

МИНОБРНАУКИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
(СПбГМТУ)

Допущен к защите
Заведующий кафедрой
(Вербицкий С.В.)


«__» _____ 2021г.

Факультет Кораблестроения и океанотехники
Кафедра Океанотехники и морских технологий
Направление подготовки 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и
(код, наименование)
системотехника объектов морской инфраструктуры
Профиль 26.03.02.03 Океанотехника
(код, наименование)

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

На тему Оценка экологических последствий
утечек нефти из трубопровода терминала
Варандей

ОБУЧАЮЩИЙСЯ Требух Ф.И. ()
(Ф.И.О.) (подпись)

РУКОВОДИТЕЛЬ Гончаров В.К. ()


Санкт-Петербург
2021 г.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
(СПбГМТУ)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
(Вербицкий С.В.)

(подпись) (ФИО)

« ____ » _____ 2021 г.

Факультет Кораблестроения и океанотехники
Кафедра Океанотехники и морских технологий
Направление подготовки 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и
(код, наименование)
системотехника объектов морской инфраструктуры
Профиль 26.03.02.03 Океанотехника
(код, наименование)

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Обучающийся Требух Фаина Ивановна
Тема работы: Оценка экологических последствий утечек нефти из трубопровода терминала Варандей.
Исходные данные Морской трубопровод длиной 22.6 км.
Расчетная пропускная способность 4000 м³/ч.

Содержание расчетно-пояснительной записки:

1. Анализ данных о возникновении и развития утечек нефти из морских трубопроводов и выбор расчетных моделей для оценки экологических последствий.
2. Экспериментальное исследование образования и всплытия капель нефти.
3. Сбор и анализ данных о нефтепроводе и гидрологических условиях в акватории терминала «Варандей», исходные данные для расчетов.
4. Результаты расчетов распространения нефтяного загрязнения в водной массе и на поверхности моря.

Перечень графического материала
Графики с результатами расчетов

Дата выдачи

Дата представления работы
на кафедру

«08» февраля 2021 г.

«07» июня 2021 г.

Принял задание к исполнению

Руководитель

(подпись обучающегося)

(подпись)

Аннотация

Работа содержит: 49 страниц, 10 таблиц, 16 рисунков, 5 приложений.

Ключевые слова: морской трубопровод, утечки нефти, экологические последствия, оценка размеров нефтяных капель, скорость всплытия капель.

В данной работе рассматривается проблема прогнозирования экологических последствий, которые могут возникнуть вследствие утечек нефти из трубопроводов, расположенных на морском дне. Излагаются основные положения математических моделей, которые описывают распространение капель нефти в водной среде и образование нефтяных slickов на поверхности моря. Оцениваются экологические последствия, связанные с вытеканием капель нефти из донного трубопровода. Эффективность моделей иллюстрируется результатами расчетов.

Оглавление	
Принятые сокращения:	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОПИСАНИЕ ТЕРМИНАЛА ВАРАНДЕЙ	9
2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ	14
3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ УТЕЧКИ НЕФТИ ИЗ МОРСКОГО ТРУБОПРОВОДА (МАЕСОЛМР)	18
4. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ УТЕЧКИ НЕФТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДА С МОРСКОГО ДНА	22
4.1 Выбор вероятного положения отверстия на трубопроводе и его размера	22
4.2 Расчет скорости утечки нефти из отверстия для выбранных размеров и положения	23
4.3 Оценка вероятных средних размеров нефтяных капель для выбранного диаметра отверстия	24
4.4 Расчет границ шлейфа, составленного из капель нефти, и его ориентации в водном пространстве	27
4.5 Оценки размеров нефтяного загрязнения	27
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ВСПЛЫТИЯ КАПЛИ ОТ ЕЕ РАЗМЕРА ОПЫТНЫМ ПУТЕМ	30
5.1 Место и условия проведения работы	30
5.2 Схема установки	30
5.3 Таблицы измерений	31
5.4 Вычисление погрешности	42
5.5 Зависимость размера капли нефти от диаметра отверстия	45
5.6 Зависимость скорости всплытия капли от ее размера	45
5.7 Вывод по лабораторной работе	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
Список использованных источников	49
Приложение А. Программа для расчета экологических последствий утечек нефти из донных трубопроводов.	51
Приложение Б. Программа для оценки размеров нефтяного загрязнения.	57

Приложение В. Программа для расчета погрешности. Вычисление среднего арифметического значения скорости всплытия капли.	61
Приложение Г. Расчет суммарной погрешности.	71
Приложение Д. Расчет относительной и абсолютной погрешностей.	72

Принятые сокращения:

КЗ ПС – камера запуска поточных средств

КП ПС – камера приёма поточных средств

СМЛОП- Стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал

БРП- береговой резервуарный парк

ВВЕДЕНИЕ

Нефтяное загрязнение поверхности моря и береговой черты является наиболее опасным последствием разливов нефти вследствие аварий и различных повреждений при транспортировке добытой нефти с платформ к потребителям на побережье. Поэтому при проектировании сооружений для разработки шельфовых месторождений нефти требуется обязательно предварительная оценка воздействия на окружающую среду функционирования добывающей нефть техники, танкерного флота и трубопроводов. Крупномасштабные разливы нефти вследствие столкновения или посадки на мель танкеров достаточно хорошо исследованы теоретически и экспериментально, и к настоящему времени созданы и эффективно применяются для вышеупомянутых целей эффективные методы и различные компьютерные программы [1].

В то же время интенсивно развивается транспортировка нефти морскими донными трубопроводами, особенно в мелководных внутренних морях, таких как Печорское море и Северное море. Утечки нефти из донных нефтепроводов могут произойти вследствие появления коррозионных свищей в стенках труб, на дефектах производства или сварки, а также благодаря появлению повреждений: трещин или разрывов, вызванных действием нагрузок различных типов. Также представляют опасность ледовые нагрузки в замерзающих морях [2]. Такие утечки имеют малую интенсивность, а всплывающая на морскую поверхность нефть образует небольшие по размерам нефтяные пленки, которые невозможно обнаружить с платформы или с берега. Кроме того, свищи и микротрещины скрыты слоем воды, и их очень трудно обнаружить и ликвидировать. В зимнее время последствия утечек нефти скрываются ледовым покровом, которые впитывает нефть и сохраняет ее до таяния льдов. Вследствие длительного действия малые утечки нефти способны вызвать существенные экологические последствия в водной среде и на побережье, в частности, могут нанести ущерб рыбному хозяйству и зонам отдыха.

Для оценки экологических последствий утечек нефти из трубопровода Варандей, связывающего береговую и морскую части, необходимо выполнить следующие задачи:

1. Оценить размер вытекающих капель нефти из донного трубопровода;
2. Рассчитать скорость всплытия образовавшихся капель;
3. Провести гидравлический расчет трубопровода;
4. Оценить интенсивность утечки капель нефти;
5. Оценить распространение вытекающих капель в толщу водной среды;
6. Оценить развитие нефтяного слика и возможность его попадания на берег.

Для достижения поставленных целей необходимо рассмотреть существующие модели возникновения и развития утечек нефти, выделить основные положения оценки экологических последствий утечек нефти из морского трубопровода, на основе которых произвести необходимые расчеты и представить их в графическом виде. А в завершение работы провести собственный эксперимент и опытным путем составить методику для определения зависимости скорости всплытия капли от ее размера и зависимости размера капли нефти от диаметра отверстия.

1. ОПИСАНИЕ ТЕРМИНАЛА ВАРАНДЕЙ

Варандейский терминал – морской отгрузочный терминал – один из уникальнейших проектов, разработанный компанией Лукойл в Баренцевом море для транспортировки нефти с берегового резервуарного парка северным морским путем. Он является самым северным круглогодично действующим нефтяным терминалом в мире, как было отражено в книге рекордов Гиннесса.

Адрес местонахождения: Объект находится в 7,5 км северо-восточнее поселка Варандей, и в 0,8 км от побережья Баренцева моря.
Координаты:

Широта: 69.010226

Долгота: 57.624321

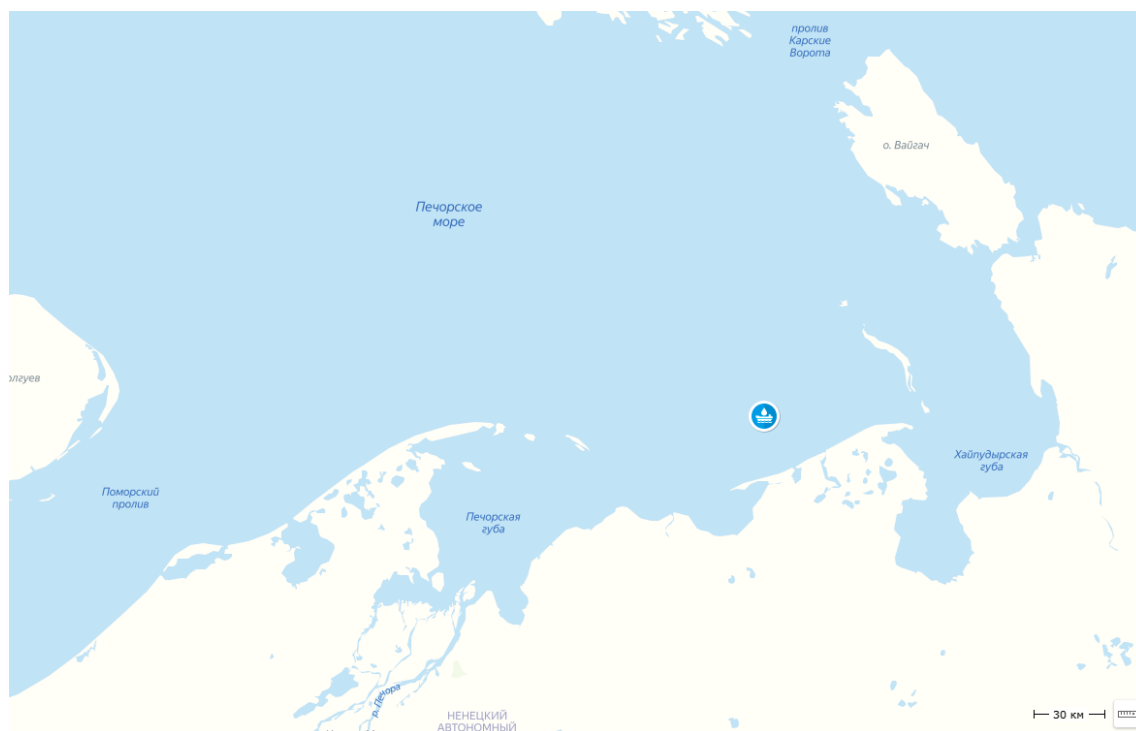


Рисунок 1.1 - Местоположение Варандейского терминала на картосхеме.

Характеристики терминала:

Тип: нефтяной

Год ввода в эксплуатацию: 2008

Пропускная способность: 12 млн. тонн/год

Емкость резервуарного парка: 325 тыс. м³

Максимальная осадка принимаемого судна: 14 м

Максимальное водоизмещение (дедвейт) принимаемого судна: 70 тыс. тонн

Тип причалов: ВПУ (выносные причальные устройства)

Кол-во нефтеналивных причалов: 1

Период навигации: Круглогодично

Вид входящего транспорта: трубопровод

Направления поставки: Экспорт

Состояние: идет отгрузка

Основная задача – круглогодичная перевалка нефти, добываемой в Тимано-Печорской нефтегазозоносной провинции [3].

Рабочие параметры транспортировки нефтепродукта:

Рабочая температура, °С: от 10 до 55

Рабочее давление, МПа (кгс/см²): от 1,6 (16) до 7,0 (70)

Терминал состоит из морской и береговой частей, соединенных подводным трубопроводом. Береговая часть включает в себя насосную станцию, резервуарный парк (БРП), объектов энергообеспечения. Морская часть включает стационарный морской отгрузочный причал (СМОП). Для бесперебойной отгрузки нефти имеются ледокол и буксир.

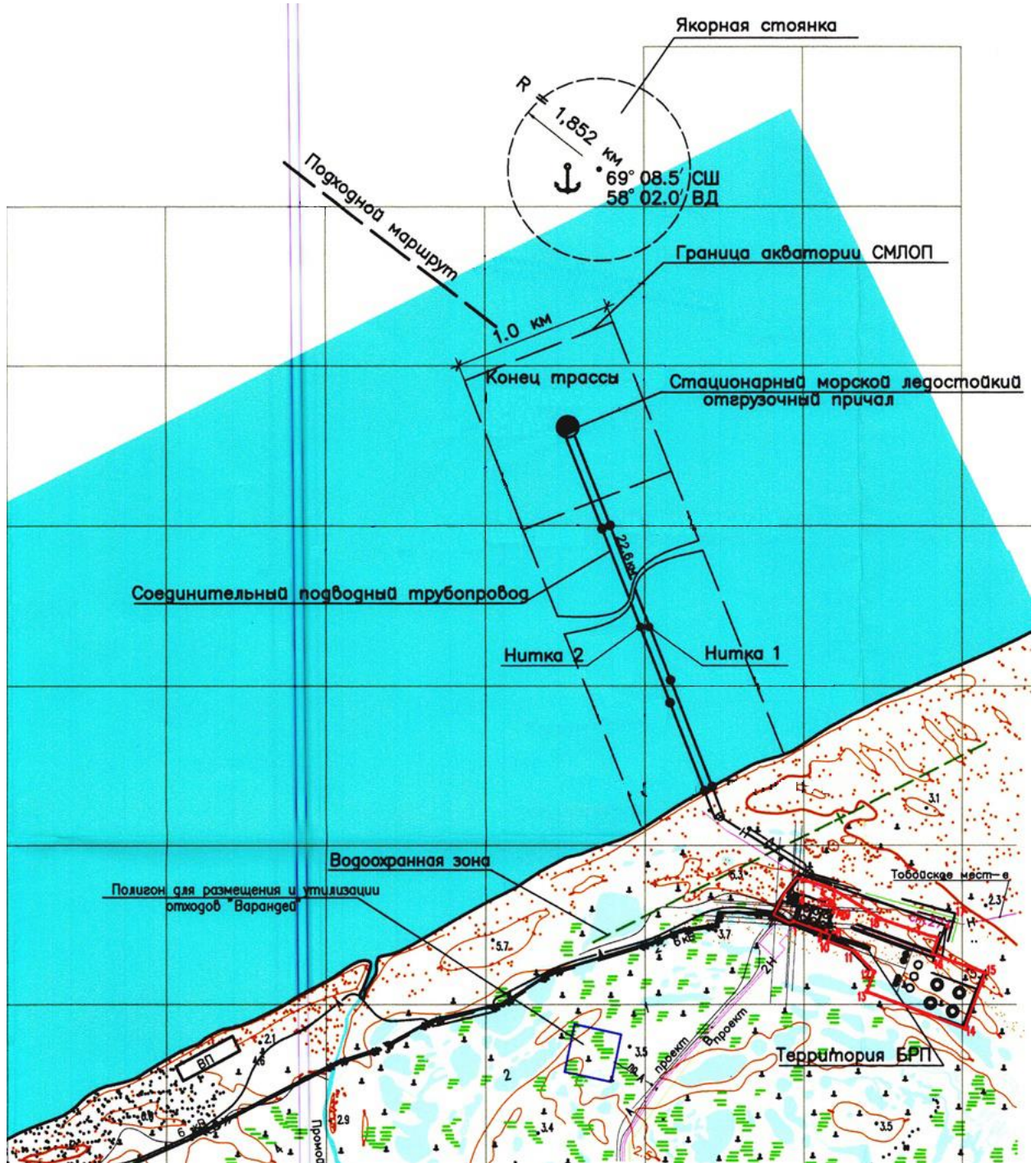


Рисунок 1.2 - Неполная схема генерального плана морского специализированного нефтеналивного порта Варандей.

