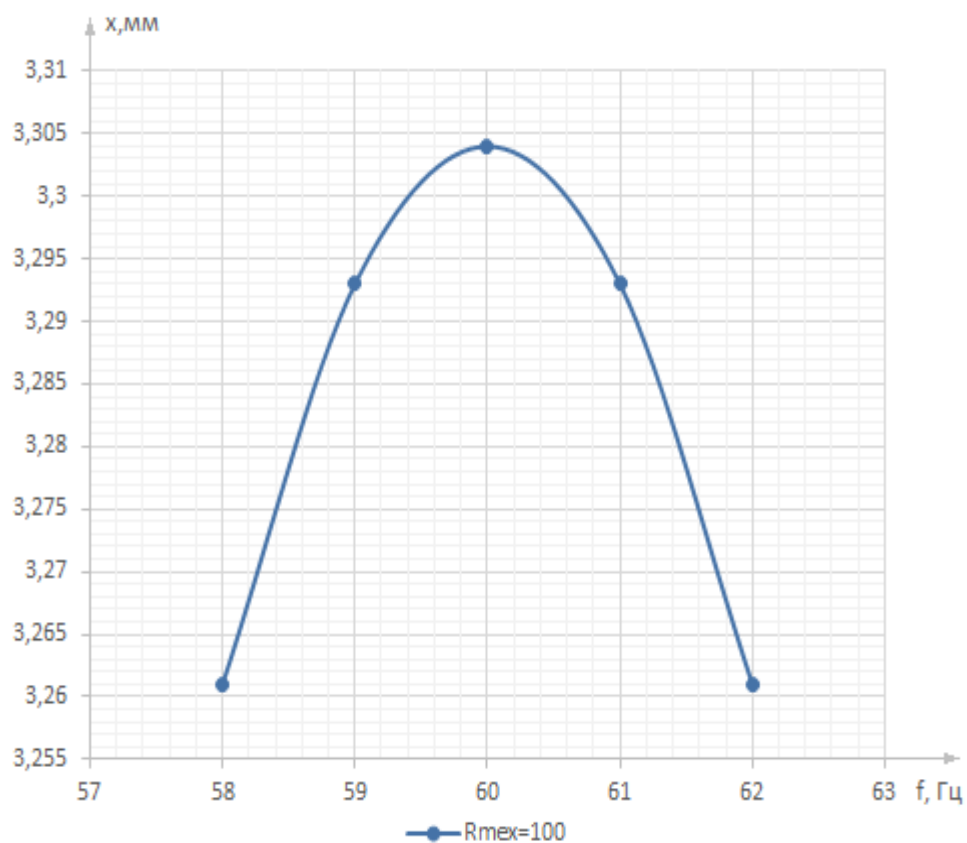


Рисунок 4.1.9 – АЧХ изменения колебаний активатора от частоты питающего напряжения $f = 60$ Гц

Таблица 4.1.8 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 65 Гц

f , Гц	63	64	65	66	67
I_d , А	0,704	0,734	0,767	0,802	0,839
U_d , В	384,3	390,4	396,5	402,6	408,7
x , мм	3,31	3,343	3,356	3,344	3,31

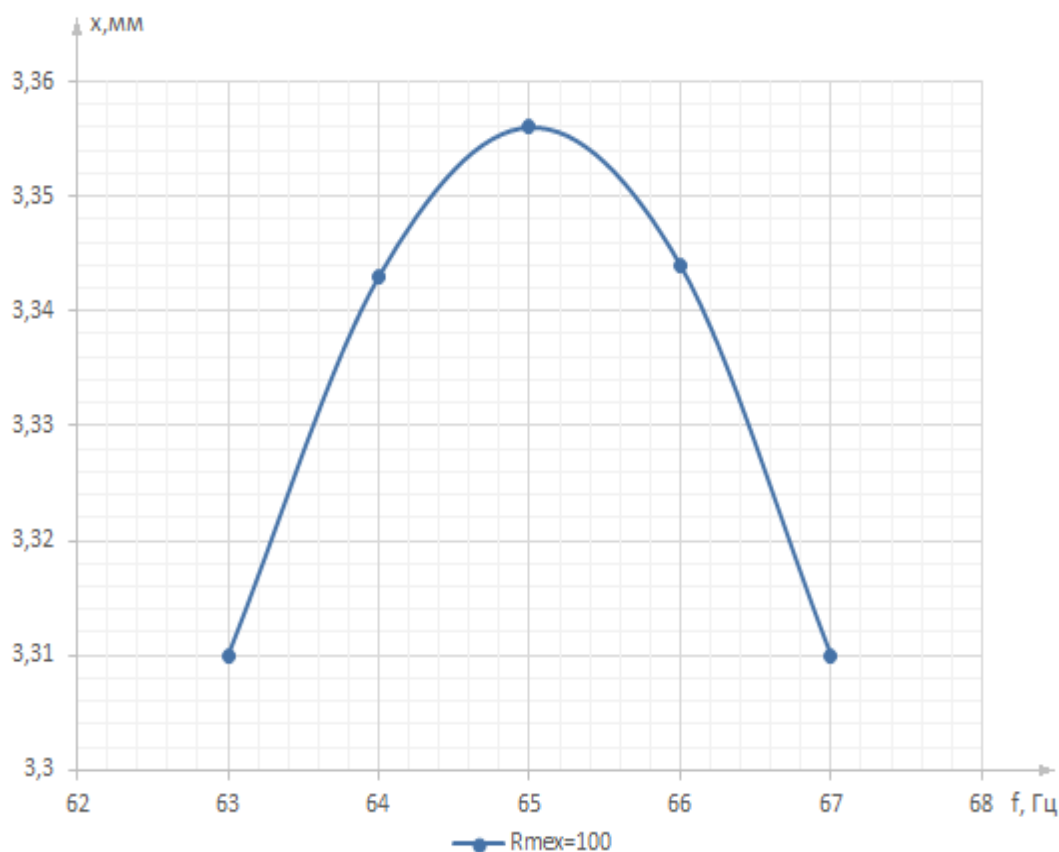


Рисунок 4.1.10 – АЧХ изменения колебаний активатора от частоты питающего напряжения $f = 65$ Гц

4.2 Анализ режимов работы при обработке нефти со средним показателем вязкости (механическое сопротивление $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с)

Представляет интерес работа МВО с отложениями более высокой вязкости. Высокое значение вязкости сопровождается увеличением механического сопротивления ЖС. Практически достаточным будет произвести расчёты при значении $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с.

Для получения амплитудно-частотных характеристик выбираем начальный зазор $X_0 = 4$ мм.

На рисунке 4.2.1 и 4.2.2 приведены характерные зависимости амплитуды колебаний, начального зазора, электромагнитной силы, тока в основной цепи от времени для МВО, работающего на частоте 49 Гц при $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с.

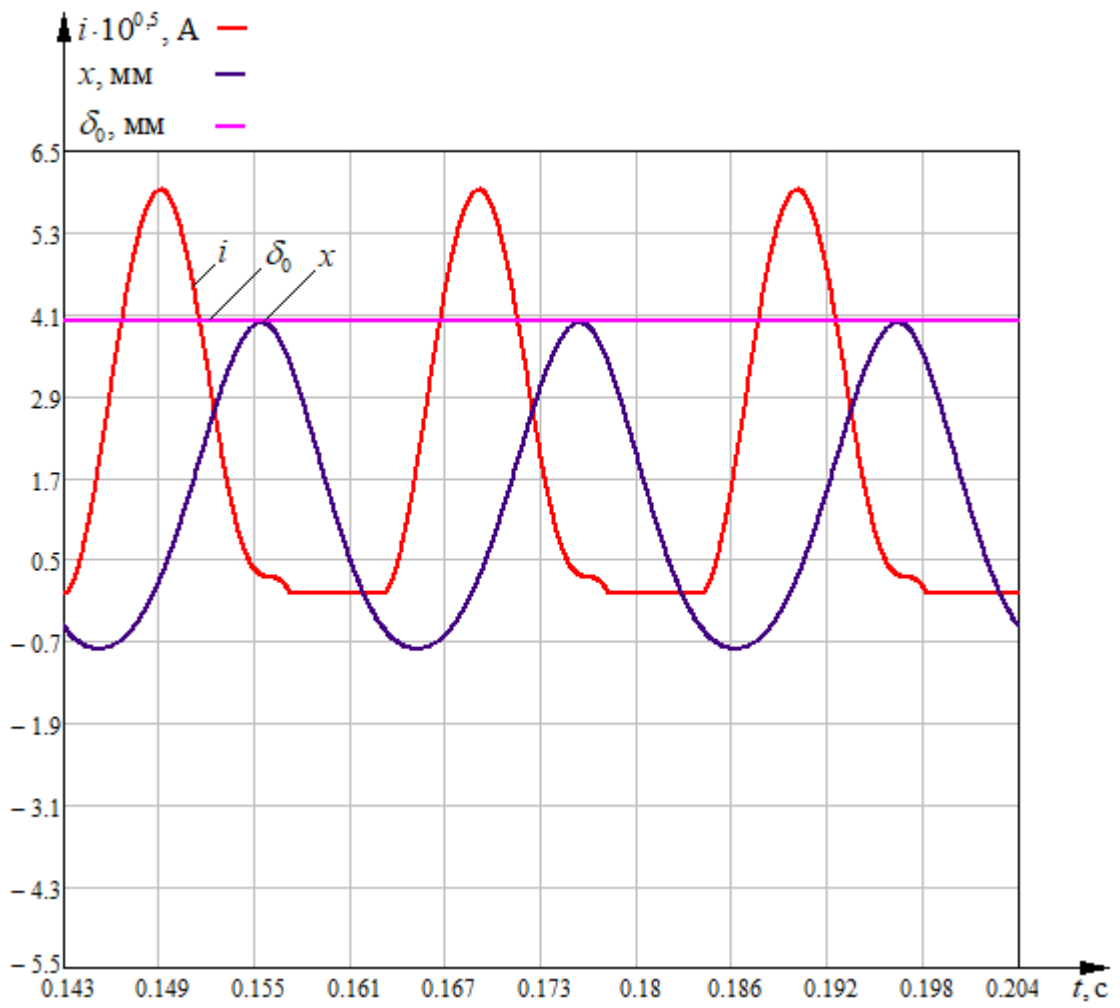


Рисунок 4.2.1 – Типичные диаграммы изменения расчётных параметров МВО
 при $R_{\text{мех}} = 300 \text{ кг/с}$, $f = 49 \text{ Гц}$, $U_d = 406,7 \text{ В}$

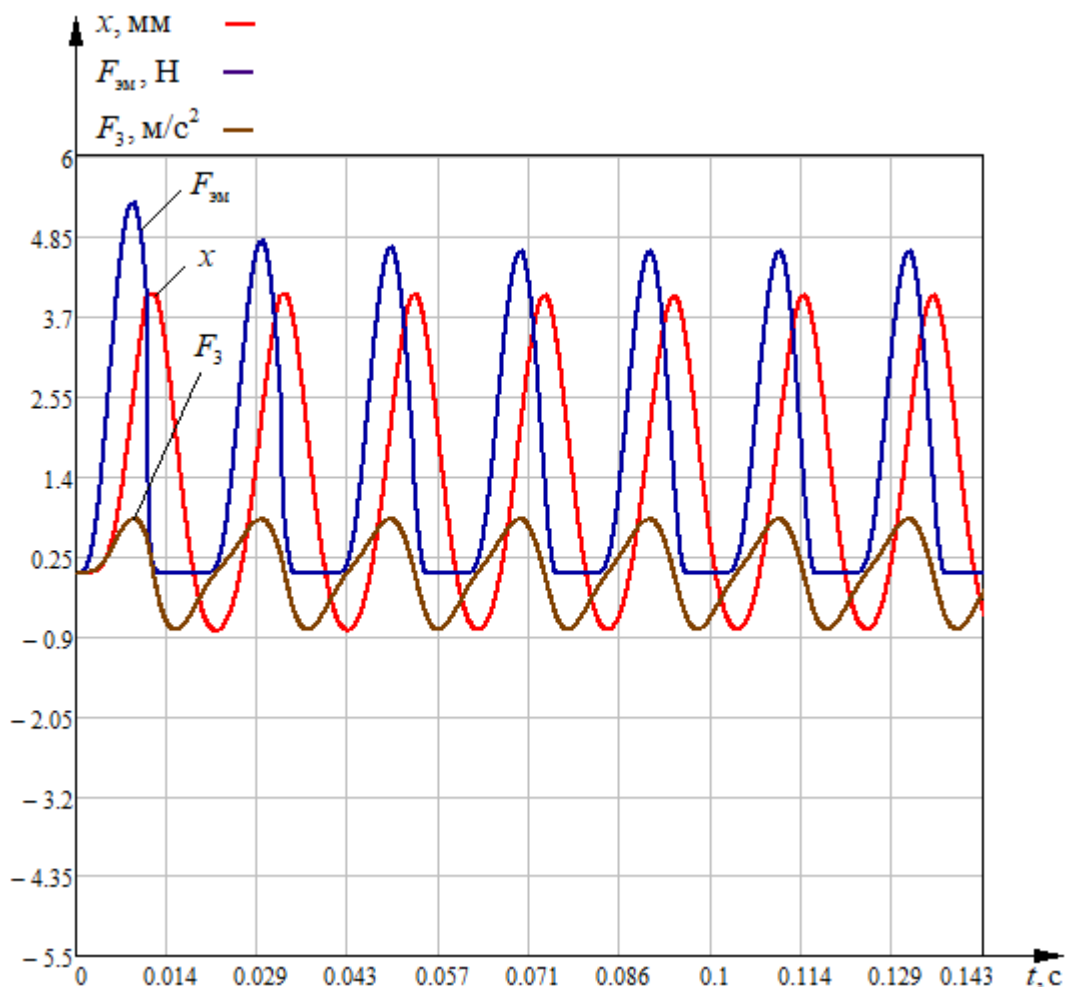


Рисунок 4.2.2 – Типичные диаграммы изменения расчётных параметров МВО при $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с, $f = 49$ Гц, $U_d = 406,7$ В

Из рисунка 4.2.1 следует, что при частоте питающего напряжения 49 Гц и напряжении $U_d = 406,7$ В амплитуда колебаний активатора практически соответствует начальному зазору 4 мм.

По рисунку 4.2.2 можно сказать, что в режиме пуска происходит плавное изменение параметров и, спустя один период, МВО работает в установившемся режиме.

Построим амплитудно-частотную характеристику МВО, работающего на частоте 49 Гц. Полученные данные сведём в таблицу 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 49 Гц

f , Гц	47	48	49	50
I_d , А	0,876	0,897	0,917	0,937
U_d , В	390,1	398,4	406,7	415
x , мм	2,416	2,417	2,417	2,416

На основе полученных данных (таблица 4.2.1), построим АЧХ для МВО, работающего на частоте 49 Гц.

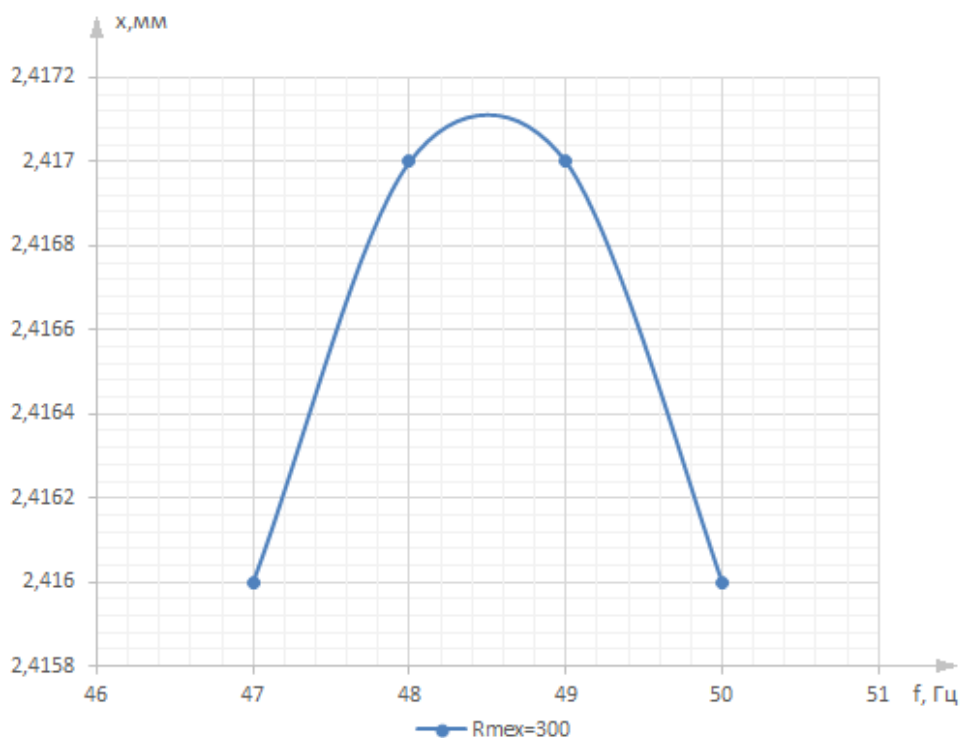


Рисунок 4.2.3 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения $f = 49$ Гц

Как видно из рисунка 4.2.3 резонанс наступает при частоте 48,5 Гц при напряжении $U_d = 402,5$ В. Значение амплитуды колебаний активатора составляет 2,417 мм. При этом значение тока в основном контуре равно $I_d = 0,907$ А и не превышает допустимого значения $I_{доп} = 1,36$ А.

Приведём результаты расчётов АЧХ для остальных модулей.

Таблица 4.2.2 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 30 Гц

f , Гц	28	29	30	31	32
I_a , А	0,58	0,594	0,609	0,624	0,638
U_a , В	215,6	223,3	231	238,7	246,4
x , мм	2,083	2,108	2,108	2,105	2,083

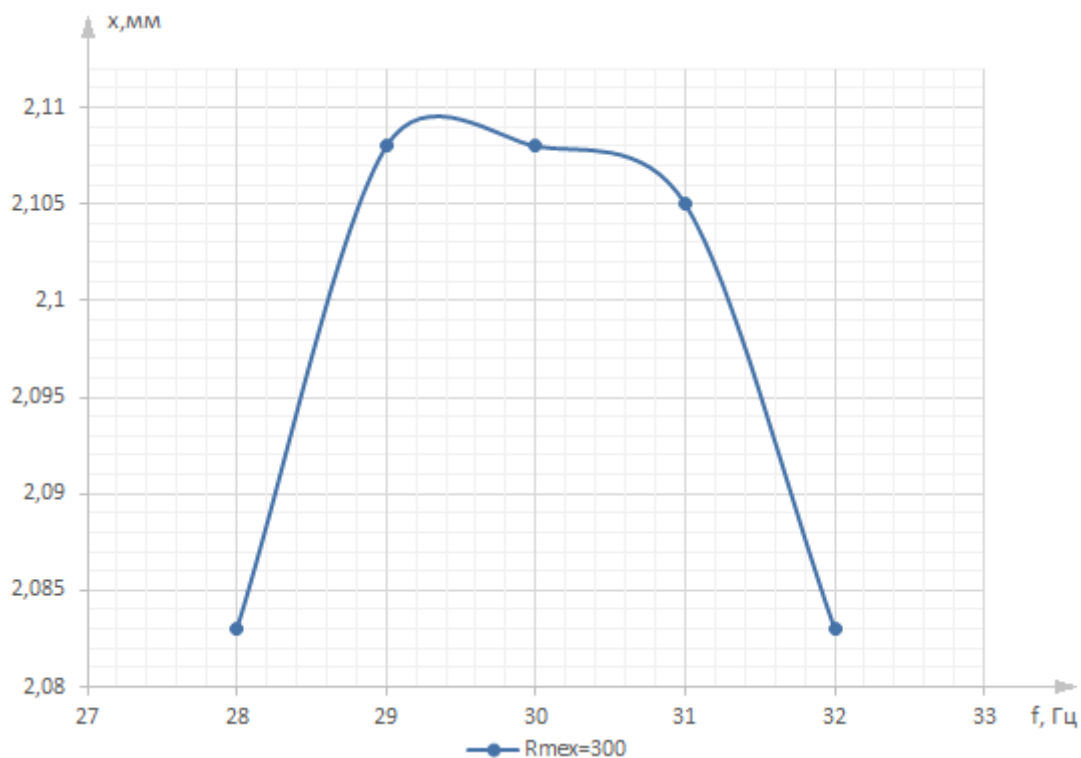


Рисунок 4.2.4 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 30$ Гц

Таблица 4.2.3 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 34 Гц

f , Гц	32	33	34	35	36
I_a , А	0,645	0,661	0,677	0,694	0,709
U_a , В	252,8	260,7	268,6	276,5	284,4
x , мм	2,195	2,196	2,196	2,196	2,195

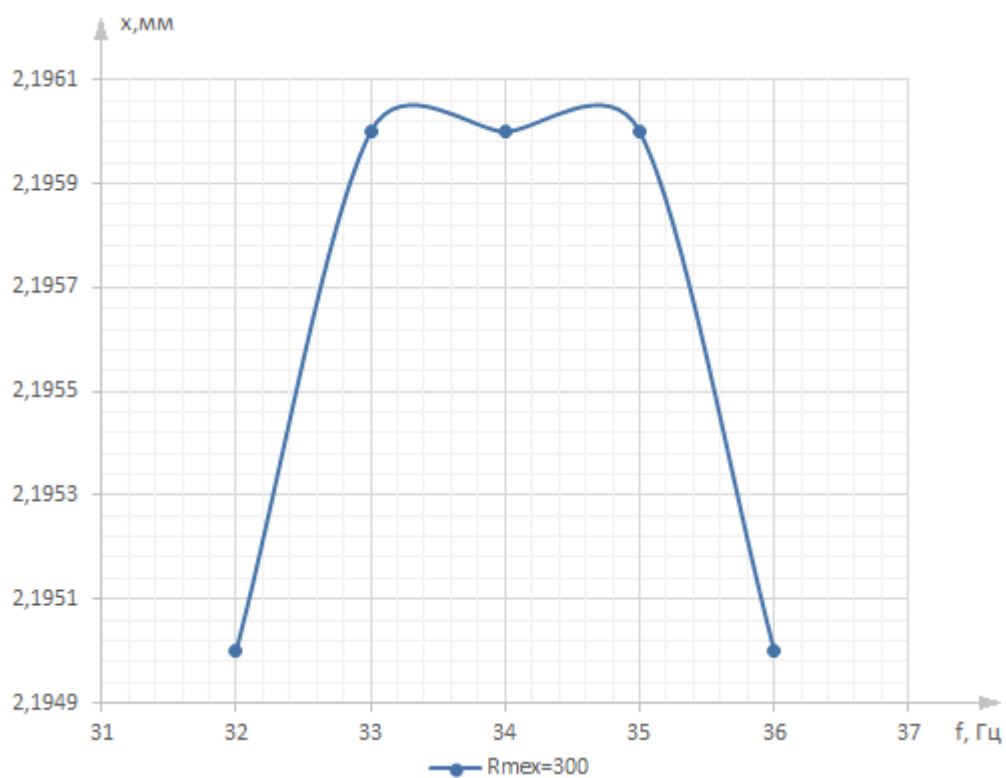


Рисунок 4.2.5 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 34$ Гц

Таблица 4.2.4 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 39 Гц

f , Гц	37	38	39	40
I_d , А	0,722	0,739	0,756	0,774
U_d , В	296	304	312	320
x , мм	2,274	2,275	2,275	2,274

