

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование призабойной зоны с целью оптимизации работы скважины

УДК 622.276:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Никульчиков А.В.	к.ф-м.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Романюк В.Б	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М. С.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Зятиков П.Н.	к.т.н.		

Томск – 20__ г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Общие по направлению подготовки (специальности)</i>	
P1	Применять естественнонаучные, математические, гуманитарные, экономические, инженерные, технические и глубокие профессиональные знания в области современных нефтегазовых технологий для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки
P2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные исследования с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в сложных и неопределённых условиях; использовать принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P3	Проявлять профессиональную осведомленность о передовых знаниях и открытиях в области нефтегазовых технологий с учетом передового отечественного и зарубежного опыта; использовать инновационный подход при разработке новых идей и методов проектирования объектов нефтегазового комплекса для решения инженерных задач развития нефтегазовых технологий, модернизации и усовершенствования нефтегазового производства
P4	Выбирать оптимальные решения в многофакторных ситуациях, владеть методами и средствами технического моделирования производственных процессов и объектов нефтегазовой отрасли; управлять технологическими процессами, обслуживать оборудование, использовать любой имеющийся арсенал технических средств, обеспечивать высокую эффективность при разработке нефтегазовых объектов
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности
P6	Работать эффективно в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, нести ответственность за результаты работы; координировать работу групп по извлечению и совершенствованию добычи нефти, газа и газового конденсата, передавать знания через наставничество и консультирование
P7	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений</i>	
P11	Контролировать выполнение требований регламентов для обеспечения добычи нефти, газа и газового конденсата и повышение интенсификации притока скважинной продукции
P12	Совершенствовать, разрабатывать мероприятия и/или подготавливать бизнес-предложения по технологическому процессу и технологическим мероприятиям при добыче нефти, газа и газового конденсата на основе производственного менеджмента и планирования работ в сфере нефтегазодобычи
P13	Корректировать программы работ по добыче нефти, газа и газового конденсата, выбирать и принимать решения в нестандартных ситуациях, опираясь на государственные стандарты в области нефтегазодобычи

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (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
2БМ7Э	Рамазанову Турабу Раджаб оглы

Тема работы:

Моделирование призабойной зоны с целью оптимизации работы скважины	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	17.05.2019, 3900/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	24.05.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Основные технические характеристики объекта:</i>
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. радиус и толщина призабойной зоны скважины; 2. радиус скважины; 3. диаметр и длина обсадной колонны; 4. диаметр и длина насосно-компрессорных труб; 5. пористость и проницаемость; 6. призабойной зоны скважины; 7. давление на входе и на выходе;

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</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 литературы в рассматриваемой области; 2. построение гидродинамических моделей для кумулятивного, гидропескоструйного и механического методов перфорации в программном пакете ANSYS; 3. построение гидродинамической модели призабойной зоны с открытым забоем в программном пакете ANSYS; 4. определить оптимальный метод перфорации.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Романюк Вера Борисовна
Социальная ответственность	Черемискина Мария Сергеевна
Часть ВКР на английском языке	Гутарева Надежда Юрьевна

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

Введение
Теоретическая часть

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.03.2019
--	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Никульчиков А.В.	к.ф-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы

Школа	ИШПР	Отделение школы (НОЦ)	ОНД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. Материальные затраты 2. Затраты на спецоборудование для проведения научных исследований 3. Затраты на электроэнергию; 4. Зарботная плата исполнителей
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс РФ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Проведена оценка применения вычислительной гидродинамики к разным методам перфорации
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	...
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Составлен календарный план 2. Рассчитан бюджет НТИ
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определена экономическая эффективность

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Романюк Вера Борисовна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы

Школа	ИШПР	Отделение школы (НОЦ)	ОНД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Работа выполнялась в закрытом помещении за ПЭВМ.</p>
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>1. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 “Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы”.</p> <p>2. ТООИ р-45-084-01 “Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере”.</p> <p>3. Трудовой Кодекс Российской Федерации.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>Проведен анализ вредных факторов таких как: уровень шума, уровень электромагнитного излучения и освещенность рабочей зоны.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); 	<p>Проведен анализ опасных факторов таких как: электрический ток и пожароопасность</p>

– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	
3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	Рассмотрено воздействие вредных и опасных факторов на экологическое состояние окружающей среды, приведены методы по борьбе с отходами бурения
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Наиболее типичной ЧС является пожар Приведены противопожарные мероприятия, а так же мероприятия в случае возникновения пожара
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	Рассмотрены правовые нормы безопасности и организации рабочей зоны
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа _____ 84 _____ с., _____ 20 _____ рис., _____ 28 _____ табл.,
_____ 28 _____ источников, _____ 1 _____ прил.

Ключевые слова: модель, моделирование, перфорация, призабойная зона скважины, кумулятивная перфорация, гидropескоструйная перфорация, механическая перфорация.

Объектом исследования является призабойная зона скважины.

Цель работы – оптимизация работы скважины с применением вычислительной гидродинамики к призабойной зоне.

В процессе исследования проводились моделирование и анализ различных методов перфорации, а также призабойной зоны скважины с открытым забоем.

В результате исследования был определен метод перфорации, при котором дебит скважины наибольший.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: часть пласта в призабойной зоне, обсадная колонна, НКТ, перфорационные каналы.

Степень внедрения: находится на стадии исследования.

Область применения: заканчивание скважин.

Экономическая эффективность/значимость работы присутствует. В ходе исследования было установлено целесообразность применения данного подхода при выполнении перфорационных работ.

В будущем планируется уточнить геометрию перфорационных каналов, улучшить качество сеточной модели, учесть скин-фактор, применить закон фильтрации Форхгеймера.

Определения

Забой скважины – часть скважины, формируемая вскрытым продуктивным горизонтом.

Моделирование – исследование каких либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей

Модель – аналог изучаемого процесса, предмета или явления, отображающий его основные функции и характеристики.

Перфорация – пробивание отверстий в обсадной колонне, цементном камне и горной породе.

Призабойная зона скважины – часть пласта (отсчитываемая по радиусу от оси скважины), примыкающая к забою скважины.

Скважина – цилиндрическая горная выработка пространственной ориентации, диаметр которой существенно меньше ее длины, пробуренная в горных породах Земли, и предназначенная как для сообщения определенных горизонтов между собой, так и продуктивного горизонта с земной поверхностью.

Ствол скважины – цилиндрическая горная выработка, пройденная в горных породах и ограниченная ее стенками.

Обозначения, сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

БШ – буровой шлак

ГПП – гидropескоструйная перфорация

ОБР – отходы буровых растворов

ОК – обсадная колонна

ПЭВМ – персональная электро-вычислительная машина

ПЗС – призабойная зона скважины

ПК – перфорационный канал

ПЛ – пласт

СО – социальная ответственность

СТ.У – стандартные условия

ФЧ – финансовая часть

ЦК – цементный камень

Нормативные ссылки

В данной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1).
2. ГОСТ Р 55059 – 2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Термины и определения [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2014 – 8 с.
3. ГОСТ Р 12.1.009 – 2009. Электробезопасность. Термины и определения. – М. – Из-во стандартов. – 16 с.
4. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 “Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы”.
5. ТОИ р-45-084-01 “Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере”.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	14
Литературный обзор.....	16
1 Теоретическая часть	18
1.1 Постановка задачи	18
1.2 Закон Дарси и уравнение неразрывности при фильтрации флюида в пористой среде.....	19
1.3 Уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности.....	20
1.4 Уравнение состояния для реальных газов.....	22
1.5 Методы перфораций.....	23
1.5.1 Взрывные методы	24
1.5.2 Гидродинамические методы	26
1.5.3 Механические методы	28
1.6 Открытый забой.....	29
2 Расчетная часть	32
2.1 Исходные данные	32
2.1.1 Геометрические размеры.....	32
2.1.2 Пласт.....	33
2.1.3 Метан.....	34
2.1.4 Граничные условия.....	34
2.2 Мешинг	34
2.3 Результаты.....	36
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	39
3.1 Контрольные события	39

3.2 Планирование и анализ работ для выполнения магистерской работы	40
3.3 Бюджет научно – исследовательской работы	42
3.4 Материальные затраты	42
3.5 Затраты на спецоборудование для проведения научных исследований	43
3.6 Затраты на электроэнергию	44
3.7 Заработная плата исполнителей.....	45
3.8 Отчисления во внебюджетные фонды.....	48
3.9 Накладные расходы	49
3.10 Бюджет научно-исследовательской работы	49
4 Социальная ответственность	50
4.2 Производственная безопасность.....	50
4.2.1 Анализ вредных производственных факторов.....	51
4.2.1.1 Показатели микроклимата в помещении.....	51
4.2.1.2 Уровень шума	52
4.2.1.3 Уровень электромагнитного излучения	53
4.2.1.4 Освещенность рабочей зоны	54
4.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды	55
4.1.2.1 Электрический ток.....	55
4.2 Экологическая безопасность.....	58
4.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	59
4.3.1 Пожарная безопасность на рабочем месте	60
4.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	61

Заклучение	64
Список публикаций студента	65
Список литературы.....	66
Introduction	70
1 Theory	72
1.1 Statement of problem.....	72
1.2 Darcy's law and the continuity equation for filtration in a porous medium.	73
1.3 Navier-Stokes equation and the continuity equation	74
1.4 Equation of state for real gases	75
1.5 Perforation methods.....	77
1.5.1 Explosive methods.....	77
1.5.2 Hydrodynamic methods	79
1.5.3 Mechanical methods	81
1.6 Open-hole	82

Введение

Заканчивание скважины является важным заключительным этапом при ее строительстве, в процессе которого создается гидродинамическая связь между продуктивным пластом и стволом скважины. Гидродинамическое совершенство скважины, которое непосредственно влияет на приток пластовых флюидов в скважину, во многом определяется на этом этапе строительства, а именно зависит от выбора конструкции забоя. Поэтому с точки зрения экономической выгоды заканчивание скважины играет ключевую роль в добыче нефти и газа из продуктивного пласта.

В настоящее время на практике существуют несколько типовых конструкций забоя скважины, среди которых широкое применение нашли скважины с перфорированным забоем. После того как нефтяная или газовая скважина обсажена, ствол скважины изолируется от продуктивного пласта обсадной колонной и цементным камнем. Для установления гидродинамической связи между стволом обсаженной скважины и продуктивным пластом требуется перфорация, эффективность которой обеспечивает гидродинамическое совершенство призабойной зоны скважины. Перфорация – это процесс пробивания отверстий в обсадной колонне, цементном камне и пласте. В зависимости от применяемого метода перфорации, механических и физических свойств перфорируемых материалов длина перфорационных каналов в продуктивном пласте может варьироваться от 0 до нескольких сантиметров. Радиальное распределение отверстий вокруг внутренней части ствола скважины называется фазированием. Угол, образованный между осями перфорационных каналов, называется углом фазировки. Количество отверстий на один погонный метр, которое называется плотностью перфорации, может варьироваться от 1 до нескольких десятков отверстий. На рис.1. показана геометрия типичного перфорированного забоя скважины.

В данной работе внимание сфокусировано на различных методах перфорации, так как перфорация является решающим фактором при определении дальнейшей судьбы скважины.

Геолого-технические условия вторичного вскрытия продуктивных пластов в обсаженных скважинах имеют три критерия эффективности:

- надежное сообщение пласта со скважиной за счет перфорационных каналов;
- суммарная поверхность вскрытия обсадной колонны в виде отверстий и щелей;
- сохранение прочности обсадной колонны и цементного кольца как в зоне, так и за пределами вскрытия.