Характеристики трубы:

Год постройки: 2008

Перекачиваемый продукт: нефть

Количество ниток: 2

Общая длина трубопровода: 22,6 км

Диаметр трубопровода: Ø 820 мм

Толщина стенки:

надземный участок – 14,0 мм;

подземный участок – 20,0 мм;

подводный участок – 20,5 мм;

Расчетное давление: 7.0 МПа (70 кгс/см²)

Расчетная пропускная способность: 4000 м³/ч для каждой нитки

Минимальный предел текучести (предел прочности при растяжении) материала труб
Нефтепровода: 479 МПа (530 МПа)

Марка стали: 10Г2ФБЮ[1]

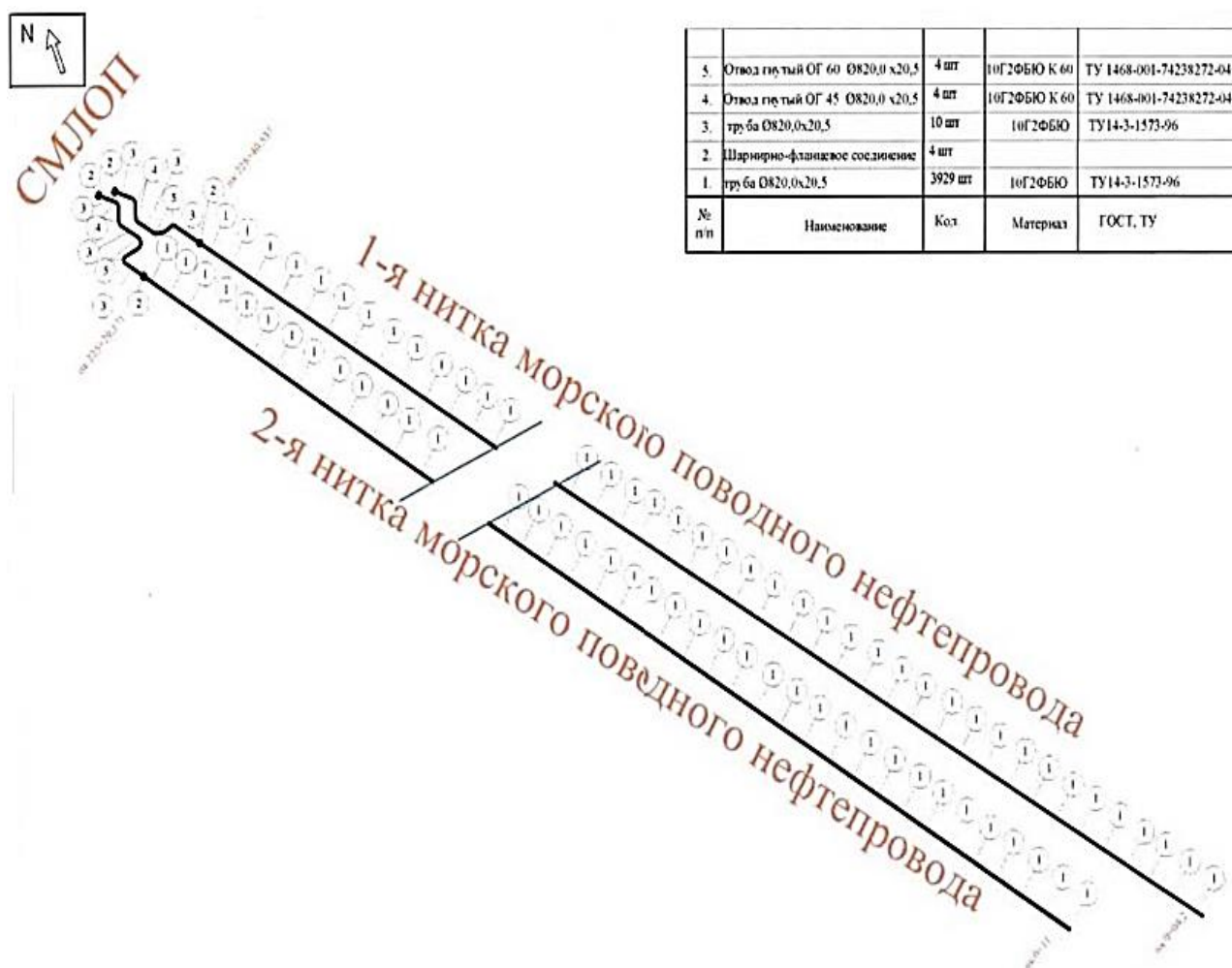


Рисунок – 1.3 Схема Нефтепровода БРП-СМЛОП

В целях безопасности терминала и из условий прочностных характеристик трубопровод заглублен более чем на 1,5 метров в грунт, что так же защищает его от повреждения ледяными торосами. Подземный участок трубопровода изолирован трехслойным наружным защитным полиэтиленовым покрытием со сплошным обетонированием [4].

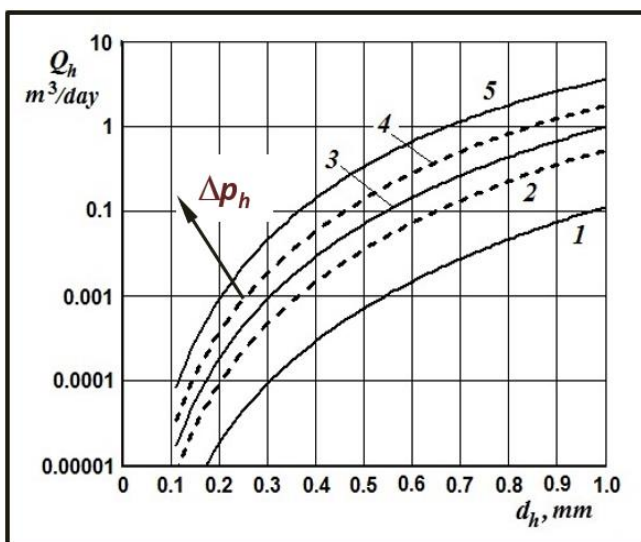
Однако Варандейский нефтепровод, как и все трубопроводы, подвержен различным повреждениям. Утечки, вызванные коррозионными повреждениями трубопроводов и сварных швов, связаны с возникновением и постоянным ростом опасности для морской среды. В данной работе предстоит дать оценку последствиям таких утечек.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ

Проблема оперативного и достоверного обнаружения утечек нефти из нефтепроводов в настоящее время становится все более актуальной в связи с ужесточившимися экологическими требованиями. Интерес к добыче углеводородов на дне Мирового океана постоянно растет, что увеличивает опасность разлива нефтепродуктов в воду. В связи с этим существует необходимость в изучении моделей возникновения и развития утечек нефти. В последнее время всё чаще поднимается вопрос о необходимости анализа последствий небольших, но систематических утечек нефти через свищи, которые неизбежно появляются.

Для оценок интенсивности утечек нефти через свищи, образующиеся вследствие коррозии стенок трубопроводов, используются методы гидравлики для истечения жидкости при постоянном напоре из цилиндрического сопла в затопленное пространство. Такому подходу свойственна некоторая условность, которая связана с априорной известностью параметров свища как элемента трубопровода: его формы, поперечных и продольных размеров. Для упрощения задачи, завышая при этом оценку интенсивности утечек, свищ считается цилиндрическим, его длина принимается равной толщине стенки трубы, диаметр варьируется в некотором обоснованном практическим опытом диапазоне. На Рисунках 2.1 и 2.2 представлены зависимость обнаруживаемой интенсивности утечки нефти из морского трубопровода и диаметра капли нефти от диаметра отверстия, из которого происходит истечение. Это позволяет сделать вывод об увеличении интенсивности утечек нефти при увеличении диаметра отверстия.

Перепад давления на свище определяется гидравлическим расчётом трубопровода, исходя из перепада давления на концах трубопровода, его размеров и шероховатости стенок, а также с учётом глубины расположения свища. Коэффициент истечения учитывает потери на входе и выходе из отверстия, которые выбираются по максимуму из имеющихся опытных данных, а также потери сопротивления при течении нефти по каналу свища (тем выше, чем меньше его диаметр).



$$Q_h = \frac{\pi d_h^2}{4} w_h = \mu \frac{\pi d_h^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_h}{\rho_o}} \quad (2.1)$$

Интенсивность утечки нефти - Q_h ,

диаметр отверстия - d_h ,

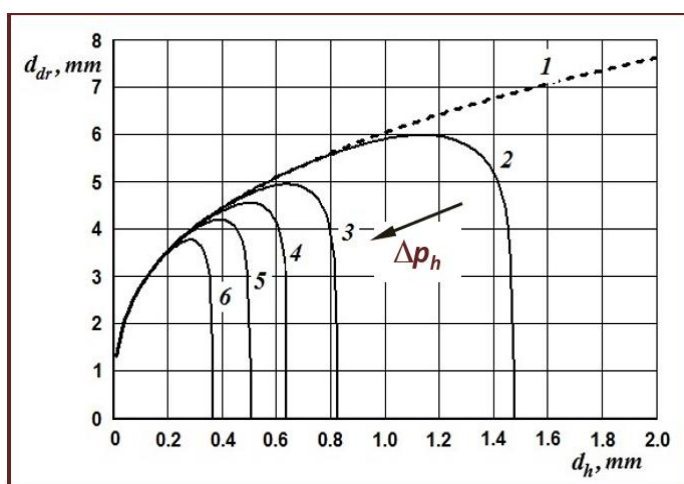
коэффициент сопротивления - μ ,

плотность нефти - ρ_o ,

перепад давления - Δp_h ,

скорость всплытия капель - w_h

Рисунок 2.1 – Математическая модель образования капель нефти при утечках из морских донных источников



Диаметр капель нефти - d_{dr}

скорость течения нефти - w_h

плотность воды - ρ_w

$$d_{dr}^5 - \frac{6\sigma_{wp}d_h}{\rho_w - \rho_o} d_{dr}^2 - \frac{3}{64} \frac{\rho_o}{\rho_w - \rho_o} d_h^4 w_h^2 = 0. \quad (2.2)$$

Рисунок 2.2 – Математическая модель образования капель нефти при утечках из морских донных источников

Результаты расчёта утечек через свищи различных размеров в зависимости от их расположения на трубопроводе показаны на Рисунке 2.3. Трубопровод имеет длину 30 км и проложен с берега до глубины 25 м [5].

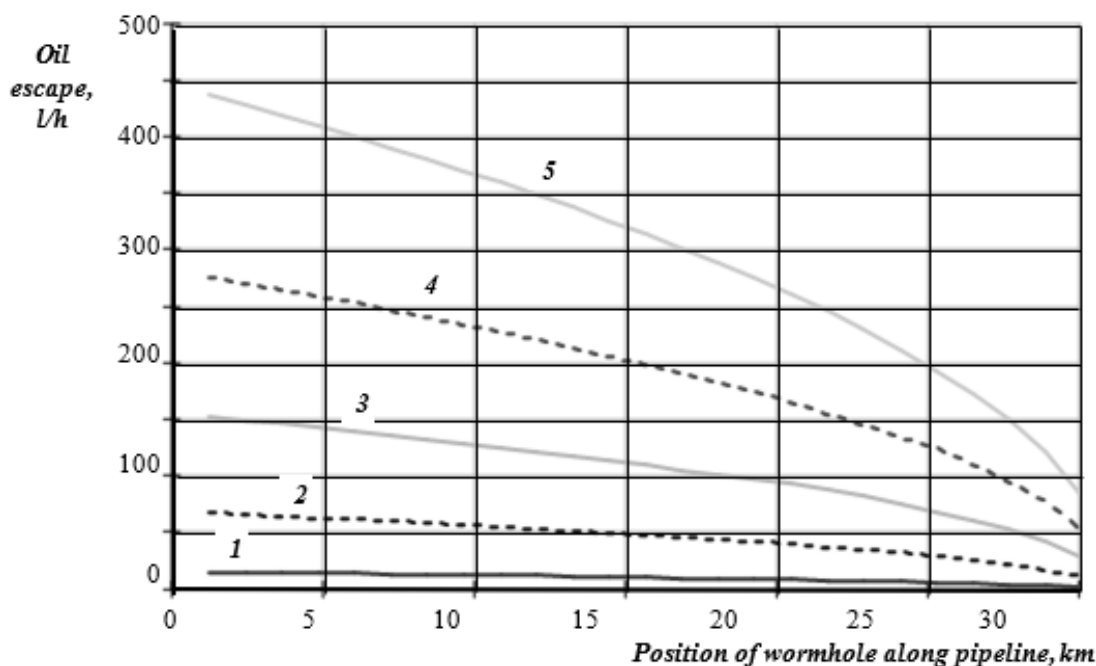


Рисунок 2.3 – Скорость утечки нефти из свища на морском трубопроводе в зависимости от размера свища и ее положения вдоль трубопровода. (Обозначения: 1 - $d_h = 0,5$ мм; 2 - $d_h = 1,0$ мм; 3 - $d_h = 1,5$ мм; 4 - $d_h = 2,0$ мм; 5 - $d_h = 2,5$ мм).

При истечении в водную среду из сравнительно небольшого отверстия струя нефти будет дробиться на отдельные капли. Так как нефть имеет высокую вязкость, спектр размеров капель будет относительно узким, а средний диаметр капель будет определяться балансом плавучести капли и поверхностного натяжения на грани отверстия. Скорость всплытия капель нефти зависит от их размеров (плавучести) и сопротивления движению, которое связано с формой капли.

Исследования [6] показали, что капли нефти способны всплыть на поверхность моря с любых реальных морских глубин. Нефть является смесью углеводородов, среди которых имеются газы (метан, этан и др.), способные растворяться в морской воде. Однако капли нефти не растворяются со временем в воде и всегда всплывают на поверхность моря. Поэтому образование коррозионных свищей или трещин вследствие механических повреждений сопровождаются утечкой нефти, которая

способна загрязнять придонные водные массы и свободную поверхность, и в случае больших утечек вызвать загрязнение прилегающих береговых территорий.[7]

Рассмотренные модели неразрывно связаны с моделью для оценки экологических последствий утечки нефти, положения которой будут использованы для Варандейского нефтепровода и рассмотрены в следующем разделе.

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ УТЕЧКИ НЕФТИ ИЗ МОРСКОГО ТРУБОПРОВОДА (МАЕСOLMP)

Модель основана на предположении, что утечка нефти из свища в стенке трубопровода на морском дне соответствует потоку отдельных нефтяных капель, которые всплывают вверх, создавая шлейф в водном пространстве. И после выхода нефтяных капель на море, на поверхности они образуют нефтяное пятно, которое имеет форму полосы, проходящей вдоль направления поверхностного течения. В зависимости от расстояния от свища до берега и скорости утечки нефти эта нефтяная полоса может достигать береговой линии или распространяться по морской поверхности.

Основными параметрами, определяющими нефтяное загрязнение окружающей среды, являются следующие: размер слика нефтяных капель в водном пространстве, размер нефтяного пятна на поверхности моря и вынос сырой нефти на береговую линию, если он оторвется [8].

Согласно этому основанию модели, оценка экологических последствий утечки нефти из трубопровода с морского дна состоит из следующих этапов:

1. Выбор вероятного положения дефекта на трубопроводе и его размера (рекомендуется варьировать размер и положение свища вдоль трубопровода);
2. Расчет скорости утечки нефти из отверстия для выбранных размеров и положений;
3. Оценка вероятных средних размеров нефтяных капель для выбранного диаметра отверстия;
4. Расчет границ слика, образовавшегося из капель нефти, и его ориентации в водном пространстве;
5. Расчет ширины и протяженности нефтяного пятна на поверхности моря для выбранного положения отверстия;
6. Оценка объемов нефти, которые могут быть вынесены на береговую линию в каждом конкретном случае, и выявление наиболее опасного варианта аварии.