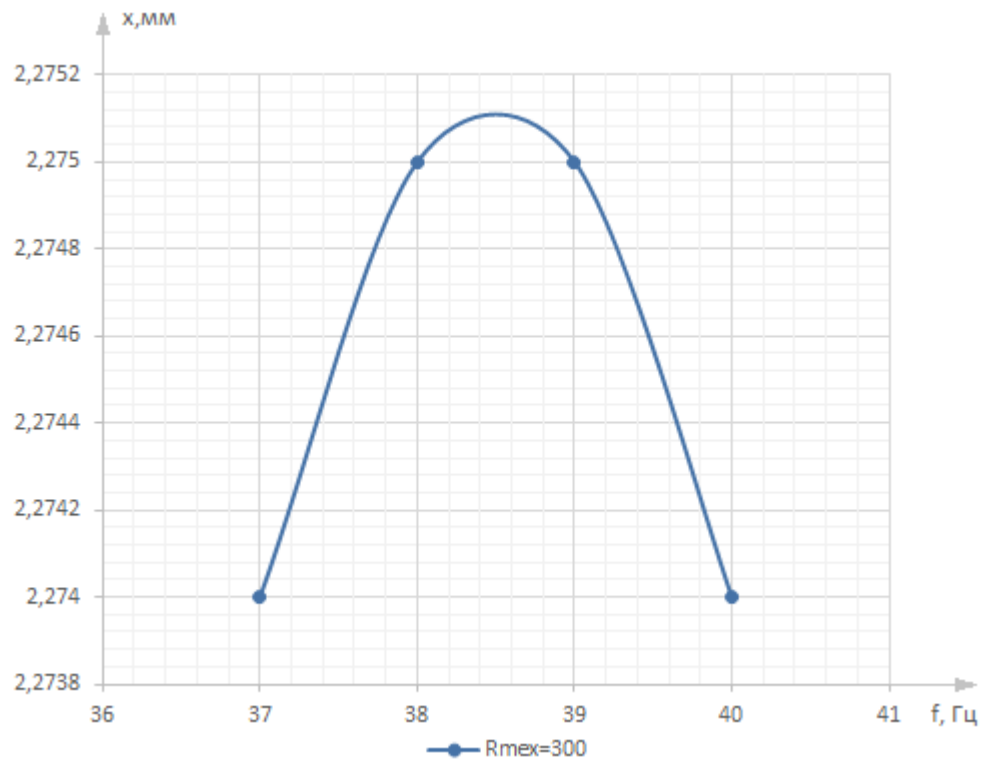


Рисунок 4.2.6 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 39$ Гц

Таблица 4.2.5 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 45 Гц

f , Гц	43	44	45	46
I_d , А	0,817	0,836	0,855	0,874
U_d , В	350,02	358,16	366,3	374,44
x , мм	2,346	2,347	2,347	2,346

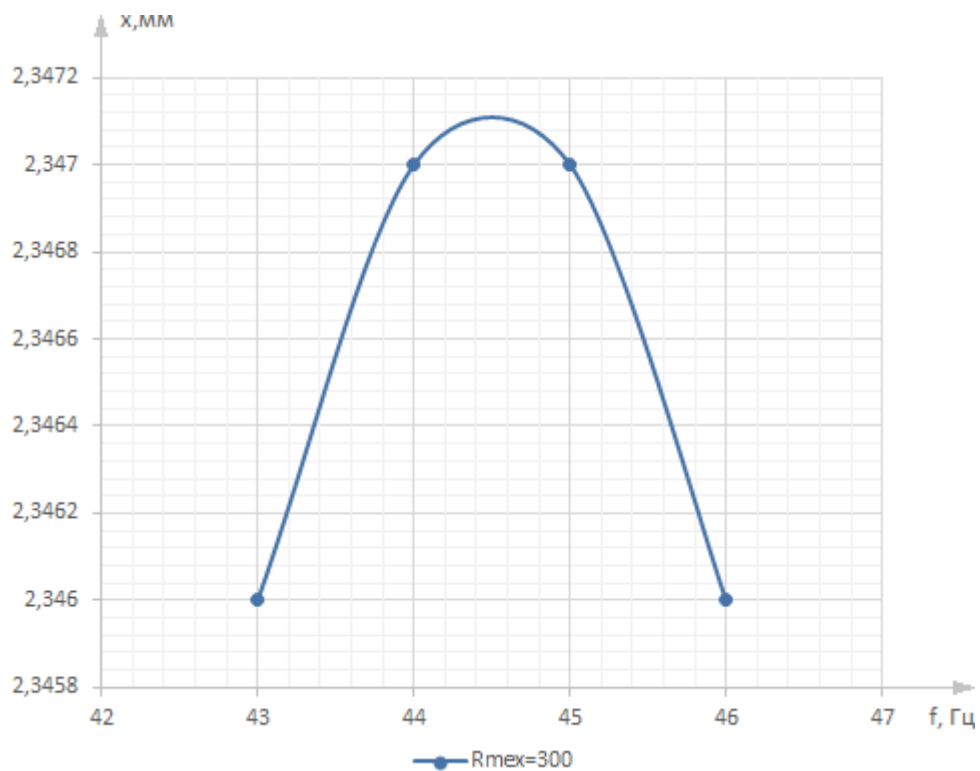


Рисунок 4.2.7 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 45$ Гц

Таблица 4.2.6 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 52 Гц

f , Гц	51	52	53	54
I_a , А	0,929	0,953	0,974	0,995
U_a , В	429,93	438,36	446,79	455,52
x , мм	2,482	2,482	2,482	2,481

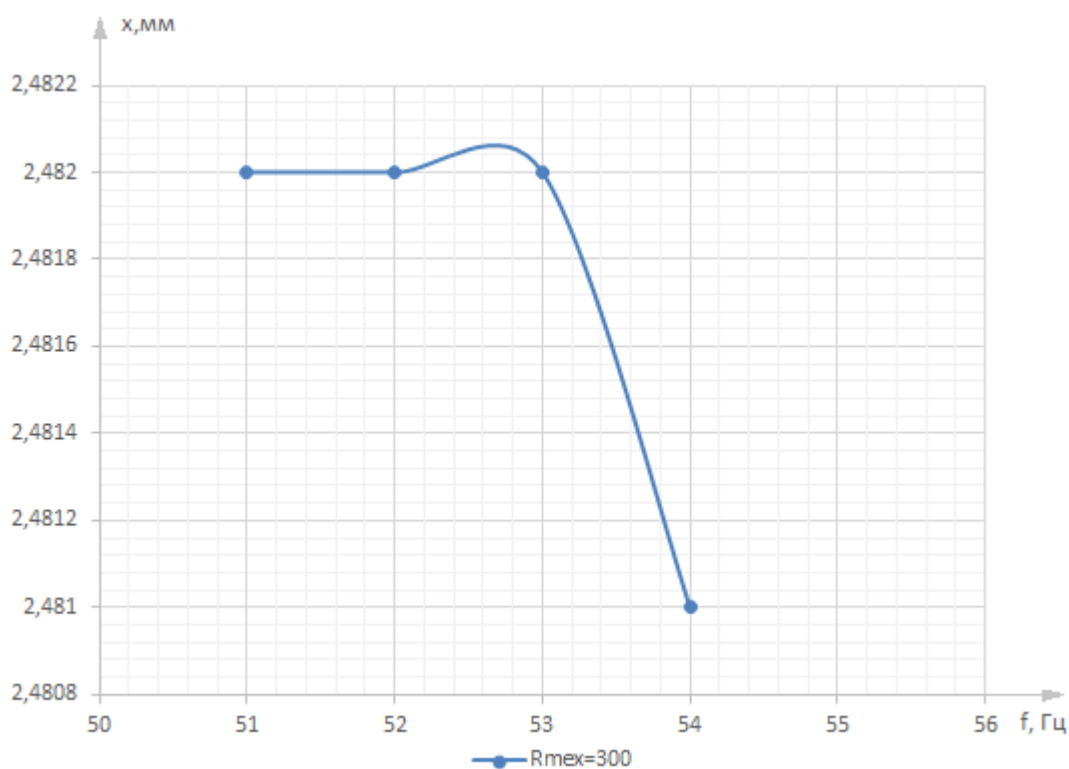


Рисунок 4.2.8 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 52$ Гц

Таблица 4.2.7 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 58 Гц

f , Гц	56	57	58	59	60
I_a , А	1,005	1,027	1,049	1,071	1,093
U_a , В	478,8	487,35	495,9	504,45	513
x , мм	2,544	2,544	2,544	2,544	2,543

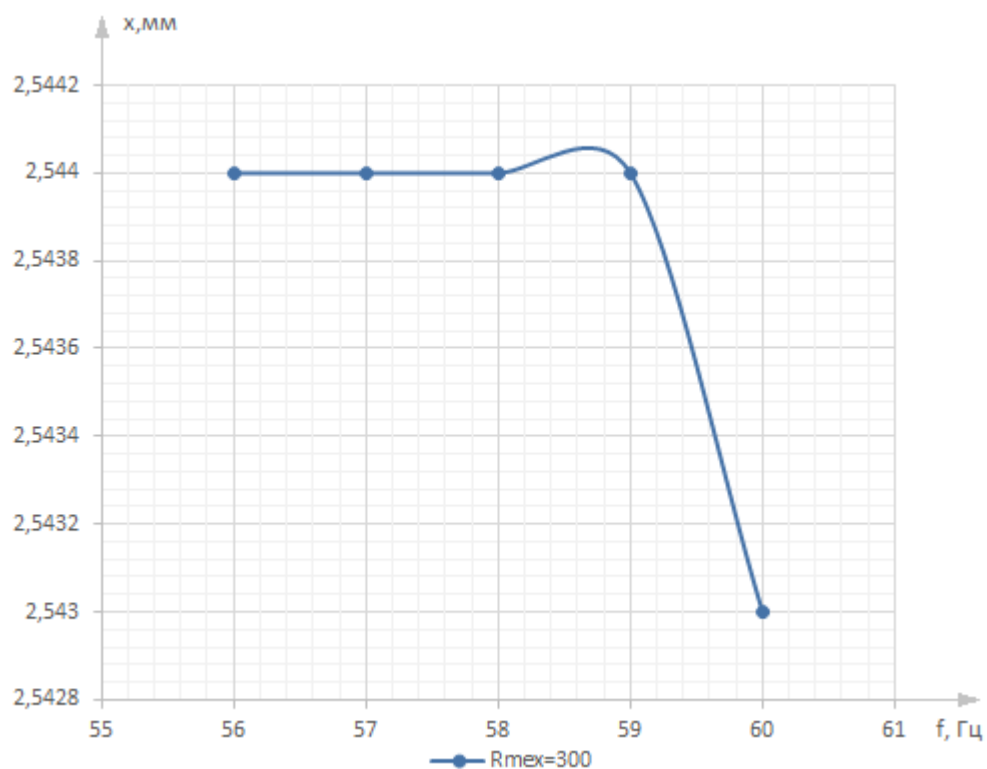


Рисунок 4.2.9 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 58$ Гц

Таблица 4.2.8 – Данные расчётов АЧХ для МВО, работающего на частоте 63 Гц

f , Гц	61	62	63	64	65
I_d , А	1,081	1,104	1,127	1,15	1,174
U_d , В	531,31	540,02	548,73	557,44	566,15
x , мм	2,601	2,601	2,601	2,601	2,6

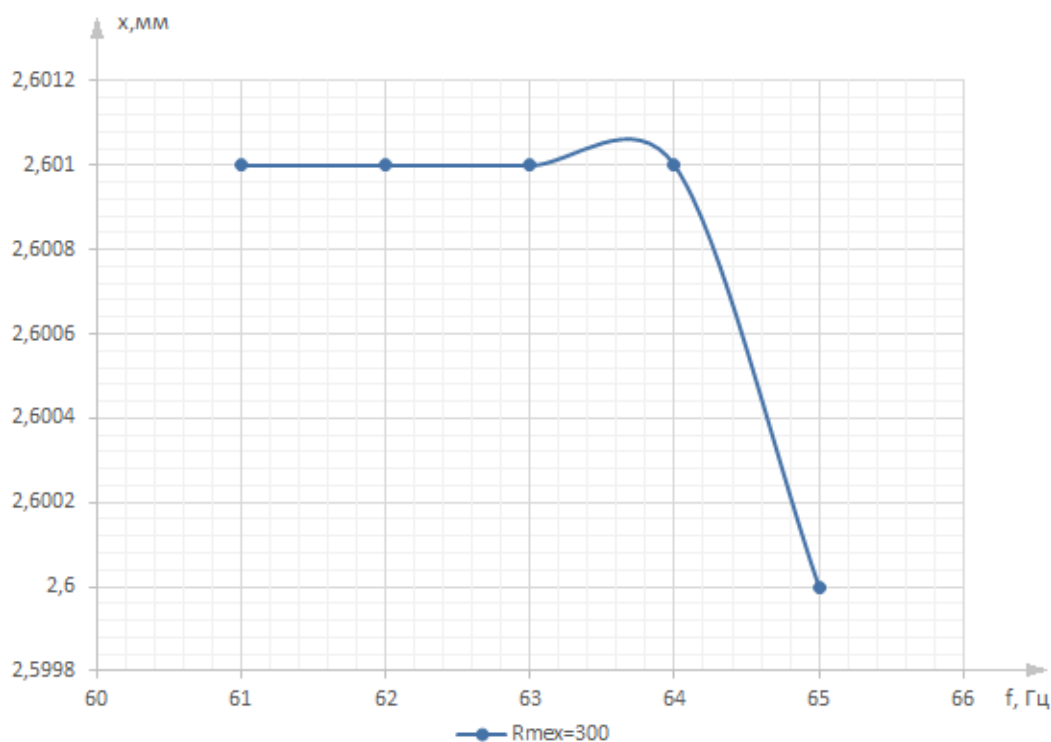


Рисунок 4.2.10 – АЧХ колебаний активатора от частоты питающего напряжения
 $f = 58$ Гц

4.3 Выводы

Таким образом, для обеспечения требуемой амплитуды колебаний МВО ВС-3500 необходимо:

1. Для обработки ПЗП с низким значением вязкости нефти $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 240 до 560 В, начальный зазор 4 мм при величине тока до 0,8 А.
2. Для обработки ПЗП со средним значением вязкости нефти $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 320 до 780 В, начальный зазор 4 мм при величине тока до 1,2 А.
3. Обеспечить работу отдельных МВО в резонансных режимах:
 - диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с от 30 до 65 Гц с шагом 5 Гц;
 - диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с от 30 до 58 Гц с шагом 3-5 Гц.

ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОПРИВОД УСТАНОВКИ

В зависимости от конкретных габаритов и области применения устройства целесообразно использовать принцип компоновки, предусматривающий конструктивное объединение нескольких единичных модулей в одном блоке. Такой подход позволяет существенно экономить на расходе конструктивных материалов.

5.1 Разработка схемы подключения ВС-3500

Промышленная энергосистема позволяет осуществить подключение ВС-3500 как на однофазную сеть, так и на трёхфазную. Как было установлено ранее, полный вариант ВС-3500 состоит из восьми единичных МВО. Исходя из количества единичных МВО, выбираем однофазную схему, представленную на рисунке 5.1.1. К фазе подключены все восемь МВО.

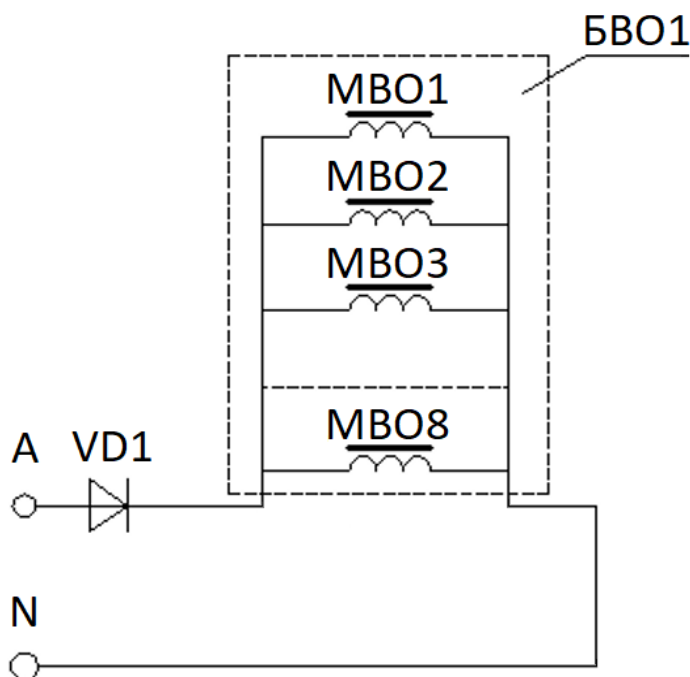


Рисунок 5.1.1 – Электрическая схема подключения ВС-3500

При однофазной схеме питания и количестве модулей $N = 8$ шт., полный ток БВО:

$$I_{\phi} = 8 \cdot I_{\text{доп}} = 8 \cdot 1,36 = 10,9 \text{ А.} \quad (5.1.1)$$

5.2 Выбор элементов электропривода ВС-3500

Основными элементами схемы подключения ВС-3500 являются блок виброобработки, автоматический выключатель, преобразователь частоты, блок диодов. Следует иметь в виду, что при выборе элементов схемы подключения необходимо учитывать соответствующие коэффициенты запаса, рекомендуемые из практики эксплуатации аналогичных устройств.

Функциональная схема подключения ВС-3500 к электрической сети приведена на рисунке 5.2.1.

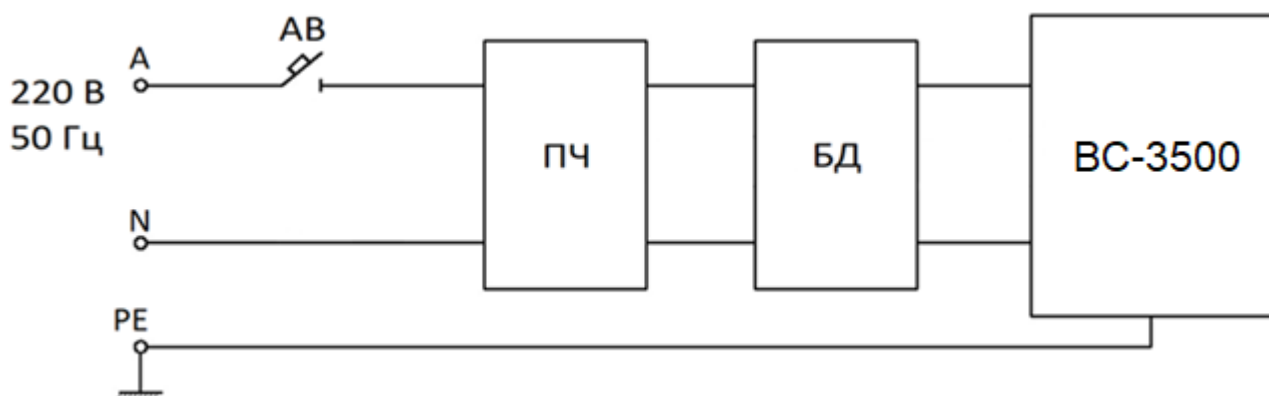


Рисунок 5.2.1 – Функциональная схема подключения ВС-3500

ВС-3500 (рисунок 5.2.1) подключается к однофазной сети переменного тока. АВ предназначен для включения и выключения устройства. АВ выбирается по условиям его работы на напряжение промышленной сети и рабочий ток в фазе не менее 10,9 А. БД содержит один диод. Диод выбирается по справочным данным с учётом кратности номинального тока не менее 10 к рабочему току в фазе МВО. Диод должен выдерживать величину обратного напряжения не менее 1000 В. Для улучшения условий охлаждения диод должен монтироваться на радиаторе.

Для подачи питания на устройство должен использоваться трёхжильный кабель в гибкой негорючей оболочке. Сечение жил кабеля выбирается по величине рабочего тока БВО. Длина кабеля должна составлять 2000 м, так как ВС-3500 будет применяться в добывающих скважинах глубиной от 1000 до 2000 м. Корпус устройства должен иметь заземление.

5.2.1 Выбор преобразователя частоты

Выбор ПЧ осуществляется по данным, полученным в результате расчёта режимов работы ВС-3500 на математической модели. Исходными данными для этого являются величина тока, напряжение, подаваемое на обмотки электромагнита, и частота напряжения.

В таблице 5.2.1.1 представлены данные для выбора ПЧ.

Таблица 5.2.1.1 – Данные для выбора преобразователя частоты

Диапазон регулирования частот, Гц	от 30 до 65
Номинальное напряжение сети, В	220
Ток фазы, А	$I_{\text{полн}} = k_3 \cdot I_{\text{max}} = 1,2 \cdot 10,9 = 13,1 \text{ А.}$ $I_{\text{max}} - \text{максимальный ток, протекающий в БВО;}$ $k_3 = 1,2 - \text{коэффициент запаса.}$

По справочным данным [23] выбираем ближайший больший по каталогу ПЧ марки ESQ-A200-2S0037. Характеристики ПЧ приведены в таблице 5.2.1.2

Таблица 5.2.1.2 – Технические характеристики ПЧ

Наименование параметра	Величина
Номинальная выходная мощность, кВт	3,7
Номинальный ток нагрузки, А	17
Номинальное напряжение на входе, В	220
Частота питающей сети, Гц	50/60
Диапазон регулирования частоты, Гц	0-400

Внешний вид ПЧ представлен на рисунке 5.2.1.1.



Рисунок 5.2.1.1 – Внешний вид ПЧ марки марки ESQ-A200-2S0037

5.2.2 Выбор диода

Для обеспечения работы ВС-3500 на частотах 30-65 Гц выбираем диод марки Vishay VS-40EPF10PBF [24].

Характеристики диода:

- $U_{об.мах} = 1000 \text{ В}$;
- $I_{пр.мах} = 40 \text{ А}$;
- диапазон рабочих температур -40 до $+150 \text{ С}^\circ$.

Внешний вид диода представлен на рисунке 5.2.2.1.



Рисунок 5.2.2.1. – Внешний вид диода марки Vishay VS-40EPF10PBF

5.2.3 Аппаратура управления преобразователя частоты

Управление ВС-3500 осуществляется в ручном режиме. Основным объектом управления является преобразователь частоты. Управление осуществляется по двум каналам регулирования U и f .

5.2.4 Аппаратура защиты преобразователя частоты

Так как преобразователь частоты имеет достаточное количество защитных функций, то из элементов защиты выберем только АВ.

5.2.5 Выбор автоматического выключателя

В качестве устройства защиты однофазной цепи (рисунок 5.2.1) будем использовать автоматический выключатель QF . АВ предназначен для защиты кабеля и электрооборудования от тока КЗ и перегрузок. Выбор осуществляется на основании рабочего тока в фазе и напряжения промышленной частоты.

$$1. \quad I_{н,расц} \geq I_{номЭП} = 10,9 \text{ А}; \quad (5.2.5.1)$$

$$2. \quad I_{устКЗ} > k_3 \cdot I_{пуск} = 1,2 \cdot k \cdot I_{номЭП} = 1,2 \cdot 5 \cdot 10,9 = 78,6 \text{ А}, \quad (5.2.5.2)$$

где $k = 5$ – кратность пускового тока.

Выбираем АВ марки Schneider Electric EZ9F34116 Easy 9 [25]. Параметры АВ представлены в таблице 5.2.5.1.

Таблица 5.2.5.1 – Технические характеристики автоматического выключателя

Количество полюсов	1
Номинальное напряжение, В	220
Номинальный ток, А	16
Частота, Гц	50/60
Время срабатывания расцепителя в зоне КЗ, с	0,01
Номинальная отключающая способность, кА	4,5
Степень защиты	IP20
Диапазон рабочих температур, °С	от – 40 до +55

5.2.6 Выбор кабеля питания

Ввиду того, что ВС-3500 будет эксплуатироваться в скважине на глубине от 1000 до 2000 м в условиях высоких температур до 70°С, необходимо подобрать соответствующий нефтепогружной кабель.

Расчётный ток ВС-3500 равен $I_{\text{расч}} = 10,9$ А.

Определяем экономическое сечение кабеля [26]:

$$S = \frac{I_{\text{расч}}}{j_{\text{эк}}} = \frac{10,9}{3,1} \approx 3,52 \text{ мм}^2, \quad (5.2.6.1)$$

где $j_{\text{эк}} = 3,1$ – нормированное значение экономической плотности тока, А/мм². Выбирается [26] с учётом, что время использования максимальной нагрузки T_{max} от 3000 до 5000 ч.

Сечение округляем до ближайшего стандартного 6 мм². Длительно допустимый ток для трёхжильного кабеля сечением 3х6 мм² согласно [26] составляет $I_{\text{д,доп}} = 55$ А.

Выбираем трёхжильный нефтепогружной кабель КППпПБК-90 3х6. Область применения кабеля: кабель КППпПБК-90 3х6 предназначен для подачи электроэнергии к погружным электродвигателям установок добычи нефти, водоподъёма и перекачки жидкостей из шурфов, резервуаров и водоемов [27].

Внешний вид нефтепогружного кабеля представлен на рисунке 5.2.6.1.



Рисунок 5.2.6.1 – Внешний вид нефтепогружного кабеля КППпПБК-90 3х6/3 кВ

5.3 Выводы

Конструкция спроектированного электромагнитный вибратора для обработки ПЗП позволяет его применять согласно проекту, на нефтедобывающих скважинах, принимая во внимание всевозможные ограничения.

Расчёты электрических параметров скорректированы оптимальным образом. Обмоточные данные МВО, выбранные при расчёте, позволяют использовать в качестве источника энергии промышленную сеть напряжением 220 В и частотой 50 Гц. При этом работа осуществляется в режиме резонанса, что способствует снижению энергозатрат при использовании частотного преобразователя.