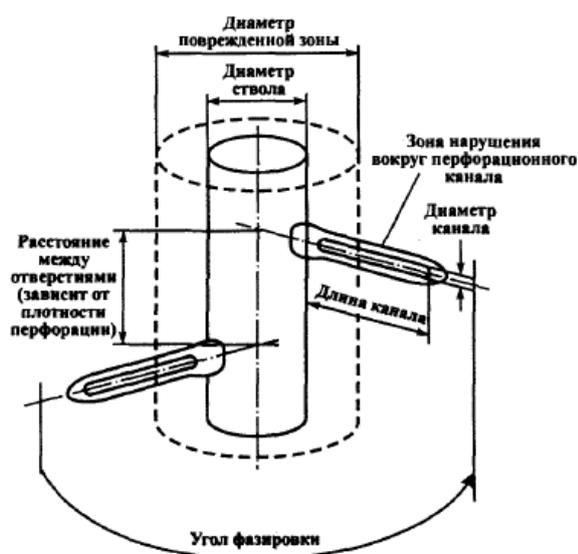


Рис.1. – Перфорированный забой скважины

Вскрытие пласта перфорацией в обсаженных скважинах является одной из наиболее важных операций при их строительстве, поскольку от нее зависит дальнейший успех испытания, получения притока пластового и освоения скважины как объекта эксплуатации.

Литературный обзор

В работе [6] рассматривается оценка производительности скважины по двум распространенным схемам заканчивания: гравийная набивка и гидроразрыв. А также затронуто влияние песка на продуктивность скважины и связанные с этим эрозионные воздействия ствол скважины, скважинное оборудование, в связи, с чем в исследование включено модели с разделенной геомеханикой.

Геомеханико-гидродинамическое моделирование было выполнено с использованием метода вычислительной гидродинамики для моделирования призабойной зоны скважины, на которой одновременно взаимодействуют различные физические процессы, такие как нелинейное течение флюида в пористой среде (формулировка Форхгеймера), диссипация турбулентной кинетической энергии, неоднородность свойств горной породы в пористой среде и транспортировка частиц.

Работа [7] посвящена построению полностью трехмерных моделей для моделирования потока в обсаженных, перфорированных скважинах. В работу также включено проведение предварительного исследования ряда проблем, которые либо упрощены (при эксцентричном положении перфоратора), либо не решены в настоящее время (перфорация в открытом забое) с помощью программных пакетов. Проведено сравнение результатов моделирования с полуаналитическими решениями Каракаса и Тарика в диапазоне параметров перфорации и пласта. В ходе исследования было выявлено, что текущие полуаналитические решения в их нынешнем виде, предусмотренные для оценки продуктивности перфорации в обсаженных скважинах, не могут применяться к перфорациям в скважинах с открытым забоем.

Монография [9] посвящена заканчиванию скважин в условиях низкопроницаемых коллекторов. Впервые обобщены результаты исследований выработки каналов в ластах гидропескоструйным и

газопескоструйным способами, разработана методика проектирования перфораций, учитывающая индивидуальные особенности скважин и пластов. Описана новая технология создания циклических глубоких депрессий с использованием струйных аппаратов, а также раскрыт механизм их воздействия на призабойную зону. В этой работе приведена формула для расчета диаметра перфорационного канала в горной породе, которая была использована при построении геометрической модели перфорационных каналов для гидropескоструйной перфорации.

Длина перфорационного канала при гидropескоструйной перфорации, использованная при построении геометрической модели, приведена в 9 главе учебного пособия [10], где рассматривается вторичное вскрытие продуктивных пластов.

В 1 главе учебных пособий [11] и [12] подробно описаны конструкции забоя скважин, основы вторичного вскрытия пласта, рассмотрена тема несовершенства скважин. Приводится классификация всех существующих на данный момент времени методов перфорации, таких как пулевая, торпедная, кумулятивная, гидropескоструйная, механическая, химическая перфорация. Показаны достоинства и недостатки каждого из методов перфорации. Приведены приблизительные размеры перфорационных каналов, образующихся вследствие применения различных методов перфорации. Таким образом, при построении геометрических моделей перфорационных каналов для кумулятивной и механической перфорации были использованы данные из этих учебных пособий.

1 Теоретическая часть

1.1 Постановка задачи

Моделирование призабойной зоны скважины требует объединения отдельных физических моделей, описывающих поведение потока флюида в каждой из областей, являющихся частью целостной модели. Модель ПЗС обычно состоит из пористой среды, ствола скважины и перфорационных каналов, но в случае моделирования открытого забоя перфорационные каналы отсутствуют. Движение флюида в пористой среде описывается законом Дарси, а в стволе скважины и перфорационных каналах физическая модель течения флюида базируется на уравнениях Навье-Стокса.

В качестве моделируемого флюида выбран газ метан. Имея в виду то, что свойства газа изменяются в зависимости от давления и температуры, то необходимо применять уравнение состояния для реальных газов. Основными уравнениями состояния для реальных газов, которые часто применяются, являются уравнения Соаве-Редлиха Квонга и Пенга-Робинсона. Течение флюида является изотермическим, однофазным, однокомпонентным, сжимаемым, установившимся. Пористая среда в призабойной зоне гомогенна, стенки перфорационных каналов идеально гладкие. Поскольку в призабойной зоне и примыкающих к ней перфорационных каналах загрязнение и повреждение отсутствуют, то скин-эффект не будет учитываться.

Вязкость зависит только от температуры. Поскольку температура внутри резервуара принимается постоянной, модель основана на постоянном значении вязкости для метана, хотя это может показаться недостатком представленного подхода к моделированию. Следует отметить, что давление в незначительной степени влияет на вязкость метана, поэтому ошибка, вносимая предположением о постоянной вязкости, несущественна.

В этом исследовании рассматривается моделирование различных методов перфорации, а также призабойной зоны с открытым забоем. Для моделирования термодинамических свойств флюида в качестве уравнения состояния для реальных газов выбрано уравнение Соаве-Редлиха Квонга.

1.2 Закон Дарси и уравнение неразрывности при фильтрации флюида в пористой среде.

Основным законом движения флюида в пористой среде является закон Дарси, который был экспериментально установлен французским инженером Анри Дарси в 1856 году. Существуют несколько форм записи закона Дарси. Для одномерного течения Закон Дарси имеет скалярный вид и записывается в следующей форме:

$$q = \left(\frac{kA}{\mu} \right) \frac{P_i - P_o}{L}, \quad (1)$$

где q – объемный расход;

k – коэффициент проницаемости;

A – площадь поперечного сечения;

μ – динамическая вязкость;

P_i – давление на входе;

P_o – давление на выходе.

Для трехмерного течения закон Дарси имеет векторный вид и записывается в следующей форме (2):

$$\vec{v} = \frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g), \quad (2)$$

где \vec{v} – вектор скорости;

k – проницаемость;

μ – вязкость;

∇ – оператор набла (Гамильтона);

p – давление;

ρ – плотность;

g – ускорение свободного падения.

Значительное число научных работ посвящено проверке и исследованию применимости закона Дарси. В ходе исследований было выявлено, что закон Дарси имеет верхнюю и нижнюю границы применимости. Верхняя граница применимости закона Дарси определяется группой причин, связанных с проявлением инерционных сил при высоких скоростях фильтрации. В случае высоких скоростей течения инерционные эффекты становятся значительными, из-за чего связь между перепадом давления и скоростью потока становится нелинейной.

При достаточно малых скоростях фильтрации флюид взаимодействует с твердым скелетом пористой среды, проявляет неньютоновские свойства, что и определяют нижнюю границу применимости Закона Дарси.

Уравнение неразрывности при фильтрации флюида в пористой среде для сжимаемой среды записывается следующим образом:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = 0, \quad (3)$$

где m – пористость.

1.3 Уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности

Уравнения Навье-Стокса представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающую течение вязкой жидкости. Впервые эти уравнения были получены Навье в 1822г. и Пуассоном в 1829г. Позднее эти уравнения получил Сен-Венан в 1843г. и затем Стокс в 1845г. На сегодняшний день на базе уравнений Навье -Стокса

развита полная теория вязких течений. Обычно уравнения Навье-Стокса (4) дополняются уравнением неразрывности (5) и записываются в векторном виде для сжимаемой вязкой среды следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = \vec{F} - \nabla p + \zeta \nabla \vec{v} + \mu \left(\Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \text{grad div} \vec{v} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

где \vec{F} – внешние силы;

Δ – оператор Лапласа;

t – время;

ζ – объемная вязкость;

grad – градиент;

div – дивергенция.

Для несжимаемой среды уравнения Навье-Стокса (5) и уравнение неразрывности (6) принимают следующий вид:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = \vec{F} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v}, \quad (6)$$

$$\nabla(\vec{v}) = 0. \quad (7)$$

Так как среда является вязкой и сжимаемой, то течение флюида в перфорационных каналах и в стволе скважины описываются формулами (4) и (5).

1.4 Уравнение состояния для реальных газов

Связь между параметрами, характеризующими состояние термодинамической системы называется уравнением состояния, в случае простого тела уравнение состояния в неявном виде имеет следующий вид $F(p, v, T) = 0$. Уравнение состояния Редлиха-Квонга – это эмпирическое алгебраическое уравнение, которое связывает давление, температуру и объем газов. Это уравнение было предложено Отто Редлихом и Джозефом Нен Шун Квонгом в 1949 году. Существует несколько модификаций уравнения Редлиха-Квонга. Одной из них является модификация, предложенная Соаве в 1972 году, которая использована при моделировании. Уравнение состояния Соаве-Редлиха-Квонга (8) записывается в следующем виде:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b)}, \quad (8)$$

$$a = \alpha a_c, \quad (9)$$

$$a_c = \frac{0,42747R^2T_c^2}{P_c}, \quad (10)$$

$$b = \frac{0,08664RT_c}{P_c}, \quad (11)$$

$$\alpha = (1 + (0,48 + 1,574\omega - 0,176\omega^2)(1 - T_r^{0,5}))^2, \quad (12)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad (13)$$

$$V_m = \frac{V}{n}, \quad (14)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

V_m – молярный объем;

V – объем;

b – поправка, учитывающая объем частиц;

a – поправка, учитывающая влияние межмолекулярного притяжения на давление при данной температуре;

a_c – поправка, учитывающая влияние межмолекулярного притяжения на давление при критической температуре;

p_c – критическое давление;

T – абсолютная температура;

T_c – критическая температура;

T_r – приведенная температура;

n – количество вещества;

α – отношение поправки при данной температуре a к поправки при критической температуре;

ω – ацентрический фактор;

1.5 Методы перфораций

Пулевые перфораторы были первыми коммерческими перфорационными устройствами. Пулевая перфорация впервые нашла свое коммерческое применение в начале 1930-х годов.

В течение 30-х и 40-х годов 20 века в военной сфере велись работы в области кумулятивных зарядов. Базука с ее бронебойными зарядами была одним из первых масштабных применений технологии в нефтяной промышленности. Кумулятивная перфорация начала широко применяться с

конца 40-х годов 20 века и по сей день является самым распространенным методом перфорации.

Существуют альтернативные методы перфорации, основанные на химических реакциях, сверлении и высоконапорных струях жидкости.

По принципу действия технических средств и технологий, применяемых для перфорации скважин, все методы можно классифицировать как:

- взрывные;
- гидродинамические;
- механические;
- химические.

1.5.1 Взрывные методы

Взрывные методы включают в себя пулевую, торпедную и кумулятивную перфорацию. Из взрывных методов для моделирования выбрана кумулятивная перфорация, так как она по сравнению остальными нашло широкое применение.