Оценка скорости утечки нефти начинается с расчета режима течения сырой нефти внутри трубопровода известными методами гидравлики. Необходимо определить перепад давления между потоком нефти в трубопроводе и водным пространством. Затем можно оценить скорость утечки из коррозионного свища, который рассматривается как цилиндрическая труба, длина которой равна толщине стенки трубы, диаметр варьируется в некоторых практически возможных диапазонах размеров. Средние размеры масляных капель определяются балансом плавучести капли и поверхностного натяжения на краю отверстия.

Конфигурация пространства выхода на поверхность моря шлейфа, состоящего из капель нефти, определяется соотношением между скоростью течения и скоростью всплытия капли нефти. Можно оценить текущую скорость как сумму дрейфа ветра, скорости прилива и других составляющих. Скорость всплытия нефтяной капли можно оценить по следующей формуле, основанной на аппроксимации экспериментальных данных [9]:

$$w_o = 1.22 \left[\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} g \right]^{0.50} d_o^{0.50} \quad (3.1)$$

Где, g - ускорение свободного падения.

d_o – диаметр капель нефти,

ρ_w – плотность воды,

ρ_o – плотность нефти.

Данная формула верна для капель нефти диаметром более 2 мм.

Для расчета границ слика, образуемого из капель нефти, предполагается, что все капли имеют одинаковый диаметр и их растекание в толще воды происходит за счет турбулентной диффузии, поэтому концентрация нефти в воде определяется решением полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии:

$$c_o(x, r, z) = \frac{Q_h}{4\pi\sqrt{K_l K_z} x} \cdot \exp\left(-\frac{y^2 V}{4K_l x}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - w_o x/V)^2 V}{4K_z x}\right] + \exp\left[-\frac{(z + w_o x/V)^2 V}{4K_z x}\right] \right\} \quad (3.2)$$

Для описания области концентрации нефти в водном пространстве у поверхности моря необходимо использовать решение этого же уравнения с граничным условием “absorbing” каплей нефти после выхода на поверхность моря (капли нефти имеют положительную плавучесть, не тонут, а остаются на поверхности моря):

$$c_o(x, r, z) = \frac{Q_h}{4\pi\sqrt{K_l K_z} x} \cdot \exp\left(-\frac{y^2 V}{4K_l x}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - w_o x/V)^2 V}{4K_z x}\right] - \exp\left[-\frac{(2H_0 - z - w_o x/V)^2 V}{4K_z x}\right] \right\} \quad (3.3)$$

Где, c_o - концентрация нефти; K_l и K_z - коэффициенты турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно; H_0 - глубина воды в месте утечки масла; V - текущая скорость.

Чтобы оценить размер пятна, образующегося на поверхности моря, необходимо определить количество нефти, поступающей на поверхность моря Q_h - поток нефти путем интегрирования формулы (3.2) от $z = H_0$ до $z = \infty$.

Предполагается, что после плавания на поверхности моря капли нефти стекают и образуют пленку - пятно. Нефтяное пятно на поверхности моря будет иметь вид вытянутой по ветру извилистой полосы, которая в месте соприкосновения хвоста шлейфа, состоящего из нефтяных капель, с поверхностью имеет следующую ширину:

$$B_s = 4 \sqrt{\frac{K_l H_0}{w_o} \ln \left[\frac{Q_h}{4 c_{sl} V} \sqrt{\frac{w_o}{\pi K_l H_0}} \right]} \quad (3.4)$$

Где c_{sl} - величина поверхностной концентрации масла, связанная с минимальной толщиной устойчивой масляной пленки.

Дальнейшее развитие нефтяного пятна - изменение ширины и толщины можно оценить с помощью известных формул распространения нефтяного пятна на поверхности моря. Во время дрейфа нефтяного пятна на поверхности моря оно будет разорвано ветровыми волнами, а образовавшиеся капли нефти будут разноситься турбулентностью в водном пространстве. В данной модели этот процесс характеризуется одним интегральным параметром - удельным периодом $T_{1/2}$, когда половина объема нефти, которая дрейфует на поверхности, рассеивается в подстилающей толще воды [10]. Следовательно, ветровое течение будет уносить меньшее количество нефти к береговой линии. Скорость переноса нефти можно оценить по следующей формуле:

$$Q_{sh} = Q_h \exp \left[- \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \left(\frac{H_0}{w_p} + \frac{L}{w_{wd} \sin \varphi_{wd}} \right) \right] \quad (3.5)$$

Где, L - кратчайшее расстояние от положения отверстия до береговой линии;
 w_{wd} - скорость ветра; φ_{ws} - угол между направлением ветра и береговой линией.

4. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ УТЕЧКИ НЕФТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДА С МОРСКОГО ДНА

На основании раздела данной работы «Описание терминала Варандей» выбраны следующие входные данные для оценки экологических последствия:

1) Параметры трубопровода:

длина $L = 22$ м,

внутренний диаметр $d_t = 0,82$ м,

толщина стенки трубы $t = 20$ мм,

давление на входе в трубопровод $P = 7$ МПа,

глубина трубопровода $H = 17$ м,

расход нефти в трубопроводе $Q = 4000$ м³ / ч;

2) Условия окружающей среды:

скорость ветра $W = 6$ м / с

направление ветра относительно трубопровода $\theta = 215$ °,

средняя скорость постоянного течения $U = 0,1$ м / с;

3) Свойства нефти и морской воды:

плотность нефти $\rho_o = 910$ кг / м³,

кинематическая вязкость нефти $\gamma_o = 1,053 \cdot 10^{-5}$ м² / с

коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_o = 200$ мкН / см;

плотность воды $\rho_w = 1028$ кг / м³

кинематическая вязкость воды $\gamma_w = 1,7 \cdot 10^{-6}$ м² / с

4.1 Выбор вероятного положения отверстия на трубопроводе и его размера

Выберем положение свища на трубопроводе:

- расстояние от начала трубопровода 11 км;

- диаметры отверстий: $d_1=1$ мм, $d_2=2$ мм, $d_3=3$ мм, $d_4=4$ мм.

На Рисунке 4.1 показан профиль подводного нефтепровода «Терминал «Варандей»» и показано место вероятного повреждения. Для удобного решения поставленной задачи упростим профиль нефтепровода. Место повреждения (обозначено буквой М) выбрано на расстоянии 11 000 м от начала трубопровода, на глубине 11,3 м.

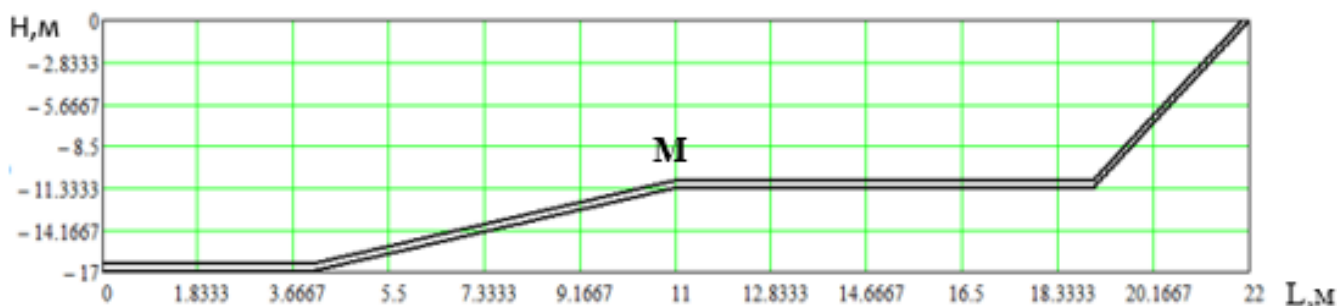


Рисунок 4.1 – Упрощенный профиль подводного нефтепровода.

4.2 Расчет скорости утечки нефти из отверстия для выбранных размеров и положения

Используя общую формулу для потерь напора по трубопроводу (4.1) - формула Дарси – Вейсбаха, можем получить давление на выходе трубопровода - давление в начале минус потери на трения и минус высота нефтяного столба от начала до конца трубопровода.

$$h_{\text{лн}g} = \lambda \frac{L}{d_t} \frac{V_p^2}{2g} \quad (4.1)$$

где, λ - коэффициент Дарси, рассчитанный по формуле Блазиуса;

g – ускорение свободного падения;

V_p – скорость потока нефти в трубе, которая рассчитывается по формуле (4.2).

$$V_p = 4 \frac{Q}{\pi * 3600 * d_t^2} \quad (4.2)$$

В Приложении А производятся подробные расчеты данного раздела в приложении Mathcad «Программа для расчета экологических последствий утечек нефти из донных трубопроводов». Исходя из расчетов получаем, что потери напора составили 0.095м, скорость потока нефти в трубе 2.1 м/с, давление на выходе равно 5.444 МПа, потери давления составили 1.556 МПа.

Расчет количества нефти (по формуле 2.1), вытекающего за сутки из отверстий в зависимости от выбранных в п. 4.1 диаметров, представлен на Рисунке 4.2. Расход нефти находится в диапазоне от 1 м³/день до 17.2 м³/день.

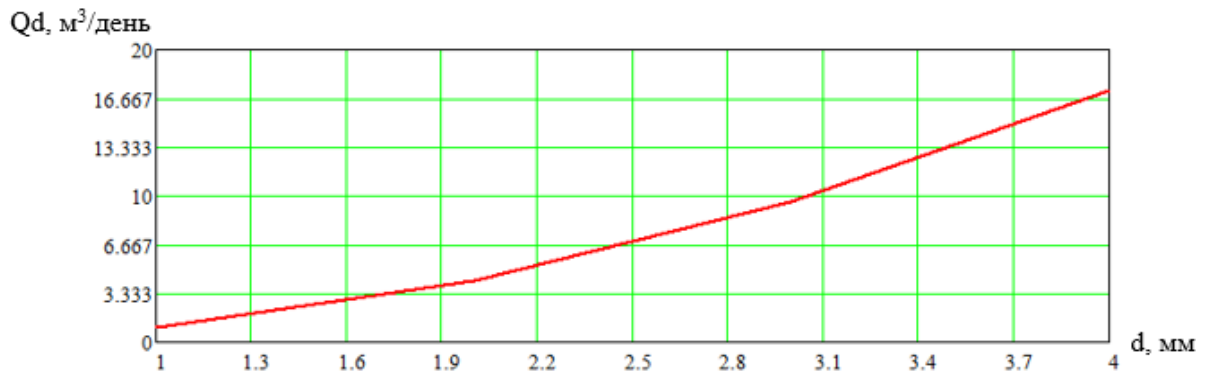


Рисунок 4.2 – Расход сырой нефти из отверстия в зависимости от диаметра свища.

4.3 Оценка вероятных средних размеров нефтяных капель для выбранного диаметра отверстия

Образование капель нефти в водном пространстве при истечении их из небольшого отверстия происходит, когда плавучесть капли превышает поверхностное натяжение, удерживающее каплю на краю отверстия [11]. Это условие определяет следующее уравнение:

$$\pi \sigma_p d_n = \frac{\pi}{6} (\rho_w - \rho_o) d_o^3. \quad (4.4)$$

где, d_n - диаметр отверстия

d_o – диаметр капли нефти

Преобразовав это уравнение, получаем формулу для определения диаметра образовавшейся капли нефти:

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{6\sigma_p d_n}{\rho_w - \rho_o}}. \quad (4.5)$$

По графику (Рисунок 4.3) видим зависимость диаметра капель нефти от диаметра отверстия, из которого она истекает и можем сделать вывод: чем больше отверстие, тем больше диаметр капель вытекающей нефти и большее количество капель вытечет за определенное время из этого отверстия (по рисунок 4.4).

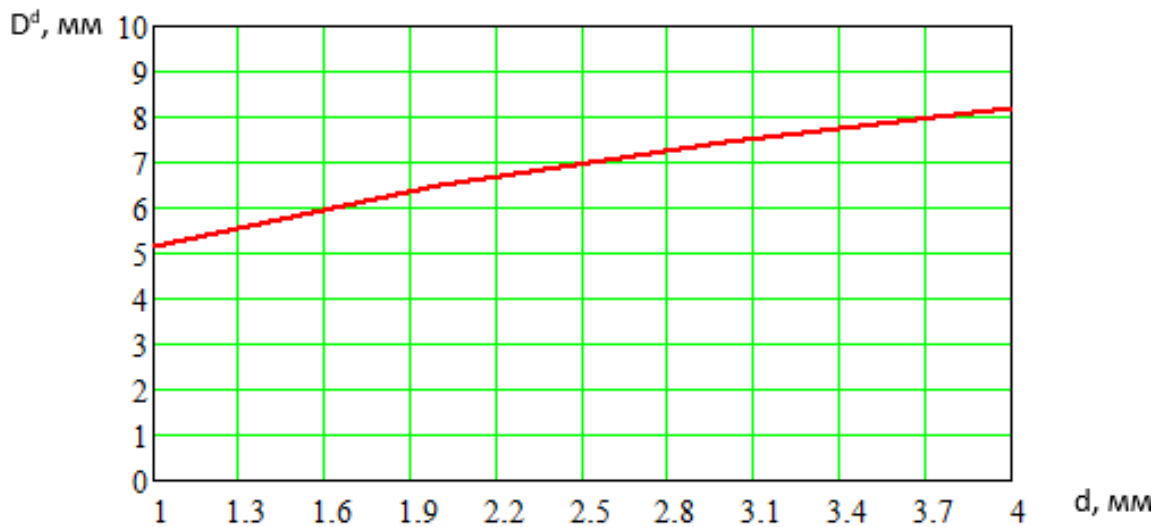


Рисунок 4.3 – График зависимости диаметра капель нефти от диаметра отверстия

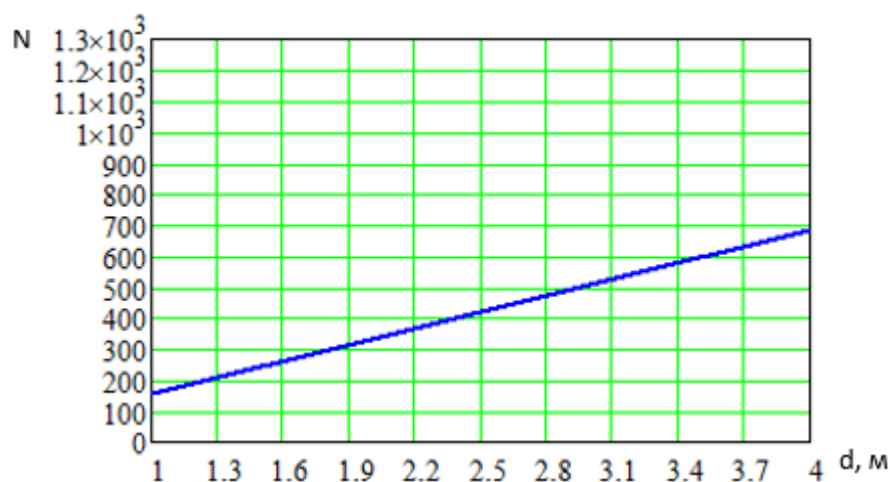


Рисунок 4.4 – График, показывающий какое количество капель нефти вытечет из отверстия заданного диаметра за 1 секунду.