Для обеспечения требуемой амплитуды колебаний МВО ВС-3500 необходимо:

1. Для обработки ПЗП с низким значением вязкости нефти $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 240 до 560 В, начальный зазор 4 мм при величине тока до 0,8 А.
2. Для обработки ПЗП со средним значением вязкости нефти $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 320 до 780 В, начальный зазор 4 мм при величине тока до 1,2 А.
3. Обеспечить работу отдельных МВО в резонансных режимах:
 - диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с от 30 до 65 Гц с шагом 5 Гц;
 - диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с от 30 до 58 Гц с шагом 3-5 Гц.

ГЛАВА 6. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА

Цель проекта – разработать маркетинговый план продвижения продукта, а именно, электромагнитного вибратора обработки призабойной зоны пласта на российский рынок потребителей. Продукт относится к области электротехники и может применяться в нефтегазодобывающей отрасли для повышения нефтеотдачи продуктивных пластов на начальном этапе заметного снижения дебита скважин.

6.1 Описание продукта как результата НИР

В настоящее время большинство эксплуатируемых нефтяных месторождений истощены и имеют высокую себестоимость добычи. В этих условиях нефтяные компании стремятся производить работы по разработке залежей нефти с максимальной эффективностью путём снижения издержек производства и рационального использования дефицитных инвестиционных ресурсов.

После ввода скважины в работу при её длительной эксплуатации снижается проницаемость ПЗП вследствие скопления в порах коллектора парафина, смол, мех. примесей и др. трудно удаляемых отложений различного рода. Всё это приводит к снижению дебита. Тогда нефтяным компаниям приходится прибегнуть к методам воздействия на ПЗП, с целью сохранения дебита скважины на должном уровне.

К наиболее часто применяемым методам увеличения дебита относятся:

- гидравлический разрыв пласта;
- бурение горизонтальных скважин;
- электромагнитное воздействие.

Вышеуказанные методы увеличения дебита имеют ряд отдельных недостатков, при которых их применение затруднено:

- сложность оборудования;
- энерго- и капиталоемкость компонентов;
- времязатратность подготовки;

- вероятность недостижения планируемого эффекта;
- неэффективность метода на большой глубине (малая продолжительность эффекта).

Поэтому, в связи со сложившейся проблемой, появились предпосылки разработки электромагнитного вибратора обработки призабойной зоны пласта.

Готовый продукт представляет собой вибратор скважинный ВС-3500. Конструкция ВС-3500 представляет собой трубу с вырезами в виде окон по всей длине конструкции, в которых расположены модули вибробработки. Сборочный чертёж конструкции ВС-3500 представлен в Приложении А.

В реальных условиях проведены исследования эффективности применения технологии ВСМА с целью снижения вязкости и напряжений сдвига нефтей (рисунок 6.1.1). Опыты проводилась на лабораторных установках Вл-1 [20].

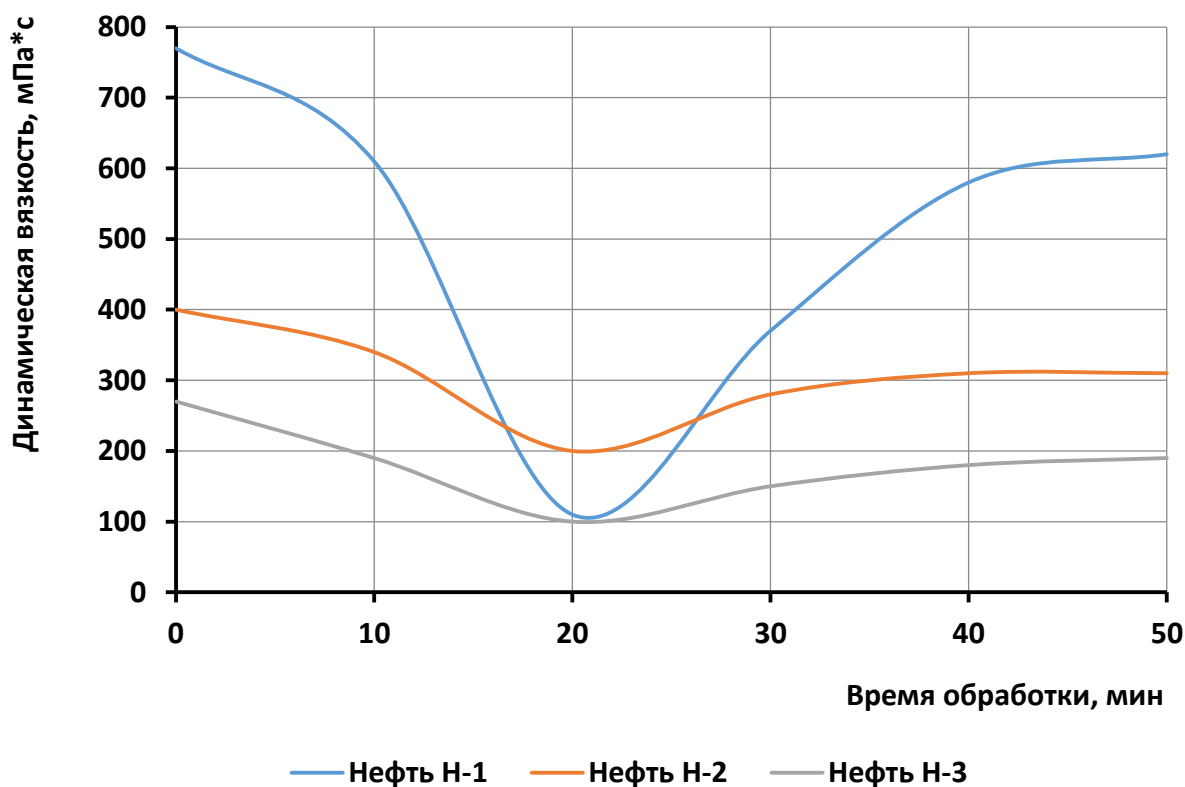


Рисунок 6.1.1 – Влияние времени обработки на вязкость трёх образцов нефти месторождений Западной Сибири

Из рисунка 6.1.1 видно, что после обработки нефти в течении 20 минут вязкость нефти Н-1 снизилась в 7 раз, а нефтей Н-2 и Н-3 в 2 раза, что говорит об эффективности применения технологии ВСМА для увеличения дебита. При низких параметрах вязкости электроцентробежному насосу потребуется меньше энергии и времени для перекачки определенного объёма нефти.

После проведения опытов и получения результатов, проведена количественная оценка для определения эффективности использования технологии ВСМА методом Бенч-маргинга по основным критериям качества. Сравнению подвергались существующие методы увеличения дебита, и технология ВСМА. Результаты оценки представлены в таблице 6.1.1.

Таблица 6.1.1 – Эффективность применения технологии ВСМА

Метод увеличения дебита	Вяз- кость (4)	Время обработки (3)	Энерго- эффективность (2)	Стои- мость (1)	Общая эффектив- ность
ВСМА	5	4	5	5	47
Гидроразрыв пласта	3	5	3	3	36
Бурение горизонтальных скважин	4	5	1	1	34
Электромагнитное воздействие	2	2	3	5	25

Пример расчёта эффективности приведём для технологии ВСМА:

$$5 \cdot 4 + 4 \cdot 3 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 1 = 47.$$

Таким образом, исходя из полученной оценки (таблица 6.1.1), технология ВСМА является эффективнее, по сравнению с другими методами увеличения дебита.

Следует также отметить, что технология ВСМА может быть использована и для профилактики, т.е., не дожидаясь существенного снижения дебита можно производить обработку ПЗП на ранних стадиях, тем самым поддерживая более высокий уровень дебита и сдвигая момент применения кардинальных МУН, в том числе за счёт увеличения дальности и глубины воздействия на продуктивный пласт (рисунок 6.1.2, 6.1.3).

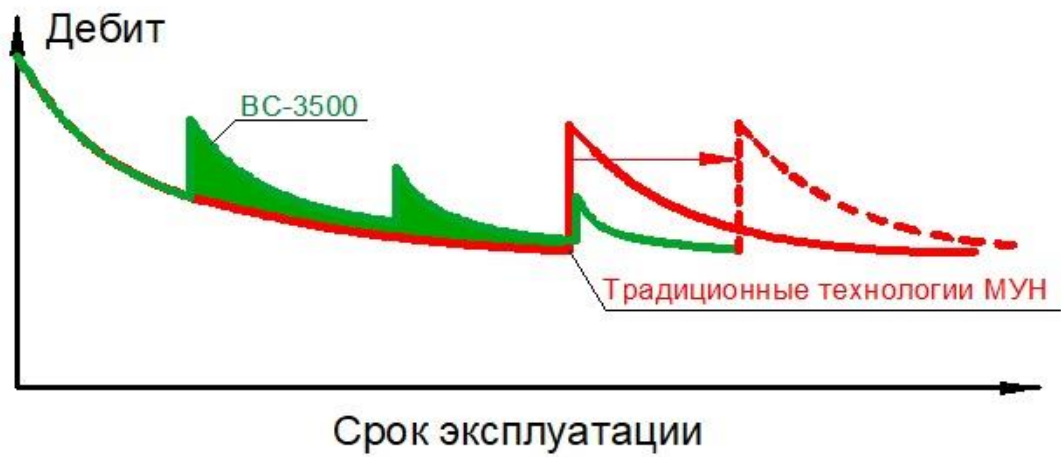


Рисунок 6.1.2 – Сравнение существующих МУН и технологии ВСМА

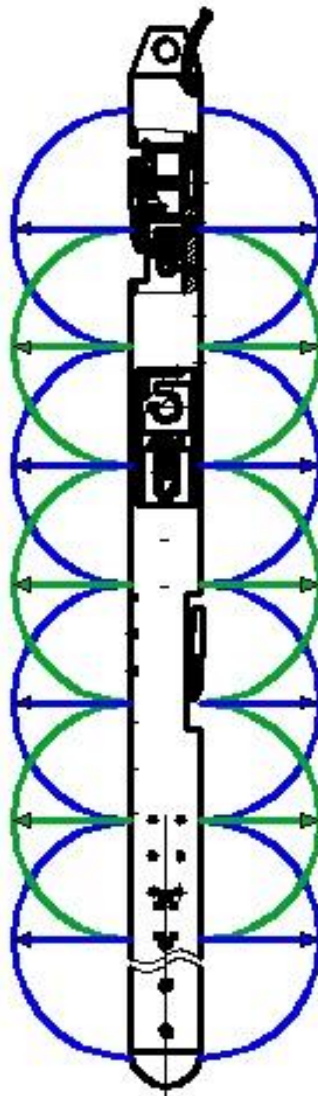


Рисунок 6.1.3 – Объем воздействия ВС-3500

6.2 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

В последние годы в России сократились размеры новых месторождений: если раньше крупное месторождение с запасами в 50 млн т считалось весьма распространенным, то сегодня нефтяные компании рады открытиям малых месторождений в 3 млн т. Большинство новых месторождений находится далеко от инфраструктуры, поэтому рентабельность их добычи, особенно при небольших запасах, может быть отрицательной. И, наконец, качество нефти на новых месторождениях хуже по химическому составу, по показателю содержания серы и плотности. Снижение качества ресурсной базы – это серьезный вызов для нефтегазового сектора России наравне с санкциями ЕС и США [28].

Так, например, по состоянию на 2018 г. в наибольшей уязвимости от санкций находилось оборудование для шельфовых проектов, а также оборудование для увеличения нефтеотдачи пластов, в том числе и ГРП (до 80%). При этом обе технологии являются критическими для нефтедобывающей отрасли России. Первая – это залог успешного функционирования нефтяной промышленности в будущем, а вторая – это гарантия возможности поддержания добычи на текущих месторождениях в среднесрочном периоде. ГРП стал неотъемлемой частью процесса разработки нефтяных месторождений. Он проводится на 50-80 % добывающих скважин. Вклад ГРП в достижение конечного значения КИН на новых нефтегазовых месторождениях достигает 80% [29]. Более того, практически всё оборудование ГРП, действующее в России, имеет возраст более 10 лет, то есть его придется заменять в достаточно короткие сроки (рисунок 6.2.1).

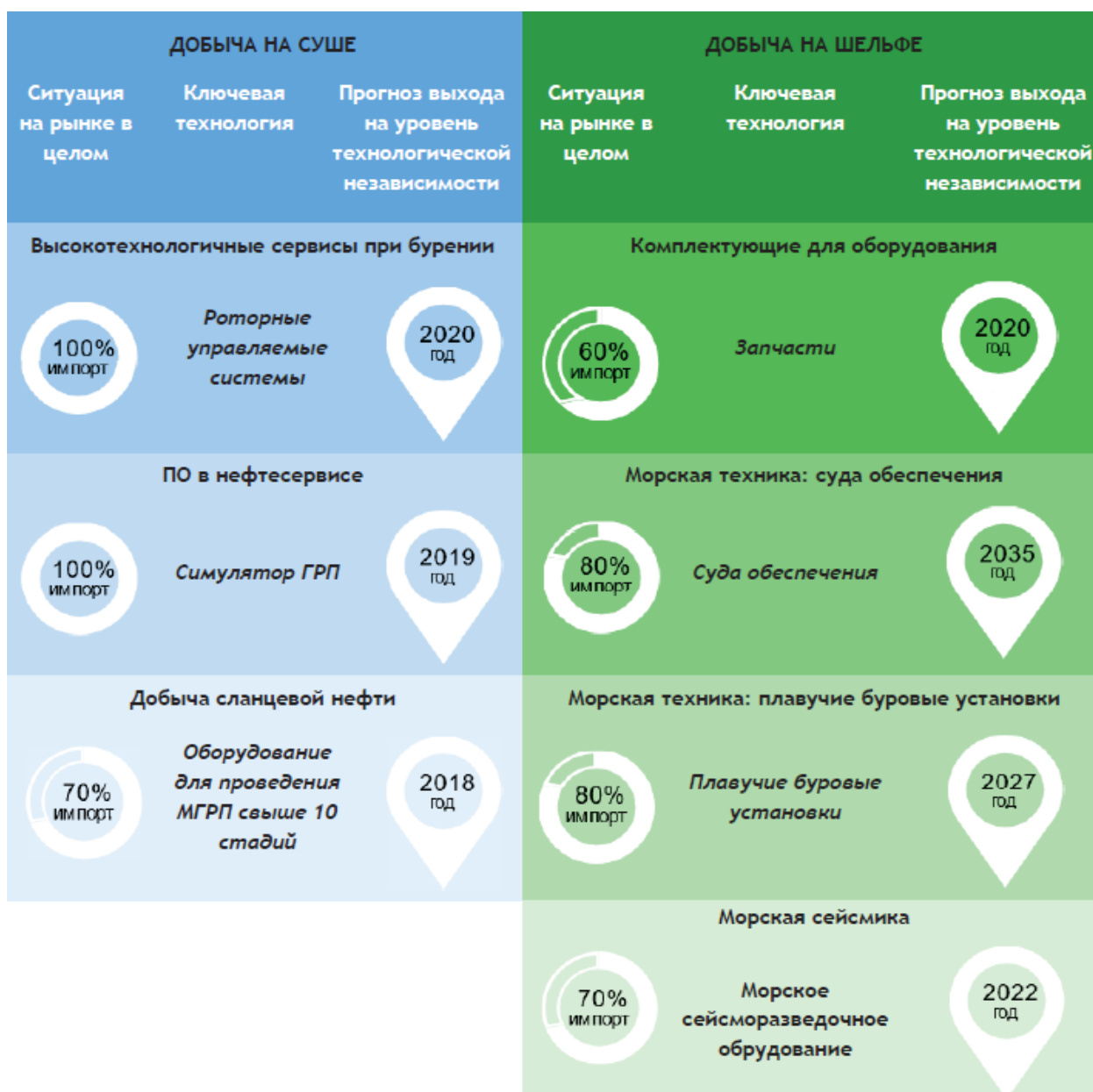


Рисунок 6.2.1 – Ситуация с импортным оборудованием для работ на суше и на шельфе, а также оценка перспективы его импортозамещения

6.2.1 Сценарный прогноз российской нефтедобычи

Прогноз добычи нефти в России посчитан на базе экономико-математической оптимизационной модели мирового нефтяного и нефтепродуктового рынка, разработанной в Институте энергетических исследований РАН World Oil Model [30].

Результаты расчетов показывают, что в «Базовом сценарии» добыча на крупнейших новых месторождениях до 2030 г. достигнет пика в примерно 90 млн т (рисунок 6.2.1.1). В сценарии «Усиление санкций» добыча на крупнейших

новых проектах также будет стабильно расти, однако, ее уровень достигнет лишь 75 млн т.

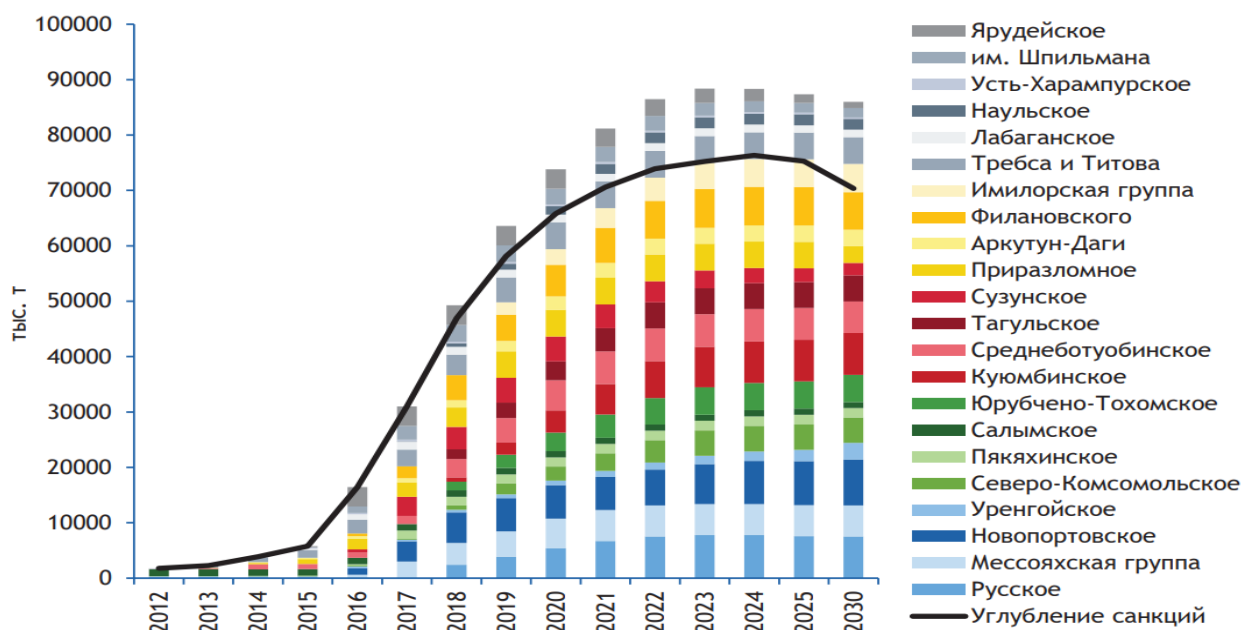


Рисунок 6.2.1.1 – Прогноз добычи нефти и газового конденсата на крупнейших новых месторождениях в «Базовом сценарии» и в сценарии «Усиление санкций» на период до 2030 г.

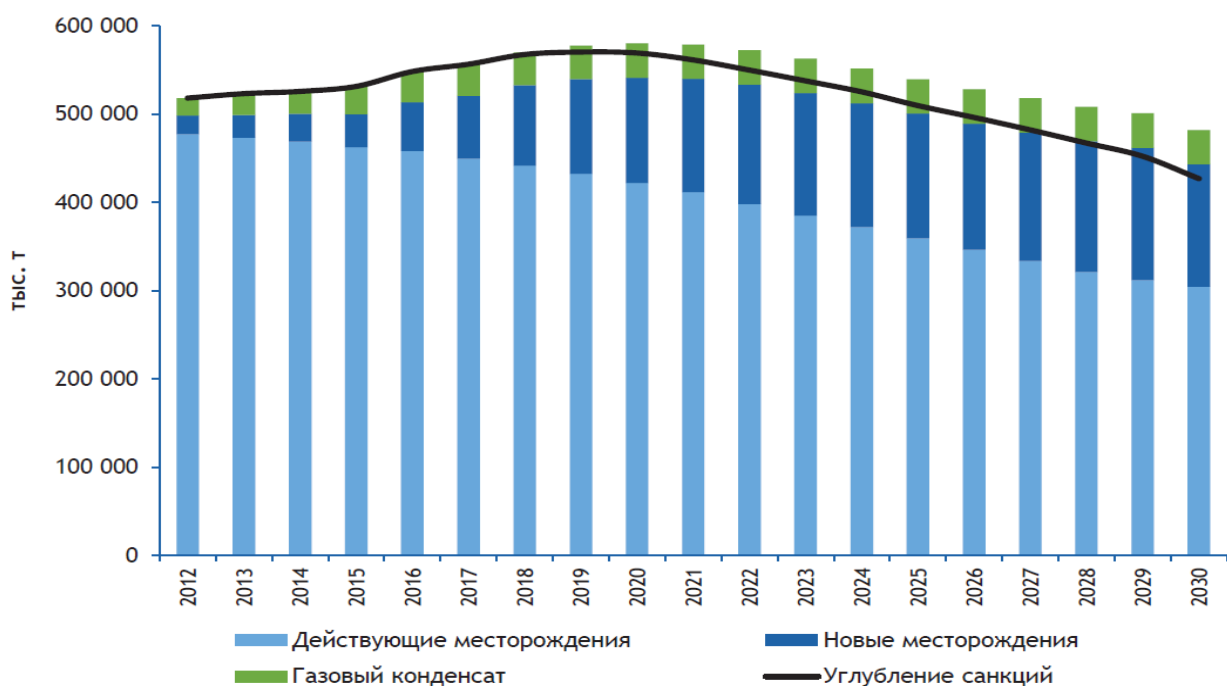


Рисунок 6.2.1.2 – Сценарный прогноз добычи нефти и газового конденсата в России на период до 2030 г.

Таким образом, вышеизложенные исследования в нефтегазовой промышленности показали, что тенденция освоения скважин не сократится еще как минимум до 2030 г. и разработанный прибор будет актуален ещё длительное время.

6.3 Объём и емкость рынка

По состоянию на 2018 год в России бездействующий фонд составлял 24,5 тысячи скважин – 14% от общего эксплуатационного фонда скважин. Около 34% принадлежат компании ПАО НК «Роснефть» – 8 тысяч скважин, также высокая доля простаивающих скважин у компаний «ЛУКОЙЛ» и «Татнефть». На эти три компании приходится более половины всех бездействующих скважин России, минимум половина из которых подлежит восстановлению. В основном эти скважины на зрелых месторождениях, сосредоточенных в Западной Сибири. Действующий фонд скважин ПАО «Сургутнефтегаз» характеризуется низкими дебитами и высокой обводнённостью, в связи с чем компании необходимо наращивать темп ввода новых скважин на зрелых месторождениях не менее 10% в год, чтобы удерживать текущий уровень добычи.

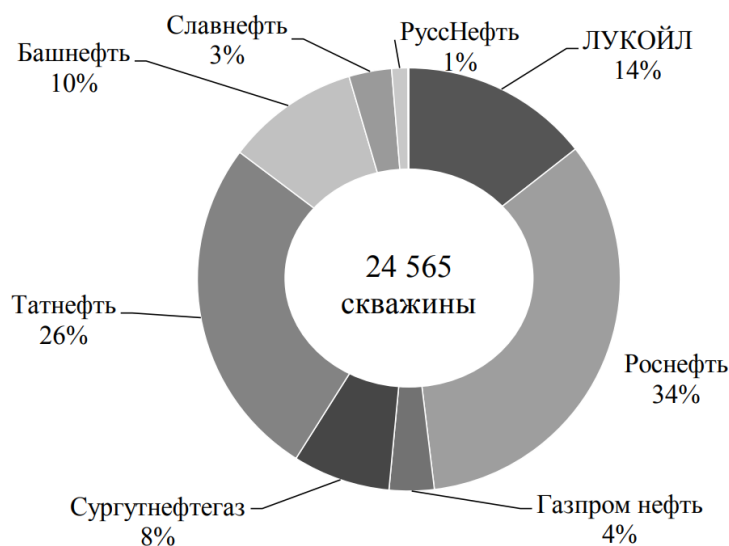


Рисунок 6.3.1 – Доля бездействующего фонда скважин по нефтяным компаниям за 2018 год (По данным ФГБУ «ЦДУ ТЭК»)

6.4 Целевые сегменты

На территории России располагается шесть основных нефтегазодобывающих районов:

- Дальневосточный;
- Восточно-Сибирский;
- Северо-Кавказский;
- Волго-Уральский;
- Тимано-Печорский.

Основными целевыми сегментами потребителей являются нефтегазодобывающие компании России. Также представляет интерес рынок Казахстана.