Кумулятивный заряд, является взрывчатый компонентом, который фактически создает перфорацию. Он представляет собой простое устройство, состоящее из корпуса, взрывчатого вещества и металлической облицовки, как показано на рис.2.

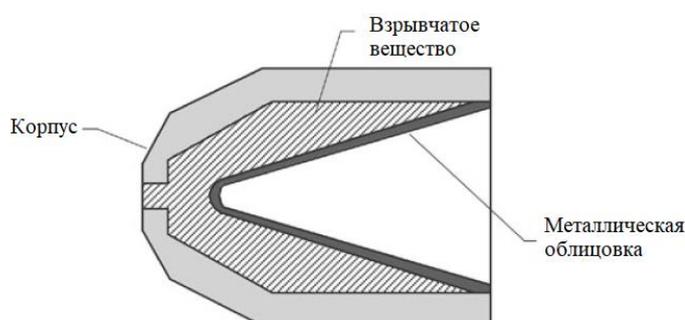


Рис.2. Кумулятивный заряд

Процесс образования струи и разрушения металлической облицовки начинается с детонации взрывчатого вещества в основании заряда. Детонационная волна распространяется по взрывчатому веществу, химически высвобождая его энергию. Газы под высоким давлением на фронте детонации сообщают импульс, который разрушает металлическую облицовку вдоль оси симметрии. Таким образом газы и размягченный металл двигаясь к оси симметрии формируют поток, называемый кумулятивной струей. Давление вдоль центральной линии может достигнуть 0,3 млн МПа, а скорость в головной части кумулятивной струи может варьировать в пределах 6-8 км/с. Предел прочности металлов намного ниже давления кумулятивной струи.

Процесс проникновения кумулятивной струи аналогичен потоку воды под большим давлением, проникающему через блок желатина. Предел прочности желатина настолько мал, что не оказывает никакого сопротивления потоку воды. По сути, такой же процесс происходит с кумулятивной струей, проникающей в стенку осадной колонны, только при значительно более высоких давлениях (рис.3.).

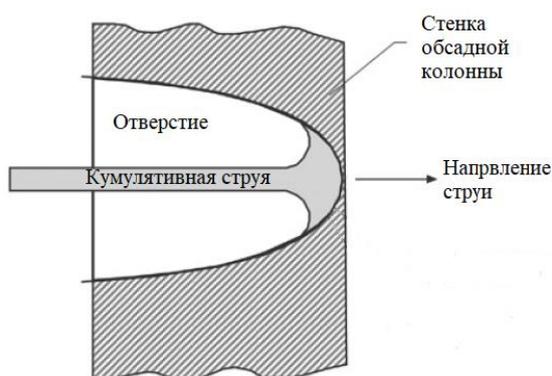


Рис.3. – Схематическое изображение проникновения кумулятивной струи

Кумулятивная струя, проходя через стенку осадной колонны, цементный камень и проникая в горную породу, формирует отверстие,

которое называют перфорационным каналом. В зависимости от формы и материала облицовки возможны различные характеристики разрушения и проникновения.

На рис.4. показан профиль перфорационного канала в продольном сечении, который использован в модели кумулятивной перфорации. Указанные размеры идентичны размерам, использованным при построении геометрической модели для кумулятивной перфорации.

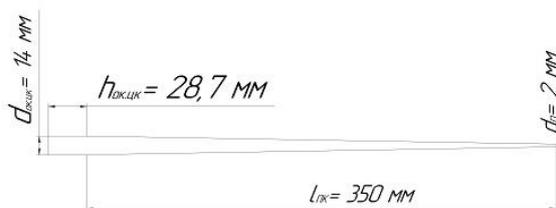


Рис.4. – Профиль канала при кумулятивной перфорации

Полная длина перфорационного канала вычисляется по следующей формуле:

$$l_{\text{ПД}} = h_{\text{ОК.ЦК}} + l_{\text{ПК}}, \quad (15)$$

где $l_{\text{ПД}}$ – полная длина;

$h_{\text{ОК.ЦК}}$ – общая толщина стенки обсадной колонны и цементного камня;

$l_{\text{ПК}}$ – длина перфорационного канала в горной породе.

1.5.2 Гидродинамические методы

Гидродинамические методы начали применяться в 1960-х годах как средство перфорации обсадной колонны, цементного камня и горной породы путем перекачивания жидкости под большим давлением. В зависимости от состава высоконапорные струи бывают эрозионные и абразивные. Эрозионные струи в основном состоят из воды и в редких случаях из облегченного бурового раствора. Абразивные струи состоят из жидкости и

абразивных частиц, находящихся во взвешенном состоянии. В качестве абразивных частиц используются кварцевый песок, стальная дробь и др. В настоящее время гидropескоструйная перфорация считается наиболее перспективным среди гидродинамических методов. Метод ГПП применяют для образования в обсаженных и необсаженных скважинах каналов и щелей с большой поверхностью фильтрации. Он основан на использовании кинетической энергии струи, состоящей из жидкости и песка. Жидкостно-песчаная смесь формируется за счет насадок, установленных в гидropескоструйном аппарате.

Для создания перфорационных каналов используются насосные агрегаты, НКТ и гидropескоструйный аппарат. В скважину спускают НКТ с гидropескоструйным аппаратом. В НКТ закачивается жидкостно-песчаная смесь насосными агрегатами. В насадках ГПП потенциальная энергия смеси переходит в кинетическую энергию, которая достаточна, чтобы разрушить стенку обсадной колонны, цементный камень и образовать грушеобразную каверну (рис.5.) в горной породе. Вынос частиц разрушенной горной породы из канала осуществляется возвратными потоками жидкости, а на дневную поверхность частицы поднимаются по затрубному пространству. Процесс выработки каналов и щелей в обсаженных скважинах можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит выработка отверстия в стенке обсадной колонны, а на втором – происходит выработка канала и щели в цементном камне и горной породе.

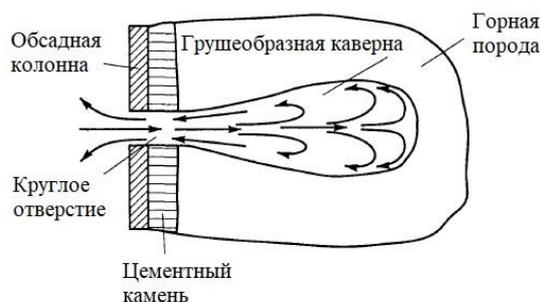


Рис.5. – Схема образования канала

На рис.6. показан профиль перфорационного канала в продольном сечении, который использован в модели ГПП. Указанные размеры идентичны размерам, использованным при построении геометрической модели для ГПП.

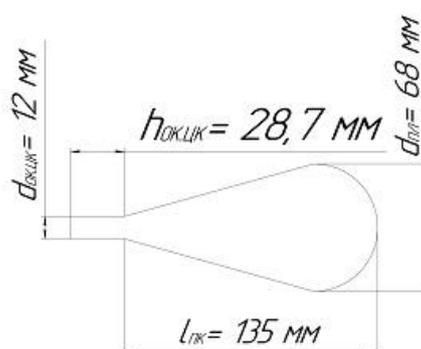


Рис.6. – Профиль канала при ГПП

Полная длина перфорационного канала вычисляется по формуле (15). Условный диаметр перфорационного канала в горной породе вычисляется по следующей формуле:

$$D_{ПК} = - 3,8 + 0,53l_{ПК} , \quad (16)$$

где $D_{ПК}$ – условный диаметр перфорационного канала.

1.5.3 Механические методы

Механический метод перфорации осуществляется механическим сверлящим или щелевым перфораторами. В настоящее время в России используются следующие сверлящие перфораторы:

- ПС – 112;
- ПГСП;
- ПС – 500.

В данной работе размеры перфорационных каналов, использованные для моделирования, относятся к ПГСП.

Перфоратор состоит из гидравлических и электромеханических систем. Эти системы кроме сверления каналов обеспечивают фиксацию перфоратора в скважине во время сверления. Передача электроэнергии перфоратору осуществляется с помощью каротажного кабеля. Управление процессом сверления выполняется с поверхностного пульта, а контроль и фиксирование всех параметров осуществляется компьютером.

При применении механического сверлящего перфоратора образующиеся перфорационные каналы имеют цилиндрическую форму. На рис.7. показан профиль перфорационного канала в продольном сечении, который использован в модели механической сверлящей перфорации. Указанные размеры идентичны размерам, использованным при построении геометрической модели для механической сверлящей перфорации.

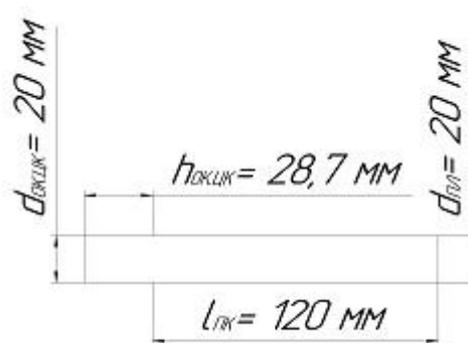


Рис.7. – Профиль канала при механической сверлящей перфорации

Полная длина перфорационного канала вычисляется по формуле (15). Вследствие незначительного температурного воздействия предотвращается оплавление стенок перфорационного канала. На обсадной колонне отсутствуют заусенцы, стенки перфорационных каналов являются гладкими.

1.6 Открытый забой

Часть скважины, формируемая вскрытым продуктивным пластом,

называется забоем. В течение всего срока эксплуатации забой определяет эффективность скважины. Существуют следующие типовые конструкции забоев скважин:

- скважина с перфорированным забоем;
- скважина с забойным хвостовиком;
- скважина с забойным фильтром;
- скважина с открытым забоем.

Для моделирования была выбрана скважина с открытым забоем (рис.8.). Скважина с открытым забоем, при условии, что продуктивный пласт полностью вскрыт и отсутствует загрязнение ПЗС буровым раствором, считается гидродинамически совершенной. Остальные модели считаются гидродинамически несовершенными, поскольку забой в каждой из моделей перекрыт перфорированной обсадной колонной.

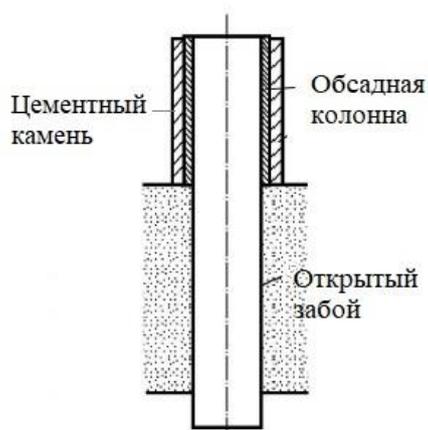


Рис.8. – Скважина с открытым забоем

Результаты расчетов данной модели будут использоваться при определении гидродинамического совершенства скважины и коэффициента несовершенства по характеру вскрытия для остальных моделей. Коэффициент гидродинамического совершенства скважины (17) и коэффициент несовершенства по характеру вскрытия (18) определяются по следующим формулам:

$$\varphi = \frac{Q_{НС}}{Q_c}, \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \ln \frac{R_k}{r_c}, \quad (18)$$

Где φ – гидродинамическое совершенство скважины;

$Q_{нс}$ – дебит несовершенной скважины;

Q_c – дебит совершенной скважины;

C_2 – коэффициент несовершенства по характеру вскрытия;

R_k – радиус контура питания (радиус ПЗС);

r_c – радиус скважины.

2 Расчетная часть

Моделирование проводилось в академической версии программного пакета ANSYS 2019 R1. Из-за ограничений академической версии были выбраны маленькие модели, так как максимально допустимое количество элементов составляет 510000.