Оценивая средний диаметр капель нефти, образовавшихся в результате утечки из свища, в зависимости от выбранных диаметров, можно сказать, что из-за нефти, которая имеет относительно высокую вязкость, спектр размеров капель будет достаточно узким. Средний диаметр нефтяных капель определяется балансом плавучести капли и межфазным натяжением на краю отверстия [12]. Исходя из расчетов получаем, что диаметр капель нефти (формула 4.4) находится в диапазоне от 5.2 мм до 8.2 мм, а скорость всплытия, используя формулу (3.1), от 0.069 м/с до 0.083 м/с (представлено на рисунке 4.5).

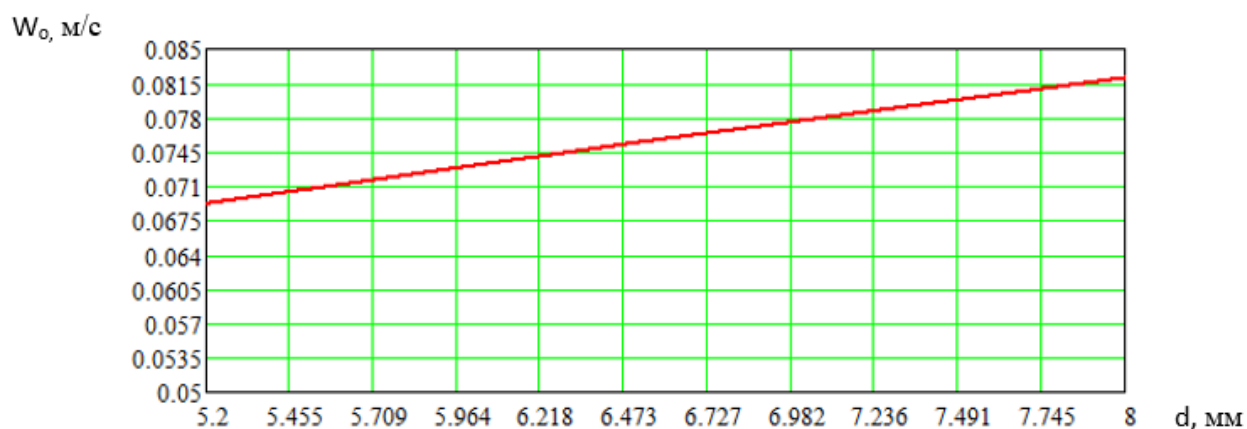


Рисунок 4.5 – График зависимости скорости всплытия капель от их размеров.

4.4 Расчет границ шлейфа, составленного из капель нефти, и его ориентации в водном пространстве

На Рисунке 4.6 представлен график поперечного разреза нефтяного слик на расстоянии от свища, для получения данного результата используется формула (3.3). Такой слик может возникать от отверстия диаметром 4 мм, на расстоянии 1 км от начала трубопровода (место его повреждения).

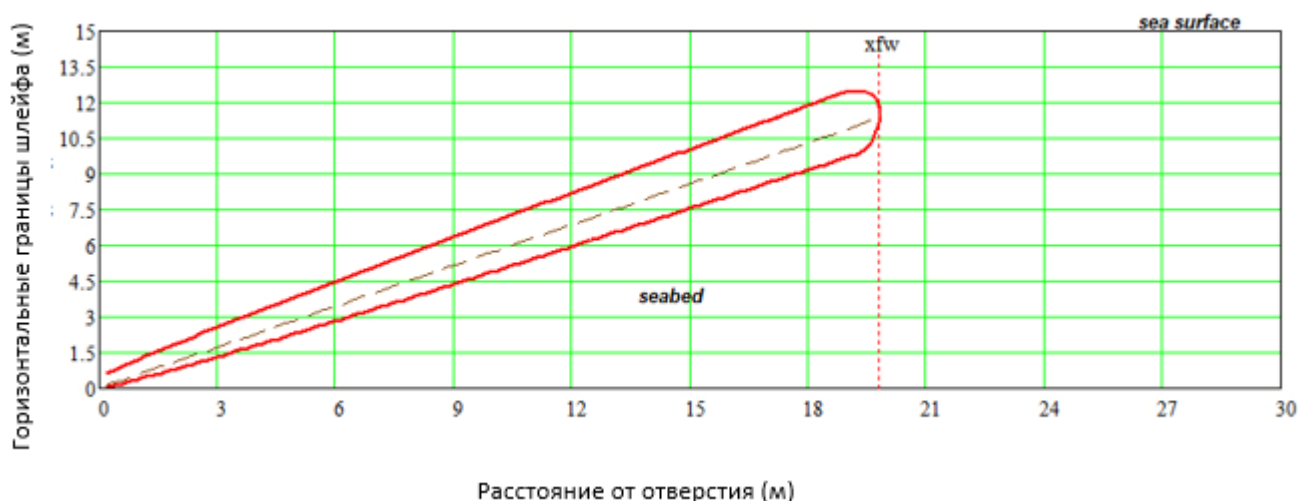


Рисунок 4.6 - Вид сверху на шлейф, составленный из капель нефти (ось абсцисс совпадает с положением трубопровода в горизонтальной плоскости)

4.5 Оценки размеров нефтяного загрязнения

С помощью программы, представленной в Приложении А, получили расход нефти, который составил $17.2 \text{ м}^3/\text{день}$ при вытекании капель из отверстия диаметром 4 мм. Для теоретической оценки размеров нефтяного пятна необходимо выбрать время, в течение которого нефть будет вытекать из свища и образовывать слик. Предположим, что нефть вытекает из отверстия 150 дней, тогда объем этой жидкости за данный промежуток времени составит $2580 \text{ м}^3/\text{день}$.

Чтобы оценить экологические последствия утечек нефти из трубопровода терминала «Варандей», нужно найти:

- максимальную площадь слика нефти;
- объем нефти, вынесенной на берег;
- протяженность загрязненного берега.

Эти результаты можно найти с помощью программы, написанной для курса «Техногенные загрязнения и их распространения» [13]. В Приложении Б произведен подробный расчет необходимых для оценки параметров: максимальная площадь слика составила 5.233 км², объем нефти, вынесенной на берег равен 28.104 м³, а протяженность загрязненного берега 7.307 км.

На графике поперечного разреза нефтяного слика (Рисунок 4.6) x_{fw} – координата точки соприкосновения нефтяного слика с морской поверхностью. Эту точку используем как центр образования нефтяного пятна на поверхности моря. Отметим на схеме, используемой в первом разделе, плана морского нефтеналивного порта Варандей (Рисунок 1.2) найденные в Приложение Б параметры, что поможет наглядно оценить экологические последствия утечек нефти из Варандейского трубопровода.



Рисунок 4.7 – Схема плана морского нефтеналивного порта Варандей с обозначением места повреждения трубопровода, площадью слика и протяженности загрязнения берега.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ВСПЛЫТИЯ КАПЛИ ОТ ЕЕ РАЗМЕРА ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения, определение зависимости скорости всплытия капли от ее размера и определение зависимости размера капли нефти от диаметра отверстия.

5.1 Место и условия проведения работы

Место проведения работы: СПбГМТУ, лаборатория «Исследования свойств льда и ледостойких сооружений»

Для исследования использовался аквариум размером 49x29x40 см, заполненный пресной / соленой водой до высоты 32 см.

Температура воды (t_v) изменялась в диапазоне от 15 °С до 25 °С.

Соленость (S) менялась от 0 ‰ до 35 ‰.

В трубку вводилась разбавленная нефть плотностью $\rho_n=820 \text{ кг/м}^3$.

Плотность воды (ρ_v) изменялась в диапазоне от 1012 кг/м³ до 1033 кг/м³.

5.2 Схема установки

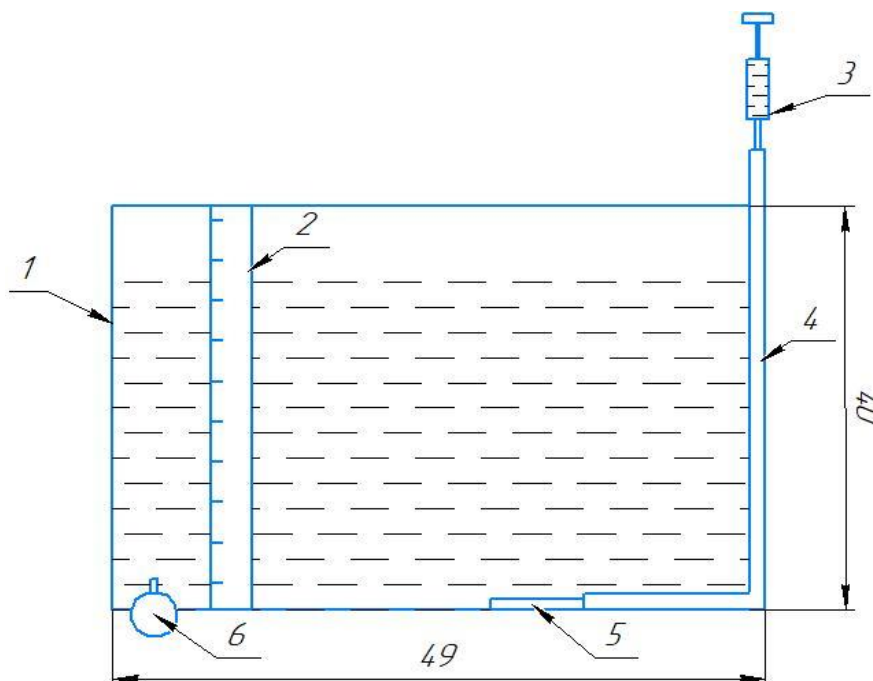


Рисунок 5.2 – Схема лабораторной установки

1 – Аквариум

2 – Линейка

3 – Инструмент для введения жидкости с использованием поршневого давления

4 – Трубка

5 – Съёмная насадка цилиндрической формы известного диаметра

6 – Секундомер

5.3 Таблицы измерений

Эксперимент №1 (Таблица 1):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв1}=2$ мм; объем вливаемой жидкости $V_1=5$ мл; температура воды $t_b = 25$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 1 – Результаты измерений №1

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	5,5	2,73
2	6	2,4
3	6	2,68
4	5,5	2,61
5	6	2,35
6	5,5	2,45
7	6	2,37
8	5,5	2,45
9	6	2,46
10	6	2,37

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=37$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 5.8 \text{ мм} = 0.0058 \text{ м}$.

Используя формулу (3.1), получаем скорость всплытия капли нефти:

$$w_1 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.0058^{0.50} = 0,127 \text{ м/с}$$

Задача эксперимента – подсчет количества капель N , образовавшихся из контролируемого объема жидкости V_n , вытекающего из трубки определенного диаметра d_n в воду, и всплывающих на поверхность.

Расчётная формула для определения коэффициента поверхностного натяжения σ_p имеет вид:

$$\sigma_p = (\rho_w - \rho_o) \frac{V_n}{\pi N d_{отв}} \quad (5.1)$$

Подставляем в формулу получившиеся значения измерения №1:

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 37 * 2 * 10^{-3}} = 0,0041 \text{ кг/м}$$

Теперь воспользуемся формулой (4.5) для определения диаметра капли нефти и проверки результатов:

$$d_{он} = \sqrt[3]{\frac{6\sigma_p d_{отв}}{\rho_w - \rho_o}}$$

$$d_{о1} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0044 * 2 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 6,3 \text{ мм}$$

Эксперимент №2 (Таблица 2):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв2}=2 \text{ мм}$; объем вливаемой жидкости $V_2=10 \text{ мл}$; температура воды $t_b = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; соленость $S=0 \text{ ‰}$, $\rho=1012 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 2– Результаты измерений №2

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	6,5	2,69
2	5,5	2,62
3	6	2,44
4	6	2,51
5	6	2,35
6	6	2,42
7	6	2,52
8	5,5	2,45
9	5,5	2,57
10	6	2,30

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=74$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 5.9 \text{ мм} = 0.0059 \text{ м}$.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_2 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.0059^{0.50} = 0,128 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №2 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{10^{-5}}{\pi * 74 * 2 * 10^{-3}} = 0,0041 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{o2} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0041 * 2 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 6,4 \text{ мм}$$

Эксперимент №3 (Таблица 3):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв3}=4$ мм; объем вливаемой жидкости $V_3=5$ мл; температура воды $t_b = 25$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 3 – Результаты измерений №3

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	6,5	2,39
2	6,5	2,43
3	7	2,42
4	6,5	2,26
5	6,5	2,23
6	7	2,29
7	6,5	2,32
8	7	2,35
9	6,5	2,24
10	6,5	2,28

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=28$.

Средний диаметр каплей данного измерения $\bar{d} = 6,65$ мм = 0.00665 м.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_3 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.00665^{0.50} = 0,136 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №3 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 28 * 4 * 10^{-3}} = 0,0027 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{03} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0027 * 4 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 7 \text{ мм}$$

Эксперимент №4 (Таблица 4):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв4}=4$ мм; объем вливаемой жидкости $V_4=10$ мл; температура воды $t_b = 25$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 4 – Результаты измерений №4

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	7,5	2,37
2	7	2,50
3	6,5	2,44
4	6,5	2,45
5	7	2,17
6	6,5	2,24
7	7	2,43
8	7	2,32
9	6,5	2,41
10	7	2,27

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=55$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 6,85$ мм = 0.00685 м.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_4 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.00685^{0.50} = 0,138 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №4 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{10^{-5}}{\pi * 55 * 4 * 10^{-3}} = 0,0025 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{o4} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0028 * 4 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 7 \text{ мм}$$

Эксперимент №5 (Таблица 5):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв5}=1$ мм; объем вливаемой жидкости $V_5=5$ мл; температура воды $t_b = 25$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 5 – Результаты измерений №5

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	5,5	2,38
2	5	2,63
3	5	2,44
4	5,5	2,38
5	5	2,25
6	5	2,59
7	5	2,30
8	5	2,32
9	5,5	2,25
10	5	2,32

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=45$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 5,15$ мм = 0.00515 м.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_5 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.00515^{0.50} = 0,119 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №5 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 45 * 1 * 10^{-3}} = 0,0068 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{05} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0068 * 1 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 6 \text{ мм}$$

Эксперимент №6 (Таблица 6):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв6}=6$ мм; объем вливаемой жидкости $V_6=5$ мл; температура воды $t_b = 22$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 6 – Результаты измерений №6

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	10	2,50
2	8	2,27
3	7	2,20
4	7	2,21
5	7,5	2,42
6	8	2,18
7	7,5	2,24
8	6	2,40
9	7,5	2,07
10	8,5	2,14

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=21$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 7,7$ мм = 0.0077 м.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_6 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.0077^{0.50} = 0,146 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №6 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 21 * 6 * 10^{-3}} = 0,0024 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{о6} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0024 * 6 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 7.7 \text{ мм}$$

Эксперимент №7 (Таблица 7):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв7}=4$ мм; объем вливаемой жидкости $V_7=5$ мл; температура воды $t_b = 15$ °С; соленость $S=0$ ‰, $\rho=1012$ кг/м³.