Основные нефтегазодобывающие компании России:

- «Газпром»;
- «Лукойл»;
- ПАО НК «Роснефть»
- «Газпром нефть»;
- ПАО «Сургутнефтегаз»;
- «Татнефть»;
- «НОВАТЭК»;
- ОАО НК «Славнефть»;
- ПАО АНК «Башнефть»;
- АО «Самотлорнефтегаз».

Данные компании входят в число потенциальных потребителей разрабатываемого прибора.

6.5 Конкурентные преимущества создаваемого продукта

Проведённые ранее сравнения существующих способов увеличения дебита с технологией ВСМА, показывают существенное преимущество последнего по таким показателям, как энергоэффективность, снижение вязкости и стоимость.

Конкурентные преимущества:

- снижение энергозатрат до 20%;
- российский продукт (импортозамещение);
- снижение вязкости нефтепродуктов и, как следствие, снижение нагрузки на электроцентробежный насос;
- простая и надежная в эксплуатации конструкция;
- менее затратная технология по сравнению с аналогичными методами увеличения дебита;
- увеличение текущей нефтеотдачи до 15%.

Основываясь на вышеизложенном следует заключить, что ВС-3500 обладает сильной конкурентной способностью, а его использование для обработки ПЗП, позволит сократить себестоимость добычи нефти или газа за счёт сокращения затрат по таким статьям, как:

- расходы на энергию по извлечению нефти;
- расходы на содержание и эксплуатацию скважин и оборудования;
- расходы на технологическую подготовку нефти;
- расходы на подготовку и освоение производства.

6.6 Защита интеллектуальной собственности

ВС-3500 имеет все возможности и права на защиту. Реализация защиты прав на интеллектуальную собственность возможна несколькими способами:

- для разработчика ТПУ – это патент на изобретение (устройство);
- для изготовителя – это патент на промышленный образец или полезную модель.

Для защиты интеллектуальной собственности в соответствии с законом необходимо направить заявку в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (Роспатент), дождаться получения патента, после чего алгоритм будет регулироваться сразу несколькими актами – частью четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации, а также федеральными законами № 98-ФЗ от 29 июля 2004 года «О коммерческой тайне», № 149-ФЗ от 27 июля 2006 года «Об информации, информационных технологиях и о защите

информации», № 135-ФЗ от 26 июля 2006 года «О защите конкуренции», а также Кодексом об административных правонарушениях РФ, Уголовным кодексом РФ и другими.

6.7 Планируемая стоимость продукта

В силу того, что конструкторская документация на опытный образец ВС-3500 разработана, оптовую отпускную цену прибора определим расчётным путём на основе имеющегося опыта изготовления аналогичных образцов другого назначения. Подробная калькуляция приведена в таблице 6.7.1.

Таблица 6.7.1 – Расчёт стоимости ВС-3500

№	Статьи калькуляции	Затраты, руб.
1	Сырьё и материалы	104 240,00
2	Комплектующие	12 000,00
3	Расходные материалы	15 000,00
4	Основная заработная плата	172 700,00
5	Дополнительная заработная плата	15 100,00
6	Начисления на заработную плату	75 120,00
7	Общепроизводственные расходы	28 170,00
8	Полная себестоимость	422 330,00
9	Прибыль производителя*	633 495,00
10	Оптовая цена производителя	1 055 825,00
11	НДС	211 165,00
12	Оптовая отпускная цена*	1 266 990,00

*норма прибыли на начальном этапе 150 % для компенсации затрат на подготовку производства, сертификацию и пр.

Расчёт производился исходя из следующих соображений:

- Норматив дополнительной ЗП составляет 10% от основной;
- Норматив начисления составляет 40% от ЗП;
- Норматив общепроизводственных расходов составляет 15% от ЗП;
- Норматив прибыли составляет 15% от полной себестоимости;
- НДС = 20% от оптовой цены.

6.8 Планируемый доход от реализации

В рамках полученной отпускной цены одного ВС-3500 (1 266 990,00 руб.) можно провести расчёт планируемого дохода от реализации в зависимости от объёма производства, который отражён в таблице 6.8.1.

Таблица 6.8.1 – Планируемый доход от реализации ВС-3500

Объем производства, штук	50	100	200
Общий доход от реализации, руб.	63 349 500,00	126 699 000,00	253 398 000,00
Расчетная прибыль, руб.	6 018 202,50	9 185 677,50	15 520 627,50

6.9 Экономическая оценка эффективности применения ВС-3500

Выполним расчёт эффективности применения ВС-3500 в целях увеличения дебита на примере Фаинского месторождения, принадлежащего компании ООО «РН-Юганскнефтегаз». Согласно [31] средний дебит скважин по нефти Фаинского месторождения составляет 9,6 т/сут.

В отличие от существующих кардинальных МУН, когда дебит падает ниже уровня рентабельности, ВС-3500 используется в ходе текущей эксплуатации скважины. Другими словами, начинаем применять прибор после некоторого времени от начала эксплуатации скважины, когда реальный дебит уже несколько упал по отношению к начальному. Мы увеличиваем дебит скважины на 15% по отношению к текущему дебиту.

Поэтому, если говорить о среднегодовом дебите, то он увеличивается на величину менее 15%. Всё зависит от времени начала применения прибора. Можно принять, что начинаем применять прибор, например, начиная с четвёртого квартала, когда уже можно предположить, что скважина стала проблемной с позиций загрязнения ПЗП. Это правильно, так как причины падения дебита могут быть и другие: падение пластового давления, прорывы, газопроявления и т.п. Эту идеологию можно принять в качестве рабочей.

В этом случае реально можно рассчитывать на увеличение среднегодового дебита на уровне 1,5-2,0%. Это и следует принять за показатель увеличения годового дебита скважины при использовании ВС-3500.

Тогда на примере Фаинского месторождения можно ожидать увеличение годовой добычи нефти на уровне:

$$\Delta A = q \cdot (365 - t_{\text{уст}}) \cdot 0,02 \cdot k_3, \quad (6.9.1)$$

где q – среднегодовой дебит, т;

$t_{\text{уст}}$ – время на монтаж и установку ВС-3500;

k_3 – коэффициент эксплуатации нефтяных скважин ($k_3 = 0,967$).

$$\Delta A = 9,6 \cdot (365 - 14) \cdot 0,02 \cdot 0,967 = 65,168 \text{ т/год.}$$

Цена нефти по состоянию на 27 мая 2020 года за одну тонну составляет 645 714,54 руб. Тогда дополнительный доход составит: $65,168 \cdot 645\,714,54 = 42\,079\,925,1$ млн. руб. с одной скважины в год. Одним прибором при такой схеме можно обрабатывать до четырёх скважин в год. Дополнительный годовой доход от применения одного прибора при обработке четырёх скважин составит $(4 \cdot 42\,079\,925,1 - 1\,266\,990,00) = 168\,319\,701,0$ млн. руб. Прибор ВС-3500 окупится уже после обработки одной скважины.

6.10 Стратегия продвижения продукта на рынок

Для продвижения ВС-3500 на рынок было определено несколько стратегий:

- Формирование мобильной бригады по монтажу ВС-3500 (договорная основа);
- Непосредственная реализация Российским нефтегазодобывающим компаниям;
- Участие в тематических выставках, конференциях, форумах;
- Безвозмездная опытная эксплуатация для нефтегазовых компаний (на первых этапах реализации).

6.11 Бизнес-модель проекта

Итогом проекта является бизнес модель, составленная на основе диаграммы Остервальдера, которая отражает ключевые этапы реализации ВС-3500. Бизнес модель представлена в таблице 6.11.1.

Таблица 6.11.1 – Бизнес-модель проекта

<p><i>КП</i> Предприятия по реализации нефтегазового оборудования. Нефтегазодобывающие компании.</p>	<p><i>КД</i> Конструирование. Производство.</p>	<p><i>ЦП</i> Увеличение и поддержание текущего дебита скважин. Повышение производительности и приемистости скважин. Импортзамещение. Энергоэффективность. Простая и надёжная конструкция.</p>	<p><i>ВК</i> Авторское сопровождение продукции. Гарантийное обслуживание. Ремонт оборудования.</p>	<p><i>ПС</i> Компании по добыче нефти и газа.</p>
	<p><i>КР</i> Разработчики, рабочие. Помещения и оборудование. Бренд ТПУ.</p>		<p><i>КС</i> Установка на действующие нефтегазодобывающие скважины Аренда оборудования на период ремонтных работ. Безвозмездная опытная реализация на первых этапах.</p>	
<p><i>СИ</i> Персонал разработчиков. Производство. Маркетинг и продажа.</p>		<p><i>ПД</i> Доходы от продаж прибора нефтегазодобывающим компаниям. Доходы от сервисных услуг по установке оборудования на действующие нефтегазодобывающие скважины. Доходы от аренды оборудования.</p>		

КП – Ключевые потребители; *КД* – Ключевая деятельность; *ЦП* – Ценностные предложения; *ВК* – Взаимоотношения с клиентами; *ПС* – Потребительские сегменты; *КР* – Ключевые ресурсы; *КС* – Каналы сбыта; *СИ* – Структура издержек; *ПД* – Потоки доходов.

6.12 Выводы

В данном разделе определены ключевые этапы бизнес-планирования для продвижения ВС-3500 на российский рынок потребителей. К основным потребителям относятся нефтегазодобывающие предприятия. Использование ВС-3500 позволит увеличить, а также сохранить дебит скважины на должном уровне.

Потоки доходов основываются на продажах, оказании сервисных услуг и выдачи оборудования в аренду. Проект обладает всеми правами на защиту интеллектуальной собственности и высокой конкурентоспособностью в силу отсутствия аналогов.

Оценка качества, полученная на основе проведенных опытов, подтвердила эффективность изделия и подчеркнула явные преимущества по сравнению с традиционными техническими решениями по увеличению дебита скважин.

ГЛАВА 7. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Возрастающая мировая потребность в энергии требует более эффективной выработки полезных ископаемых. В связи с этим, внедрение новых методов повышения нефтеотдачи, которые позволят улучшить существующие техники добычи нефти, является актуальной задачей.

Для обеспечения требуемого дебита скважин парафиновые и асфальтеновые отложения на стенках пор коллекторов необходимо удалять, т.к. следствием их скопления является уменьшение проницаемости призабойной зоны пласта, в результате чего дебит скважин снижается, а иногда и полностью прекращается эксплуатация скважин.

Решение данной проблемы достигается путём размещения в скважинном приборе преобразователей электромагнитной энергии в механическую, работающих на разных частотах. При этом ЭМП расположены в скважинном приборе последовательно в порядке убывания резонансной частоты, а размер каждого из них определяется величиной резонансной частоты.

Объектом исследования является электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта.

Работа проводится на базе оборудования, находящегося в аудитории №253 8 корпуса ТПУ.

В разделе будут рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на производственную деятельность персонала, правовые и организационные вопросы, воздействия разрабатываемого устройства на окружающую среду, а также предложены мероприятия по предупреждению возникновения чрезвычайных ситуаций.

7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К правовым нормам относятся: соблюдение работодателем и работником законов и должностных инструкций предприятия.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. №197-ФЗ [32] работник аудитории №253 8 корпуса ТПУ имеет права и обязанности, установленные трудовым законодательством и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права, локальными нормативными актами.

В ходе исследования привлечение к работам в ночное время не производится. Практикуется применение спецодежды и средств индивидуальной защиты (очки, маски, перчатки, каски и др.). Спецпитание и особое лечебно-профилактическое обслуживание отсутствует. Особенности обязательного социального страхования и пенсионного обслуживания стандартные. Режим работы с 9:00 утра до 17:00 вечера с перерывом для отдыха и питания в течение 1 часа, воскресенье – выходной день, продолжительность рабочего времени не превышает 40 часов в неделю. Численность работающих на установках не более 5-ти человек [32].

Также работнику предоставляется ежегодный основной оплачиваемый отпуск продолжительностью 2 календарных дня за каждый отработанный им месяц и дополнительный оплачиваемый отпуск. Кроме этого, по семейным обстоятельствам и другим уважительным причинам работнику по его письменному заявлению может быть предоставлен отпуск без сохранения заработной платы. Согласно п.13.1 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [33] лица, работающие с электронно-вычислительными машинами более 50 % рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке. Согласно Приказу Минздравсоцразвития РФ от 12.04.2011 №302н «Об утверждении перечней вредных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические

медицинские осмотры (обследования), и порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда» [34] лица, работающие за компьютером не менее 50% рабочего времени, один раз в два года должны проходить осмотр у невролога и офтальмолога.

7.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место сотрудника должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ [35]. Площадь помещения должна быть не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем – не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина – 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 – 80 см. Также рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

7.3 Производственная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, влияющих на персонал при выполнении работ в аудитории №253 8 корпуса ТПУ, связанных с разработкой и исследованием электромагнитного вибратора, представлен в таблице 7.3.1.

Таблица 7.3.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Недостаточная освещенность рабочей зоны.	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [36].
1. Превышение уровня шума на рабочем месте.	–	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 [37].
2. Повышенный уровень вибрации.	–	+	+	ГОСТ 12.1.012-2004 [38].
3. Физические перегрузки; эмоциональные перегрузки.	+	+	+	№ 197-ФЗ [32].
4. Неудовлетворительный микроклимат.	+	+	+	ГОСТ 12.1.005-88 [39]. СанПиН 2.2.4.548-96 [40].
5. Движущиеся механизмы, подвижные части производственного оборудования.	–	+	+	ГОСТ 12.2.062-81 [41].
6. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 [42]. ГОСТ 12.4.011-89 [43].

Проанализируем опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть на рабочем месте при выполнении научно-технического исследования.

7.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов

1 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Оценка освещенности рабочей зоны проводится в соответствии с [36].

Правильное освещение рабочего места способствует повышению производительности путем улучшения зрительной работы, тем самым оказывая психологическое действие на работника. Плохое освещение приводит к быстрой

усталости, головным болям, несчастным случаям. Слишком яркое освещение – к рези в глазах, ослеплению. Все эти причины приводят к ухудшению зрения.

Осветительные установки должны удовлетворять следующим требованиям [44]:

- создавать на рабочей поверхности освещенность, соответствующую характеру зрительной работы, не ниже установленных норм;
- обеспечивать достаточную равномерность распределения яркости на рабочей поверхности и в пределах окружающего пространства;
- ограничивать прямую и отраженную блескость в поле зрения;
- не создавать на рабочей поверхности резких и глубоких теней;
- обеспечивать постоянную освещенность во времени;
- ограничивать глубину пульсации освещенности при использовании газоразрядных ламп, питаемых от сети переменного тока 50 Гц;
- создавать свет необходимого спектрального состава;
- не создавать опасных и вредных производственных факторов (шум, тепловые выделения, опасность поражения током, пожаро- и взрывоопасность);
- должны быть надёжны, удобны, просты в эксплуатации, экономичны и эстетичны.

Для защиты органов зрения применяются различные защитные очки, щитки, шлемы, обеспечивающие защиту органов зрения от ультрафиолетового и инфракрасного излучений, повышенной яркости и ряда других факторов.

Освещенность на поверхности стола в зоне работы должна быть 300-500 лк [45]. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Следует ограничивать прямую блёскость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м². Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях должен быть не более 20. Нормы на освещение для оператора установок представлены в таблице 7.4.1 [45].

Таблица 7.4.1 – Нормы освещения для оператора

Характер зрительной работы	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Искусственное освещение		Естественное освещение КЕО _{ен} , % при боковом
			Освещенность при системе общего освещения, лк	Коэффициент пульсации К _п , %	
Различение объектов высокой точности	Б	1	300	15	1,0

2 *Превышение уровня шума на рабочем месте*

В условиях производства имеют место шумы различной интенсивности и спектра, которые создаются в результате работы различных механизмов. Они образуются вследствие быстрых вращательных движений, ударов, трений и вибрации.

Повышенный уровень шума ухудшает качество условий труда, неблагоприятно действует на организм человека. При работе в условиях длительного шумового воздействия, человек может испытывать головную боль, нарушается работа слухового аппарата, снижается работоспособность.

Основным источником шума в рабочем помещении являются вентиляторы системы охлаждения ПЭВМ. Уровень шума колеблется от 35 до 40 дБ. В процессе работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ. ПДУ шума нормируются ГОСТ 12.1.003-2014 [37]. Значения ПДУ шума представлены в таблице 7.4.2 (для постоянных шумов).

Таблица 7.4.2 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Научная деятельность, конструирование проектирование. Рабочие места в аудиториях, лабораториях для теоретических работ и обработки данных.	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Организационно-технические мероприятия по защите от действия шума:

- ограничение времени пребывания рядом с источником шума;
- ограничение расстояния между оператором и производственным оборудованием;
- экранирование источника шума;
- замена оборудования;
- использование средств индивидуальной защиты (наушники).

3 Повышенный уровень вибрации

Длительное воздействие вибрации на человека может привести к головокружениям, расстройству координации движений, укачиванию, вестибулярной неустойчивости, нарушению зрительной функции.

ПДУ вибрации нормируется согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [46] и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [47].

В таблице 7.4.3 представлены санитарные нормы показателей вибрационной нагрузки для 8-часовой смены. По категории вибрации работы относятся к категории 3 тип «а» [38].

Таблица 7.4.3 – Санитарные нормы вибрационной нагрузки

Вид вибрации	Категория вибрации по санитарным нормам	Направление действия	Нормативные, скорректированные по частоте и эквивалентные скорректированные значения			
			Виброускорения		Виброскорости	
			м·с ⁻²	дБ	м·с ⁻² ·10 ⁻²	дБ
Общая	3 тип «а»	Z0, Y0, X0	0,1	100	0,2	92

Для борьбы с вибрацией предпринимаются следующие меры:

- подавления в источнике возникновения (центровка, регулировка);
- изменения в конструкции;
- использования пружинных амортизаторов, виброизоляционных прокладок.

4 Физические перегрузки; эмоциональные перегрузки

Для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранения здоровья на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы.

Сильное психологическое влияние оказывает цветовая гамма окружающего пространства. Поэтому важно правильно подбирать цвета при планировании интерьера. Нужно избегать ярких цветов, а использовать спокойные пастельные краски.

Для уменьшения физических нагрузок (нервно-эмоциональная нагрузка, напряженность зрительного аппарата, нагрузка на мышцы рук, шеи, поясницы), действующих на организм человека, во время работы рекомендуется использовать специальную мебель с возможностью регулировки под конкретные антропометрические данные.

5 Неудовлетворительный микроклимат

Принципом нормирования микроклимата является выполнение приемлемых условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

Параметрами, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха, t [$^{\circ}\text{C}$];
- температура поверхностей (стен, потолка, пола, ограждений оборудования и т.п.), $t_{\text{п}}$ [$^{\circ}\text{C}$];
- относительная влажность воздуха, W [%];
- скорость движения воздуха, V [м/с];
- интенсивность теплового облучения, P [Вт/м²].

Стандартами (ГОСТ 12.1.005-88 [39] и СанПиН 2.2.4.548-96 [40]) предусмотрены два качественных уровня норм микроклимата: оптимальные и допустимые величины параметров микроклимата.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, инсоляции на постоянных и непостоянных рабочих местах не должна превышать 35 Вт/м² при облучении 50% поверхности тела и более 70 Вт/м² – при величине облучаемой поверхности от 25 до 50% и 100 Вт/м² – при облучении не более 25% поверхности тела.

Интенсивность теплового облучения работающих от открытых источников (нагретый металл, стекло, «открытое» пламя и др.) не должна превышать 140 Вт/м², при этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

Оптимальные нормы параметров микроклимата установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека представлены в таблице 7.4.4 для 8-часовой рабочей смены [40].

Таблица 7.4.4 – Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Категория работы	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	II б	17-19	60-40	0,2
Теплый	II б	19-21	60-40	0,2

К категории П б относятся работы, связанные с ходьбой и перемещением грузов массой до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением, умственным трудом; учёбой.

Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах должны соответствовать значениям таблицы 7.4.5 [40].

Таблица 7.4.5 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	П б	15-22	15-75	0,2-0,4
Теплый	П б	16-27	15-75	0,2-0,5

Поддержание параметров микроклимата в лабораториях в зимний период времени обеспечивается водяной системой отопления. Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха используется система естественной вентиляции, но для наиболее комфортных условий работы в теплое время года рекомендуется использовать систему кондиционирования или вентиляторы.

б Движущиеся механизмы, подвижные части производственного оборудования

Источниками опасности для персонала в аудитории могут быть: различные движущиеся части механизмов; вращающиеся механизмы токарного станка; сверлильного станка; вращающиеся части электрического привода (ротор или якорь электродвигателя) и т.д.

Основные последствия механических опасностей: защемление или раздавливание; порезы; отрезание или разрубание; попадание под удар; поверхностное повреждение наружных тканей под действием трения.

Требования безопасности к применению ограждений в зависимости от расположения опасных элементов устанавливает стандарт ГОСТ 12.2.062-81 [41].

Согласно ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности [48], к средствам защиты от механического травмирования (физического опасного фактора) относятся:

- СИЗ (перчатки, очки, костюм, ботинки, каска и т.д.)
- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);
- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами.

7.5 Анализ выявленных опасных факторов

1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которого может пройти через тело человека

Основным источником электротравматизма в аудитории являются испытательные стенды. Сотрудники должны иметь группу не ниже II группы допуска по технике безопасности, отчетливо представлять опасность электрического тока и приближение к токоведущим частям, знать основные меры предосторожности при работах в электроустановках, а также знать правила оказания первой доврачебной помощи.

Согласно ПУЭ (7-е изд.) [26] аудитория №253 8 корпуса ТПУ относятся к помещениям без повышенной опасности, т.к. отсутствует сырость, высокая температура, токопроводящие полы, токопроводящая пыль, химическая среда.

Основными мероприятиями по защите от электропоражения согласно ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ [49] являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;

- применение защитного заземления;
- применение защитного зануления;
- применение защитного отключения;
- использование диэлектрических подставок и ковриков;
- использование диэлектрических перчаток;
- ограничение напряжения.

7.6 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность на производстве – это определенный комплекс мер. Их цель – приведение деятельности к соответствию природоохранным нормативам и повышению её рентабельности. Организация, использующая энерго- и ресурсосберегающие процессы, увеличивает свою эффективность и, как следствие, снижает воздействие вредных веществ, как на самих работников, так и на окружающую среду.

Процесс исследования представляет собой работу с информацией, такой как обзор технической литературы, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с помощью программного комплекса. Таким образом, процесс исследования не оказывает негативного влияния на окружающую среду (атмосферу, гидросферу литосферу).

Защита литосферы

Некоторые части и узлы объекта исследования подвергаются износу, что приводит к скоплению металлических отходов. Данные отходы сортируются и отправляются на утилизацию [50].

При обращении с твердыми отходами находящимися в аудитории: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014 г.) [51]: бытовой мусор после

предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [52]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к I классу опасности.

Защита атмосферы

Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртуть материала (винипласта).

7.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Если рассматривать местоположение и условия эксплуатации объекта исследования, то можно представить следующие варианты ЧС: разрушение здания, удар молнии, взрыв, пожар. Наиболее вероятная ЧС – пожар в здании.

В соответствии с НПБ 105-03 [53] аудиторию №253 8 корпуса ТПУ можно отнести к категории «Д»: негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Основная причина пожаров в здании – электрический ток. Во избежание пожаров по этой причине необходимо, чтобы электрические сети и электрооборудование отвечали требованиям правил по охране труда при эксплуатации электроустановок [54].

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия включают в себя:

1. Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
2. Ознакомление персонала с правилами техники безопасности;
3. Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1. Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
2. Обеспечение свободного подхода к оборудованию;
3. Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.

В помещении площадью 50 м² согласно документу «Правила противопожарного режима в РФ» от 25.04.2012 г. [55] необходимо иметь:

- 1 порошковый огнетушитель типа ОП-5;
- не менее 1 углекислотного огнетушителя типа ОУ-6;
- план эвакуации людей;
- средства пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре.

В случае пожара нужно немедленно вызвать пожарную охрану по телефону 01 (сот. 101), а также при необходимости вызвать газоспасательную, медицинскую и другие службы. Информацию об очаге возгорания необходимо сообщить лицу, ответственному за эвакуацию людей из здания. Если в помещении, где произошло загорание, находятся предметы, потеря которых может привести к серьезным финансовым затруднениям предприятия или к потере ценной информации, то нужно приступить к тушению очага пожара.

В каждом помещении имеется ответственный за пожарную безопасность. В его обязанности входит:

- своевременное проведение профилактических осмотров и ППР;
- слежение за правильностью выбора и применения оборудования;
- систематический контроль состояния аппаратов, предохраняющих от отклонений в режимах работы;
- слежение за наличием средств пожаротушения;
- организация системы обучения и инструктажа по пожарной безопасности.