2.1 Исходные данные

Все исходные данные для всех 4 моделей идентичны кроме размеров перфорационных каналов и радиуса открытого забоя. В случае открытого забоя эксплуатационная колонна отсутствует, а его радиус равен радиусу скважины.

2.1.1 Геометрические размеры

В таблицах 1,2,3,4 приведены геометрические размеры моделей.

Таблица 1 – Призабойная зона скважины

радиус ПЗС $R_{ПЗС}$, м	радиус скважины r_c , м	мощность пласта $h_{пл}$, м
0,8	0,1905	0,4

Таблица 2 – Эксплуатационная колонна

внешний диаметр $d_э^{6m}$, м	внутренний диаметр $d_э^{6m}$, м	длина $l_{экс}$, м
0,1461	0,1331	0,4

Таблица 3 – Насосно-компрессорные трубы

внутренний диаметр $d_{нкм}^{6m}$, м	длина $l_{НКТ}$, м
0,062	0,2

Таблица 4 – Перфорационные каналы

Параметры	кумулятивная перфорация	ГПП	Механическая перфорация
средняя длина канала в пласте $l_{пл}$, м	0,25	0,135	0,12
диаметр канала в обсадной колонне и цементном камне $d_{ок.цк}$, м	0,0014	0,014	0,02
диаметр канала в пласте $d_{пл}$, м	0,002	0,068	0,02
плотность перфорации на один погонный метр n , отв/м	20	20	20
угол фазировки θ , градус	90	90	90
расстояние между центрами смежных каналов l_{nc} , м	0,2	0,2	0,2

2.1.2 Пласт

В таблице 5 приведены физические свойства пласта.

Таблица 5 – Физические свойства пласта

проницаемость k , м ²	пористость φ , %	температура t , К
10^{-14}	20	300

2.1.3 Метан

В таблице 6 приведены физические свойства метана.

Таблица 6 – Физические свойства метана

плотность ρ , кг/м ³	вязкость μ , Па·с
0,6679	0,00001087

2.1.4 Граничные условия

В таблице 7 приведены физические свойства метана.

Таблица 7 – Граничные условия

давление $P_{вх}$, Па	давление $P_{вых}$, Па
$4 \cdot 10^6$	0

2.2 Мешинг

В ходе работы было построено 4 сеточной модели. Количество узлов и элементов каждой из модели представлено в таблице 8.

Таблица 8 – Узлы и элементы

Показатели сеточной модели	Открытый забой	Кумулятивная перфорация	ГПП	Механическая сверлящая перфорация
количество узлов	512346	106498	95099	94353
количество элементов	490849	505602	509370	500249

На рисунках 9, 10, 11 и 12 представлены сеточные модели модели призабойной зоны при кумулятивном, гидropескоструйном и механическом методах перфорации, а также скважины с открытым забоем.

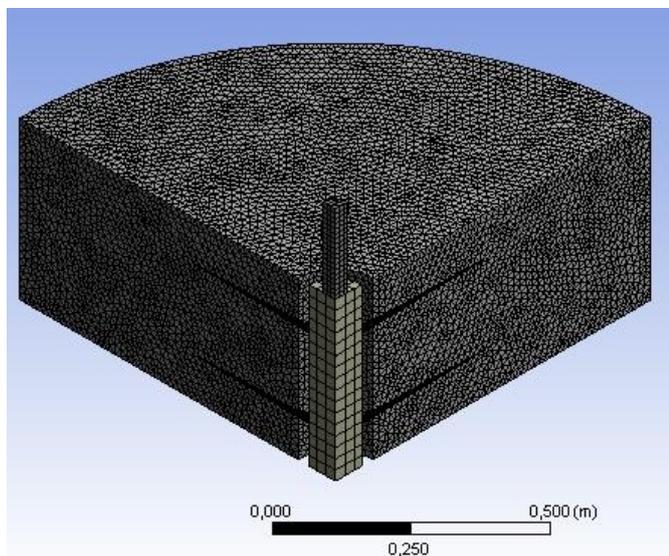


Рис.9. – Кумулятивная перфорация

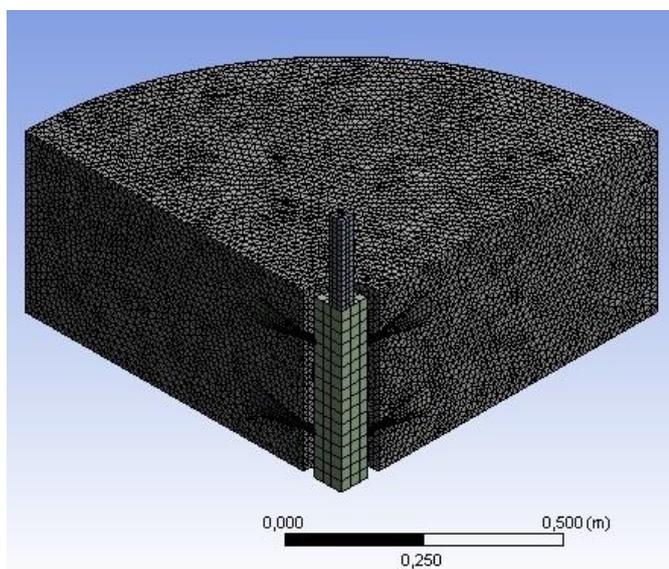


Рис.10. – Гидropескоструйная перфорация

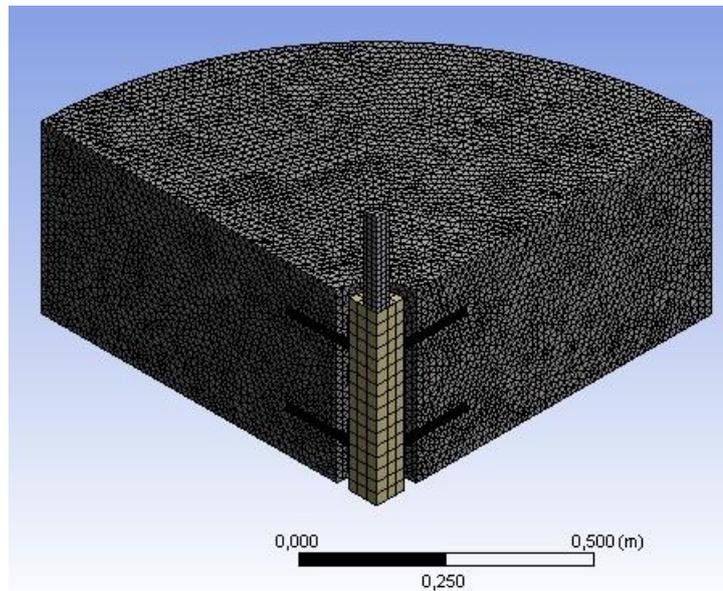


Рис.11. – Механическая сверлящая перфорация

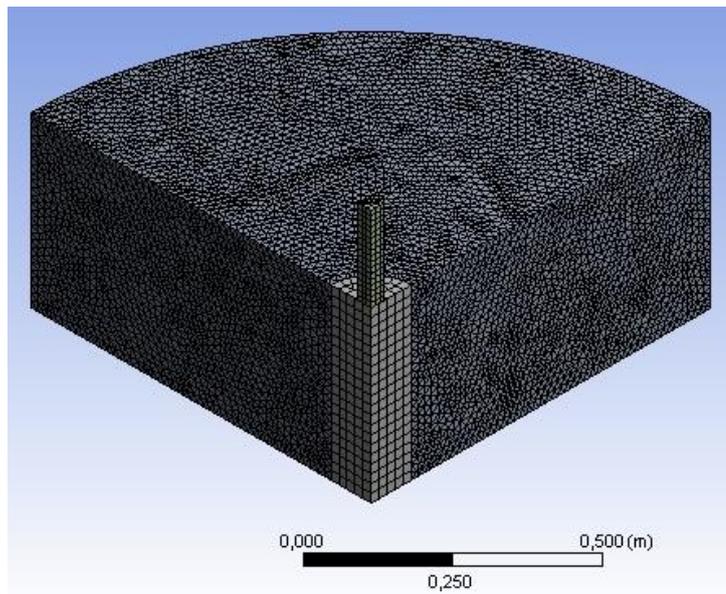


Рис.12. – Открытый забой

2.3 Результаты

После расчета для всех моделей был получен приток, объемные и массовые расходы которых представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Массовые и объемные расходы, полученные на основе моделей

Расход	Скважина с открытым забоем	Кумулятивная перфорация	Гидропеско-струйная перфорация	Механическая перфорация
Массовый расход \dot{m} , кг/с	4,025	3,829	3,699	3,913
Объемный расход $Q_{пл.у}$, м ³ /с	0,336	0,323	0,297	0,305

На основе полученных результатов были рассчитаны объемный расход в стандартных условиях, объемный коэффициент газа, коэффициент совершенства скважины, коэффициент несовершенства скважины по характеру вскрытия. Скважина с открытым забоем является совершенной скважиной. Для расчетов были использованы следующие формулы:

$$Q_{ст.у} = \frac{\dot{m}}{\rho_{ст.у}} \quad (19)$$

$$B_{г} = \frac{Q_{пл.у}}{Q_{ст.у}} \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{сов}} \quad (21)$$

Где $Q_{ст.у}$ – объемный расход при стандартных условиях;

$Q_{пл.у}$ – объемный расход в пластовых условиях;

$\dot{m}_{сов}$ – массовый расход совершенной скважины;

$\rho_{ст.у}$ – плотность при стандартных условиях

V_r – объемный коэффициент газа;

γ – коэффициент совершенства скважины.

Коэффициент несовершенства скважины по характеру вскрытия вычисляется по формуле (18).

Таблица 10 – Расчеты

Наименование	Скважина с открыты м забоем	Кумулятивная перфорация	Гидропеско-струйная перфорация	Механическая перфорация
Объемный расход $Q_{ст.у}$, м ³ /с	6,026	5,773	5,538	5,859
Объемный коэффициент газа V_2	0,055	0,056	0,054	0,052
Коэффициент совершенства скважины γ	1	0,951	0,918	0,972
Коэффициент несовершенств а скважины по характеру вскрытия C_2	0	0,127	0,219	0,071

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Контрольные события

Контрольные события научно-исследовательской работы с ключевыми датами и результатами, которые необходимо получить, закреплены в форме таблицы 11.

Таблица 11– Контрольные события научно-исследовательской работы

Контрольное событие	Дата	Результат
Определение направления исследования	05.03.2019	Область исследования
Разработка технического задания	15.03.2019	Бланк заданий на выполнение магистерской диссертации
Изучение литературы	25.03.2019	Литературный обзор
Построение и расчет модели	09.04.2019	Расчетная часть
Обсуждение полученных результатов	14.04.2019	Научный руководитель, специалист
Оформление выводов	19.04.2019	Выводы по работе
Оценка эффективности производства и применения проектируемого процесса	29.04.2019	Раздел “Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение”
Разработка социальной	09.05.2019	Раздел “Социальная

ответственности по теме		ответственность”
Разработка части ВКР на иностранном языке	14.05.2019	Часть ВКР на иностранном языке
Оформление пояснительной записки	20.05.2019	Магистерская диссертация

3.2 Планирование и анализ работ для выполнения магистерской работы

Для выполнения научно-исследовательской работы формируется рабочая группа, которая будет заниматься проведением исследования, обобщением результатов, оценкой и анализом проведенной работы. В состав рабочей группы входят специалист, научный руководитель и консультанты по части социальной ответственности (СО), по финансовой части (ФЧ) и иностранному языку. Для успешного проведения научно-исследовательской работы в таблице 12 приведены примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ.

