

На правах рукописи



**Гулин Денис Алексеевич**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ  
В СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ВАКУУМНЫХ АНКЕРНЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент  
**Султанмагомедов Султанмагомед  
Магомедтагирович**

**Официальные оппоненты:**

**Дудников Юрий Владимирович**  
доктор технических наук/  
ПАО «Уфаоргсинтез» /  
генеральный директор

**Пульников Сергей Александрович**

кандидат технических наук/  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет» / кафедра «Транспортные и  
технологические системы», доцент

**Ведущая организация**

ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина»

Защита диссертации состоится «23» мая 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.rusoil.net>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

В России эксплуатируется более 250 тысяч магистральных нефтепроводов, газопроводов и нефтепродуктопроводов, преодолевающих сложные геологические и климатические условия, естественные и искусственные препятствия – ручьи, малые и большие реки и водотоки, озера, водохранилища, болота, участки многолетнемерзлых грунтов и другие, сложенные слабонесущими грунтами.

Так, например, предприятие ООО «Газпром трансгаз Ухта», осуществляющее свою деятельность на территории Ямало-Ненецкого, Ханты-Мансийского автономных округов и Свердловской области, эксплуатирует 17 ниток газопроводов общей протяженностью 26770 км. Из них 60 % (более 16 000 км) проходят по болотам и заболоченным равнинным участкам с множеством ручьев и рек.

Такие условия требуют отдельного повышенного внимания при решении задач по повышению надежности трубопроводных систем в условиях болот и слабонесущих грунтов по обеспечению продольной устойчивости трубопроводов и устойчивости против всплытия.

В процессе эксплуатации трубопроводов известны случаи обводнения пойменных участков вблизи водных преград, подверженных паводковому затоплению. Кроме того, во время строительно-монтажных работ возможен боковой приток поверхностных дождевых, грунтовых либо талых вод через стенки траншеи.

Увеличение протяженности трубопроводных магистралей для транспорта углеводородов в районах Западной Сибири, повышение требований к эксплуатационной надежности и качеству сооружаемых объектов обосновывают приоритетные задачи, направленные на дальнейшее развитие технологических, организационных и конструкционных решений по объектам трубопроводного транспорта, сооружаемых в условиях слабонесущих грунтов.

Требования нормативной документации и законодательства к конструкциям для балластировки и закрепления трубопроводов с течением времени ужесточаются, увеличивая минимальный порог по их качеству и надежности с одновременным ускорением темпов производства работ. Поэтому перспективы развития – применение новых, более надежных и прочных материалов и конструкций, использование современных методов при производстве работ, повышение уровня механизации производимых работ, а также оптимизация и внедрение новых форм организации строительства.

Использование определенных конструкций средств балластировки и закрепления трубопроводов для различных условий имеет ограниченные области применения. Так, для заболоченных территорий Западной Сибири и Крайнего Севера с суровыми климатическими условиями, проблема круглогодичного строительства может быть, в основном, решена на организационном этапе производства работ, а также за счет увеличения объема зимнего строительства.

Применение различных конструкций анкерных устройств отчасти помогло решить вышеперечисленные проблемы. Анкера, по сравнению с железобетонными или чугунными балластирующими устройствами, обладают меньшей материалоемкостью, их применение уменьшает объем транспортных и погрузочно-разгрузочных работ, что приводит к лучшим экономическим показателям. Повышение надежности работы средств балластировки и закрепления трубопроводов, снижение их материалоемкости и транспортных расходов, а также дальнейшее повышение темпов работ остаются актуальными и в настоящее время.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросам продольной устойчивости трубопроводов и устойчивости трубопроводов против всплытия посвящено большое количество трудов. Одними из самых полных можно считать работы А.Б. Айнбиндера, Л.А. Бабина, В.Л. Березина, П.П. Бородавкина, Л.И. Быкова, Н.П. Васильева, П.Н. Григоренко, А.К. Дерцакяна, Л.А. Димова, М.Я. Елисеева, В.И. Черникина, Э.М. Ясина и др. Кроме того, существует большое количество

конструкций анкерных устройств, разработанных и запатентованных С.М. Соколовым, Ю.М. Минаевым, В.А. Шукаевым, Ф.М. Мустафиним и специалистами ныне действующих АО «ВНИИСТ», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, ФГБОУ ВО УГНТУ, ФГБОУ ВО ТИУ и др.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно пункту 4 – «Разработка теории конструктивной и системной надежности нефтегазопроводных систем, в том числе для сложных климатических условий».

**Цель работы** – обоснование применения вакуумных анкерных устройств для обеспечения устойчивости магистральных трубопроводов в слабонесущих грунтах.

### **Задачи исследований:**

- 1) анализ методов обеспечения проектного положения трубопроводов в слабонесущих грунтах для определения области применения средств балластировки и закрепления трубопроводов;
- 2) оценка влияния характеристик грунта, параметров вакуумного анкера и давления в вакуумной камере на удерживающую способность вакуумного анкерного устройства;
- 3) прогнозирование фильтрационных процессов внутри корпуса вакуумного устройства и разработка рекомендаций по выбору конкретных параметров анкеров;
- 4) разработка новой конструкции вакуумного анкерного устройства и технологии закрепления трубопроводов с применением вакуумных анкеров;
- 5) расчет экономической эффективности использования вакуумных анкерных устройств при строительстве трубопроводов.