Меры пожарной безопасности:

- наличие необходимого количества выходов;
- пожарная сигнализация;
- организационно-технические мероприятия.

В 8 корпусе ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации. План эвакуации представлен на рисунке 7.7.1.

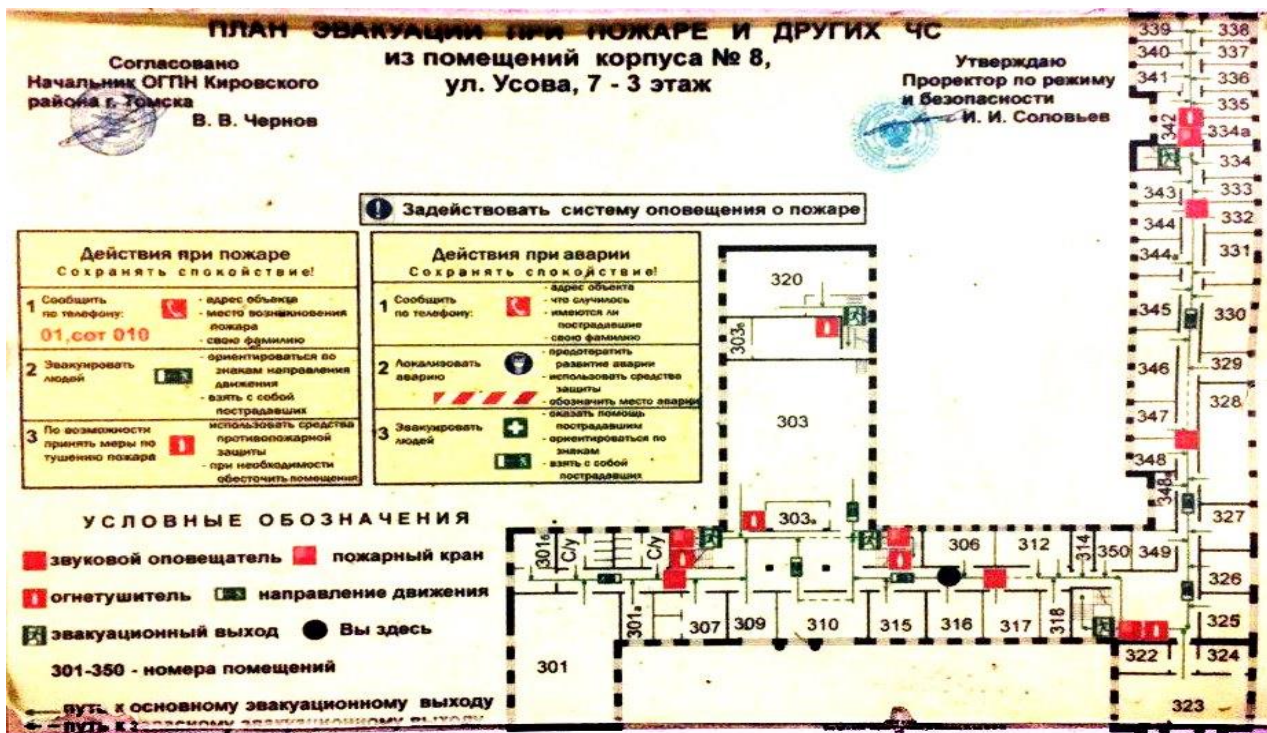


Рисунок 7.7.1 – План эвакуации людей на случай пожара

План эвакуации из аудитории №253 8 корпуса ТПУ представлен на рисунке 7.7.2.



Рисунок 7.7.2 – План эвакуации людей на случай пожара из аудитории №253 8 корпуса ТПУ

7.8 Выводы

В данном разделе рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, выявлены вредные и опасные производственные факторы при разработке и исследовании электромагнитного вибратора обработки призабойной зоны пласта, предложены меры по ограничению этих факторов. Определены наиболее вероятные чрезвычайные ситуации, разработаны меры по их предупреждению, а также порядок действий при их возникновении. Рассмотрена экологическая безопасность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации спроектирован электромагнитный вибратор обработки призабойной зоны пласта. Исходя из рассчитанных параметров ВС-3500 и результатов моделирования, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные рекомендации для определения параметров при конструировании прибора позволяют производить расчёты основных показателей на стадии проектирования. Исходя из объёмного воздействия на пласт, как по длине, ширине, так и по высоте нефтеносного слоя определено количество единичных МВО прибора $N = 8$ шт. С учётом ограничений, связанных с диаметров обсадной трубы, выбран внешний диаметр трубы прибора 121 мм, определены основные размеры активатора и выбран начальный воздушный зазор $X_0 = 4$ мм. Исходя из требований, по обеспечению необходимой амплитуды колебаний активатора, рассчитаны обмоточные данные электромагнита и выбран провод диаметром жилы $d_{пр} = 0,85$ мм. На основании полученных размеров рассчитана общая масса подвижных частей вибратора $M = 0,928$ кг.

2. Для обеспечения работы единичных МВО на резонансной частоте, для каждого МВО рассчитана своя жёсткость пружинного подвеса и подобраны соответствующие пружины.

3. Разработана математическая модель, позволяющая анализировать режимы работы вибратора при различных частотах и значениях механического сопротивления. Каждый МВО настроен на резонансную частоту, тем самым снижая энергопотребление и увеличивая степень воздействия на ПЗП.

4. Анализ режимов работы показал, что для обработки ПЗП с низким значением вязкости нефти $R_{мех} = 100$ кг/с необходимо ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 240 до 560 В, начальный зазор 4 мм при величине тока до 0,8 А. Для обработки ПЗП со средним значением вязкости нефти $R_{мех} = 300$ кг/с ориентироваться на следующие параметры: напряжение питания от 320 до 780 В, начальный зазор 4 мм при величине тока

до 1,2 А. Для обеспечения работы отдельных МВО в резонансных режимах:

– диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 100$ кг/с от 30 до 65 Гц с шагом 5 Гц;

– диапазон резонансных частот при $R_{\text{мех}} = 300$ кг/с от 30 до 58 Гц с шагом 3-5 Гц.

5. Для подключения ВС-3500 к электрической сети выбрана однофазная схема питания $U = 220$ В, $f = 50$ Гц.

6. Выбраны основные элементы силовой схемы. Подключение и регулирование параметров ВС-3500 обеспечивается применением преобразователя частоты марки ESQ-A200-2S0037, диода марки Vishay VS-40EPF10PBF. В качестве аппаратуры защиты выбран автоматический выключатель марки Schneider Electric EZ9F34116 Easy 9. Для питания ВС-3500 выбран трёхжильный нефтепогружной кабель КППпПБК-90 3х6/3 кВ.

7. В качестве экономического обоснования исследования определены ключевые особенности продвижения ВС-3500 на Российский рынок. Для этого была посчитана себестоимость прибора, определены целевые сегменты потребителей, проанализированы перспективы дальнейшего развития нефтегазодобывающей отрасли и обоснована конкурентоспособность прибора на рынке.

8. Определены требования для безопасной эксплуатации ВС-3500. Были рассмотрены всевозможные вредные и опасные факторы, возникающие на месте работы, произведен анализ воздействия объекта на окружающую среду, а также разработаны необходимые меры для предупреждения возникновения чрезвычайной ситуации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Проект стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2030 г. Версия от 12.09.2016 г.
- 2 Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. М: Недра, 1977. 159 с.
- 3 Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти. М: Недра, 1977. 159 с.
- 4 Коломоец А.В. Предупреждение и ликвидация прихватов в разведочном бурении. М: Недра, 1985. 220 с.
- 5 Калинин В.Ф. Литолого-физические критерии выбора оптимальной технологии повышения продуктивности скважин физико-химическими методами. М: Ренфорс, 2013. 240 с.
- 6 Калинин В.Ф., Матвеев Л.М. Способ возбуждения пласта. Патент РФ №2005167. Официальный патентный бюллетень №47-48. Москва, 14 с.
- 7 Обзор современных методов увеличения дебита. Petros.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://petros.ru/worldmarketoil/?action=show&id=267> (дата обращения 30.04.2020 г.).
- 8 Замахаев В.С. Физические основы планирования импульсно-волнового воздействия на нефтегазовые пласты // Нефтеотдача. 2002. №5 с. 46-50.
- 9 Ганиев О.Р., Украинский Л.Е. Экспериментальное исследование однонаправленных течений в пористой среде, насыщенной жидкостью, при волновом воздействии: доклады РАН. Т. 409, №1. С. 39-42.
- 10 Повышение продуктивности и реанимации скважин с применением виброволнового воздействия. В.П. Дыбленко [и др.]. М.: Недра, 2000. 381 с.
- 11 Kostrov S.A., Wooden B.O. Mechanisms, field suitability, and case studies for enhancement of oil recovery and production using in-situ seismic stimulation// Nonlinear Acoustic at the Beginning of the 21 Century. V. 2. 2002. P. 1205-1212.

- 12 Симкин Э.М. Геолого-промысловые исследования низкочастотного вибросейсмического воздействия для повышения продуктивности нефтяных пластов и ресурсов извлекаемых запасов // Геоинформатика.1998. №3. С. 3-6.
- 13 Влияние ультразвуковых колебаний на процесс разгазирования нефти/ Г.С. Степанова [и др.]. // Бурение и нефть. 2003. №7-8. с. 36-38.
- 14 Mousavi S.M.R., Najafi I., Ghazanfari M.H., Kharrat R., Ghotbi C. Quantitative analysis of ultrasonic wave radiation on reversibility and kinetics of asphaltene flocculation: сб. материалов 4-ой Междунар. конф. «К новым открытиям через интеграцию наук». г. Санкт-Петербург, 5-8 апр. 2010. 140 с.
- 15 Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. 192 с.
- 16 Process and apparatus for electrohydraulic recovery of crude oil. Researchgate.net: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/239874424_Process_and_apparatus_for_electrohydraulic_recovery_of_crude_oil (дата обращения 30.04.2020 г.).
- 17 Устройство для гидроимпульсного воздействия на призабойную зону пласта. Findpatent.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patents/2522195> (дата обращения 30.04.2020 г.).
- 18 Скважинное оборудование для поличастотной волновой обработки призабойной зоны продуктивного пласта и генератор колебаний расхода для него. Findpatent.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/257/2574651.html> (дата обращения 30.04.2020 г.).
- 19 Основы виброструйной магнитной активации жидких сред / В.А. Данекер, В. В. Доленко // ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000.
- 20 Расчет и конструирование электромагнитных преобразователей для активации жидких систем / В.А. Данекер // ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – 102 с.
- 21 Медные обмоточные провода. Vprl.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://vprl.ru/index/obmotochnye_provoda/0-76 (дата обращения 30.04.2020 г.).

22 ГОСТ 14963-78. Проволока стальная легированная пружинная. Технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 8 с.

23 Регион – Новые технологии. Преобразователи частоты. Ufk-techno.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ufk-techno.ru/1548.htm> (дата обращения 05.05.2020 г.).

24 Terra Электроника. Tomsk.terraelectronica.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tomsk.terraelectronica.ru/product/1018473> (дата обращения 05.05.2020 г.).

25 Каталог автоматических выключателей. Tomsk.220-volt.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tomsk.220-volt.ru/catalog-210238/#ui-tabs-description> (дата обращения 05.05.2020 г.).

26 Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2020 г. – М.: КНОРУС, 2020 – 488 с.

27 Кабель РФ. Cable.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cable.ru/cable/marka-kppppbk_90_3x6.php (дата обращения 05.05.2020 г.).

28 Перспективы Российской нефтедобычи. Energy.skolkovo.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/research04-ru.pdf>.

29 Техническое задание на технологическое направление в рамках Постановления Правительства РФ №1312. «Разработка и серийное производство высокопроизводительного комплекса для большеобъемных и многостадийных гидроразрывов нефтяных и газовых пластов, в том числе при разработке трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов».

30 Институт энергетических исследований РАН. Eiras.ru: [Электронный ресурс]. Режим доступа: eiras.ru.

31 Л.В. Петрова. Д.Р. Яруллин. Геологическое строение и проблемы разработки Фаинского месторождения. (Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал, г. Октябрьский, РФ).

32 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

33 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы.

34 Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 №302н (ред. от 13.12.2019) «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда» (Зарегистрировано в Минюсте России 21.10.2011 №22111).

35 ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

36 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

37 ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

38 ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.

39 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

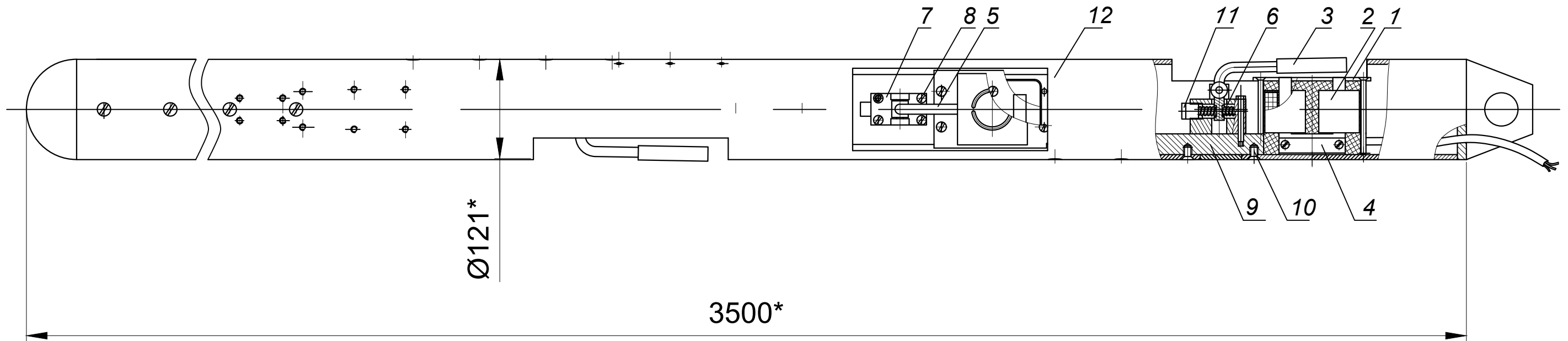
40 СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (с Изменением N1).

41 ГОСТ 12.2.062-81 ССБТ. Оборудование производственное. Ограждения защитные (с Изменением N1).

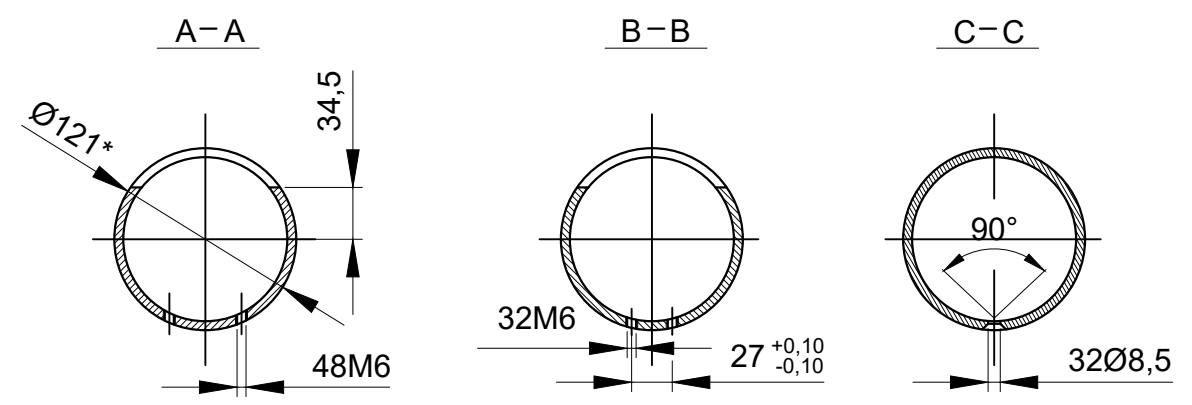
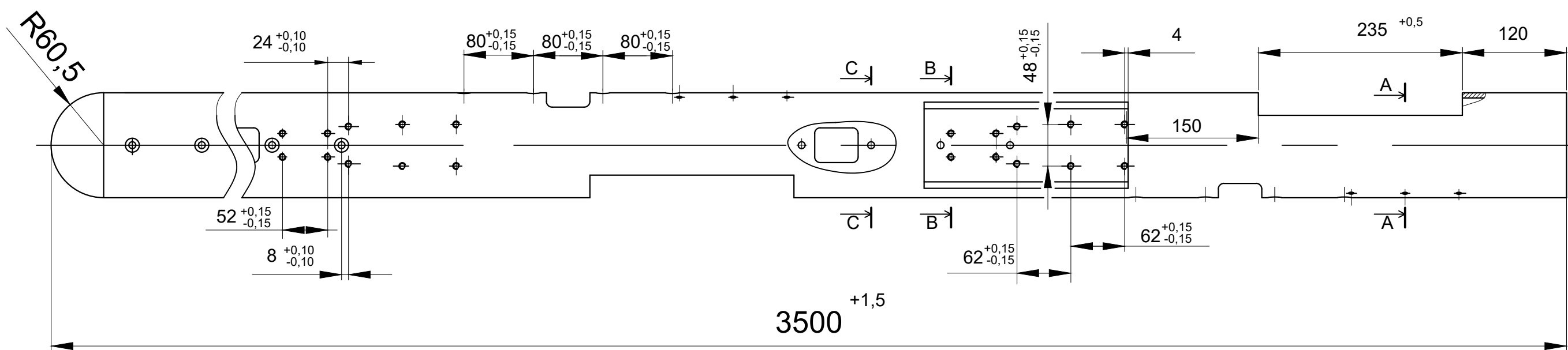
42 ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N1).

43 ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

- 44 ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерения.
- 45 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
- 46 СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы.
- 47 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.
- 48 ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
- 49 ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 50 СанПиН 2.1.7.1322-03. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления.
- 51 Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014 г.).
- 52 Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств».
- 53 НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (Дата введения 2003-08-01).
- 54 Приказ от 24 июля 2013 года №328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» (с изменениями на 15 ноября 2018 года).
- 55 Постановление Правительства Российской Федерации от 25 апреля 2012 г. №390 г. Москва «О противопожарном режиме».

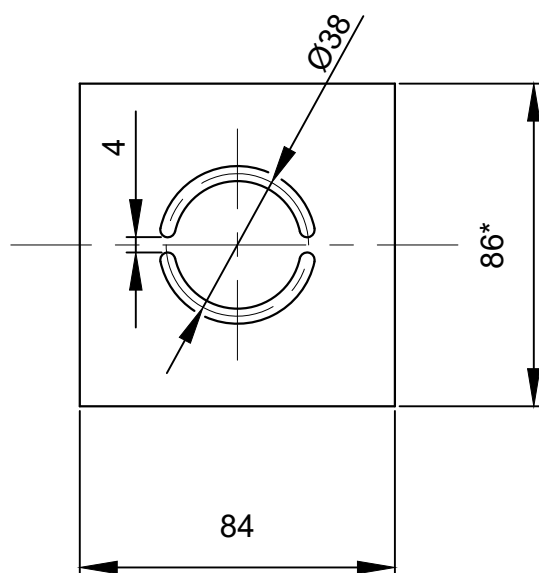
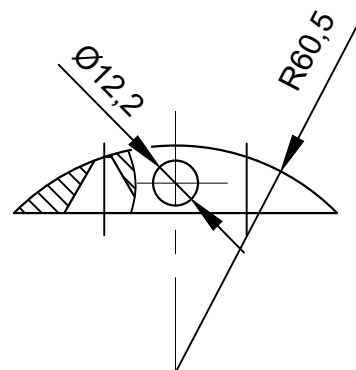
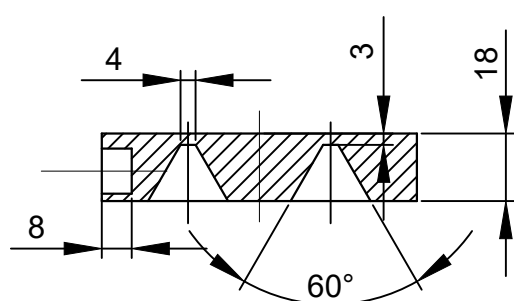


					Приложение А			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Вибратор скважинный ВС-3500 Сборочный чертёж	Литера	Масса	Масштаб
								1:5
						Лист	Листов 1	
Н.контр.								
Утв.								



Приложение Б						
Корпус вибратора ВС-3500				Литера	Масса	Масштаб
						1:5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	
					Листов 1	
Разраб.	Кузнецов					
Пров.	Данекер					
Т.контр.						
Н.контр.						
Утв.						

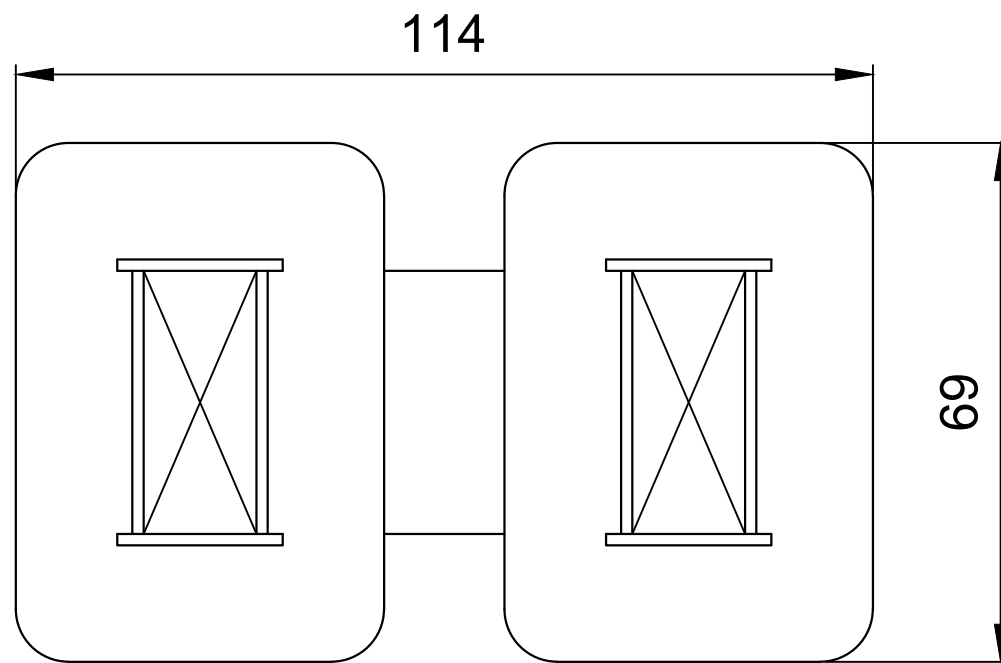
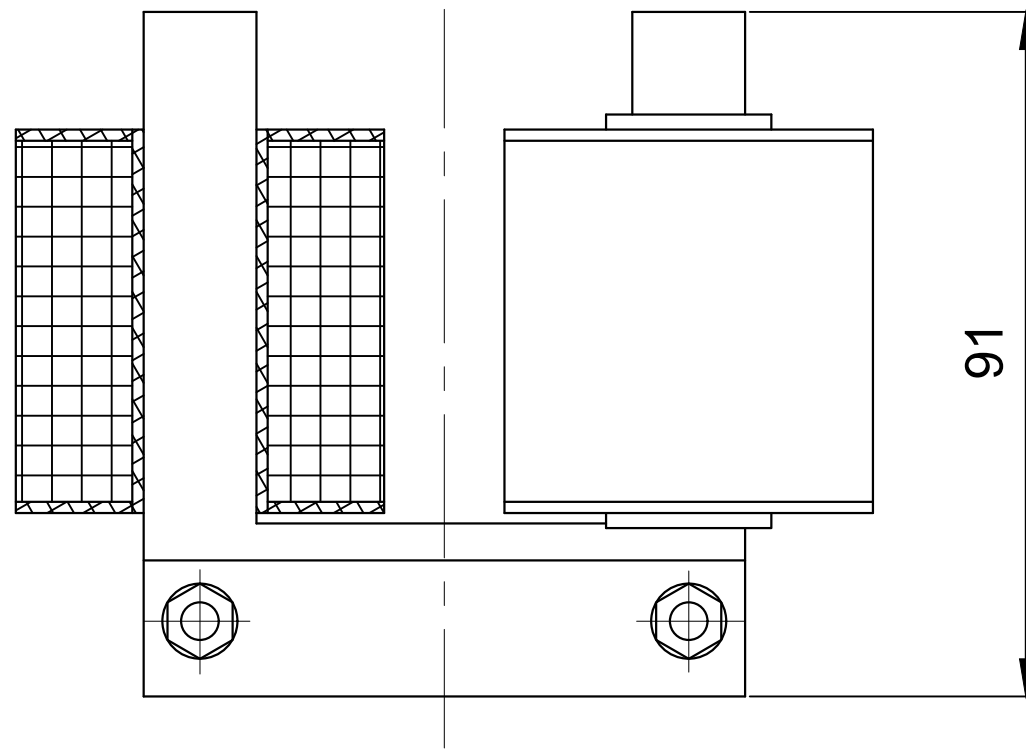
6,3 ✓ (✓)