Таблица 12 – Календарный план

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав
Определение направления исследования	5	01.03.2019	05.03.2019	Научный руководитель, специалист
Разработка технического задания	10	06.03.2019	15.03.2019	Научный руководитель, специалист
Изучение				

литературы, составление литературного обзора	10	16.03.2019	25.03.2019	Специалист
Построение и расчет модели	15	26.03.2019	09.04.2019	Специалист
Обсуждение полученных результатов	5	10.04.2019	14.04.2019	Научный руководитель, специалист
Оформление выводов	5	15.04.2019	19.04.2019	Специалист
Оценка эффективности производства и применения проектируемого процесса	10	20.04.2019	29.04.2019	Консультант по ФЧ, специалист
Разработка социальной ответственности по теме	10	30.04.2019	09.05.2019	Консультант по СО, специалист
Разработка части ВКР на иностранном языке	5	10.05.2019	14.05.2019	Консультант по иностранному языку, специалист
Оформление пояснительной	7	14.05.2019	20.05.2019	Специалист

записки				
---------	--	--	--	--

3.3 Бюджет научно – исследовательской работы

Для составления бюджета научно – исследовательской работы используются следующие статьи затрат:

- 1) материальные затраты;
- 2) затраты на спецоборудование;
- 3) затраты на электроэнергию;
- 4) заработная плата исполнителей;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды;
- 6) накладные расходы.

3.4 Материальные затраты

При расчете стоимости материальных затрат учитываются действующие расценки или договорные цены. Материальные затраты, необходимые для данной работы, представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Расход	Цена за единицу с учетом НДС, руб.	Сумма, руб.
Бумага	шт.	500	2	1000
Ручка	шт.	2	120	240
Флеш-накопитель	шт.	1	800	800

Итого за материалы	2040
Транспортно-заготовительные расходы, (3-5%)	102
Итого по статье, C_m	2142

3.5 Затраты на спецоборудование для проведения научных исследований

В таблице 14 приведены затраты на спецоборудование. Все спецоборудование, указанное в таблице 14, имеется в лаборатории вуза. Поэтому его необходимо учитывать при амортизационных отчислениях.

Таблица 14 – Затраты на спецоборудование

Наименование	Количество единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Принтер	1	7000	7000
Персональный компьютер	1	28000	28000
Итого, C_{co}			35000

При проведении научно-исследовательской работы были использованы академическая версия программного пакета ANSYS, учебная версия программного пакета Компас, которые бесплатны.

3.6 Затраты на электроэнергию

Требуется рассчитать затраты на электроэнергию для всего спецоборудования. В таблице 15 приведен расчет количества использованной электроэнергии для всего спецоборудования.

Таблица 15 – Количество использованной электроэнергии

Наименование оборудования	Количество единиц оборудования	Потребляемая мощность, кВт	Количество часов работы в сутки, ч	Количество потребляемой энергии, кВтч
Персональный компьютер	1	0,15	8	1,2
Принтер	1	2,5	0,1	0,25
Итого				1,45

В 2019-ом году стоимость 1 кВтч электроэнергии в Томской области составляет 3,42 руб. Для того, чтобы рассчитать общее количество затрат на электроэнергию при исследовании, надо учитывать стоимость с апреля по май. В таблице 16 приведена общая стоимость использованной электроэнергии.

Таблица 16 – Общая стоимость использованной электроэнергии

Месяц	Количество дней	Количество рабочих дней	Количество потребляемой энергии за месяц, кВтч	Стоимость электроэнергии за месяц, руб.
Апрель	30	22	31,9	109,098
Май	15	6	13,6	29,754

Итого, С ₃	138,852
-----------------------	---------

3.7 Заработная плата исполнителей

Заработная плата исполнителей состоит из основной заработной платы и дополнительной заработной платы и рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{зп} = Z_o + Z_d,$$

где $Z_{зп}$ – заработная плата;

Z_o – основная заработная плата;

Z_d – дополнительная заработная плата (10 – 20 % от Z_o).

Основная заработная плата вычисляется следующим образом:

$$Z_o = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

Среднедневная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{дн} = Z_m \cdot M / F_d,$$

где Z_m – месячный должностной оклад, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочие дни.

Таблица 17 – Баланс рабочего времени

Показатели	Научный	Специалист	Консультант	Консультант	Консультант
------------	---------	------------	-------------	-------------	-------------

рабочего времени	Руководитель		ФЧ	СО	по иностранному языку
Календарное число дней	365	365	365	365	365
Количество нерабочих дней					
– выходные дни	104	104	104	104	104
– праздничные дни	14	14	14	14	14
Потери рабочего времени					
– отпуск	24	60	24	24	24
– невыходы по болезни	0	0	0	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	187	223	223	223

Месячный должностной оклад рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где Z_b – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия составляет 15 – 20% от Z_b);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Таблица 18 – Основная заработная плата

Исполнители	Z_b , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	T_p , раб.дн.	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	Z_o , руб.
Научный	24000	0,3	0,2	1,3	20	46800	2329,50	46590,13

Руководитель								
Консультант по ФЧ	27000	0,3	0,2	1,3	10	52650	2620,69	26206,95
Консультант по СО	17000	0,3	0,2	1,3	10	33150	1650,06	16500,67
Консультант по иностранному языку	17000	0,3	0,2	1,3	5	33150	1650,06	8250,33
Специалист	1906	0	0	1,3	80	2477,8	81,46	6516,95
Итого, С _{озп}								104065,04

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_d = k_d \cdot Z_o,$$

где Z_d – дополнительная заработная плата, руб.;

k_d – коэффициент дополнительной зарплаты (составляет 10 - 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы);

Z_o – основная заработная плата, руб.

В таблице 19 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 19 – Заработная плата

Заработная плата	Основная зарплата	Дополнительная зарплата	Зарплата исполнителя
Руководитель	46590,13	4659,01	51249,14
Консультант по ФЧ	26206,95	2620,69	28827,64

Консультант по СО	26206,95	1650,06	18150,73
Консультант по иностранному языку	8250,33	825,03	9075,36
Специалист	6516,95	0	6516,95
Итого, С _{зп}			113819,86

3.8 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{вбф}} * (З_о + З_д),$$

где $k_{\text{вбф}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Размер страховых взносов составляет 30%. Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Зарплата исполнителя, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель	51249,14	15374,74
Консультант по ФЧ	28827,64	8648,29
Консультант по СО	18150,73	5445,22
Консультант по иностранному языку	9075,36	2722,61
Специалист	6516,95	0
Итого, С _{вбф}		32190,87

3.9 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 80-100 % от общей суммы заработной платы и рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{н}} \cdot C_{\text{зп}},$$

где $k_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. При расчете $k_{\text{н}}$ примем равным 80%. На основе полученных данных о разных статьях затрат вычисляется себестоимость научно-исследовательской работы. Результаты расчетов по бюджету представлены в таблице 21.

3.10 Бюджет научно-исследовательской работы

В таблице 21 приведены расходы по основным статьям и рассчитан бюджет научно-исследовательской работы.

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Затраты, руб.
Материальные затраты	2142
Затраты на спецоборудование для проведения научных исследований	35000
Затраты на электроэнергию	138,852
Заработная плата исполнителей	113819,86
Отчисления во внебюджетные фонды	32190,87
Накладные расходы	91055,88
Итого, С	274347,46

4 Социальная ответственность

Человек является частью общества, он не живет обособленно. И в связи с этим при осуществлении своей деятельности человеку приходится учитывать деятельности других людей. Этот учет заключается как в понимании собственных интересов и ценностей, так и в понимании чужих интересов и ценностей, и проявляется в форме ответственности.

Ответственность является организационным положением, которое обеспечивает дисциплинированность и максимально эффективное отношение человека к своим обязанностям. По сферам существования и действительности выделяют следующие типы ответственности: социальная, экономическая, организационная, политическая, юридическая. В современных условиях среди выделенных типов решающую роль играет социальная ответственность корпораций.

Социальная ответственность – это ответственность, которая возлагается на физическое или юридическое лицо за влияние его деятельности на широкие социальные группы людей и на общество в целом.

Целью настоящей научно-исследовательской работы является оптимизация работы скважины созданием численных моделей призабойной зоны скважины для различных методов перфорации. Модели призабойной зоны скважины для различных методов перфорации созданы использованием академической версии программного пакета ANSYS.

В этом разделе рассматривается здоровье и безопасность работы на рабочем месте в компьютерном классе, так как основная работа производится в закрытом помещении за персональной электронно-вычислительной машиной.

4.2 Производственная безопасность

В таблице 22 приведены опасные и вредные факторы при работе за ПВЭМ в закрытом помещении.

Таблица 22 – Опасные и вредные факторы в рабочей зоне

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Построение модели	Решение	Обработка результатов	
повышенный уровень шума	–	–	–	1. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 2. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ
повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	+	
недостаточная освещенность рабочей зоны	–	–	–	
электрический ток	+	+	+	
пожароопасность	+	+	+	

4.2.1 Анализ вредных производственных факторов

Физические, химические и биологические факторы на рабочем месте влияют на условия рабочей среды. Соответствие вышеперечисленных факторов нормативам оказывает благоприятное воздействие на людей, способствуя сохранению их здоровья, обуславливая проявление способностей и стимулируя желание выполнять рабочие задачи. Как правило, состояние внешней среды считается комфортным, если обеспечивает хорошее самочувствие, оптимальную динамику работоспособности и сохранение здоровья работающего человека.

4.2.1.1 Показатели микроклимата в помещении

Микроклимат – это совокупность физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Микроклимат в помещении оценивается и регулируется параметрами воздуха, такими как

температура, относительная влажность, абсолютная влажность, скорость движения.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 оптимальные параметры микроклимата во всех типах учебных и дошкольных помещений с использованием ПЭВМ должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 23.

Таблица 23 – Оптимальные параметры микроклимата во всех типах учебных и дошкольных помещений с использованием ПЭВМ

Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Абсолютная влажность воздуха, г/м ³	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	10	0,1
20	58	10	0,1
21	55	10	0,1

В помещениях, которые оборудованы персональными электронно-вычислительными машинами, требуется провести систематическое проветривание после каждого часа работы и ежедневную влажную уборку. Оконные проемы, а также дверной проем предназначены для осуществления естественной вентиляции в помещении. Такая вентиляция по зоне действия классифицируется как общеобменная.

4.2.1.2 Уровень шума

Беспорядочная совокупность непериодических звуков различной интенсивности и частоты называют шумом. Шум является одним из наиболее опасных вредных факторов в производстве. Как следствие длительного воздействия шума происходят потеря внимания, снижения остроты слуха и утомление. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 в таблице 24 приведены допустимые значения уровней звукового давления в октавных

полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ. Из таблицы 24 видно, что при выполнении основной работы на ПЭВМ уровень звука на рабочем месте не должен превышать 50 дБА.

Таблица 24 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука в дБА
31,5 Гц	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	
86 дБ	71 дБ	61 дБ	54 дБ	49 дБ	45 дБ	42 дБ	40 дБ	38 дБ	50

Для охлаждения во время работы все ПЭВМ оснащены встроенными вентиляторами, которые являются основным источником шума на рабочем месте. Уровень шума вентиляторов колеблется от 35 до 40 дБА. Следовательно, уровень шума на рабочем месте соответствует вышеуказанным нормам.