Таблица 7 – Результаты измерений №7

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	6	2,32
2	5,5	2,45
3	6	2,38
4	6	2,11
5	5,5	2,72
6	6	2,32
7	4,5	2,75
8	6	2,57
9	6	2,20
10	6	2,41

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости N=42.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 5,75 \text{ мм} = 0,00575 \text{ м}$.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_7 = 1.22 \left[\frac{1012-820}{1012} 9.81 \right]^{0.50} 0.00575^{0.50} = 0,126 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №7 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 42 * 4 * 10^{-3}} = 0,0018 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{07} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0018 * 4 * 10^{-3}}{1012 - 820}} = 6,1 \text{ мм}$$

Эксперимент №8 (Таблица 8):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв8}=4 \text{ мм}$; объем вливаемой жидкости $V_8=5 \text{ мл}$; температура воды $t_b = 15 \text{ °C}$; соленость $S=35 \text{ ‰}$, $\rho=1033 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 8 – Результаты измерений №8

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	6	2,39
2	5,5	2,46
3	6	2,25
4	6	2,26
5	6,5	2,78
6	6	2,26
7	6,5	2,06
8	6	2,34

Продолжение таблицы 8

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
9	6,5	2,11
10	6	2,27

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости $N=44$.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 6,1 \text{ мм} = 0.0061 \text{ м}$.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_8 = 1.22 \left[\frac{1033-820}{1033} 9.81 \right]^{0.50} 0.0061^{0.50} = 0,135 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №8 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 44 * 4 * 10^{-3}} = 0,0017 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{08} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0017 * 4 * 10^{-3}}{1033 - 820}} = 5.8 \text{ мм}$$

Эксперимент №9 (Таблица 9):

Насадка цилиндрической формы диаметром $d_{отв9}=4 \text{ мм}$; объем вливаемой жидкости $V_9=5 \text{ мл}$; температура воды $t_b = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; соленость $S=20 \text{ ‰}$, $\rho=1019 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 9 – Результаты измерений №9

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
1	6,5	2,33

Продолжение таблицы 9

№	Диаметр капли, мм	Время всплытия, с
2	6,5	2,32
3	6	2,27
4	6	2,44
5	6	2,39
6	6,5	2,30
7	6,5	2,39
8	6	2,42
9	6	2,38
10	6	2,33

Количество образовавшихся капель из данного объема жидкости N=41.

Средний диаметр капель данного измерения $\bar{d} = 6,2 \text{ мм} = 0.0062 \text{ м}$.

Скорость всплытия капли нефти:

$$w_9 = 1.22 \left[\frac{1019-820}{1019} 9.81 \right]^{0.50} 0.0062^{0.50} = 0,132 \text{ м/с}$$

Определяем коэффициент поверхностного натяжения для измерения №9 по формуле (5.1):

$$\sigma_p = (1012 - 820) \frac{5 * 10^{-6}}{\pi * 41 * 4 * 10^{-3}} = 0,0019 \text{ кг/м}$$

Диаметр капли нефти по формуле (4.5) теоретически должен быть равен:

$$d_{09} = \sqrt[3]{\frac{6 * 0.0019 * 4 * 10^{-3}}{1019 - 820}} = 6.1 \text{ мм}$$

5.4 Вычисление погрешности

Для того чтобы определить величины случайных погрешностей необходимо найти математическое ожидание. В качестве математического ожидания при многократных измерениях параметра выступает среднее арифметическое значение \bar{d} [14].

$$MD \approx \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (5.2)$$

где, n – число измерений

d_i – диаметр капель i -го измерения.

Далее находим среднее квадратическое отклонение [15]:

$$\sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad (5.3)$$

При ограниченном числе измерений n вводят коэффициент Стьюдента t_p , определяемый по специальным таблицам в зависимости от числа измерений и принятой доверительной вероятности P .

Средний результат измерений находится с заданной вероятностью P в интервале:

$$d = \bar{d} \pm t_p \cdot \sigma_d / \sqrt{n} \quad (5.4)$$

Зададим доверительную вероятность $P=0.95$. В каждом эксперименте число измерений $n=10$. Тогда Коэффициент Стьюдента $t_p = 2.26$.

$t_p \cdot \sigma_d / \sqrt{n}$ – случайная погрешность измерения, которую обозначим $\Delta d_{сл}$.

Также необходимо учитывать приборную погрешность для диаметра капель нефти $\Delta d_{np} = 0.5$ мм.

Погрешность вычисления ускорения свободного падения Δg принято считать 0.63 м/с².

Погрешность для плотности нефти $\Delta \rho_n$ и воды $\Delta \rho_v$ 1.73 кг/м³.

Обозначим:

σ_d – среднее квадратическое отклонение диаметра образовавшейся капли нефти;
 $\bar{d} \pm \Delta d$ – результат измерений диаметра капли нефти в интервале, учитывающим случайную и приборную погрешности;
 \bar{w} – среднее арифметическое значение скорости всплытия капли;
 $\bar{w} \pm \Delta w$ - результат измерений диаметра капли нефти в интервале, учитывающим абсолютную погрешность среднего значения величины w .

Все подробные вычисления (для каждого эксперимента) среднего квадратичного значения диаметра капли нефти, среднего квадратичного отклонения диаметра капли, среднего результата измерения, учитывающего случайную погрешность, и среднего арифметического значения скорости всплытия капли находятся в Приложении В, они производились в приложение Mathcad. Результаты среднего квадратичного отклонения диаметра капли нефти записаны в Таблице 10.

Далее найдем суммарную погрешность капли нефти по следующей формуле [16]:

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_{сл}^2 + \Delta d_{пр}^2} \quad (5.5)$$

Результаты данных измерений представлены в Приложении Г, они занесены в Таблицу 10.

Перейдем к вычислению погрешности скорости всплытия капли. Средняя скорость всплытия вычислена выше в данной главе по формуле (3.1) и в Приложении В. Также эти результаты записаны в Таблицу 10.

Запишем общую формулу для вычисления относительной погрешности [17]:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} * 100\% = \sqrt{\sum_{p=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial K_p} * \frac{\Delta \bar{K}_p}{\bar{K}_p} \right)^2} * 100\% \quad (5.6)$$

где, A – величина, для которой находим погрешность, вычисляемая как

$$A=f(K_1, K_2, K_3\dots),$$

m – количество аргументов K_p ,

$\frac{\partial f}{\partial K_p}$ – частные производные функции f по аргументам K_p ,

$\Delta \bar{K}_p$ - абсолютная погрешность среднего значения аргумента K_p .

Применимо к нашей формуле для вычисления скорости (3.1) запишем следующую формулу относительной погрешности, используя формулы относительной погрешности косвенного измерения [18]:

$$\delta = \frac{\Delta w}{w} * 100\% = \sqrt{\left(\frac{1}{2} * \frac{\Delta \rho_B + \Delta \rho_H}{\rho_B - \rho_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} * \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} * \frac{\Delta d}{\bar{d}}\right)^2 - \left(\frac{1}{2} * \frac{\Delta \rho_B}{\rho_B}\right)^2} * 100\% \quad (5.7)$$

Следующим действием найдем абсолютную погрешность среднего значения величины w :

$$\Delta w = \frac{\delta}{100\%} * \bar{w} \quad (5.8)$$

Подробные вычисления относительной и абсолютной погрешностей представлены в Приложении Д и записаны в Таблицу 10.

Таблица 10. – Результаты вычислений

№ эксперимента	σ_d , мм	$\bar{d} \pm \Delta d$, мм	\bar{w} , м/с	$\bar{w} \pm \Delta w$, м/с
1	0.082	5.8±0.503	0.127	0.127 ±0.007
2	0.1	5.9±0.505	0.128	0.128±0.007
3	0.076	6.65±0.503	0.136	0.136±0.007
4	0.107	6.85±0.506	0.138	0.138±0.007
5	0.076	5.15±0.503	0.119	0.119±0.007
6	0.335	7.7±0.554	0.146	0.146±0.007

Продолжение таблицы 10

7	0.154	5.75 ± 0.512	0.126	0.126 ± 0.007
8	0.1	6.1 ± 0.505	0.135	0.135 ± 0.008
9	0.082	6.2 ± 0.503	0.133	0.133 ± 0.007

5.5 Зависимость размера капли нефти от диаметра отверстия

Используя данные Таблицы 10, построим график зависимости размера капли нефти от диаметра отверстия (Рисунок 5.2).

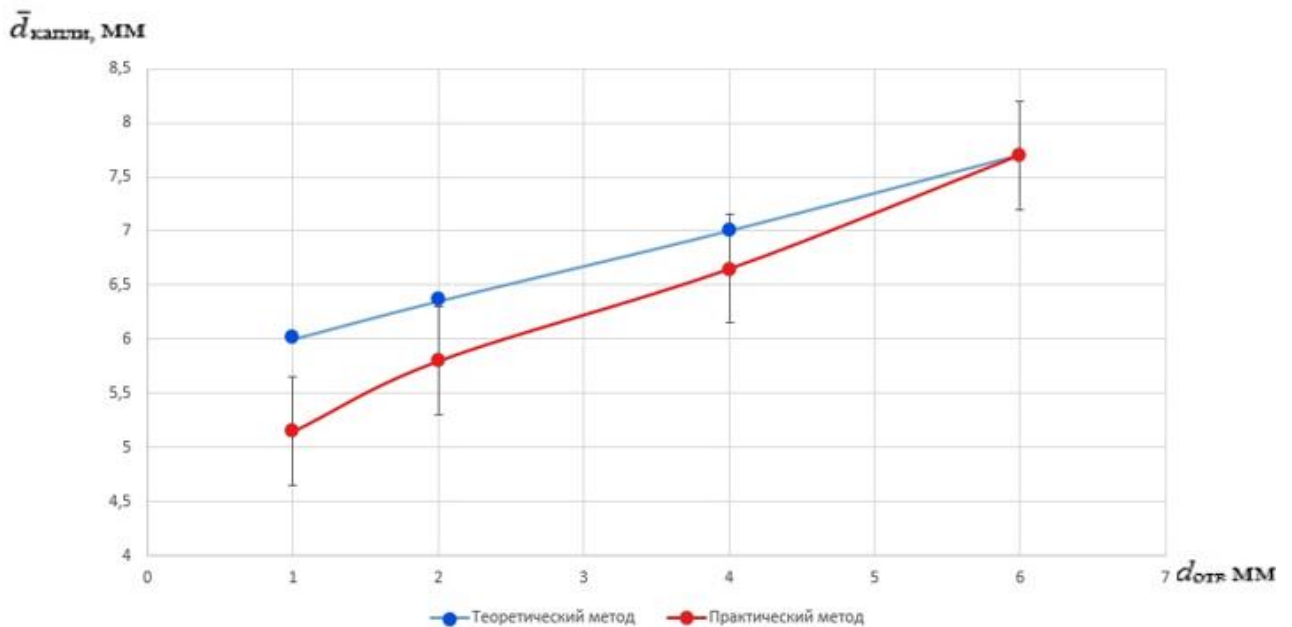


Рисунок 5.2 – График зависимости размера капли нефти от диаметра отверстия

5.6 Зависимость скорости всплытия капли от ее размера

Используя данные Таблицы 10, построим график зависимости размера капли нефти от диаметра отверстия (Рисунке 5.3).

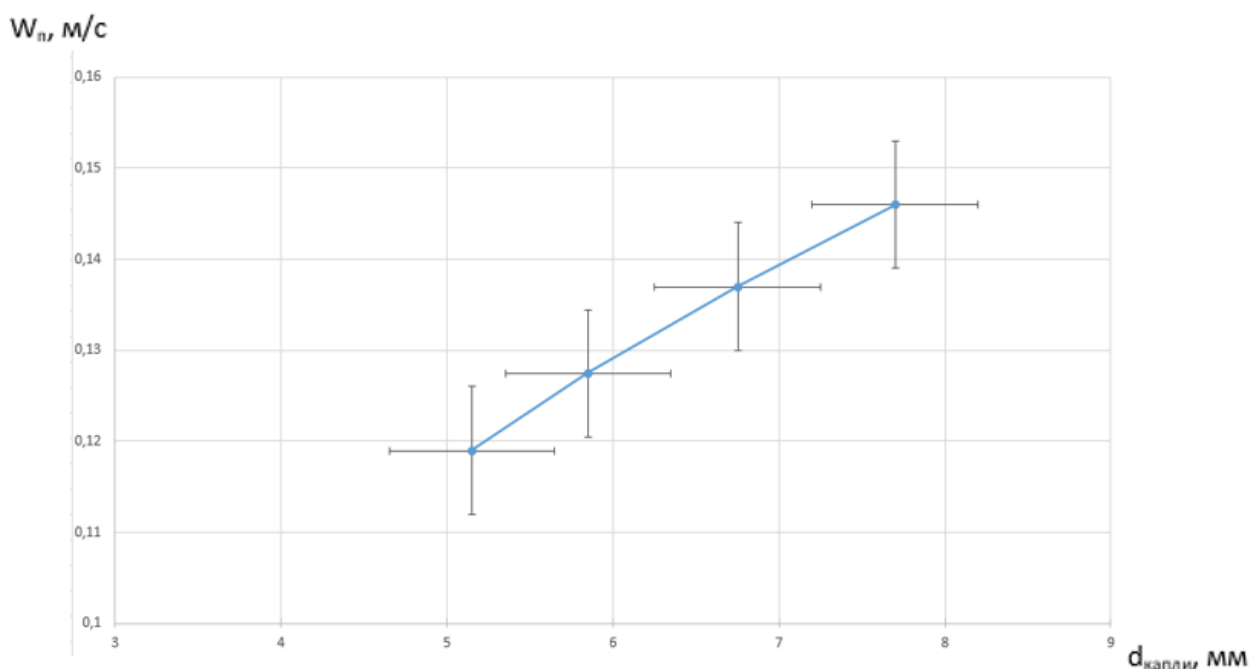


Рисунок 5.3 – График зависимости скорости всплытия капли от ее размера

5.7 Вывод по лабораторной работе

Образование капель нефти в водной среде при истечении нефти из отверстия малого диаметра происходит тогда, когда плавучесть капли превысит поверхностное натяжение, удерживающего её на трубке [19]. При повышении давления в трубке появляется перепад давления на границе отверстия, из-за чего отрыв капли происходит быстрее, поэтому наблюдается отрыв капли с меньшим диаметром. С ростом перепада давления размеры капель уменьшаются, но частота их отрыва при том же расходе нефти увеличивается. Поэтому в дальнейшем истечение нефти в виде струи сменяет отрыв капель.

Скорость всплытия нефтяной капли определяется балансом ее плавучести и сопротивления движению, поэтому скорость зависит, прежде всего, от размеров капель, а также от плотности и вязкости нефти и от формы капель [20]. В данной работе получены результаты, на основе которых можно сказать, что размер капли нефти напрямую зависит от диаметра отверстия: чем больше значение первого, тем больше и второго. Так же можно убедиться, что результаты зависимости получены

правильно, так как численные значения, полученные практическим методом близки к значениям, полученным теоретическим способом. Что касается зависимости скорости всплытия капель нефти от её размера, то можно утверждать, что при малых диаметрах капель получается график линейной зависимости, это означает прямую зависимость скорости всплытия капли от её размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе произведен анализ данных о возникновениях и развитиях утечек нефти из донных трубопроводов, рассмотрены расчетные модели для оценки экологических последствий, на основе которых производились вычисления для нефтепровода терминала «Варандей». Результаты расчетов распространения нефтяного загрязнения в водной массе и на поверхности моря представлены в графическом виде. Полученные результаты показали работу математической модели, положения которой помогли дать оценку возможным экологическим последствиям. Эта методика позволила оценить масштабы вероятного загрязнения нефтью морской поверхности и береговой линии в случае возникновения дефектов, свищей на стенке трубопровода.