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

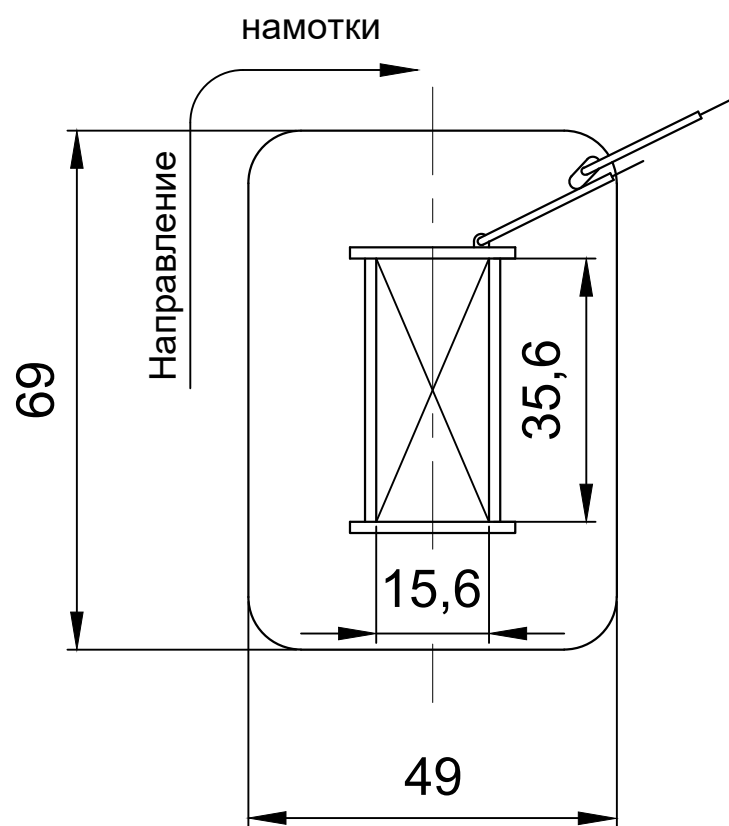
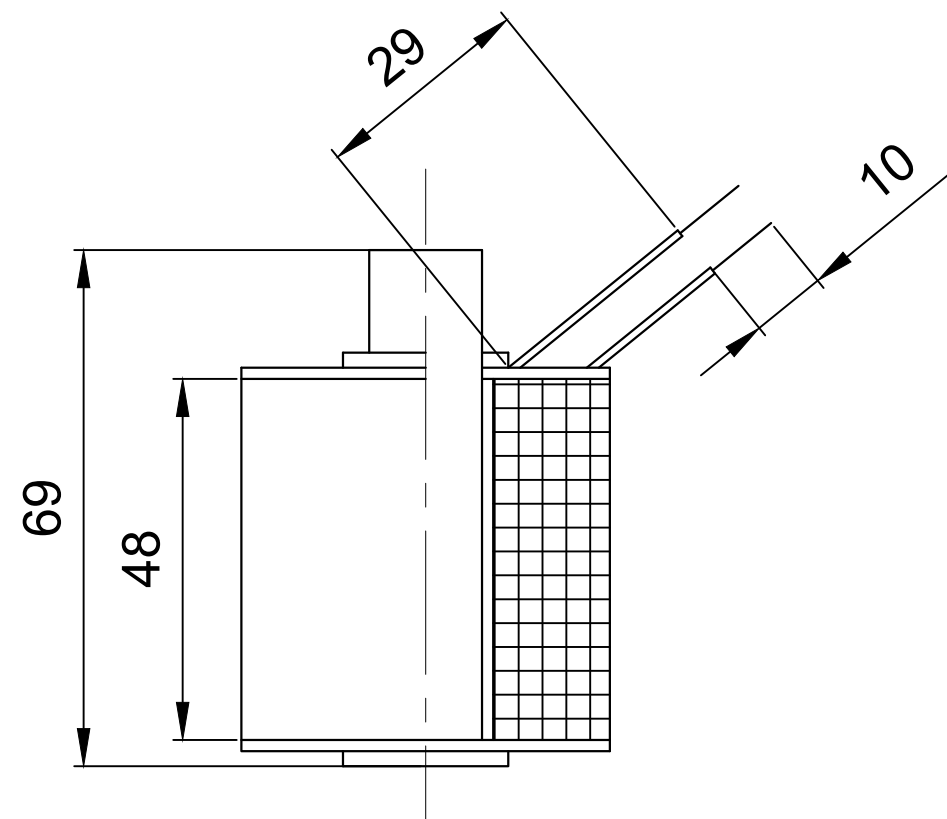
Приложение В

Литера	Масса	Масштаб					
		1:2					
Лист	Листов 1						
<p>Ативатор-излучатель</p> <p>Сталь 10, круг 150 мм</p>							
			Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
			Разраб.		Кузнецов		
			Пров.		Данекер		
			Т.контр.				
Н.контр.							
Утв.							



1. Размеры для справок.
2. Катушки поз.1 закрепить на магнитопроводе отгибанием крайних пластин поз.2 на угол $(1-5)^\circ$.
3. Пропитку электромагнита проводить под вакуумом.

					Приложение Г			
						Литера	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Электромагнит			1:1
	Разраб.	Кузнецов						
	Пров.	Данекер						
	Т.контр.							
	Н.контр.							
	Утв.							
						Лист	Листов 1	



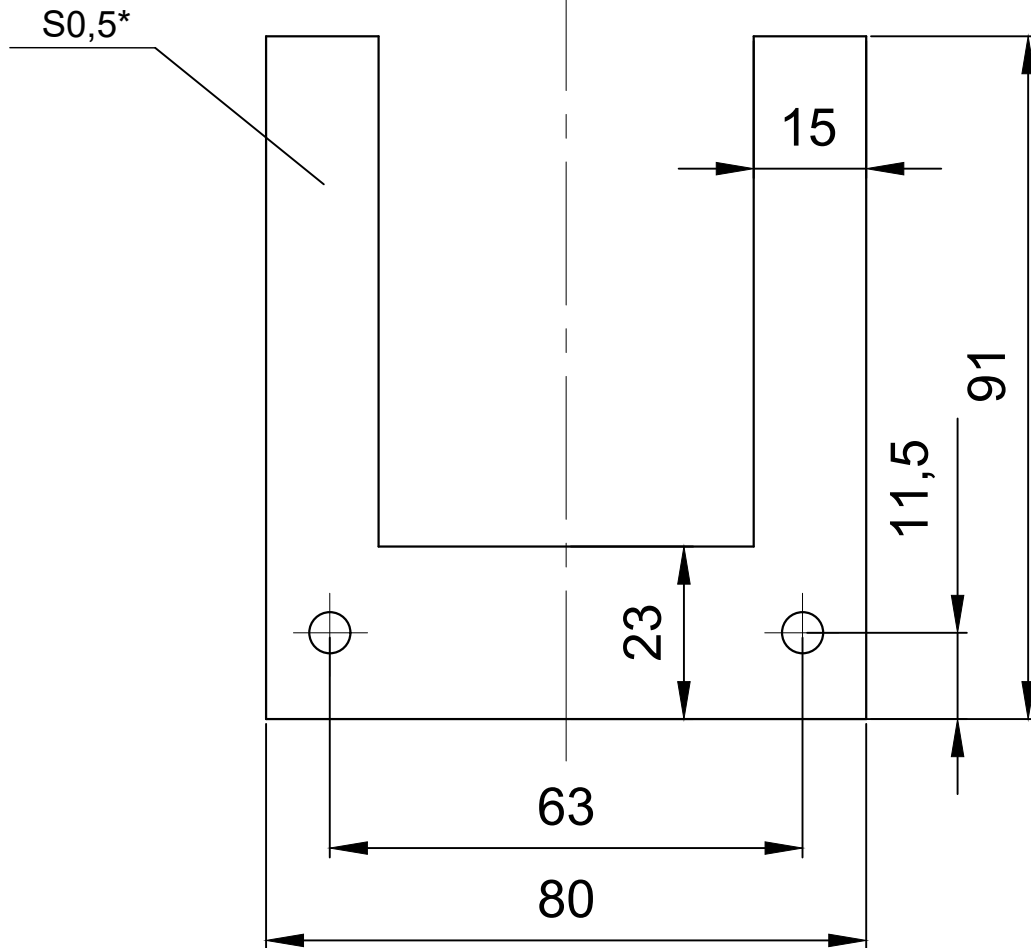
Обмоточные данные

Обозначение провода	Кол. витков	Актив. сопр. R, Ом	Обознач. выводов	Напряжение, U, В
Провод ПЭТВ-2 0,85,ТУ16-705.048-78	950	4,74	C1, C2	220

1. Размеры для справок.
2. Каркас обернуть лентой поз.3 в 3 слоя.
3. Намотку катушки производить по ОСТ4 ГО.075.200.
4. Выводы обмотки выполнить собственным проводом в трубке поз.4.
5. Наружную изоляцию выполнить лентой поз.3.
6. Изоляцию закрепить клеем БФ-4 ГОСТ 12172-74.
7. Катушку пропитать лаком КО-916к ТУ6-02-1-012-89.
8. Маркировать белой эмалью ПФ-115 ГОСТ 6465-76 в соответствии с таблицей, шрифт произвольный.
9. Намотку катушек проводить виток к витку.
10. Не допускается выход наматываемого провода за пределы размера щек каркаса более 0,5 мм
11. Пропитку катушек производить под вакуумом.

					Приложение Д				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Электромагнит	Литера	Масса	Масштаб	
									1:1
Разраб.		Кузнецов							
Пров.		Данекер							
Т.контр.						Лист	Листов 1		
Н.контр.									
Утв.									

6,3 / (✓)



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

Приложение Ж

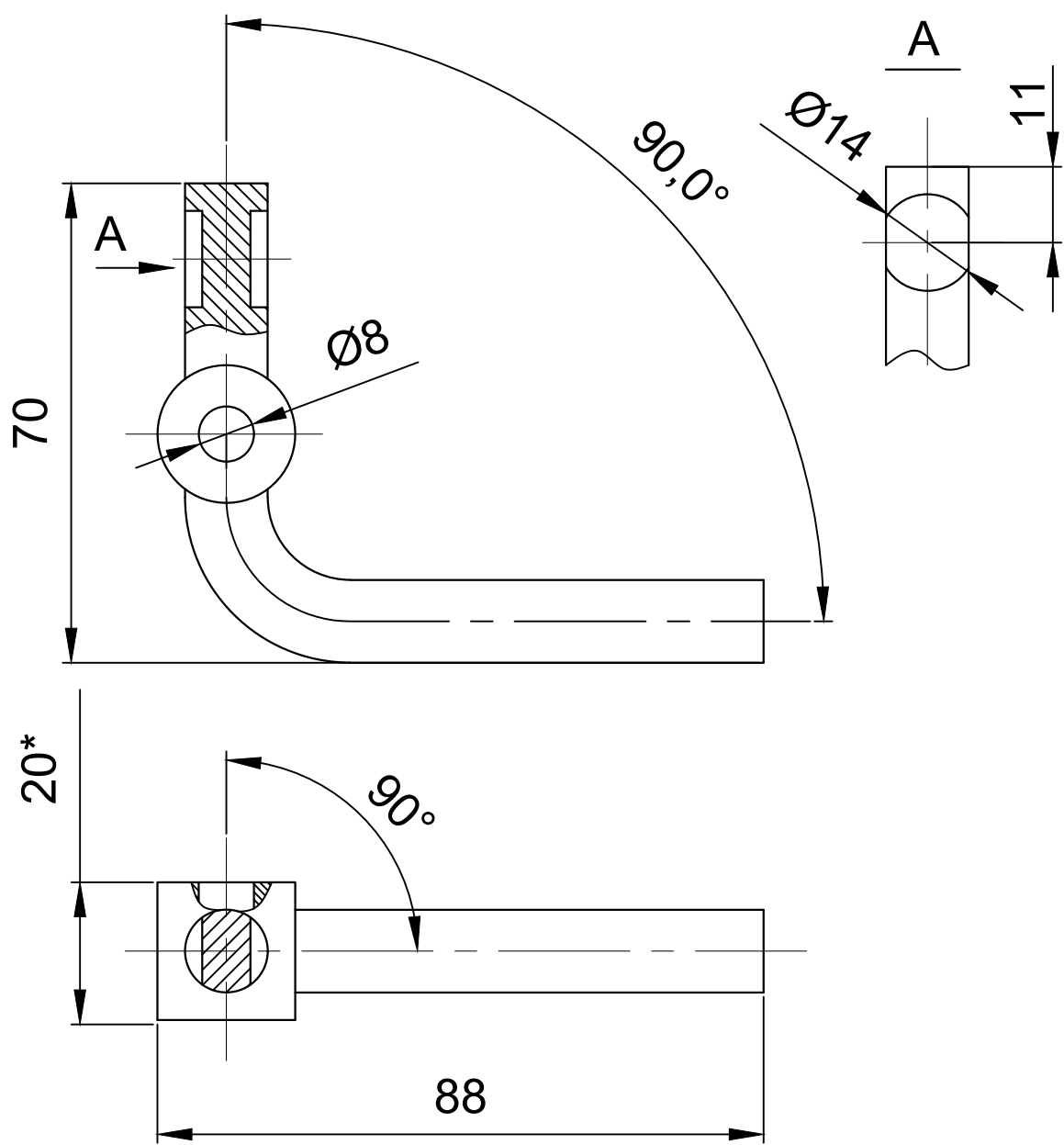
Лист
магнитопровода

Сталь электротехн. 0,5 мм

Литера	Масса	Масштаб
		1:1
Лист		Листов 1

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

6,3
√(√)



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

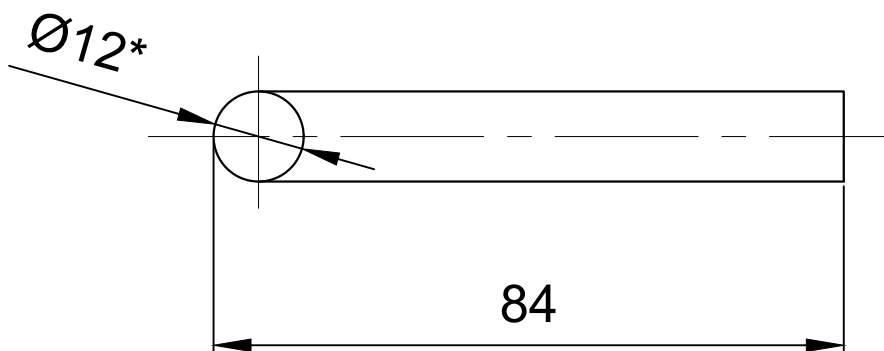
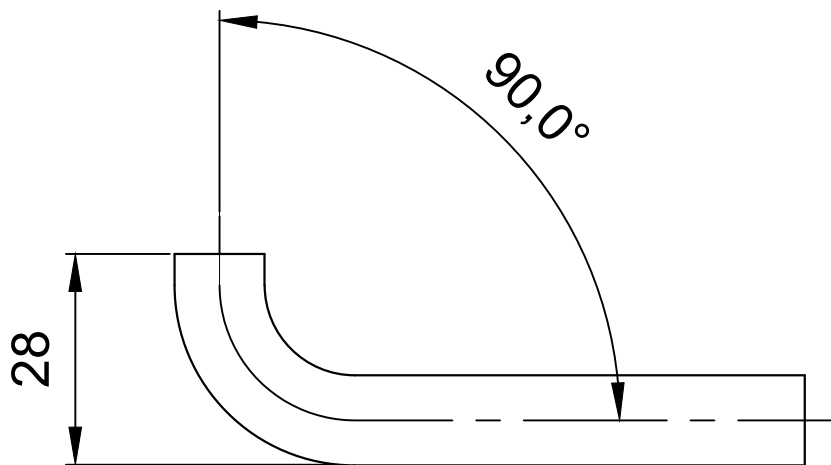
Приложение К

Коромысло
в сборе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Кузнецов		
Пров.		Данекер		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Литера	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов 1	

6,3
√(√)

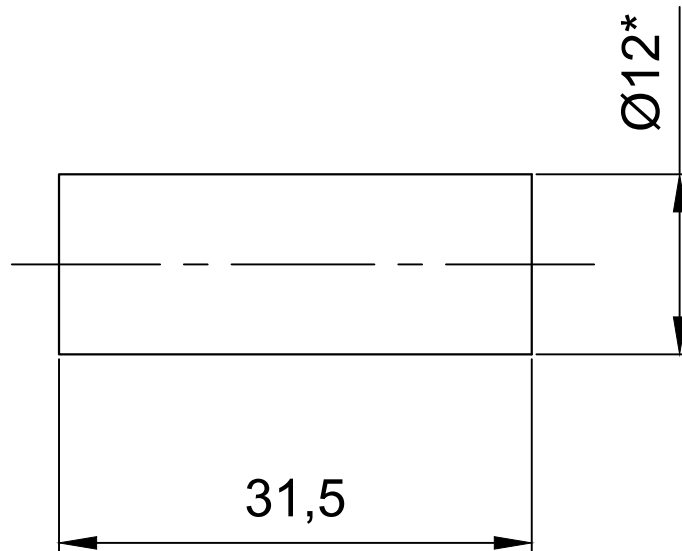


1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

Приложение Л

					Литера	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Плечо 1		
Разраб.	Кузнецов						
Пров.	Данекер				Лист		Листов 1
Т.контр.					Сталь 10, пруток 12 мм		
Н.контр.							
Утв.							

6,3 ✓ (✓)



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

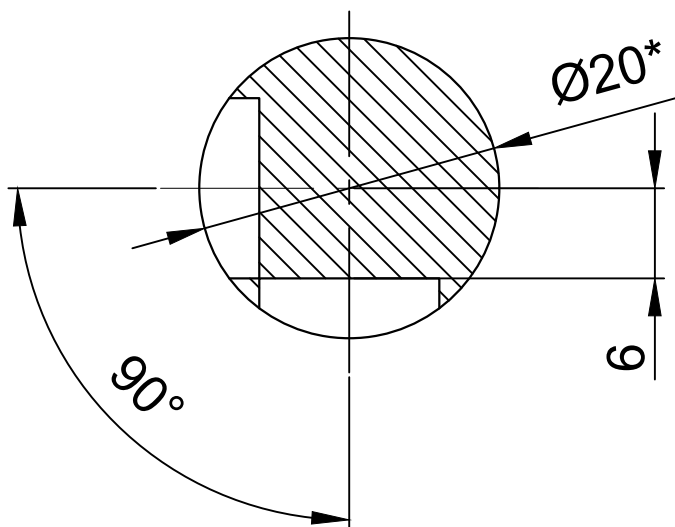
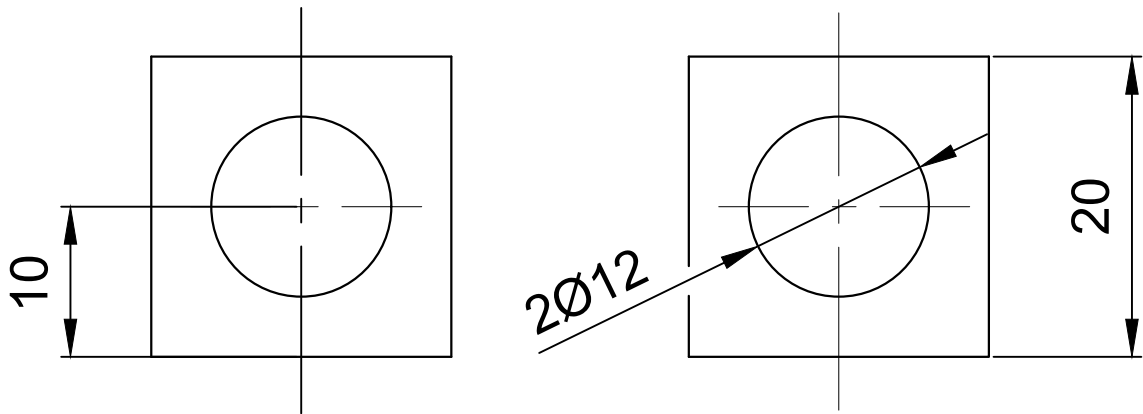
Приложение М

					Литера	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			2:1
Разраб.	Кузнецов						
Пров.	Данекер				Лист		Листов 1
Т.контр.					Сталь 10, пруток 12 мм		
Н.контр.							
Утв.							

Плечо 2

Сталь 10, пруток 12 мм

6,3 $\sqrt{(\checkmark)}$



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

Приложение Н

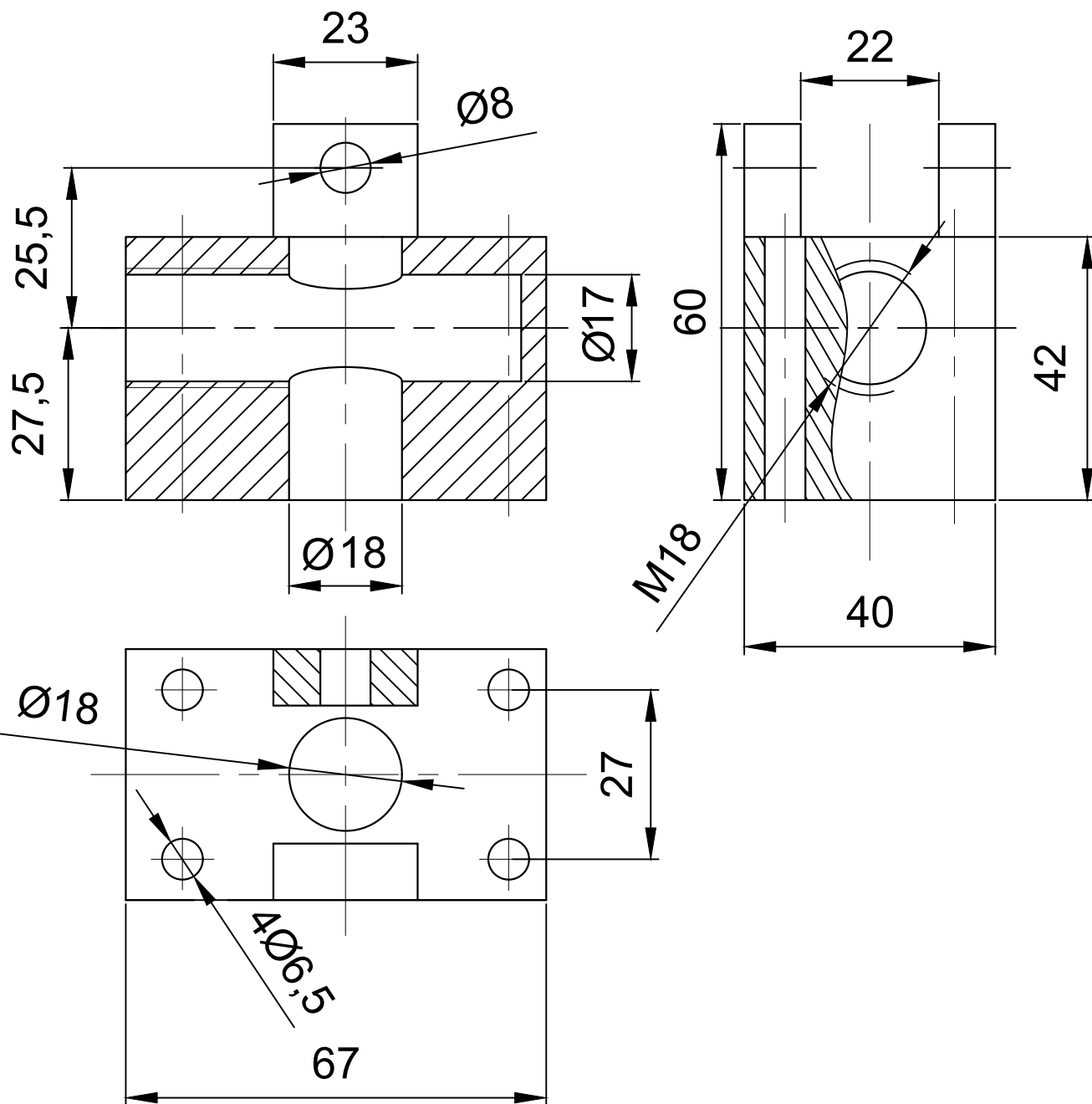
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Кузнецов		
Пров.		Данекер		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Втулка

Сталь 10, пруток 12 мм

Литера	Масса	Масштаб
		2:1
Лист	Листов 1	

6,3 $\sqrt{(\checkmark)}$



1. Остальные ТТ по ОСТ4 ГО.070.014.