4.2.1.3 Уровень электромагнитного излучения

В нашем случае основным источником электромагнитного излучения являются мониторы ПЭВМ. Электромагнитное излучение, генерируемое ПЭВМ, включает в себя широкий диапазон электромагнитных волн. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 в таблице 25 приведены временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Таблица 25 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл

потока	в диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Рабочие места оборудованы персональными компьютерами типа Асер, имеющими следующие характеристики:

- напряженность электромагнитного поля составляет 2,5 В/м;
- поверхностный потенциал составляет 420 В.

4.2.1.4 Освещенность рабочей зоны

Освещение рабочей зоны является важнейшим фактором для создания нормальных условий труда. Освещение подразделяют на следующие виды:

- естественное;
- искусственное;
- совмещенное.

В помещении используется совмещенное освещение, которое включает в себя естественное и искусственное. Естественный свет, проникая через оконные проёмы, обеспечивает нормальную освещенность в помещении. Когда естественного света недостаточно, то для достижения нормальной освещенности помещения используются искусственный свет. В качестве источников искусственного света установлены люминесцентные лампы. Люминесцентные лампы по спектральному составу близки к дневному свету, кроме того обладают более высоким КПД и повышенной светоотдачей.

При недостаточном освещении в помещении ухудшается зрение, из-за быстрого утомления снижается продуктивность работы человека, растет вероятность ошибочных действий, что может привести к травматизму.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 в таблице 26 приведены требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

Таблица 26 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ.

Освещенность на рабочем столе, лк	Освещенность на экране ПЭВМ, лк	Блики на экране, кд/м ²	Прямая блескостность источника света, кд/м ²	Показатель ослепленности	Показатель диском-форга	Отношение яркости		Коэффициент пульсации, %
						между рабочими поверхностями	между поверхностями стен и оборудования	
300-500	300	40	200	20	15	3:1-5:1	10:1	5

4.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды

Факторы, приводящие при определенных условиях к травматическим повреждениям или резким нарушениям здоровья, называются опасными производственными факторами.

4.1.2.1 Электрический ток

Положение электробезопасности регулируется ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. К опасным производственным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества оборудования, которое использует электрический ток. В сети напряжение и частота электрического тока составляют 220 В и частотой 50 Гц соответственно. Из-за отсутствия влажности, высокой температуры, токопроводящей пыли и возможности одновременного соприкосновения с имеющими соединение с землей металлическими предметами и корпусами оборудования, рабочее место можно отнести к помещениям без повышенной опасности.

При нормальном режиме работы оборудования риск поражения электрическим током крайне мал. Не исключены внештатные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение узлов оборудования, находящегося под напряжением, с заземленными конструкциями. К основным мероприятиям по обеспечению электробезопасности относятся:

- изолирование токопроводящих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

При поражении электрическим током тело человека подвергается термическому, электролитическому, биологическому и механическому воздействию, которое может вызывать не только местные повреждения тканей и органов, но и всеобщее поражение, приводя к различным нарушениям в организме.

При термическом воздействии тока на теле происходит нагрев, появляются ожоги, вызывающие серьезные функциональные расстройства органов.

Вследствие электролитического воздействия тока кровь и другие жидкости организма разлагаются, появляются значительные нарушения их физико-химического состава.

Механическое воздействие тока вызывает непроизвольные судорожные сокращения мышц, приводящих к разрывам кожи, кровеносных сосудов, нервной ткани, вывихам суставов и даже переломам костей.

Раздражение и возбуждение тканей, приводящих к нарушениям биологических процессов в них, являются следствием биологического воздействия тока.

Любое из вышеуказанных воздействий может служить причиной электрической травмы. Первая помощь при поражении электрическим током включает в себя следующее:

- необходимо отключить источник электрического тока;
- если невозможно отключить источник электрического тока, то необходимо отделить пострадавшего от токопроводящих частей и оттащить его не менее чем на 10 метров от места поражения;
- после эвакуации пострадавшего из зоны воздействия электрического тока, необходимо вызвать скорую помощь;
- если пострадавший в сознании, то его следует уложить в удобное положение, наблюдать за его пульсом и дыханием;
- если пострадавший в бессознательном состоянии, но у него устойчивое дыхание и пульс, то его следует удобно уложить, расстегнуть одежду, обеспечить приток свежего воздуха, обрызгать лицо холодной водой, поднести к носу вату, смоченную в нашатырный спирт, растирать и согревать тело;
- если у пострадавшего отсутствуют признаки жизни, то необходимо немедленно делать искусственное дыхание и закрытый массаж сердца;
- если пострадавший пришел в сознание, то необходимо укрыть и согреть его;
- необходимо следить за состоянием пострадавшего до прибытия медицинского персонала, потому что может наступить повторная остановка сердца;
- доврачебная помощь оказывается непрерывно, даже если время исчисляется часами.

4.2 Экологическая безопасность

Объектом исследования является призабойная зона скважины. Под ПЗС подразумевается зона, прилегающая к стенкам скважины, в которой существенно возрастают фильтрационные сопротивления движению продукции. В данной научно-исследовательской работе моделируются различные методы перфорации, которые напрямую связаны с призабойной зоной. Сами перфорационные работы, которые ведутся в обсаженной скважине, не несут угрозы экологической безопасности окружающей среды. Но в целом как в результате бурения нефтяных и газовых скважин образуются производственно-технологические отходы.

Вопросы охраны окружающей среды актуальны для отрасли, и в связи с этим нефтегазовые предприятия применяют комплекс природоохранных мер, включающих мероприятия по очистке, обезвреживанию и утилизации отходов, таких как отработанные буровые растворы, буровой шлам и буровые сточные воды.

Повторное использование ОБР для бурения новых скважин является эффективным способом в рамках утилизации отходов, поскольку оправдан как с экологической, так и экономической точек зрения.

В настоящее время для захоронения БШ после окончания бурения скважины используются земляные амбары, непосредственно находящиеся на территории буровой. Захоронение БШ в земельных амбарах широко применяется в практике, но не является надежным способом с точки зрения экологической защиты.

С целью обеспечения экологической безопасности разрабатываются нормативы, усовершенствуется законодательство, изучается зарубежный опыт, применяются новые технологии. Разведка, бурение, разработка нефтяных и газовых месторождений, а так же транспортировка нефтепродуктов должны осуществляться при соблюдении мер по охране недр и окружающей среды.

4.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном разделе рассматривается безопасность в чрезвычайных ситуациях, в частности пожарная безопасность, так как наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар. Согласно Федеральному закону от 21.12.1994 N 68-ФЗ (ред. от 23.06.2016) "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При эксплуатации современных ПЭВМ выделяется значительное количество теплоты, которое может привести к повышению температуры отдельных его компонентов. При повышении температуры отдельных компонентов может возникнуть процесс оплавления или оголения изоляции соединительных проводов, который приведет к короткому замыканию, сопровождающееся в свою очередь, искрением.

Для предотвращения распространения пожара предусматриваются мероприятия, ограничивающие площадь, интенсивность и продолжительность горения. К ним относятся:

- конструктивные и объёмно-планировочные решения, препятствующие распространению опасных факторов пожара по помещению;
- ограничения пожарной опасности строительных материалов используемых в поверхностных слоях конструкции здания, в том числе кровель, отделок и облицовок фасадов, помещений и путей эвакуации;
- снижение технологической взрывопожарной и пожарной опасности

помещений и зданий;

- сигнализация и оповещение о пожаре.
- план эвакуации людей при пожаре;
- установление системы автоматической противопожарной сигнализации.

Соблюдение норм при монтаже электропроводки, отсутствие электрообогревательных приборов и дефектов в розетках и выключателях делает маловероятным возникновение пожароопасной ситуации в данном помещении.

4.3.1 Пожарная безопасность на рабочем месте

Согласно Федеральному закону от 21 декабря 1994 г. N 69-ФЗ "О пожарной безопасности" пожарная безопасность – состояние защищенности личности, имущества, общества и государства от пожаров. Согласно пункту 10 статьи 27 Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 29.07.2017) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" данное помещение можно отнести к категории Д.

В помещении для питания разного рода техники и освещения имеется электропроводка, по которой течет электрический ток напряжением 220 В. При неправильной эксплуатации, технической неисправности оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

В таблице 27 приведены противопожарные мероприятия, соответствующие категории Д.

Таблица 27 – Противопожарные мероприятия

Пожарно-профилактические	Организационные мероприятия	Эксплуатационные мероприятия	Технические мероприятия
--------------------------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------

мероприятия			
организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта	противопожарный инструктаж обслуживающего персонала	противопожарный инструктаж обслуживающего персонала	соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения
эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования	обучение персонала правилам техники безопасности	обучение персонала правилам техники безопасности;	
технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов	издание инструкций, плакатов, планов эвакуации	издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.	

В коридоре имеется порошковый огнетушитель типа ОП-5, рубильник, на двери приведен план эвакуации в случае пожара, и, на достигаемом расстоянии находится пожарный щит. Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2 или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно своевременно организовать эвакуацию людей, позвонить в пожарную службу.

4.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

При разработке данного раздела учтены все необходимые нормы и

требования законов Российской Федерации при работе с персональными электронно-вычислительными машинами.

Работа проходила в компьютерном классе, который расположен в 218 аудитории 3 учебного корпуса НИ ТПУ. В аудитории имеется 15 рабочих мест. Каждое из них представляет собой компьютерный стол, оснащенный персональным компьютером. Площадь и объем помещения составляет 45 м^2 и 135 м^3 соответственно. Оконные проемы оборудованы регулируемыми устройствами.

Согласно пункту 4 статьи 4 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 площадь, отведенная на одно рабочее место, должна быть не менее $6,0 \text{ м}^2$. Обычно в помещении одновременно работают не более 6 человек, следовательно, нормы по площади выполняются.

Согласно приказу Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 12 апреля 2011 г. N 302н (ред. от 06.02.2018) "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" работы профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ не входят в перечень вредных и (или) опасных производственных факторов и работ. Электромагнитное поле широкополосного спектра частот от ПЭВМ (работа по считыванию, вводу информации, работа в режиме диалога в сумме не менее 50% рабочего времени) входит в перечень вредных и (или) опасных производственных факторов, при наличии которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования).

Согласно статье 91 Трудового Кодекса Российской Федерации нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Согласно статье 92 Трудового Кодекса РФ сокращенная

продолжительность рабочего времени при проведении работ профессионально связанных с эксплуатацией ПЭВМ не предусмотрена. Согласно статье 108 Трудового Кодекса Российской Федерации в течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

Согласно пункту 2 статьи 3 ТОИ р-45-084-01 продолжительность непрерывной работы с компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать двух часов. Продолжительность и частота перерывов зависит от категории работы с компьютером и уровня нагрузки, которая приведена в таблице 28.

Таблице 28 – Время регламентированных перерывов

Категория работы	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с компьютером			Суммарное время регламентированных перерывов, мин.	
	Группа А, количество знаков	Группа Б, количество знаков	Группа В, час	при 8-часовой смене	при 12-часовой смене
I	До 20000	До 15000	До 2,0	30	70
II	До 40000	До 30000	До 4,0	50	90
III	До 60000	До 40000	До 6,0	70	120

Заключение

В ходе работы были созданы 4 модели, 3 из которых относятся к разным методам перфорации и одна к скважине с открытым забоем. После расчетов всех моделей были получены притоки. Наибольший приток флюида был получен из скважины с открытым забоем, что и ожидаемо. Среди методов перфораций с точки зрения получения наибольшего притока флюида в скважину оптимальным оказался механический сверлящий метод перфорации. Приток флюида в скважину при механической сверлящей перфорации оказался на 2% больше чем при кумулятивной перфорацией и на 5,5 % больше чем при гидropескоструйной перфорации.