Во второй половине работы представлены результаты лабораторных экспериментов, целью которых было выявить зависимость скорости всплытия капель и размер нефтяных капель от диаметров отверстий, что представлено в числовом и графическом виде, а также изучить процесс образования нефтяных капель и их всплытия на поверхность воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Goncharov V.K., Ivanov I.V. and Sokolov A.N., "Evaluation of Environmental Effect of Emergency Oil Spills by Means of Simulation of Behavior and Spreading of Oil on the Sea Surface," Proceeding of the 28th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar and 22nd Technical Seminar on Chemical Spills, Calgary, Canada (in press), 2005
2. Li Zhijun, Wang Yongxue and Qiu Dahong, "Where is the entrance of crude oil spill study in icy conditions in Bohai," Proceedings of Seminar of Combating Marine Oil Spills in Ice and Cold/Arctic Conditions, Helsinki, Finland, Pp.51-60, 2001
3. Общество с ограниченной ответственностью "Варандейский терминал" Документация о закупке: «Открытые многоэтапные конкурентные переговоры с переторжкой на право заключения договора на оказание услуг по внутритрубной диагностике подводного морского нефтепровода (Закупка № 182кп-20ВТ)» Интернет-портал. – URL: <https://energybase.ru/tender/32110111545> (дата обращения: 04.03.2021). – Текст: электронный.
4. Пашилов М.В., статья «Мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации морского подводного трубопровода варандейского нефтеотгрузочного терминала», журнал: Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2015. № 5. с. 155-158.
5. Goncharov V.K., Klementieva N.Yu. Forecasting of the ecological after-effects of the oil and natural gas escapes on the sea environments from pipelines located on seabed. // Proceeding of the Sixth International Conference "Remote Sensing for Marine and Coastal Environments". Charleston. South Carolina. USA. May 2000. Vol. 1. Pp. 194 – 201.
6. Goncharov V.K., Simulation of oil drop dynamics in seawater environment. // Proceedings of IMarEST. Part A. Journal of Marine Engineering and Technology. Vol. 2009. No 15. September 2009. Pp. 21 – 28.
7. Goncharov V.K., Lyskov V.G. Study of possibilities of creation the remote optical systems for remote sensing the under ice oil spills. // Proceedings of the Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Ann Arbor, MI, USA. October 1998. Pp. II-433 - II-440.
8. Wang J., Goncharov V.K., Klementieva N.Y., « Assessment of Oil Pollution as Consequence of the Oil Leaks from Seabed Pipeline in the Bohai Sea», Proceedings of the

28. Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, Calgary, Canada, 2005, Vol. 2, Pp. 939-948
9. Кутателадзе С.С., «Анализ подобия в теплофизике». – Новосибирск: Наука, 1982
10. Кормак Д., «Реагирование на нефтяное и химическое загрязнение морской среды». - Издательство прикладных наук, Лондон и Нью-Йорк, 1983, 365 с.
11. Goncharov, VK and Lyskov, VG (1993). “Investigation of the oil spreading feature in the deep sea and of conditions oil emerging on sea surface,” *Okeanologiya*, Vol 33, No 6, pp 856-862.
12. Yapa P.D., Zheng Li, « A model for deepwater oil/gas blowouts». – *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 42, pp. 234-241, 2001
13. В. К. Гончаров, «Техногенное загрязнение морской среды и методы его прогнозирования». - *Экологическая экспертиза*. - 2009. - N 1. - С. 146-147
14. «Математическая энциклопедия» / Главный редактор И. М. Виноградов. — М.: «Советская энциклопедия», 1979. — 1104 с.
15. Худсон Д., «Статистика для физиков». - Издательство «Мир», Москва, 1970., 197 с.
16. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. — Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2008. — 284 с.
17. Рабинович С. Г. «Погрешности измерений». - Ленинград, 1978.- 262 с.
18. Гольдин Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М. и др. Лабораторные занятия по физике. Учебное пособие / под ред. Гольдина Л. Л.. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 704 с.
19. Goncharov V.K., Klementieva N .Yu., Levin I.M. and Wang J. «Measurement of Sizes and Velocities of Oil Drops is Ground for Assessment of Environmental Effects of Seabed Pipeline’s Leakage».- Proc. 6th Symp. on Test and Measurement, Dalian, China. Vol 3, 2943–2946, 2005.
20. Rye H., «Subsurface oil release field experiment» - Proceedings, 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP), Calgary, Canada, 1996

Приложение А. Программа для расчета экологических последствий утечек
нефти из донных трубопроводов.

Program
computation of ecological consequences of oil leaks
from the sea bottom pipelines

Main notations:

1. Length of pipeline - L_t [m],
2. Inner diameter - d_u [m],
3. Thickness of tube wall - d_t [m],
4. Pressure on entrance into pipeline - p_0 [kg/cm²],
5. Depth of onset of pipeline - H_t [m],
6. Density of oil - g_p [kg/m³],
7. Coefficient of kinematic viscosity of oil - n_{up} [m²/sec],
8. Coefficient of capillary tension - sg_p [kg/m],
9. Acceleration of gravity - g_r [m/sec²],
10. Density of seawater - g_w [kg/m³],
11. Kinematic viscosity of seawater - n_{uw} [m²/sec],
12. Oil rate of pipeline - Q_p [m³/hour],
(if this value is given, then it is necessary to determine pressure in origin and end of pipeline,
if pressures in origin and end pipelines are given, that is necessary to determine the rate of oil)
13. Pressure on exit from pipeline - p_k [kg/m]
(see previous note)
14. Efflux coefficient (maximum value) for wormhole - K_{sv}
15. Velocity of wind - W_n [m/sec]
16. Direction of wind in relation on pipeline - f_i [deg],
17. Average upon depth and time) velocity of constant current - U_c [m/sec],
(assumed: its direction coincident with wind drift)
18. Maximum permissible oil concentration in seawater - C_{op} [kg/m³],
19. Smallest thickness of oil slick, when it is broken up on waved sea - d_{mc} [micrometer]
20. Time period for dispersion of half volume of oil from surface into water space - T_d [hour],

Input

Lt := 22	du := 0.82	gr := 9.81
-----	-----	-----
Ht := 17	dt := 0.02	gw := 1028
gp := 910	p0 := 7	nup := 1.053·10 ⁻⁵
Ksv := 0.45	Wn := 6	nuw := 1.7·10 ⁻⁶
dmc := 1	fi := 215-deg	Qp := 4000
Td := 12	Cop := 5·10 ⁻⁵	sgp := 0.00272
		Uc := 0.1

1 stage: computation of oil flow along pipeline and the intensity of oil leaks

mass density of oil	$wh := 0.0001 \cdot gw$	
Translation of depth into pressure		$wh = 0.103$
1 meter of depth into kg/cm^2	$ph := 0.0001 \cdot gp$	$ph = 0.091$
1 meter height of oil into kg/cm^2		
velocity of oil flow in tube	$Up := 4 \cdot \frac{Qp}{\pi \cdot 3600 (du)^2}$	$Up = 2.104$
Reynolds number	$Ret := du \cdot \frac{Up}{\mu p}$	$Ret = 1.638 \times 10^5$

1 step - computation of current of oil in pipeline

Darcy coefficient for resistance in tube	$lmb := \frac{0.3164}{(Ret)^{0.25}}$	$lmb = 0.016$
frictional pressure drop meters of oil column	$htp := lmb \cdot \frac{Lt}{du} \cdot \frac{Up^2}{2 \cdot g}$	$htp = 0.095$
this value in meters of water column	$htw := htp \cdot gp \cdot gw^{-1}$	$htw = 0.084$
Pressure at end of pipeline ---- It is equal pressure in onset minus frictional drop and minus height of oil column from onset up to end pipeline, kg/m^2	$pk := p0 - ph \cdot htp - ph \cdot Ht$	$pk = 5.444$

Namely here it is possible to select input pressure p0 for provide essential pressure on exit from pipeline pk under given Qp, or determine Qp for given p0 and pk

in this variant we select p0 for essential pk under given Qp

$$p0 = 7 \quad pk = 5.444 \quad Qp = 4 \times 10^3$$

2 step - calculation of difference of pressure on wormhole

In this step it is necessary to input profile of pipeline that defines by profile of sea bottom, because the difference of pressure on wormhole depends on depth of place where it forms.

It is possible to present profile of pipeline as sum of horizontal and inclined lines.

Creation of pipeline profile

step of computation, m
(this value we can variate)
range of variation of length of pipeline
amount of equal cascade of profile

input coordinates and depths:

begin and depth in this point
end of 1-st horizontal part, m
end of 1-st grade and depth, m
end of 2-nd horizontal part, m
end of 2-nd grade and depth

$$dx := 10$$

$$xt := 0, dx..Lt$$

$$nh := 3$$

$$x0 := 0 \quad zt0 := Ht$$

$$x1 := 4$$

$$x2 := 11 \quad zt2 := Ht \cdot nh^{-1}$$

$$x3 := 19$$

$$x4 := Lt \quad zt4 := 0$$

Construction of function

of depth variation upon distance

$$zht(x) := \begin{cases} Ht & \text{if } 0 \leq x < x1 \\ Ht - Ht \cdot nh^{-1} \cdot (x2 - x1)^{-1} \cdot (x - x1) & \text{if } x1 \leq x < x2 \\ Ht \cdot (1 - nh^{-1}) & \text{if } x2 \leq x < x3 \\ Ht \cdot (1 - nh^{-1}) \cdot (x4 - x3)^{-1} \cdot (x4 - x) & \text{if } x3 \leq x < x4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Reverse sign only for graph

$$Ztr(x) := -zht(x)$$

$$Ztr1(x) := 0.5 + Ztr(x)$$

Input

position of wormhole from onset of pipeline, m
than depth in this point, m
outside pressure in this point, kg/cm²
inside (in tube) pressure in this point
(linear drop of pressure along pipeline
plus weight of oil column from wormhole up to exit from
pipeline) kg/cm²

$$xs := 11$$

$$zht(xs) = 11.333$$

$$Hs := zht(xs)$$

$$phs := zht(xs) \cdot wh$$

$$phs = 1.165$$

$$pts := p0 - (p0 - pk) \cdot xs \cdot Lt^{-1} + zht(xs) \cdot ph$$

$$pts = 7.254$$

$$Psv := pts - phs$$

$$Psv = 6.088$$

$$Lcst := Lt - xs$$

$$Lcst = 11$$

Difference of pressure on wormhole

Distance from wormhole up to shore, m

3 step - computation of leaks from wormhole (this is the 1-st outcomes of program)

Input

diameter of wormhole - array - ds [m]
amount of different diameters
(it is possible to select this array)

$$\begin{aligned} j_s &:= 1..4 \\ ds_1 &:= 0.001 & ds_2 &:= 0.002 \\ ds_4 &:= 0.004 & ds_3 &:= 0.003 \end{aligned}$$

Remarks:

1. Wormhole is tube with complicated form. Current in this tube depend on friction resistance and on pressure loss in point of outflow.
2. There are three regime of flow in tubes, and for each regime its own law of resistance exists
for $Re < 1.25 \cdot 10^3$ - laminar current,
for $1.25 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^3$ - turbulent current,
for $Re > 3 \cdot 10^3$ regime of roughness surface of tube.
3. So in calculation the selection of law is necessary.
4. Resistance coefficient depends on Reynolds number, Reynolds number depends on velocity, velocity depends upon resistance etc....

This dependence it is possible to present as equation for velocity and to solve it.

coefficients for shortening of forms

$$a_1 := \sqrt{\frac{2 \cdot gr \cdot P_{sv} \cdot 10^4}{g \rho}} \cdot nup^{-1} \quad a_1 = 3.441 \times 10^6$$

$$f_1 := 1.25 \cdot 10^3 \cdot a_1^{-1} \quad f_2 := 3 \cdot 10^3 \cdot a_1^{-1}$$

so Reynolds number is

$$Res := Sur \cdot a_1 \cdot ds \quad f_1 = 3.633 \times 10^{-4}$$

Sur is coefficient of resistance
Solvin of Equation

$$Sur_{j_s} := \text{root} \left[x - \begin{cases} \left[4.938 + \frac{dt \cdot 64}{(ds_{j_s})^2 \cdot a_1 \cdot x} \right]^{0.5} & \text{if } x \cdot ds_{j_s} < f_1 \\ \left[4.938 + \frac{dt \cdot 0.314}{ds_{j_s} \cdot (a_1 \cdot x \cdot ds_{j_s})^{0.25}} \right]^{-0.5} & \text{if } f_1 \cdot ds_{j_s} < x < f_2 \cdot ds_{j_s} \\ \left(4.938 + \frac{0.063 \cdot dt}{ds_{j_s}} \right)^{-0.5} & \text{otherwise} \end{cases}, x, 0.001, 0.5 \right]$$

Results:

when diameter of wormhole is large, the length of tube is neglect able,
and coefficient of resistance have to be close to efflux coefficient.

$$Sur = \begin{pmatrix} 0.402 \\ 0.424 \\ 0.432 \\ 0.436 \end{pmatrix}$$

We can see this in array of Sur

$$K_{sv} = 0.45$$

Last jump:

velocity of efflux m/sec

$$U_{s_{j_s}} := Sur_{j_s} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot gr \cdot P_{sv} \cdot 10^4}{g \rho}} \quad U_s = \begin{pmatrix} 14.553 \\ 15.354 \\ 15.652 \\ 15.808 \end{pmatrix}$$

rate of efflux of oil from wormhole m³/sec

$$Q_{s_{j_s}} := \frac{\pi \cdot (ds_{j_s})^2 \cdot U_{s_{j_s}}}{4}$$

liter/sec

$$Q_{l_{s_{j_s}}} := Q_{s_{j_s}} \cdot 10^3$$

m³/day

$$Q_{d_{s_{j_s}}} := Q_{s_{j_s}} \cdot 24 \cdot 3600$$

diameter of wormhole mm

$$d_{sm_{j_s}} := ds_{j_s} \cdot 10^3$$

$$zht(x_s) = 11.333 \quad x_s = 11 \quad P_{sv} = 6.088 \quad Q_{d_{s_4}} = 17.163 \quad d_{sm_4} = 4$$

Продолжение приложения А.