Приложение П

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
	Разраб.	Кузнецов		
	Пров.	Данекер		
	Т.контр.			
	Н.контр.			
	Утв.			

Стойка

Сталь 10

Литера	Масса	Масштаб
		1:1
Лист		Листов 1

Приложение Р

(Справочное)

Literature review of modern oil recovery enhancement methods

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Кузнецов Павел Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Данекер Валерий Аркадьевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИБ	Качалов Николай Александрович	к.п.н.		

Томск 2020 г.

1 EOR status

Most of the current world oil production comes from mature fields. Increasing oil recovery from the aging resources is a major concern for oil companies and authorities. In addition, the rate of replacement of the produced reserves by new discoveries has been declining steadily in the last decades. Therefore, the increase of the recovery factors from mature fields under primary and secondary products will be critical to meet the growing energy demand in the coming years.

Improved Oil Recovery (IOR) methods encompass Enhanced Oil Recovery (EOR) methods as well as new drilling and well technologies, intelligent reservoir management and control, advanced reservoir monitoring techniques, and the application of different enhancements of primary and secondary recovery processes. However, the present paper presents a comprehensive review of EOR status and opportunities to increase oil recoveries and final recovery factors in reservoirs ranging from extra heavy oil to gas condensate.

2 IOR vs EOR

The terms EOR and IOR have been used loosely and interchangeably at times. IOR, or improved oil recovery, is a general term which implies improving oil recovery by any means. For example, operational strategies, such as infill drilling and horizontal wells, improve vertical and areal sweep, leading to an increase in oil recovery. Enhanced oil recovery, or EOR, is more specific in concept, and it can be considered as a subset of IOR. EOR implies a reduction in oil saturation below the residual oil saturation (S_{or}). Recovery of oils retained due to capillary forces (after a waterflood in light oil reservoirs), and oils that are immobile or nearly immobile due to high viscosity (heavy oils and tar sands) can be achieved only by lowering the oil saturation below S_{or} . Miscible processes, chemical floods and steam-based methods are effective in reducing residual oil saturation and are hence EOR methods. The main focus of this paper is on EOR methods.

The target of EOR varies considerably for the different types of hydrocarbons. Figure 1 shows the fluid saturations and the target of EOR for typical light and heavy oil reservoirs and tar sands. For light oil reservoirs, EOR is usually applicable after secondary recovery operations, and the EOR target is ~45% OOIP. Heavy oils and tar sands respond poorly to primary and secondary recovery methods, and the bulk of the production from such reservoirs come from EOR methods.

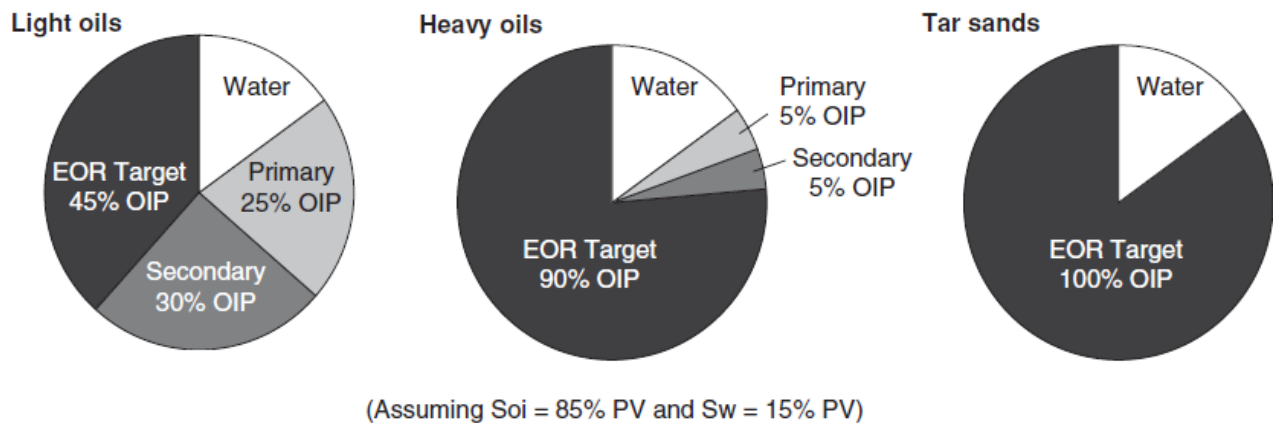


Figure 1 – EOR target for different hydrocarbons

3 Recovery of residual oil

Mobilization of residual oil is influenced by two major factors: Capillary Number (N_c) and Mobility Ratio (M). Capillary Number is defined as $N_c = v\mu/\sigma$, where v is the Darcy velocity (m/s), μ is the displacing fluid viscosity (Pas) and σ is the interfacial tension (N/m). The most effective and practical way of increasing the Capillary Number is by reducing σ , which can be done by using a suitable surfactant or by the application of heat. An approximation of the effect of Capillary Number on residual oil saturation is shown in Figure 2. The capillary number at the end of a waterflood is $\sim 10^{-7}$. A 50% reduction in residual oil saturation requires that the Capillary Number be increased by 3 orders of magnitude. Capillary number in a miscible displacement becomes infinite, and under such conditions, residual oil saturation in the swept zone can be reduced to zero if the mobility ratio is “favorable”.

Mobility ratio is defined as $M = \lambda_{ing} / \lambda_{ed}$, where λ_{ing} is the mobility of the displacing fluid (e.g. water), and λ_{ed} is the mobility of the displaced fluid (oil). ($\lambda = k/\mu$, where k is the effective permeability, (m²) and μ is the viscosity (Pas) of the fluid concerned). Mobility ratio influences the microscopic (pore level) and macroscopic (areal and vertical sweep) displacement efficiencies. A value of $M > 1$ is considered unfavorable, because it indicates that the displacing fluid flows more readily than the displaced fluid (oil), and it can cause channeling of the displacing fluid, and as a result, by passing of some of the residual oil. Under such conditions, and in the absence of viscous instabilities, more displacing fluid is needed to obtain a given residual oil saturation. The effect of the mobility ratio of displaceable oil is shown in Figure 3, the data for which was obtained from calculations using Buckley-Leverett theory for waterflooding. The three curves represent 1, 2 and 3 pore volumes of total fluid injected, respectively. Displacement efficiency is increased when $M = 1$, and is denoted a “favorable” mobility ratio.

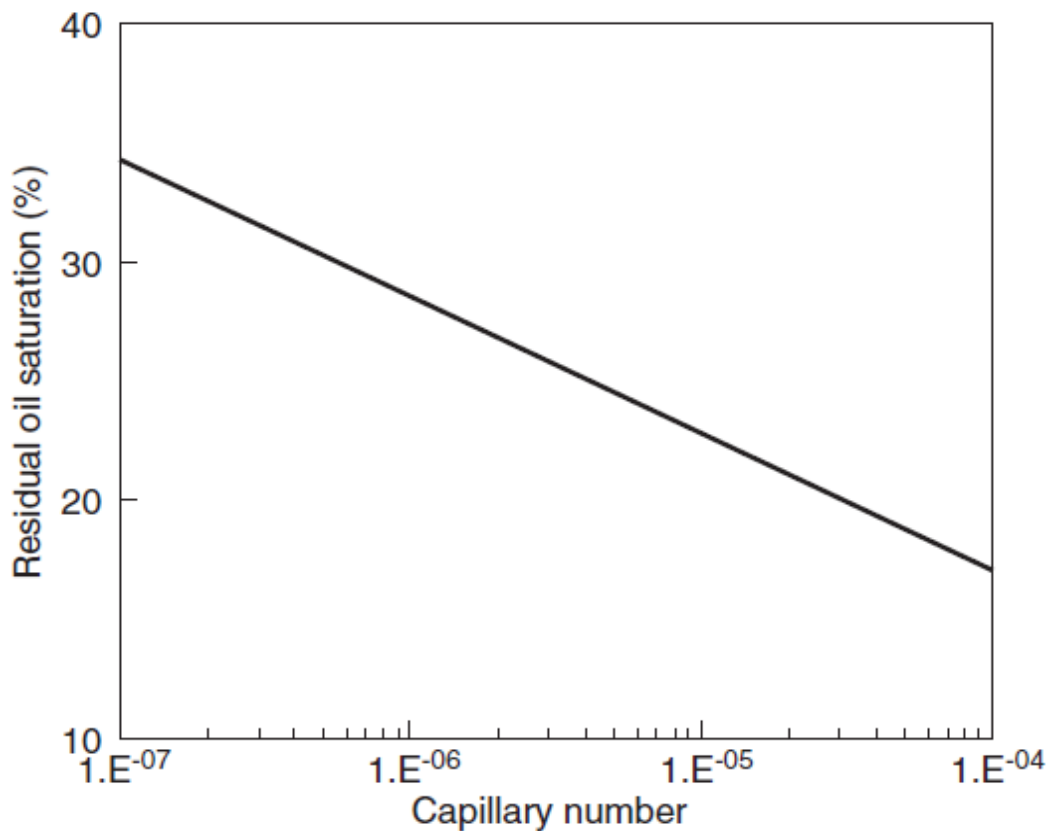


Figure 2 – Effect of capillary number on residual oil saturation

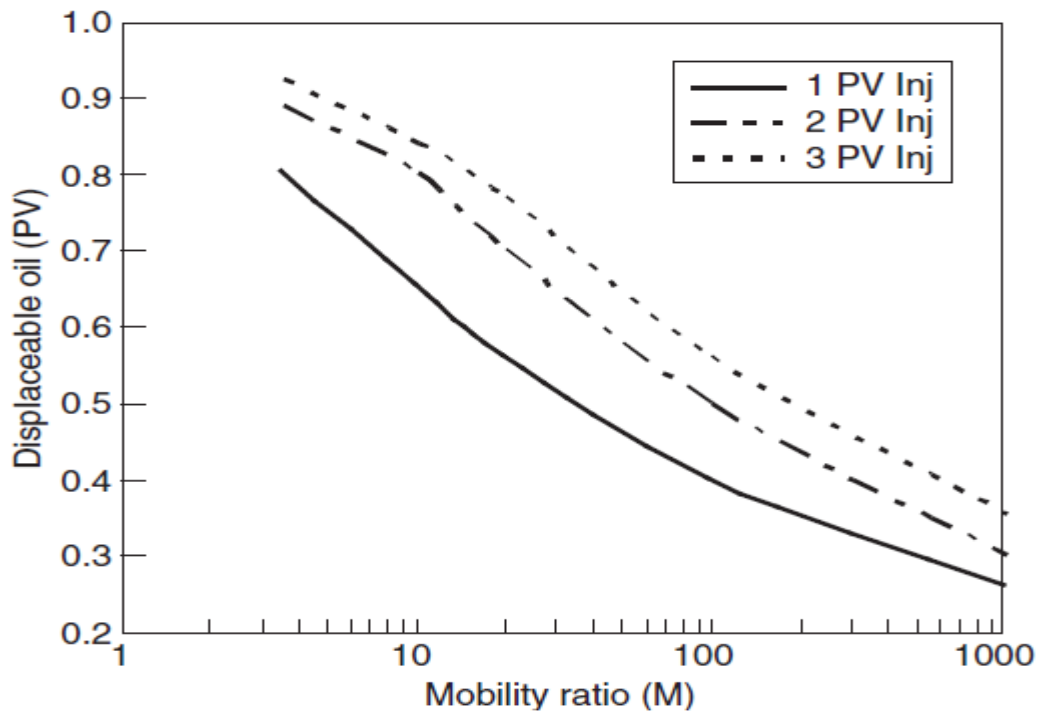


Figure 3 – Effect of mobility ratio on displaceable oil

4 EOR methods

Many EOR methods have been used in the past, with varying degrees of success, for the recovery of light and heavy oils, as well as tar sands. A general classification of these methods is shown in Figure 4. Thermal methods are primarily intended for heavy oils and tar sands, although they are applicable to light oils in special cases. Non-thermal methods are normally used for light oils. Some of these methods have been tested for heavy oils, however, have had limited success in the field. Above all, reservoir geology and fluid properties determine the suitability of a process for a given reservoir. Among thermal methods, steam-based methods have been more successful commercially than others. Among non-thermal methods, miscible flooding has been remarkably successful, however, applicability is limited by the availability and cost of solvents on a commercial scale. Chemical methods have generally been uneconomic in the past, but they hold promise for the future. Among immiscible gas injection methods, CO₂ floods have been relatively more successful than others for heavy oils.

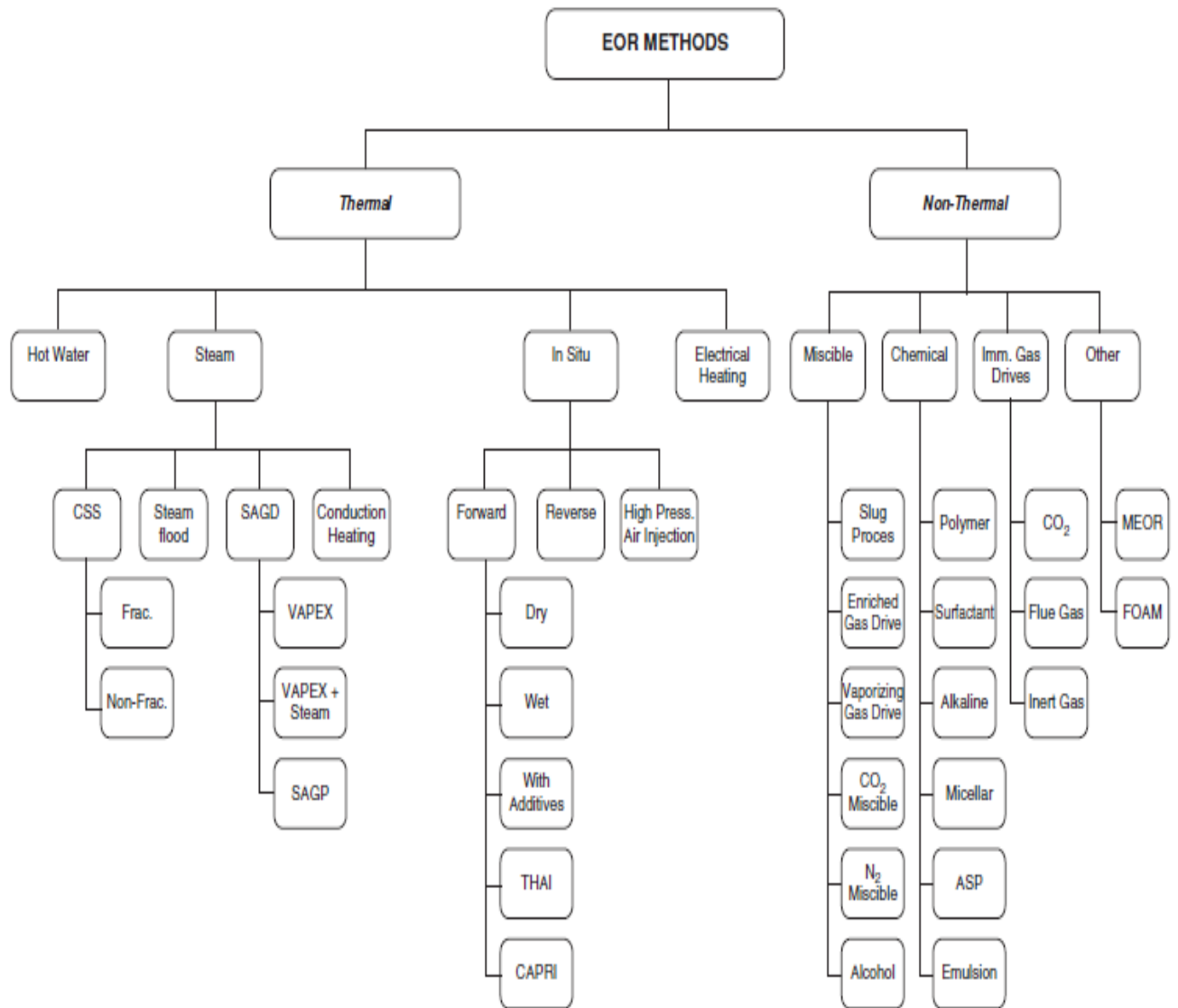


Figure 4 – Classification of EOR methods

4.1 Thermal methods

Thermal methods have been tested since 1950's, and they are the most advanced among EOR methods, as far as field experience and technology are concerned. They are best suited for heavy oils (10-20° API) and tar sands ($\leq 10^\circ$ API). Thermal methods supply heat to the reservoir and vaporize some of the oil. The major mechanisms include a large reduction in viscosity, and hence the mobility ratio. Other mechanisms, such as rock and fluid expansion, compaction, steam distillation and visbreaking may also be present. Thermal methods have been highly successful in Canada, USA, Venezuela, Indonesia and other countries.

4.1.1 Cyclic steam stimulation (CSS)

Cyclic steam stimulation [1] is a “single well” process, and consists of three stages, as shown in Figure 5. In the initial stage, steam injection is continued for about a month. The well is then shut-in for a few days for heat distribution, denoted by a soak. Following that, the well is put on production. Oil rate increases quickly to a high rate, and stays at that level for a short time, and declines over several months. Cycles are repeated when the oil rate becomes uneconomic. The steam-oil ratio is initially 1-2 or lower, and it increases as the amount of cycles increase. Near-wellbore geology is important in CSS for heat distribution as well as the capture of the mobilized oil. CSS is particularly attractive because it has quick payout, however, recovery factors are low (10-40% OIP). In a variation, CSS is applied under fracture pressure [2]. The process becomes more complex as communication develops among the wells.

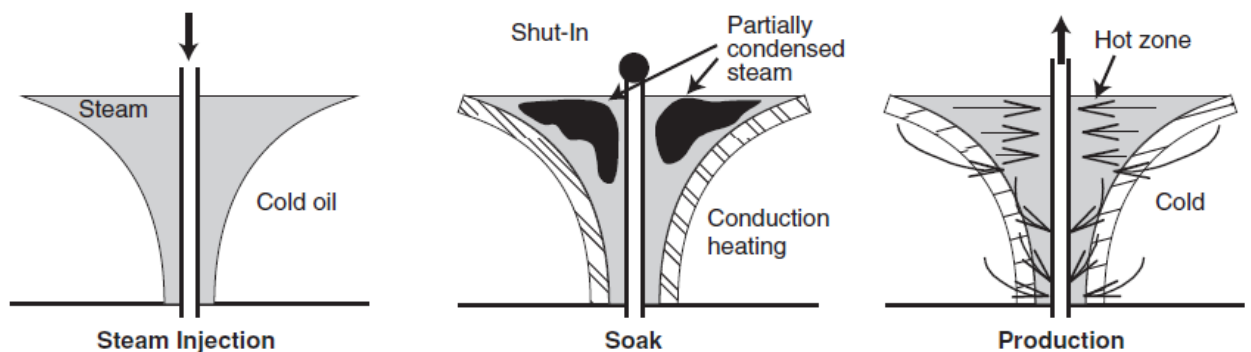


Figure 5 – Cyclic Steam Stimulation (CSS)

4.1.2 Steamflooding

Steamflooding [3-5] is a pattern drive, similar to waterflooding, and performance depends highly on pattern size and geology. Steam is injected continuously, and it forms a steam zone that advances slowly. Oil is mobilized due to viscosity reduction. Oil saturation in the swept zone can be as low as 10%. Typical recovery factors are in the range of 50-60% OIP. Steam overrides and excessive heat loss can be problematic.

4.1.3 Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD)

SAGD was developed by Butler [6] for the in situ recovery of the Alberta bitumen. The process relies on the gravity segregation of steam, utilizing a pair of parallel horizontal wells, placed 5 m apart (in the case of tar sands) in the same vertical plane. The schematic is shown in Figure 6. The top well is the steam injector, and the bottom well serves as the producer. Steam rises to the top of the formation, forming a steam chamber. High reduction in viscosity mobilizes the bitumen, which drains down by gravity and is captured by the producer placed near the bottom of the reservoir. Continuous injection of steam causes the steam chamber to expand and spread laterally in the reservoir. High vertical permeability is crucial for the success of SAGD. The process performs better with bitumen and oils with low mobility, which is essential for the formation of a steam chamber, and not steam channels.

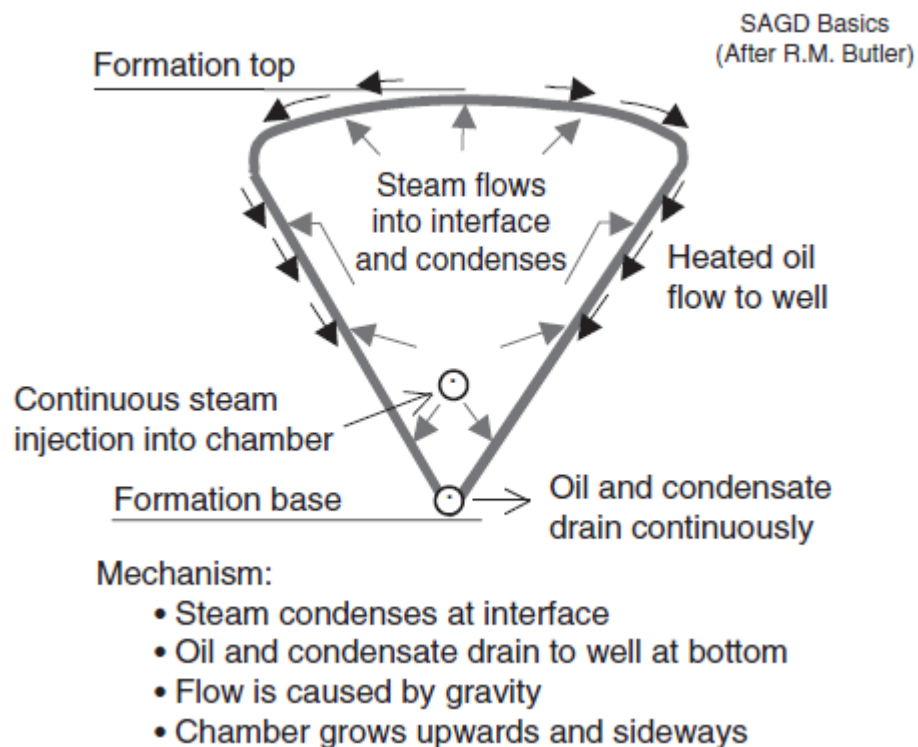


Figure 6 – Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD)

SAGD has been more effective in Alberta than in California and Venezuela for the same reason. SAGD is highly energy-intensive. Large volumes of water are

required for steam generation, and the natural gas consumption for steam generation ranges between 200-500 tonnes/sm³ of bitumen. There had been several attempts to improve the economics of SAGD. Notable examples among SAGD variations are VAPEX, ES-SAGD, and SAGP.

SAGD Variations

VAPEX [7] is the non-thermal counterpart of SAGD, and it works on the same principles as SAGD. Instead of steam, a solvent gas, or a mixture of solvents, such as ethane, propane, and butane is injected along with a carrier gas such as N₂ or CO₂. Solvent selection is based upon the reservoir pressure and temperature. The solvent gas is injected at its dew point. The carrier gas is intended to raise the dew point of the solvent vapour so that it remains in the vapour phase in the reservoir pressure. A vapour chamber is formed and it propagates laterally. The main mechanism is viscosity reduction. The process relies on molecular diffusion and mechanical dispersion for the transfer of the solvent to the bitumen for viscosity reduction. Dispersion and diffusion are inherently slow, and therefore, are much less efficient than heat for viscosity reduction.

ES-SAGD

This process (Expanding Solvent SAGD) is another variation, where the addition of about 10% steam to the solvent mixture has been suggested to gain a 25% gain in the energy efficiency of VAPEX.

SAGP

Steam and Gas Push is also a variation, where a non-condensable gas such as natural gas or nitrogen, is injected with steam to reduce the high demand for steam in SAGD. These processes are in the early stages of development and are not proven on a comm.

Special Schemes

While screening guides are useful tools in selecting a suitable process for a given reservoir, it sometimes requires ingenuity in designing a recovery method for a problem reservoir. One such example is the Tangleflags [8] reservoir on the Alberta-Saskatchewan border. The reservoir is sandstone, with 13 m thickness. Primary

recovery was less than one percent due to severe water coning. Conventional steamflood was unsuitable for this viscous heavy oil reservoir because of the presence of bottom water and a gas cap. The special scheme designed for this reservoir consisted of vertical steam injectors and horizontal producers. The schematic is shown in Figure 7. The vertical wells are completed near the gas cap. Steam and condensed hot water mobilize the oil, which drains down, and is captured by the horizontal wells placed near the bottom of the reservoir. The positive downward pressure gradient minimized water coning. The process has been highly effective and is currently operating with 11 pairs of wells.