Вычислительная гидродинамика может применяться как при выборе метода перфорации, так и при оценке эффективности выполнения перфорационных работ. Таким образом, применение вычислительной гидродинамики при проведении перфорационных работ может стать дополнительным инструментом для повышения их эффективности.

Список публикаций студента

1. Рамазанов Т.Р. Применение методов численного моделирования к призабойной зоне скважины// Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума им. М.А. Усова студентов и молодых ученых, Томск, 2019. - Томск: Изд-во ТПУ, 2019.

Список литературы

1. ANSYS. ANSYS Fluent Tutorial Guide, Release 18.0. Ansys Inc., Canonsburg, 2017.
2. Kevin D. Dahm, Donald P. Visco. Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics. – Cengage Learning, 2014. – 800 p.
3. Cengel Y., Cimbala J. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. – New York: McGraw-Hill Education, 2006. – 956 p.
4. Dake, L.P., Fundamentals of Reservoir Engineering. – Amsterdam: Elsevier, 1978. - 498 p.
5. Multi-author, Petroleum Well Construction. – Duncan, Oklahoma, 1997. – 903 p.
6. Molina, Oscar Mauricio, "Application of Computational Fluid Dynamics to Near-Wellbore Modeling of a Gas Well" (2015). LSU Master's Theses.404.
7. Susan Moloney, "Three-Dimensional Reservoir Inflow Modelling using Computational Fluid Dynamics" (2010). Imperial College London Master's Theses.
8. Chorin, Alexandre E.; Marsden, Jerrold E. (1993). A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics.
9. Яремийчук Р.С., Качмар Ю.Д. Вскрытие и освоение скважин. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1982.-152 с.
10. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Заканчивание скважин. Учеб. пособие для вузов. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2000. – 670 с.
11. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. - М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015.- 448 с.: ил.
12. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для

вузов. – М: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 816 с.

13. Дашевский А.В., Кагарманов И.И., Зейгман Ю.В., Шамаев Г.А. Справочник инженера по добыче нефти. _____ 2002, – 163с.

14. Термодинамика и теплопередача в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности/ А.Ф. Калинин, С. М. Купцов, А.С. Лопатин, К.Х. Шотиди: Учебник для вузов. - М.: Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. - 264 с.: ил.

15. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика: Учебное пособие для вузов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 544 с.

16. Подгорнов В.М. Заканчивание скважин: В двух частях: Часть Формирование крепи скважины: Учебник для вузов. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 264 с.: 16 вкл.

17. Подгорнов В.М. Заканчивание скважин. Часть 2. Формирование призабойной зоны скважины: Учебник для вузов. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2008. – 253 с.: ил.

18. Харламов С.Н. Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов. – Томск. Изд-во ТПУ, 2008. - 80с.

19. Коротков.Э.М., Александрова.О.Н., Антонов.С.А. и др. Корпоративная социальная ответственность: Учебник для бакалавров. – М.: Издательство Юрайт, 2013. – 445с.

20. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1).

21. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 12 апреля 2011 г. N 302н (ред. от 06.02.2018) "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".

22. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы".

23. ТОИ р-45-084-01 "Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере".

24. Трудовой Кодекс Российской Федерации.

25. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 29.07.2017) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

26. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. N 69-ФЗ "О пожарной безопасности".

27. ГОСТ Р 55059 – 2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Термины и определения [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2014 – 8 с.

28. ГОСТ Р 12.1.009 – 2009. Электробезопасность. Термины и определения. – М. – Из-во стандартов. – 16 с.

Приложение А (Справочное)

Application of Computational Fluid Dynamics to bottomhole zone

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ7Э	Рамазанов Тураб Раджаб оглы		

Консультант школы отделения (НОЦ) _____ (аббревиатура школы, отделения (НОЦ)) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Никульчиков А.В.	к.ф-м.н		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы _____ (аббревиатура отделения (НОЦ) школы) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Гутарева Н.Ю.	к.п.н.		

Introduction

After an oil or gas well is completed, the wellbore is isolated from the surrounding formation by casing and cement sheath. Establishing hydrodynamic connection between the wellbore and formation, for either production or injection, requires some perforating operation. Perforating is the process of creating holes in the casing that pass through the cement sheath and extend some depth into the formation. Depending on the perforation method used, the mechanical and physical properties of the perforated materials, the length of the perforation channels in the reservoir can vary from 0 to several centimeters. The holes may be dispersed in an angular pattern around the interior of the wellbore. The radial distribution of the holes around the interior of the wellbore is called phasing. The number of holes per linear meter, which is called perforation density, can vary from 1 to several dozen holes. Figure 10-1 shows the geometry of a typical perforated wellbore [4].

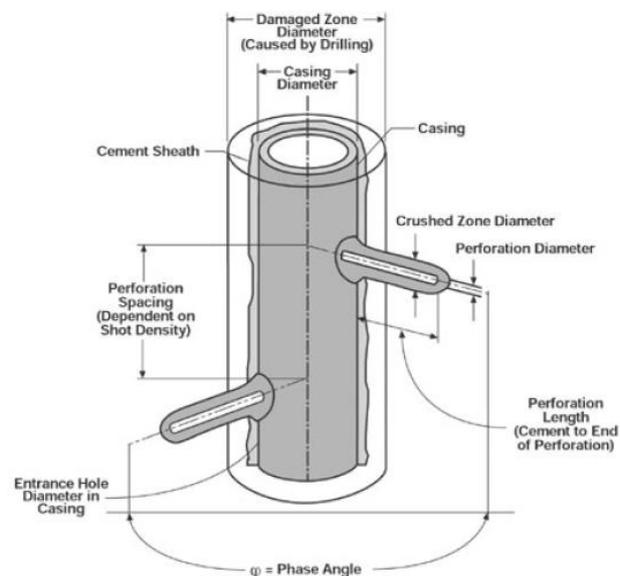


Fig.1. – Perforated Wellbore Geometry

The geological and technical conditions of the secondary penetration of reservoir in cased wells have three performance criteria [8]:

- reliable connection between the reservoir and the well due to the perforation channels;
- total penetration surface on the casing in the form of holes and slots;
- maintaining the stability of the casing and cement sheath both in the zone and outside the penetration.

Penetration of the reservoir by perforation in cased wells is one of the most important operations during their construction, since the further success of the well test, the reservoir inflow and the well development as an object of operation depend on it.

1 Theory

1.1 Statement of problem

Modeling the well bottomhole zone requires combining separate physical models that describe the behavior of the fluid flow in each of the areas that are part of a holistic model. The model of the well bottomhole zone usually consists of a porous medium, a well bore and perforation channels, but in the case of modeling the open bottomhole perforations are absent. Fluid flow in a porous medium is described by Darcy's law the physical model of fluid flow in the wellbore and perforation channels is based on the Navier-Stokes equations.

Methane gas is selected as a simulated fluid. Taking into account that the properties of a gas change depending on pressure and temperature, it is necessary to apply the equation of state for real gases. The basic equations of state for real gases, which are often used, are the Soave-Redlich-Kwong and Peng-Robinson equations. Fluid flow is isothermal, single phase, single component, compressible, steady state. The porous medium in the bottomhole zone is homogeneous, the walls of the perforation channels are ideally smooth. Поскольку в призабойной зоне и примыкающих к ней перфорационных каналах загрязнение и повреждение отсутствуют, то скин-эффект не будет учитываться.

Viscosity depends only on temperature. Since the temperature inside the reservoir is assumed to be constant, the model is based on a constant viscosity value for methane, although this may seem to be a disadvantage of the presented modeling approach. It should be noted that the pressure to a small extent affects the viscosity of methane, so the error introduced by the assumption of a constant viscosity is not significant.

This study is focused on the modeling of various methods of perforation, as well as the bottomhole zone with open-hole. To simulate the thermodynamic properties of a fluid, the Soave-Redlich-Kwong equation was chosen as the equation of state for real gases.

1.2 Darcy's law and the continuity equation for filtration in a porous medium.

The basic law of fluid motion in a porous medium is the Darcy law, which was experimentally established by the French engineer Henri Darcy in 1856. There are several forms of recording the Darcy's law. For a one-dimensional flow, the Darcy's Law has a scalar form and is written in the following way:

$$q = \left(\frac{kA}{\mu} \right) \frac{P_i - P_f}{L}, \quad (1)$$

where q – volume flow rate;

k – permeability;

A – cross-sectional area;

μ – dynamic viscosity;

P_i – initial pressure;

P_f – final pressure.

For the three-dimensional flow, the Darcy's law has a vector form and is written in the following way (2):

$$\vec{v} = \frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g), \quad (2)$$

where \vec{v} – velocity vector;

∇ – nabla;

p – pressure;

ρ – density;

g – gravitational acceleration.

A significant number of scientific papers are devoted to testing and studying the applicability of Darcy's law. As a result of the research, it was

revealed that the Darcy law has upper and lower limits of applicability. The upper limit of applicability of the Darcy's law is determined by a group of reasons related to the appearing of inertial forces at high filtration rates. In the case of high flow velocities, inertial effects become significant, due to which the relationship between the pressure drop and the flow rate becomes nonlinear. At enough low filtration rates, the fluid interacts with the solid skeleton of the porous medium, exhibits non-Newtonian properties, which determine the lower limit of applicability of the Darcy's law. The continuity equation for fluid filtration in a porous medium for a compressible medium is written as follows [3], [7]:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = 0, \quad (3)$$

where m – porosity.

1.3 Navier-Stokes equation and the continuity equation

The Navier-Stokes equations are a system of partial differential equations describing the flow of a viscous fluid. For the first time these equations were obtained by Navier in 1822. and Poisson in 1829. Later these equations were obtained by Saint-Venant in 1843. and then Stokes in 1845. Today complete theory of viscous flows is developed on the basis of the Navier-Stokes equations. Usually, the Navier-Stokes equations (4) are supplemented by the continuity equation (5) and are written in vector form for a compressible viscous medium as follows [2], [5]:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} \right) = \vec{F} - \nabla p + \zeta \nabla \vec{v} + \mu \left(\Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \text{graddiv} \vec{v} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = 0 \quad (5)$$

where \vec{F} – external forces;

Δ – Laplacian;

t – time;
 ζ – volume viscosity;
 $grad$ – gradient;
 div – divergence.

For an incompressible medium, the Navier-Stokes equations (5) and the continuity equation (6) take the following form:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = \vec{F} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v}, \quad (6)$$

$$\nabla(\vec{v}) = 0. \quad (7)$$

Since the medium is viscous and compressible, fluid flow in the perforation channels and in the wellbore is described by formulas (4) and (5).

1.4 Equation of state for real gases

The relationship between the parameters characterizing the state of a thermodynamic system is called the equation of state. In the case of a simple body, the equation of state implicitly has the following form $F(p, v, T) = 0$. The Redlich-Kwong equation of state is an empirical algebraic equation that relates pressure, temperature, and volume of gases. This equation was proposed by Otto Redlich and Joseph Nen Shun Kwong in 1949. There are several modifications of the Redlich-Kwong equation. One of them is a modification proposed by Soave in 1972, which is used in modeling. The equation of state for Soave-Redlich-Kwong (8) is written as follows [1]:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b)}, \quad (8)$$

$$a = \alpha a_c, \quad (9)$$

$$a_c = \frac{0,42747R^2T_c^2}{P_c}, \quad (10)$$

$$b = \frac{0,08664RT_c}{P_c}, \quad (11)$$

$$\alpha = (1 + (0,48 + 1,574\omega - 0,176\omega^2)(1 - T_r^{0,5}))^2, \quad (12)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad (13)$$

$$V_m = \frac{V}{n}, \quad (14)$$

где R – universal gas constant;

V_m – molar volume;

V – volume;

b – parameter that accounts for the volume of the particles;

a – parameter that accounts for the effect of intermolecular attractions on pressure at given temperature;

a_c – parameter that accounts for the effect of intermolecular attractions on pressure at critical temperature;

p_c – critical pressure;

T – absolute temperature;

T_c – critical temperature;

T_r – reduced temperature;

n – mole;

α – ratio of a to a_c ;

ω – acentric factor;

1.5 Perforation methods

Bullet perforators were the first commercial perforating devices. Bullet perforation first found its commercial use in the early 1930s.