4 step - computation of sizes of oil drops to define velocity of emersion

diameter of drops [m]

$$D_{pjs} := \left[6 \cdot s_{gp} \cdot d_{sjs} \cdot \frac{1}{(g_w - g_p)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

diameter of drops [mm]

$$D_{pmjs} := D_{pjs} \cdot 10^3$$

volume of oil drop [m³]

$$V_{dpjs} := \pi \cdot (D_{pjs})^3 \cdot 6^{-1}$$

amount of oil drops flowing from wormhole per 1 sec

$$N_{pdjs} := Q_{sjs} \cdot (V_{dpjs})^{-1}$$

$$N_{djs} := N_{pdjs} \cdot 0.001$$

Velocity of emergence of oil drops

resistance for emergence of drop equals to buoyancy of drop relative density of oil

$$d_{gwp} := (g_w - g_p) \cdot g_w^{-1}$$

$$w1 := 0.001 \quad w2 := 0.2$$

solving of equation

$$W_{bjs} := \text{root} \left[x^2 - \frac{4}{3} \cdot g_r \cdot d_{gwp} \cdot \left(0.5 + \frac{24 \cdot m_{wv}}{x \cdot D_{pjs}} \right) \cdot D_{pjs}, x, w1, w2 \right] \quad W_b = \begin{pmatrix} 0.069 \\ 0.076 \\ 0.08 \\ 0.083 \end{pmatrix}$$

Stage 2 - Calculation of field of oil concentration in water space

input data: rate of leak, velocity of floating of oil drop and wind velocity
select size (or number) of wormhole

1 step - preparation

wind velocity

$$W_n = 6$$

its direction

$$f_i = 3.752$$

$$C_{op} = 5 \times 10^{-5}$$

MPOC (permitted oil concentration)

velocity of wind drift on sea surface, m/sec

$$U_s := 0.0127 \cdot W_n \cdot (\sin(45 \text{deg}))^{-0.5} \quad U_s = 0.091$$

turbulent viscosity in water space
connected with wind drift, cm²/sec
m²/sec

$$\mu_u := 1.37 \cdot W_n^2 \quad \mu_{ut} := \mu_u \cdot 0.0001$$

$$\mu_{ut} = 4.932 \times 10^{-3}$$

Depth of wind mixing

$$H_w := 4.3 \cdot W_n \cdot (\sin(45 \text{deg}))^{-0.5}$$

$$H_w = 30.682$$

wormhole in this range of depth

$$z_{ht}(x_s) = 11.333$$

Average wind drift speed in all water column

$$U_{sh} := 0.5 \cdot U_s$$

$$U_{sh} = 0.045$$

(assume: its direction coincident with wind direction)

Constant current, m/sec

$$U_c = 0.1$$

$$U_{ss} := U_c + U_{sh} \quad U_{ss} = 0.145$$

Diffusion coefficient for horizontal plane is part (0.1 - 0.2) of turbulent viscosity

$$K_x := \mu_{ut} \cdot 0.2 \quad K_y := K_x$$

$$K_y = 9.864 \times 10^{-4}$$

Diffusion coefficient for vertical direction is part (0.1 - 0.5) of diffusion coefficient for horizontal plane

$$K_z := K_x \cdot 3^{-1}$$

$$K_z = 3.288 \times 10^{-4}$$

Coefficients for shortcut of formulas

$$w_{uj_s} := W_{bjs} \cdot U_{ss}^{-1}$$

$$k_{zu} := 4 \cdot K_z \cdot U_{ss}^{-1}$$

Assay of possibility of oil drops

for emersion on the sea surface

criteria - concentration C_{op} on surface

solving of equation

$$q_{js} := Q_{sjs} \cdot g_p \cdot \left(2 \pi \sqrt{K_y \cdot K_z} \right)^{-1}$$

$$q_{zjs} := q_{js} \cdot w_{uj_s}$$

$$k_{yu} := 4 K_y \cdot U_{ss}^{-1}$$

outcome - ultimate depth, from which oil drops can form on surface smallest are with concentration of oil > C_{op}

$$Z_{dmjs} := \text{root} \left[C_{op} - \frac{q_{zjs}}{x} \cdot \left(1 - e^{-4 \cdot x^2 \cdot k_{zu}^{-1}} \right), x, 0.1, 10^6 \right]$$

$$H_{do} := z_{ht}(x_s) \quad H_{do} = 11.333$$

Step 3 - calculation of vertical and horizontal borders of plume, formed by oil drops
 borders are defined from condition: concentration of oil inside plume > Cop

selection of No of wormhole

determination of all parameters for this number \
 and size diameter , mm
 velocity of emersion, m/sec
 leak, m³/sec

js := 4
 dsmw := dsmjs dsmw = 4
 Wbw := Wbjjs Wbw = 0.083
 Qlsw := Qlsjjs Qlsw = 0.199
 wuw := wujjs wuw = 0.572
 qw := qjjs qw = 50.519
 qzw := qzjjs qzw = 28.88

coefficients

amount of steps along axis X

Nx := 100

step along axis X as function of depth of wormhole, m

dxw := zht(xs) · (Nx · wuw)⁻¹ dxw = 0.198

digital variable along axis X

ix := 1 .. Nx - 3

coordinate along axis X

xwix := dxw · (ix + 2)

coordinate of point, where axis of plume contacts with surface

xfw := zht(xs) · (wuw)⁻¹ xfw = 19.825

Calculation of borders of plume range for find solution
 for lower border
 for upper border
 solving of equation

ad := 0 au := zht(xs) buix := xwix · wuw

$$Zxu_{ix} := \text{root} \left[\text{Cop} - \frac{qw}{xw_{ix}} \cdot \left[e^{\frac{-(z-wuw \cdot xw_{ix})^2}{kzu \cdot xw_{ix}}} - e^{\frac{-(2 \cdot zht(xs) - z - wuw \cdot xw_{ix})^2}{kzu \cdot xw_{ix}}} \right], z, bu_{ix}, au \right]$$

Zxu₀ = 1.888

Determination of point, where
 boundary of plume contacts surface

Am := max(Zxu) Am = 11.333

Zm := Am - 0.001 Zm = 11.332

Zuix := Zxuix k := $\begin{cases} ix \leftarrow 1 \\ \text{while } Zu_{ix} \leq Zm \\ ix \leftarrow ix + 1 \\ ix \end{cases}$

k = 89

Xsu := xwk Xsu = 18.041

Lsf := xfw - xwk Lsf = 1.784

coordinate of contact

length of contact zone - forward

appropriation of values, where its
 is absent

Zxu_{Nx} := Am Zxu_{Nx-2} := A Zxu_{Nx-1} := Am

lower boundary
 from distance 3-rd step

xwix := dxw · (ix + 2)

$$Zxd_{ix} := \text{root} \left[\text{Cop} - \frac{qw}{xw_{ix}} \cdot \left[e^{\frac{-(z-wuw \cdot xw_{ix})^2}{kzu \cdot xw_{ix}}} - e^{\frac{-(2 \cdot zht(xs) - z - wuw \cdot xw_{ix})^2}{kzu \cdot xw_{ix}}} \right], z, ad, bu_{ix} \right]$$

Additional points for
 drawing Graph, only

Dm := Zxd_{Nx-3}

Zxd_{Nx-3} = 9.833

$$Zxd_{Nx-2} := Dm + \frac{(Am - Dm)}{9}$$

$$Zxd_{Nx-1} := Dm + \frac{1 \cdot (Am - Dm)}{3}$$

Zxd_{Nx} := Am

Vertical size of plume
 resume variable
 than size on all distance
 for Graph the axis of plume

ix := 1 .. Nx

xwix := ix · dxw

Bzix := Zxu_{ix} - Zxd_{ix}

Bz_{Nx-1} = 1

Zoix := xwix · wuw

coordinate of end axis X
 for Graph

Приложение Б. Программа для оценки размеров нефтяного загрязнения.

Оценки размеров нефтяного загрязнения

Задаваемые и вводимые величины:

1. объём разлива куб м	Q0 := 2580
2. плотность нефти кг/литр	ρo := 0.91
3. период деструкции часы	Td := 12
4. широта градусы СШ	fi := 69
5. дистанция до берега метры	Lcm := 11000

Метео условия:

6. скорость ветра м/сек	W := 6
7. направление ветра градусы в компас	fwd := 215

$$fwdr := fwd \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$fwdr = 3.752$$

Константы

8. плотность воды кг/л	ρw := 1.025
9. ускор. тяжести м/сек ²	g := 9.81

Предварительные расчёты

относительная плотность нефти

$$dro := \frac{(\rho w - \rho o)}{\rho o} \quad dro = 0.126$$

период деструкции: часы - в секунды

$$Tds := Td \cdot 3600 \quad Tds = 4.32 \times 10^4 \text{ секунды}$$

1. Ветровой перенос

волновая энергия

$$E := 1.21 \cdot 10^{-6} \cdot W^5 \quad E = 9.409 \times 10^{-3}$$

средняя высота волн

$$hv := 1.712 \cdot \sqrt{E} \quad hv = 0.166$$

период

$$Tv := 6.2 \cdot \pi \cdot \left(g \cdot \frac{hv}{W^2} \right)^{0.625} \cdot \frac{W}{g} \quad Tv = 1.721 \text{ секунды}$$

Скорость волнового переноса

угол между вектором волнового переноса и перпендикуляром к берегу
перевод в радианы

$$Uv := 2 \cdot \pi^3 \cdot \frac{hv^2}{g \cdot Tv^3} \quad Uv = 0.034 \text{ м/сек}$$

$$btv := 360 - fwd \quad btv = 145$$

$$btvr := btv \cdot \pi \cdot 180^{-1} \quad btvr = 2.531$$

**2. Перенос дрейфовым течением
скорость дрейфового течения**

угол вектора дрейфового течения
относительно перпендикуляра на берег

перевод в радианы

проекции скоростей на ось X и Y:
волновая

ветровая

Проекция скорости дрейфа слика
на оси X и Y

Скорость дрейфа слика

Угол между U_s и осью X
в градусах

Дистанция дрейфа слика до берега

Время дрейфа слика до берега, сек
часы

Получили

1. суммарная скорость дрейфового течения (м/сек)
2. дистанция до береговой линии (м)
3. время дрейфа слика до берега (сек)
или в часах

Теперь расчёт размеров слика:

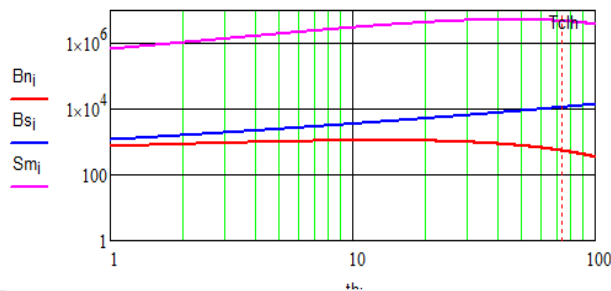
1. Поперечные размеры и площадь
Количество шагов по времени
шаг по времени относительно Tchl
индекс
время в секундах и в часах

Учитываем испарение легких фракций

Размер слика в поперечном к дрейфу направлении

Размер слика в направлении дрейфа

Площадь слика в кв. метрах
в кв. километрах



$$U_w := 0.0127 \cdot W \cdot \left(\sqrt{\sin\left(\pi \cdot \frac{f_i}{180}\right)} \right)^{-1} \quad U_w = 0.079 \text{ м/сек}$$

$$\begin{aligned} \text{btw} &:= \text{btv} - 45 & \text{btw} &= 100 \\ \text{btwr} &:= \text{btw} \cdot \pi \cdot 180^{-1} & \text{btwr} &= 1.745 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{vx} &:= U_v \cdot \cos(\text{btvr}) & U_{vx} &= -0.028 \\ U_{vy} &:= U_v \cdot \sin(\text{btvr}) & U_{vy} &= 0.02 \\ U_{wx} &:= U_w \cdot \cos(\text{btwr}) & U_{wx} &= -0.014 \\ U_{wy} &:= U_w \cdot \sin(\text{btwr}) & U_{wy} &= 0.078 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{sx} &:= U_{vx} + U_{wx} & U_{sx} &= -0.042 \\ U_{sy} &:= U_{vy} + U_{wy} & U_{sy} &= 0.097 \end{aligned}$$

$$U_s := \sqrt{U_{sx}^2 + U_{sy}^2} \quad U_s = 0.106$$

$$\text{gmr} := \text{asin}(U_{sy} \cdot U_s^{-1}) \quad \text{gmr} = 1.166$$

$$\text{amr} := \text{amr} \cdot 180 \cdot \pi^{-1} \quad \text{gmr} = 66.794$$

$$\text{Lsm} := \text{Lcm} \cdot (\cos(\text{gmr}))^{-1} \quad \text{Lsm} = 2.792 \times 10^4$$

$$\text{Lcm} = 1.1 \times 10^4$$

$$\text{Tcl} := \text{Lsm} \cdot U_s^{-1} \quad \text{Tcl} = 2.638 \times 10^5$$

$$\text{Tchl} := \text{Tcl} \cdot 3600^{-1} \quad \text{Tchl} = 73.265$$

$$U_s = 0.106$$

$$\text{Lsm} = 2.792 \times 10^4$$

$$\text{Tcl} = 2.638 \times 10^5$$

$$\text{Tchl} = 73.265$$

$$nt := 20000$$

$$\text{dt} := \text{Tcl} \cdot nt^{-1} \quad \text{dt} = 13.188$$

$$i := 1 \dots (1.75nt) \quad t_i := \text{dt} \cdot i \quad th_i := t_i \cdot 3600^{-1}$$

$$Q_e := Q_0 \cdot 0.75 \quad Q_e = 1.935 \times 10^3$$

$$B_{n_i} := 15.27 \cdot \text{dro}^{\frac{1}{3}} \cdot Q_e^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-0.23 \cdot \frac{t_i}{T_{ds}}} \cdot \left(\frac{1}{t_i}\right)^{\frac{1}{4}} \quad B_{s_i} := B_{n_i} + 0.0844 \cdot W^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{1}{t_i}\right)^{\frac{3}{4}}$$

$$S_{m_i} := \pi \cdot B_{s_i} \cdot \frac{B_{n_i}}{4}$$

$$S_{km_i} := S_{m_i} \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Tsf} := \begin{cases} \text{Tchl} & \text{if } \text{Tchl} > 100 \\ 100 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Поиск максимума площади слика

максимальное значение
определение номера шага

$$Sk_{m1} := \text{reverse}(\text{sort}(Sk_m))_1 \quad Sk_{m1} = 5.233$$

$$mx := Sk_{m1} - 0.001$$

$$\text{Max}(Sk_m, \text{thres}) := \begin{cases} j \leftarrow 1 \\ \text{while } Sk_{mj} \leq \text{thres} \\ j \leftarrow j + 1 \\ j \end{cases}$$

$$tf := \text{Max}(Sk_m, mx) - 1 \quad tf = 1.207 \times 10^4$$

$$T_m := dt \cdot tf \quad T_m = 1.592 \times 10^5$$

$$T_{mh} := T_m \cdot 3600^{-1} \quad T_{mh} = 44.227$$

момент времени - в сек
в часах

Максимальные размеры

поперечный размер

$$B_{nm} := 15.27 \cdot dro^{\frac{1}{3}} \cdot Q_e^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-0.23 \cdot \frac{tr}{T_{ds}}} \cdot (tr)^{\frac{1}{4}} \quad B_{nm} = 817.16$$

продольный размер

$$B_{sm} := B_{nm} + 0.0844 \cdot W^{\frac{4}{3}} \cdot (tr)^{\frac{3}{4}} \quad B_{sm} = 8.152 \times 10^3$$

площадь

$$S_{mx} := Sk_{m1} \quad S_{mx} = 5.233$$

удлинение

$$L_m := B_{sm} \cdot B_{nm}^{-1} \quad L_m = 9.976$$

остающийся объём

$$Q_m := Q_e \cdot e^{-\ln(2) \cdot \frac{tr}{T_{ds}}} \quad Q_m = 150.391$$

средняя толщина, метры

$$hm := Q_m \cdot (S_{mx} \cdot 10^6)^{-1} \quad hm = 2.874 \times 10^{-5}$$

Максимальная площадь слика (кв. км)

$$S_{mx} = 5.233$$

Вынос нефти течением на береговую черту

время дрейфа центра слика до берега, сек
объём разлива и он же с учетом испарения

$$T_{cl} = 2.638 \times 10^5$$

$$Q_0 = 2.58 \times 10^3$$

$$Q_e = 1.935 \times 10^3$$

оставшийся объём нефти, куб. метры

$$Q_f := Q_e \cdot e^{-\ln(2) \cdot \frac{T_{cl}}{T_{ds}}} \quad Q_f = 28.104$$

длина слика, метры

$$B_{sf} := 15.27 \cdot dro^{\frac{1}{3}} \cdot Q_e^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-0.23 \cdot \frac{tr}{T_{ds}}} \cdot (T_{cl})^{\frac{1}{4}} + 0.0844 \cdot W^{\frac{4}{3}} \cdot (T_{cl})^{\frac{3}{4}}$$