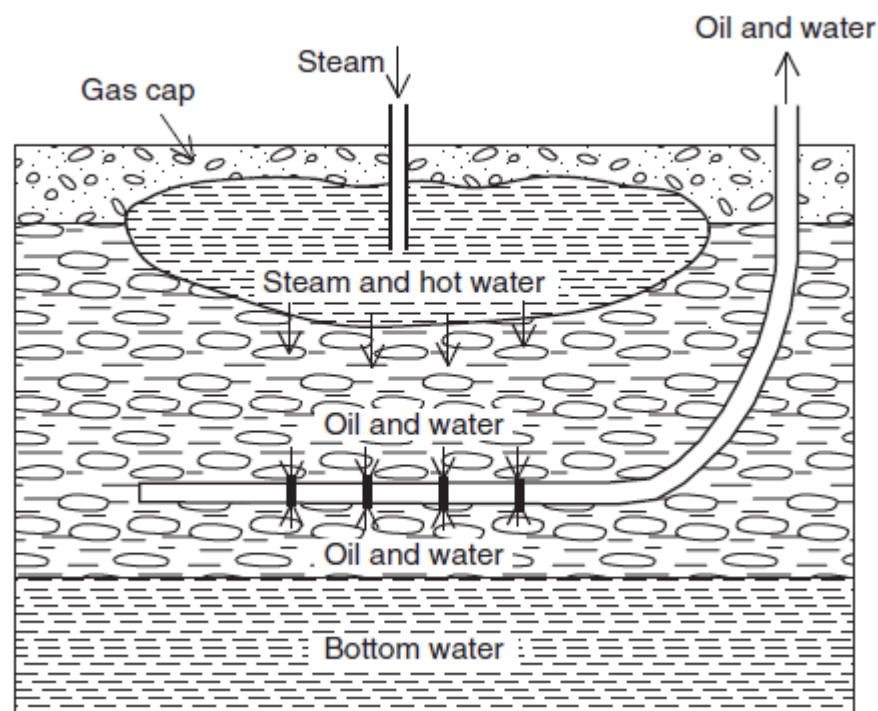


Figure 7 – Tangleflags steamflood

4.1.4 In situ combustion

In this method, also known as fire flooding [9, 10] air or oxygen is injected to burn a portion (~10%) of the in-place oil to generate heat. Very high temperatures, in the range of 450-600°C, are generated in a narrow zone. A high reduction in oil viscosity occurs near the combustion zone. The process has high thermal efficiency since there is relatively small heat loss to the overburden or underburden, and no

surface or wellbore heat loss. In some cases, additives such as water or a gas are used along with air, mainly to enhance heat recovery. Severe corrosion, toxic gas production, and gravity override are common problems. In situ combustion has been tested in many places, however, very few projects have been economical and none has advanced to commercial scale.

The main variations of in situ combustions are:

- forward combustion;
- reverse combustion;
- high-pressure air injection.

In forward combustion, ignition occurs near the injection well, and the hot zone moves in the direction of the air flow, whereas in reverse combustion, ignition occurs near the production well, and the heated zone moves in the direction counter to the airflow. Reverse combustion has not been successful in the field because of the consumption of oxygen in the air before it reaches the production well. High-pressure air injection involves low-temperature oxidation of the in-place oil. There is no ignition. The process is being tested in several light oil reservoirs in the USA.

THAI and CAPRI Processes

THAI (Toe-To-Heel Air Injection) and CAPRI [11, 12] (variation of THAI with a catalyst for in situ upgrading) are two other variations of in situ combustions, proposed as economic alternatives of SAGD. These processes utilize a combination of a vertical well and a horizontal well (strategically placed to capture the mobilized oil), as opposed to a pair of horizontal wells for SAGD. The vertical well, placed near the top of the reservoir, is the injector; and the horizontal well, placed near the base of the reservoir, serves as the producer. Initially, steam is injected to establish communication between the injector and the producer. Compressed air from the atmosphere is injected subsequently to bring about ignition/slow oxidation. High temperatures brought on by the ignition mobilize the heavy oil/tar sands, which flows from the toe to the heel of the horizontal well. In CAPRI process, it is proposed that the thermally cracked oil, captured by the horizontal well can be economically upgraded to lighter fractions by utilizing a catalytic sheath around the horizontal well.

THAI and CAPRI are expected to have higher thermal efficiency and less environmental impact. They have the potential to be applicable to a broader range of reservoirs, including thin formations of low pressure, deep reservoirs and reservoirs of poor quality. Recovery factors are estimated to be 70-80% OIP. Both processes are in the experimental phase and face several technical challenges to overcome.

4.2 Non-thermal methods

Non-thermal methods [13] are best suited for light oils (<100 cp). In a few cases, they are applicable to moderately viscous oils (<2000 cp), which are unsuitable for thermal methods. The two major objectives in non-thermal methods are:

- lowering the interfacial tension;
- improving the mobility ratio.

Most non-thermal methods require considerable laboratory studies for process selection and optimization. The three major classes under non-thermal methods are miscible, chemical and immiscible gas injection methods (see Fig. 4).

A number of miscible methods have been commercially successful. A few chemical methods are also notable. Among immiscible gas drive processes, CO₂ immiscible [14] method has been more successful than others.

4.2.1 Miscible flooding

Miscible flooding [15] implies that the displacing fluid is miscible with the reservoir oil either at first contact (SCM) or after multiple contacts (MCM). A narrow transition zone (mixing zone) develops between the displacing fluid and the reservoir oil, inducing a piston-like displacement. The mixing zone and the solvent profile spread as the flood advances. The change in the concentration profile of the displacing fluid with time is shown in Figure 8. Interfacial tension is reduced to zero in miscible flooding, therefore, $N_c = \infty$. Displacement efficiency approaches 1 if the mobility ratio is favorable ($M < 1$). The various miscible flooding methods include:

- miscible slug process;
- enriched gas drive;
- vaporizing gas drive;
- high-pressure gas (CO₂ or N₂) injection.

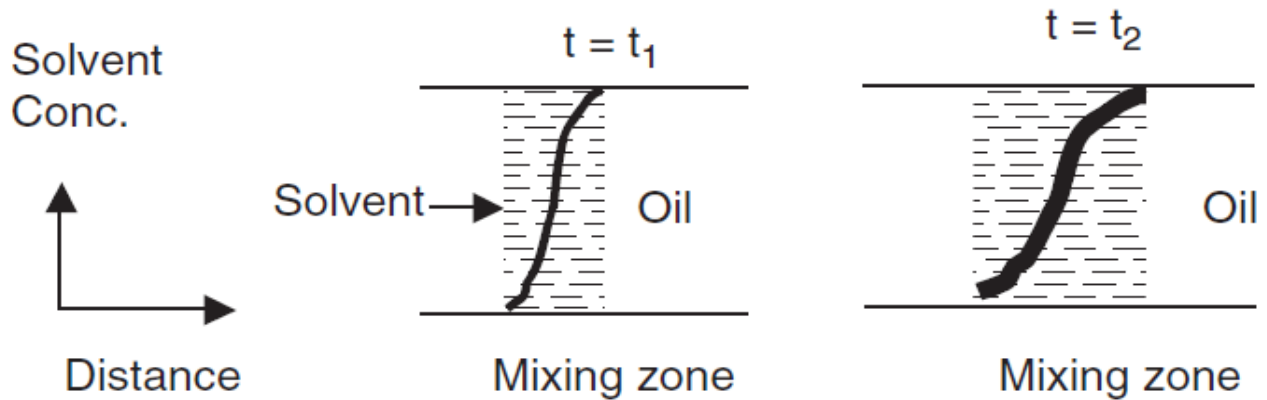


Figure 8 – Transition zone and concentration profile of the solvent in miscible flooding

Miscible Slug Process

It is an SCM (single contact miscible) type process, where a solvent, such as propane or pentane, is injected in a slug form (4-5% HCPV). The miscible slug is driven using a gas such as methane or nitrogen, or water. This method is applicable to sandstone, carbonate or reef-type reservoirs, but is best suited for reef-type reservoirs. Gravity segregation is the inherent problem in miscible flooding. Viscous instabilities can be dominant, and displacement efficiency can be poor. Reef-type reservoirs can afford vertical gravity stabilized floods, which can give recoveries as high as 90% OOIP. Several such floods have been highly successful in Alberta, Canada. The availability of solvent and reservoir geology are the deciding factors in the feasibility of the process. Hydrate formation and asphaltene precipitation can be problematic.

Enriched Gas Drive

This is an MCM type process and involves the continuous injection of a gas such as natural gas, flue gas or nitrogen, enriched with C₂-C₄ fractions. At moderately high pressures (8-12 MPa) these fractions condense into the reservoir oil and develop a transition zone. Miscibility is achieved after multiple contacts between the injected

gas and the reservoir oil. An increase in oil phase volume and reduction in viscosity contrast can also be contributing mechanisms towards enhanced recovery. The process is limited to the deep reservoirs (>6000 ft) because of the pressure requirement for miscibility.

Vaporizing Gas Drive

This also is an MCM type process, and involves the continuous injection of natural gas, flue gas or nitrogen under high pressure (10-15 MPa). Under these conditions, the C₂-C₆ fractions are vaporized from the oil into the injected gas. A transition zone develops and miscibility is achieved after multiple contacts. A limiting condition is that the oil must have sufficiently high C₂-C₆ fractions to develop miscibility. Also, the injection pressure must be lower than the reservoir saturation pressure to allow vaporization of the fractions. Applicability is limited to reservoirs that can withstand high pressures.

CO₂ Miscible

CO₂ Miscible [16] method has gained prominence in recent years, partly due to the possibility of CO₂ sequestration. Apart from environmental objectives, CO₂ is a unique displacing agent, because it has relatively low minimum miscibility pressures (MMP) with a wide range of crude oils. CO₂ extracts heavier fractions (C₅-C₃₀) from the reservoir oil and develops miscibility after multiple contacts. The process is applicable to light and medium-light oils (>30° API) in shallow reservoirs at low temperatures. CO₂ requirement is of the order of 500-1500 sm³/sm³ oil, depending on the reservoir and oil characteristics. Many injection schemes are in use for this method. Particularly notable among them is the WAG (Water Alternating Gas) process, where water and CO₂ are alternated in small slugs until the required CO₂ slug size is reached (about 20% HCPV). This approach tends to reduce viscous instabilities. Cost and availability and the necessary infrastructure of CO₂ are therefore major factors in the feasibility of the process. Asphaltene precipitation can be a problem in some cases. Currently there are 80 CO₂ floods in North America.

N₂ Miscible

This process is similar to CO₂ miscible process in principle and mechanisms involved to achieve miscibility, however, N₂ has high MMP with most reservoir oils. This method is applicable to light and medium-light oils (>30° API), in deep reservoirs with moderate temperatures. Cantarell N₂ flood project in Mexico is the largest of its kind at present and is currently producing about 500 000 B/D of incremental oil [17].

4.2.2 Chemical flooding

Chemical methods [18, 19] utilize a chemical formulation as the displacing fluid, which promotes a decrease in mobility ratio and/or an increase in the capillary number. Many commercial projects were in operation in the 1980's, among which, some were successful, but many were failures. The current chemical flood activity is low, except in China. The future holds promise because of the high demand for energy, and also because of the advancement in technology. Considerable experience and understanding have been gained from past chemical flood projects. Economics is the major deterrent in the commercialization of chemical floods. It must also be noted that the technology does not exist currently for reservoirs of certain characteristics. The major chemical flood processes are polymer flooding, surfactant flooding, alkaline flooding, micellar flooding and ASP (alkalisurfactant-polymer) flooding (see Fig. 4). Other methods tested include emulsion, foam and the use of microbes, but their impact has not been significant in EOR production thus far.

Polymer flooding

Water-soluble polymers, such as polyacrylamides and polysaccharides are effective in improving the mobility ratio and reducing permeability contrast. In most cases, polymer flooding [20] is applied as a slug process (20-40% PV) and is driven using dilute brine. Polymer concentration is between 200-2000 ppm. There were many polymer floods in the past, but the recoveries were less than 10% in most cases. The major limitations include loss of polymer to the porous medium, polymer

degradation, and in some cases, loss of injectivity. One of the common reasons for the failure of polymer floods in the past was that it was applied too late in the waterflood when the mobile oil saturation was low. The process will be more effective if applied earlier during a waterflood, at water breakthrough, for example, when the oil saturation is above the residual oil saturation.

Surfactant Flooding

Surfactants are effective in lowering interfacial tension between oil and water. Petroleum sulfonates or other commercial surfactants are often used. An aqueous surfactant slug is followed with a polymer slug, and the two chemical slugs are driven using brine. There were a number of surfactant floods in the past, but they were largely ineffective, mainly due to excessive surfactant loss to the porous medium. Surfactant adsorption and reactions with the rock minerals [21, 22] were severe in some cases. Treatment and disposal of emulsions were also of concern.

Alkaline Flooding

In alkaline flooding [23, 24] an aqueous solution of an alkaline chemical, such as hydroxide, carbonate or orthosilicate of sodium, is injected in a slug form. The alkaline chemical reacts with the acid components of the crude oil and produces the surfactant in situ. IFT reduction is the main mechanism. Spontaneous emulsification may also take place. Drop entrainment or drop entrapment may occur depending on the type of emulsion formed, which may enhance or diminish the recovery. Alkalis can cause changes in wettability [25], however, large concentrations are required for wettability alterations. Field results have been discouraging (RF 0-3% OIP). The process is complex to design due to the various reactions that take place between the alkaline chemical and the reservoir rock and fluids.

Micellar Flooding

Micellar flooding [26, 27] has been more successful in the field than other chemical flooding processes. The main components of this method are a microemulsion slug (also known as a micellar slug) and a polymer slug. These two slugs are driven using brine. Microemulsions are surfactant-stabilized, oil-water dispersions with small drop size distributions (10⁻⁴ to 10⁻⁶ mm). Microemulsions can

be “miscible” with reservoir oil as well as water. The two chemical slugs are designed such that ultra-low IFT (10-2 MN/m or lower) and a favorable mobility ratio prevails during the most part of the displacement. The process has been tested in 45 field projects, and it has been proven that the method is successful in banking and producing the residual oil left after a waterflood. Recovery factors ranged between 35-50% OIP in field projects. However, economics was unattractive due to the high cost of chemicals, the requirement of small well spacing, the high initial expense, and the considerable delay in response. Moreover, the geology and conditions in many candidate reservoirs (high salinity, temperature and clay content) are unsuitable for the application of micellar flooding. The process holds potential and deserves to be re-evaluated under the current economic conditions. Scaling groups [28] have been derived for micellar flooding, which is a valuable tool for laboratory evaluation to reduce the risk in the field application of the process.

ASP Flooding

Alkaline-Surfactant-Polymer flooding [29, 30] is relatively new and is being evaluated through laboratory investigations as well as field tests. The method utilizes mainly three chemical formulations – alkali, surfactant and polymer solutions. The chemical slugs may be injected in sequence or more likely, as a premixed single slug. The major mechanisms are IFT reduction and improvement in mobility ratio. Field results are encouraging (RF 25-30% OIP). The method is capable of banking and producing residual oil. The process holds potential, however, the mechanisms are not fully understood. Economics is marginal at best.

4.3 Current status of EOR

Most of the EOR activity took place in the USA in the past, and the bulk of the production came from that country. Figure 9 shows the EOR production during the last 20 years in USA. The total EOR production in USA is declining. The major contributor was thermal methods, and that is also on the decline, mainly because most attractive reservoirs have already been exploited. Production from the gas injection is

increasing, and that is mainly due to CO₂ floods. Production from chemical floods is non-existent at present. The total EOR production in the USA today constitutes about 12% of the total domestic oil production.

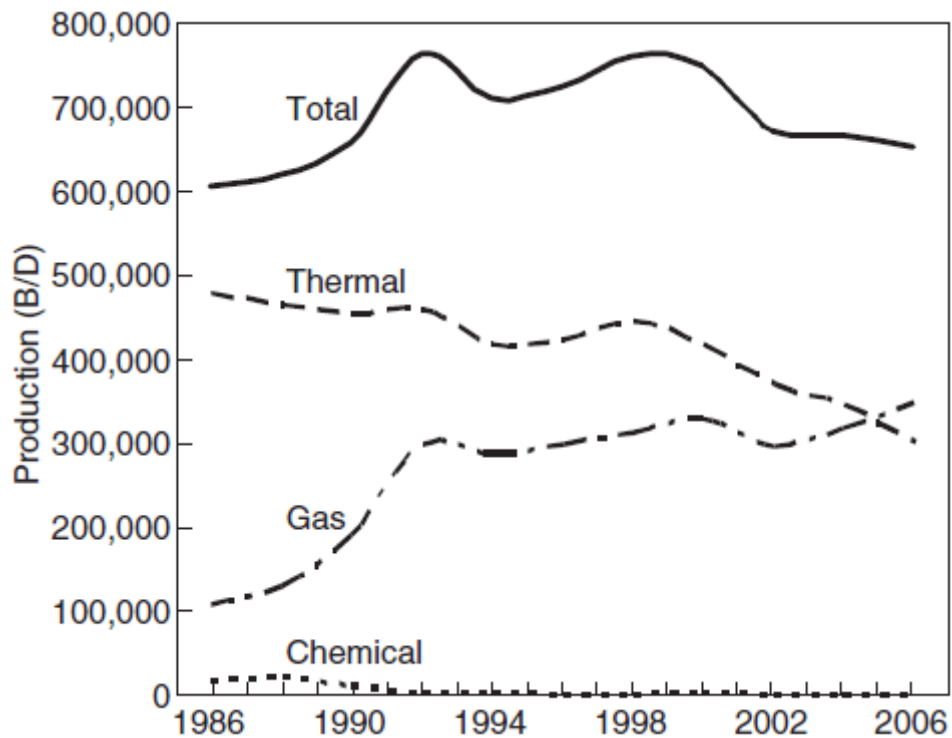


Figure 9 – EOR production in the USA

Recent advancements in technology and the current economic climate have resulted in a renewed interest in EOR. Future growth of EOR will depend on both technology and oil price. Long term commitments in the capital and human resources, as well as in R&D, are essential for success in EOR practice. While EOR screening methods are useful tools, recovery methods that are considered unattractive in most reservoirs can be applied in specific situations. Also, proven EOR methods may be adapted to adverse conditions, as experienced in Canada. Considering the widening gap between demand and supply of energy, EOR will continue to play a significant role in improving recovery factors.

Conclusions

- among the many EOR methods tested, only a few have been commercially successful;
- steam injection-based recovery methods, such as CSS and steamflooding have been highly successful for heavy oils and tar sands;
- miscible CO₂ flooding has had considerable success for light oils, although economics is not clear at this stage;
- chemical methods such as micellar flooding and ASP hold promise for the recovery of some of the 2×10^{12} barrels left in the reservoirs worldwide.

References

- 1 Owens W.D., Suter V.E. (1965) Steam Stimulation – Newest Form of Secondary Petroleum Recovery, *Oil and Gas J.* 82-87, 90.
- 2 Denbina E.S., Boberg T.C., Rotter M.B. (1991) Evaluation of Key Reservoir Drive Mechanisms in the Early Cycles of Steam Stimulation at Cold Lake, *SPE Reservoir Engineer.*, 207-211.
- 3 Farouq Ali S.M., Meldau R.F. (1979) Current Steamflood Technology, *J. Petrol. Technol.*, 1332-1342.
- 4 Stokes D.D., Doscher T.M. (1974) Shell Makes a Success of Steam Flood at Yorba Linda, *Oil and Gas J.*, 71-76.
- 5 Farouq Ali S.M. (1982) Steam Injection Theory – A Unified Approach, paper SPE 10746, California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, San Francisco, March 24-26, 1982.
- 6 Butler R.M. (1985) A New Approach to the Modeling of Steam-Assisted Gravity Drainage, *J. Can. Petrol. Technol.*, 42-50.
- 7 Das S.K., Butler R.M. (1995) Extraction of Heavy Oil and Bitumen using Solvents at Reservoir Pressure, paper No. 95-118, Proceeding of the Sixth Petroleum Conference of the South Saskatchewan Section of the Petroleum Society of CIM, Regina, Sask., Oct. 16-18, 1995.
- 8 Jespersen P.J., Fontaine T.J.C. (1993) Tangleflags North Pilot: A Horizontal Well Steamflood, *J. Can. Petrol. Technol.* 32, 5, 52-57.
- 9 Chu Cheih (1977) A Study of Fireflood Field Projects, paper SPE 5821, *J. Petrol. Technol.*, 111-120.
- 10 Chu Cheih (1982) State-of-the-Art Review of Fireflood Field Projects, paper SPE 9772, *J. Petrol. Technol.*, 19-32.
- 11 Greaves M., Xia T.X., Imbus S., Nero V. (2004) THAI-CAPRI Processes: Tracing downhole upgrading of heavy oil, Paper 067, Proceedings of the Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, June 8-10, 2004.

- 12 Greaves M., Xia T.X. (2004) Downhole Catalytic process for Upgrading Heavy Oil: Produced Oil Properties and Composition, *J. Can. Petrol. Technol.* 43, 9, 25-30.
- 13 Selby Rawya, Alikhan A.A., Farouq Ali S.M. (1989) Potential of Non-thermal Methods for Heavy Oil Recovery, *J. Can. Petrol. Technol.* 28, 4, 45-59.
- 14 Nguyen T.A., Farouq Ali S.M. (1988) Effect of Nitrogen on the Solubility and Diffusivity of Carbon Dioxide into Oil and Oil Recovery by the Immiscible WAG Process, *J. Can. Petrol. Technol.* 37, 2, 24-31.
- 15 Stalkup Jr. F.I. (1992) Miscible Displacement, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 1992, Vol. 8.
- 16 Holm L.W. (1959) Carbon dioxide Solvent Flooding for Increased Oil Recovery, *Trans. AIME* 216, 225-231.
- 17 Sanchez L., Astudillo A., Rodriguez F., Morales J., Rodriguez A. (2005) Nitrogen Injection in the Cantarell Complex: Results after Four Years of Operation, SPE 97385, Proceedings of the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, June 20-23, 2005.
- 18 Thomas S., Farouq Ali S.M. (1999) Status and Assessment of Chemical Oil Recovery Methods, *Energy Sources* 21, 177-189.
- 19 Thomas S., Farouq Ali S.M. (1993) Field Experience with Chemical Oil Recovery Methods, Proceeding of the 21st Australian Chemical Engineering Conference (Chemeca 93), Melbourne, Australia, Sept. 26-29, 1993, pp. 45-3-49-3.
- 20 Chang H.L. (1978) Polymer Flooding Technology – Yesterday, Today and Tomorrow, SPE 7043, *J. Petrol. Technol.* 30, 8, 1113-1128.
- 21 Somasundaran P, Hanna H.S. (1979) Adsorption of Sulfonates on Reservoir Rocks, SPE 7059, *SPE J.*, 221-232.
- 22 Krumrine P.H., Falcone Jr. J.S. (1983) Surfactant, Polymer and Alkali Interactions in Chemical Flooding Processes, paper SPE 11778, Proceeding of the SPE International Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry, Denver, CO, June 1-3, 1983, pp. 79-86.

- 23 Mayer E.H., Breg R.L., Carmichael J.D., Weinbrandt R.M. (1983) Alkaline Injection for Enhanced Oil Recovery – A status report, *J. Petrol. Technol.*, 209-221.
- 24 Johnson Jr. C.E. (1976) Status of Caustic and Emulsion Methods, *J. Petrol. Technol.*, 85-96.
- 25 Froning H.R., Leach R.O. (1967) Determination of Chemical Requirement and Applicability of Wettability Alteration Flooding, *J. Petrol. Technol.*, 839-843.
- 26 Gogarty W.B., Tosch W.C. (1968) Miscible-type Waterflooding: Oil Recovery with Micellar Solutions, *J. Petrol. Technol.*, 1407-1414.
- 27 Farouq Ali S.M., Thomas S. (1986) Tertiary Oil Recovery of Two Alberta Oils by Micellar Flooding, Proceedings of the 37th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM, Calgary, Alberta, June 8-11, 1986, pp. 159-184.
- 28 Thomas S., Farouq Ali S.M. (2001) Scale-up Methods for Micellar Flooding and their Verification, *J. Can. Petrol. Technol.* 39, 2, 18-27.
- 29 Wyatt K., Pitts M.J., Surkalo H. (2002) Mature Waterfloods Renew Oil Production by Alkaline-Surfactant-Polymer Flooding, SPE 78711, Proceedings of the SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky, Oct. 23-25, 2002.
- 30 Shutang G., Huabin L., Zhenyu Y., Pitts M.J., Surkalo H., Wyatt K. (1996) Alkaline/Surfactant/Polymer Pilot Performance of the West Central Saertu, Daqing Oil Field, *SPE Reservoir Engineer.*, 181-188.