During the 1930s and 1940s, scientific researches in the area of shaped charges were conducted for the military purposes. Bazooka with its armor piercing charges was one of the first large-scale applications of technology in the oil industry. Cumulative perforation began to be widely used since the late 40s of the 20th century and is still the most common perforation method.

There are alternative methods of perforation based on chemical reactions, drilling and high-pressure liquid jets.

According to the principle of operation of technical means and technologies used for perforation of wells, all methods can be classified as::

- explosive;
- hydrodynamic;
- mechanical;
- chemical.

1.5.1 Explosive methods

Explosive techniques include bullet, torpedo and cumulative perforations. Cumulative perforation was chosen for modeling, since it is widely used compared to the others.

The shaped charge is the explosive component that actually creates the perforation. It is a simple device consisting of a casing, an explosive **substance** and a metal lining, as shown in Fig.2.

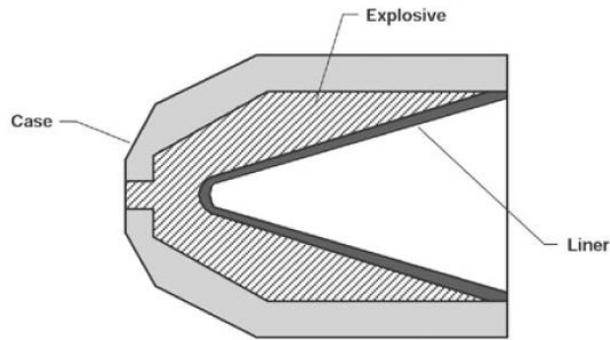


Fig.2. – Shaped charge

The process of jet formation and destruction of the metal lining begins with the detonation of the explosive at the base of the charge. The detonation wave propagates through the explosive, chemically releasing its energy. High-pressure gases at the front of the detonation impart a pulse that destroys the metal lining along the axis of symmetry. Thus, gases and softened metal moving to the axis of symmetry form a flow which is called a cumulative jet. The pressure along the central line can reach 0.3 million MPa, and the speed at the head of the cumulative jet can vary in the range of 6-8 km / s. The tensile strength of metals is much lower than the pressure of a cumulative jet.

The process of penetration of the cumulative jet is similar to the flow of water under high pressure, penetrating through the block of gelatin. The tensile strength of gelatin is so small that it has no resistance to the flow of water. In fact, the same process occurs with a cumulative jet penetrating the wall of the casing, only at much higher pressures. (fig.3.).

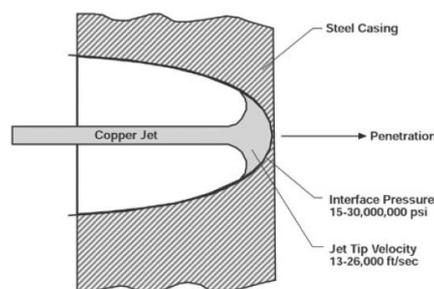


Fig.3. – Schematic of Penetration Process

A cumulative jet, passing through the wall of the casing, cement stone and penetrating the rock, forms a hole, which is called the perforation channel. Depending on the shape and material of the liner, different collapse and penetration characteristics will result [4].

Fig.4. shows the profile of the perforation in longitudinal section, which is used in the model of cumulative perforation. These dimensions are identical to those used in the geometric model for cumulative perforation.

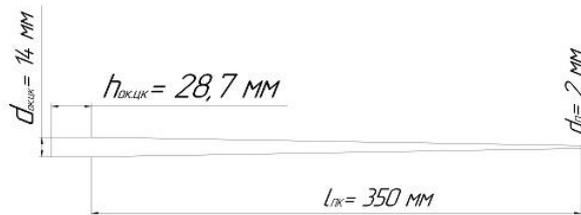


Fig.4. – Channel profile

The total length of the perforation channels is calculated by the following formula:

$$l_{fl} = h_{c.cs} + l_{pc} , \quad (15)$$

where l_{fl} – full length;

$h_{c.cs}$ – total wall thickness of the casing and cement sheath;

l_{pc} – the length of the perforation channel in the rock.

1.5.2 Hydrodynamic methods

Hydrodynamic methods began to be used in the 1960s as a means of perforating the casing, cement sheath and rock by pumping fluid under high pressure. Depending on the composition, high-pressure jets are divided into erosive and abrasive ones. Erosive jets are mainly composed of water and, in rare cases, lightweight drilling mud. Abrasive jets are composed of liquid and abrasive particles that are in suspended state. Quartz sand, steel shot, etc. are used as abrasive particles. At the present time, sand jet perforation is considered the most promising among hydrodynamic methods. This method is used to form channels

and slots with a large filtration surface in cased and uncased wells. It is based on the use of the kinetic energy of the jet, consisting of fluid and sand. Fluid-sand jet is formed by nozzles installed in the sand jet apparatus. Pumping units, production tubing and sand jet apparatus are used to create perforation channels. The production tubing and jet apparatus is lowered into the well. Pumping units inject the mixture of fluid and sand into the production tubing. In the nozzles of sand jet apparatus, the potential energy of the mixture passes into kinetic energy, which is sufficient to destroy the casing wall, cement sheath and form a pear-shaped cavity (fig.5.) in the rock. The removal of particles of destroyed rock from the channel is carried out by return flows of fluid, and the particles rise to the day surface through the annular space. The process of producing channels and slots in cased wells can be divided into two stages. At the first stage, a hole is made in the wall of the casing, and at the second stage, a channel and a slot in the cement sheath and rock are produced [6],[10].

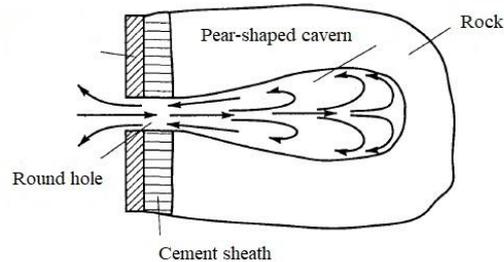


Fig.5. – Scheme of channel formation

The fig.6. shows the profile of the perforation channel in longitudinal section, which is used in the sand jet perforation model. These dimensions are identical to those used in the construction of the geometric model for the sand jet perforation model.

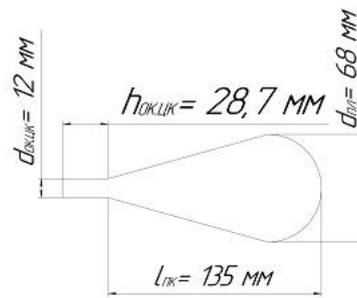


Fig.6. – Channel profile

The full length of the perforation channel is calculated by the formula (15). The nominal diameter of the perforation channel in the rock is calculated by the following formula:

$$D_{pc} = - 3,8 + 0,53l_{pc}, \quad (16)$$

where D_{pc} – nominal diameter of the perforation channel .

1.5.3 Mechanical methods

The mechanical method of perforation is carried out by mechanical drilling or slot perforators. Currently, drilling perforators used in Russia are the following:

- PS – 112;
- PGSP;
- PS – 500.

In this study, the dimensions of the perforation channels used for the simulation are referred to the PGSP.

The perforator consists of hydraulic and electromechanical systems. These systems, in addition to drilling channels, ensure the fixation of the perforator in the well during drilling process. Power transmission to the perforator is carried out using a wireline cable. The drilling process is controlled from the surface panel, and the control and recording of all parameters is carried out by a computer [9].

When using a mechanical drilling perforator, the forming perforation channels have cylindrical shape. In Fig.7. shows the profile of the perforation in longitudinal section, which is used in the model of mechanical drilling perforation.

The specified dimensions are identical to those used in the construction of the geometric model for mechanical drilling perforation.

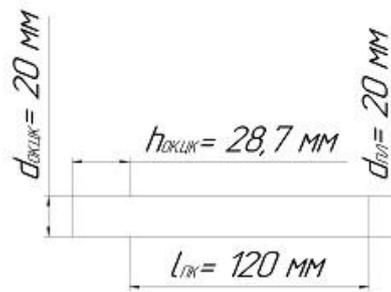


Fig.7. – Channel profile

The full length of the perforation channel is calculated by the formula (15). Due to the insignificant temperature effect, the melting of the perforation walls is prevented. Burrs on the casing are absent; the walls of the perforation channels are smooth.

1.6 Open-hole

The part of the well that is formed by the overburden is called bottomhole. Throughout the lifetime, the bottomhole determines the efficiency of the well. There are the following typical designs of bottomhole:

- perforated casing;
- liner;
- screen;
- open-hole.

A well with an open-hole is selected for modelling (fig.8.). It is considered hydrodynamically perfect, provided that the reservoir is completely penetrated and there is no contamination of the bottomhole zone with the mud. The remaining models are considered hydrodynamically imperfect, since the bottomhole in each of the models is blocked by a perforated casing [8], [9].

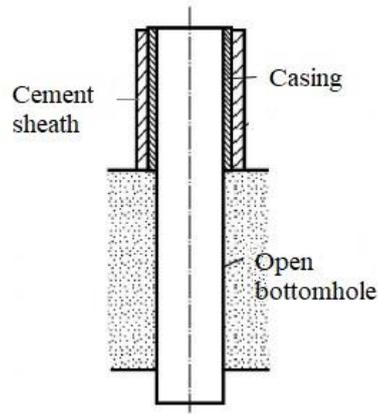


Fig.8. – Well with an open bottomhole

The results of this model will be used in determining the hydrodynamic well perfection coefficient (17) and the coefficient of imperfection by the nature of the penetration for the other models. The hydrodynamic well perfection coefficient (17) and the coefficient of imperfection by the nature of the penetration (18) are determined by the following formulas:

$$\varphi = \frac{Q_i}{Q_p}, \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \ln \frac{R_c}{r_w}, \quad (18)$$

ГДЕ φ – hydrodynamic well perfection coefficient;

Q_i – production rate of imperfect well;

Q_p – production rate of perfect well;

C_2 – coefficient of imperfections by the nature of the penetration;

R_c – radius of bottomhole zone;

r_w – well radius.

Bibliography

1. Kevin D. Dahm, Donald P. Visco. Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics. – Cengage Learning, 2014. – 800 p.
2. Cengel Y., Cimbala J. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. – New York: McGraw-Hill Education, 2006. – 956 p.
3. Dake, L.P., Fundamentals of Reservoir Engineering. – Amsterdam: Elsevier, 1978. - 498 p.
4. Multi-author, Petroleum Well Construction. – Duncan, Oklahoma, 1997. – 903 p.
5. Chorin, Alexandre E.; Marsden, Jerrold E. (1993). A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics.
6. Яремийчук Р.С., Качмар Ю.Д. Вскрытие и освоение скважин. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1982.-152 с.
7. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика: Учебное пособие для вузов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 544 с.
8. Подгорнов В.М. Закачивание скважин. Часть 2. Формирование призабойной зоны скважины: Учебник для вузов. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2008. – 253 с.: ил.
9. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. - М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015.- 448 с.: ил.
10. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов. – М: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 816 с.