угол между направлением ветра и
линией берега

$$fsdr := fwdr - 1.5 \cdot \pi \quad fsdr = -0.96$$

$$fsd := fsdr \cdot 180 \cdot \pi^{-1} \quad fsd = -55$$

Проекция слика на береговую черту, метры

$$S_f := B_{sf} \cdot \cos(fsdr) \quad S_f = 7.307 \times 10^3$$

+

Итак:
объём выноса на берег (куб. м)
протяжённость загрязнённого берега (м)

$$Q_f = 28.104$$

$$S_f = 7.307 \times 10^3$$

Количество нефти на 1 метр берега
литры на метр

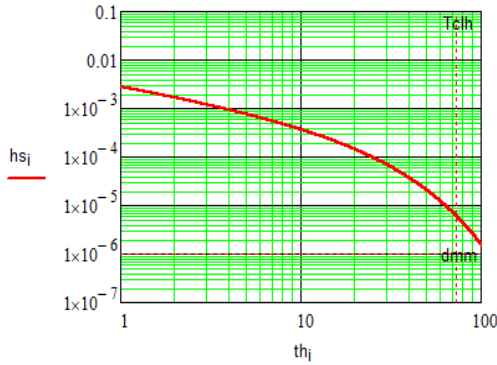
$$pol := \frac{Q_f \cdot 1000}{S_f} \quad pol = 3.846$$

Средняя толщина slicka

$$hs_i := Qe \cdot \frac{e^{-\ln(2) \cdot \frac{t_i}{Tds}}}{Sm_i}$$

Минимальная толщина slicka, после достижения которой его можно считать исчезнувшим

$$dmm := 1 \cdot 10^{-6}$$



Определение момента исчезновения slicka

$$b1 := 15.27 \cdot dro^{\frac{1}{3}} \cdot Qe^{\frac{1}{3}} \quad b2 := 0.0844 \cdot W^{\frac{4}{3}} \quad b1 = 95.489 \quad b2 = 0.92$$

$$trf := \text{root} \left[\begin{array}{c} dmm - Qe \cdot \frac{e^{-\ln(2) \cdot \frac{trf}{Tds}}}{0.25 \cdot \pi \cdot \left(b1 \cdot trf^{\frac{1}{4}} \cdot e^{-0.231 \cdot \frac{trf}{Tds}} \right) \cdot \left(b1 \cdot trf^{\frac{1}{4}} \cdot e^{-0.231 \cdot \frac{trf}{Tds}} + b2 \cdot trf^{\frac{3}{4}} \right)} \cdot trf, 1 \cdot 10^5, 4 \cdot 10^5 \end{array} \right]$$

$$trf = 3.963 \times 10^5$$

$$dT := Tchl - Tfh \quad dT = -36.818 \quad Tf := trf \quad Tfh := Tf \cdot 3600^{-1} \quad Tfh = 110.084$$

Если dT < 0, то slick дойдёт до берега, а если dT > 0, то можно считать, что он рассеется в толще воды раньше этого момента

$$Qfs := Qe \cdot e^{-\ln(2) \cdot \frac{trf}{Tds}} \quad Qfs = 3.351 \quad \text{остаток нефти на поверхности моря куб.м}$$

Конец вычислений

- 1. Максимальная площадь slicka $Smx = 5.233$ кв. км
- 2. Объём нефти, вынесенный на берег $Qf = 28.104$ куб. метров
- 3. Протяженность загрязненного берега $Sf = 7.307 \times 10^3$ метров

Приложение В. Программа для расчета погрешности. Вычисление среднего арифметического значения скорости всплытия капли.

Программа для расчета погрешности

Основные обозначения:

1. Плотность воды - ρ_w [кг/м³]
2. Плотность нефти - ρ_o [кг/м³]
3. Ускорение свободного падения - g [м/с²]
4. Диаметр капли нефти - d_{on} [мм]
5. Скорость всплытия нефтяной капли - w_{on} [м/с]
6. Среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти - d_a [мм]
7. Среднее арифметическое значение скорости всплытия капли - w_a [м/с]
8. Среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти - σ_d [мм]
9. Среднее квадратичное отклонение для скорости всплытия капли - σ_w [м/с]
10. Число измерений - N
11. Деверительная вероятность - P
12. Коэффициент Стьюдента - t_p

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $t_p := 2.26$

Experiment №1

1 step

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (5.5 \ 6 \ 6 \ 5.5 \ 6 \ 5.5 \ 6 \ 5.5 \ 6 \ 6)^T$

$N := \text{length}(don) \quad N = 10$

$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 5.8$$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 5.8 \quad \text{мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (\text{don}_i - \text{da})^2} = 0.082$$

Средний результат измерений находится в интервале:

$$\text{от } \text{don1} := \text{da} - \frac{\text{tp} \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.742 \qquad \frac{\text{tp} \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.058$$

$$\text{до } \text{don2} := \text{da} + \frac{\text{tp} \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.858$$

то есть $\text{don} = 5.8 \pm 0.058$ мм

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия капли

$$\text{donm} := \text{don} \cdot 10^{-3}$$

$$M := \text{length}(\text{donm}) \qquad M = 10$$

$$w_a := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (\text{donm}_i)^{0.5} \right] = 0.127$$

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment №2**1 step**

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (6.5 \ 5.5 \ 6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 5.5 \ 5.5 \ 6)^T$

$N := \text{length}(don) \quad N = 10$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 5.9$$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 5.9 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.1$$

Средний результат измерений находится в интервале:

$$\text{от } don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.829 \qquad \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.071$$

$$\text{до } don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.971$$

то есть $don = 5.9 \pm 0.071 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия капли

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$$wa := \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.128$$

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment №3

1 step

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$$don := (6.5 \ 6.5 \ 7 \ 6.5 \ 6.5 \ 7 \ 6.5 \ 7 \ 6.5 \ 6.5)^T$$

$$N := \text{length}(don) \quad N = 10$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 6.65$$

$$da := \text{mean}(don)$$

$$da = 6.65 \text{ мм}$$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.076$$

Средний результат измерений находится в интервале:

$$\text{от } don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.595 \quad \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.055$$

$$\text{до } don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.705$$

$$\text{то есть } don = 6.65 \pm 0.055 \text{ мм}$$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия капли

$$donm := don \cdot 10^{-3}$$

$$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$$

$$wa := \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.136$$

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $\xi := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment №4**1 step**

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (7.5 \ 7 \ 6.5 \ 6.5 \ 7 \ 6.5 \ 7 \ 7 \ 6.5 \ 7)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$
 $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 6.85$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 6.85 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$std := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.107$

Средний результат измерений находится в интервале:

от $don1 := da - \frac{tp \cdot std}{\sqrt{N}} = 6.774$ $\frac{tp \cdot std}{\sqrt{N}} = 0.076$

до $don2 := da + \frac{tp \cdot std}{\sqrt{N}} = 6.926$

то есть $don = 6.85 \pm 0.076 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия капли

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$wa := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot \xi \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.138$

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment №5**1 step**

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (5.5 \ 5 \ 5 \ 5.5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5.5 \ 5)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$
 $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 5.15$

 $da := \text{mean}(don)$
 $da = 5.15 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.076$$

Средний результат измерений находится в интервале:

от $don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.095$ $\frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.055$
до $don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.205$
то есть $don = 5.15 \pm 0.055 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия капли

$donm := don \cdot 10^{-3}$
 $M := \text{length}(donm) \quad M = 10$
 $wa := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.119$

Input

$\rho_w := 1012$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment № 6

1 step

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (10 \ 8 \ 7 \ 7 \ 7.5 \ 8 \ 7.5 \ 6 \ 7.5 \ 8.5)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$
 $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 7.7$

$da := \text{mean}(don)$
 $da = 7.7 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.335$$

Средний результат измерений находится в интервале:

от $don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 7.461$ $\frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.239$

до $don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 7.939$

то есть $don = 7.7 \pm 0.239 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$$wa := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.146$$

Input

$\rho_w := 1012$ $P := 0.95$
 $\rho_o := 820$ $tp := 2.26$
 $g := 9.81$

Experiment №7**1 step**

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (6 \ 5.5 \ 6 \ 6 \ 5.5 \ 6 \ 4.5 \ 6 \ 6 \ 6)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$
 $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 5.75$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 5.75 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.154$$

Средний результат измерений находится в интервале:

$$\text{от } don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.64 \qquad \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.11$$

$$\text{до } don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 5.86$$

то есть $don = 5.75 \pm 0.11 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$$wa := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.126$$

Input

$\rho_w := 1033$
 $\rho_o := 820$
 $g := 9.81$
 $P := 0.95$
 $tp := 2.26$

Experiment №8

1 step

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (6 \ 5.5 \ 6 \ 6 \ 6.5 \ 6 \ 6.5 \ 6 \ 6.5 \ 6)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$
 $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 6.1$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 6.1 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.1$$

Средний результат измерений находится в интервале:

от $don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.029$ $\frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.071$

до $don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.171$

то есть $don = 6.1 \pm 0.071 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$$wa := \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.135$$

Input

$\rho_w := 1019$ $P := 0.95$
 $\rho_o := 820$ $tp := 2.26$
 $g := 9.81$

Experiment №9**1 step**

Найдем среднее арифметическое значение диаметра образовавшейся капли нефти

$don := (6.5 \ 6.5 \ 6 \ 6 \ 6 \ 6.5 \ 6.5 \ 6 \ 6 \ 6)^T$
 $N := \text{length}(don) \quad N = 10$

$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} don_i = 6.2$$

$da := \text{mean}(don)$

$da = 6.2 \text{ мм}$

2 step

Найдем среднее квадратичное отклонение для диаметра капли нефти

$$\sigma_d := \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=0}^{N-1} (don_i - da)^2} = 0.082$$

Средний результат измерений находится в интервале:

$$\text{от } don1 := da - \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.142 \qquad \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 0.058$$

$$\text{до } don2 := da + \frac{tp \cdot \sigma_d}{\sqrt{N}} = 6.258$$

то есть $don = 6.2 \pm 0.058 \text{ мм}$

3 step

Найдем среднее арифметическое значение скорости всплытия

$donm := don \cdot 10^{-3}$

$M := \text{length}(donm) \quad M = 10$

$$wa := \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \left[1.22 \cdot \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \cdot g \right)^{0.5} \cdot (donm_i)^{0.5} \right] = 0.133$$

Приложение Г. Расчет суммарной погрешности.

$$ds1 := 0.058 \quad ds6 := 0.239$$

$$ds2 := 0.071 \quad ds7 := 0.11$$

$$ds3 := 0.055 \quad ds8 := 0.071$$

$$ds4 := 0.076 \quad ds9 := 0.058$$

$$ds5 := 0.055$$

$$dpr := 0.5$$

Эксперимент №1

$$\Delta d := \sqrt{ds1^2 + dpr^2} = 0.503$$

Эксперимент №2

$$\Delta d := \sqrt{ds2^2 + dpr^2} = 0.505$$

Эксперимент №3

$$\Delta d := \sqrt{ds3^2 + dpr^2} = 0.503$$

Эксперимент №4

$$\Delta d := \sqrt{ds4^2 + dpr^2} = 0.506$$

Эксперимент №5

$$\Delta d := \sqrt{ds5^2 + dpr^2} = 0.503$$

Эксперимент №6

$$\Delta d := \sqrt{ds6^2 + dpr^2} = 0.554$$

Эксперимент №7

$$\Delta d := \sqrt{ds7^2 + dpr^2} = 0.512$$

Эксперимент №8

$$\Delta d := \sqrt{ds8^2 + dpr^2} = 0.505$$

Эксперимент №9

$$\Delta d := \sqrt{ds9^2 + dpr^2} = 0.503$$

Приложение Д. Расчет относительной и абсолютной погрешностей.

ВВЕДЕМ ДАННЫЕ ДЛЯ КАЖДОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент №1

$$\Delta d1 := \sqrt{ds1^2 + dpr^2} = 0.503$$

$$d1 := 5.8$$

-Суммарная погрешность диаметра капли нефти и средний диаметр соответственно

$$w1 := 0.127$$

$$\Delta w1$$

-Средняя скорость всплытия и абсолютная погрешность

$$\rho w1 := 1012$$

$$\Delta \rho w := 1.73$$

-Плотность воды и погрешность измерения этой плотности

$$\rho o := 820$$

$$\Delta \rho o := 1.73$$

-Плотность нефти и погрешность измерения этой плотности

$$g := 9.81$$

$$\Delta g := 0.63$$

-Ускорение свободного падения и его погрешность

$$\delta 1$$

-Относительная погрешность w1

$$\delta 1 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w1 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d1}{d1}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w1}\right)^2} \cdot 100\% = 0.055$$

$$\Delta w1 := \frac{\delta 1}{100\%} \cdot w1 = 0.007$$

Эксперимент №2

$$\Delta d2 := \sqrt{ds2^2 + dpr^2} = 0.505$$

$$d2 := 5.9$$

$$w2 := 0.128$$

$$\rho w2 := 1012$$

$$\delta 2 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w2 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d2}{d2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w2}\right)^2} \cdot 100\% = 0.054$$

$$\Delta w2 := \frac{\delta 2}{100\%} \cdot w2 = 0.007$$

Эксперимент №3

$$\Delta d3 := \sqrt{ds3^2 + dpr^2} = 0.503$$

$$d3 := 6.65$$

$$w3 := 0.136$$

$$\rho w3 := 1012$$

$$\delta 3 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w3 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d3}{d3}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w3}\right)^2} \cdot 100\% = 0.05$$

$$\Delta w3 := \frac{\delta 3}{100\%} \cdot w3 = 0.007$$

Эксперимент №4

$$\Delta d4 := \sqrt{ds4^2 + dpr^2} = 0.506 \quad d4 := 6.85$$

$$w4 := 0.138$$

$$\rho w4 := 1012$$

$$\delta4 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w4 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d4}{d4}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w4}\right)^2} \cdot 100\% = 0.05$$

$$\Delta w4 := \frac{\delta4}{100\%} \cdot w4 = 0.007$$

Эксперимент №5

$$\Delta d5 := \sqrt{ds5^2 + dpr^2} = 0.503 \quad d5 := 5.15$$

$$w5 := 0.119$$

$$\rho w5 := 1012$$

$$\delta5 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w5 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d5}{d5}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w5}\right)^2} \cdot 100\% = 0.059$$

$$\Delta w5 := \frac{\delta5}{100\%} \cdot w5 = 0.007$$

Эксперимент №6

$$\Delta d6 := \sqrt{ds6^2 + dpr^2} = 0.554 \quad d6 := 7.7$$

$$w6 := 0.146$$

$$\rho w6 := 1012$$

$$\delta6 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w6 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d6}{d6}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w6}\right)^2} \cdot 100\% = 0.049$$

$$\Delta w6 := \frac{\delta6}{100\%} \cdot w6 = 0.007$$

Эксперимент №7

$$\Delta d7 := \sqrt{ds7^2 + dpr^2} = 0.512$$

$$d7 := 5.75$$

$$w7 := 0.126$$

$$\rho w7 := 1012$$

$$\delta7 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w7 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d7}{d7}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w7}\right)^2} \cdot 100\% = 0.056$$

$$\Delta w7 := \frac{\delta7}{100\%} \cdot w7 = 0.007$$

Эксперимент №8

$$\Delta d8 := \sqrt{ds8^2 + dpr^2} = 0.505$$

$$d8 := 6.1$$

$$w8 := 0.135$$

$$\rho w8 := 1033$$

$$\delta8 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w8 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d8}{d8}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w8}\right)^2} \cdot 100\% = 0.053$$

$$\Delta w8 := \frac{\delta8}{100\%} \cdot w8 = 0.008$$

Эксперимент №9

$$\Delta d9 := \sqrt{ds9^2 + dpr^2} = 0.503$$

$$d9 := 6.2$$

$$w9 := 0.133$$

$$\rho w9 := 1019$$

$$\delta9 := \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w + \Delta \rho o}{\rho w9 - \rho o}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta d9}{d9}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \rho w}{\rho w9}\right)^2} \cdot 100\% = 0.052$$

$$\Delta w9 := \frac{\delta9}{100\%} \cdot w9 = 0.007$$