### **Научная новизна:**

1. На основании выполненного сравнительного анализа существующих средств балластировки и закрепления трубопроводов

предложена уточненная классификация, включающая в себя предлагаемую конструкцию вакуумного анкерного устройства.

2. Определено влияние геометрических параметров устройства, давления внутри вакуумной камеры и ее высоты на удерживающую способность. Произведено прогнозирование фильтрационных процессов и определена долговечность работы анкерных устройств. На основании полученных результатов предложены рекомендации по выбору параметров анкеров.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в установлении зависимости удерживающей способности вакуумного анкера от геометрических показателей и грунтовых условий, включая прогнозирование фильтрационных процессов в слабонесущих грунтах, для которых планируется закрепление трубопроводов анкерами предлагаемой конструкции.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что полученные в работе результаты позволяют:

- использовать уточненную классификацию средств балластировки и закрепления трубопроводов;
- использовать предложенную конструкцию вакуумных анкерных устройств с целью увеличения надежности закрепления трубопроводов на проектных отметках в условиях слабонесущих грунтов;
- использовать предложенную расчетную математическую модель определения удерживающей способности вакуумного анкера с различными параметрами анкера и в грунтах с различными физико-механическими свойствами и производить прогнозирование изменения его удерживающей способности с течением времени.

На разработанную конструкцию вакуумного анкерного устройства получен патент на полезную модель №168768 «Вакуумное анкерное устройство». Разработанные классификация средств балластировки и закрепления трубопроводов на проектных отметках и расчетная

математическая модель анкера, позволяющая оценить его удерживающую способность, используются в учебном процессе УГНТУ при чтении курса лекций. Конструкция анкерного устройства применяется в ООО «Ордена Ленина трест «Нефтепроводмонтаж» при закреплении трубопроводов в слабонесущих грунтах.

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач и обработке промышленной технологической информации использовался алгоритм «Поиск решения» «MS Excel», универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS для автоматизированных инженерных расчётов и конечно-элементного решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель определения удерживающей способности вакуумного анкерного устройства, используемого при закреплении трубопроводов в слабонесущих грунтах.
2. Способ закрепления трубопроводов, технические и технологические решения по повышению надежности закрепления трубопроводов вакуумными анкерными устройствами.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность результатов работы подтверждена данными экспериментальных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерения и на аттестованном оборудовании по общепринятым методикам, утвержденным в соответствующем порядке.

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: 69-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2015», г. Москва, 2015 г.; X Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2015», г. Уфа, 2015 г.; VI International Conference of Young Scientists and Students “Multidisciplinary

approach to solving problems of geology and geophysics”, Baku, Azerbaijan, 2015 г.; Международная научно-техническая конференция «Транспорт и хранение углеводородного сырья», г. Тюмень, 2015 г.; Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде, г. Уфа, 2016 г.; XI Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2016», г. Уфа, 2016 г.; Международная научно-техническая конференция «Транспорт и хранение углеводородного сырья», г. Тюмень, 2016 г.; XII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2017», г. Уфа, 2017 г.; 71-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2017», г. Москва, 2017 г.; VII Международная научная конференция «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса в год экологии в России», г. Уфа, 2017 г.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 патент на полезную модель, и тезисы 20 докладов на научно-технических конференциях различного уровня.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения; содержит 149 страниц машинописного текста, в том числе 32 таблицы, 63 рисунка и 6 приложений, библиографический список из 118 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность, цель и основные задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, характеристика научной новизны, теоретическая и практическая значимость и реализация научных результатов.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу основных конструкций средств балластировки и закрепления трубопроводов для обеспечения их устойчивости всплытия.

На основании анализа разработанных конструкций представлена классификация, объединяющая существующие на сегодняшний день способы балластировки и закрепления трубопроводов на проектных отметках в две основные группы, рисунок 1. К средствам балластировки первой группы относятся устройства, воздействующие собственным весом. Ко второй – устройства, использующие удерживающую способность грунта.

Выделено две группы причины потери устойчивости трубопроводов:

1) ошибки, возникающие на этапах проектирования и строительства трубопровода (ошибки проектировщиков, возникающие из-за недостоверных данных инженерно-геологических изысканий грунтов основания или недочетов в расчетах; затруднение в прогнозировании изменения свойств грунтов в течение времени из-за их обводнения, выветривания и т.д.; нарушение расчетных параметров при производстве строительного-монтажных работ – количество балластирующих устройств и средств закрепления трубопровода и шаг их расстановки);

2) воздействие окружающей среды на объект в процессе эксплуатации (агрессивное воздействие грунта основания на анкера и балластирующие устройства, их последующее разрушение).

В представленной работе впервые рассмотрено закрепление трубопроводов вакуумными анкерными устройствами, действующими на основе явления присоса.

Рассмотрены случаи возникновения усилия присоса в промышленности, в том числе в трубопроводном строительстве: присос возникает при подъеме затонувших кораблей со дна моря, при удержании морских нефтегазовых сооружений в устойчивом положении, при укладке подводных трубопроводов способом протаскивания по грунту дна подводной траншеи. Во всех вышеперечисленных случаях увеличивается усилие для отрыва, подъема или протаскивания, соответственно.

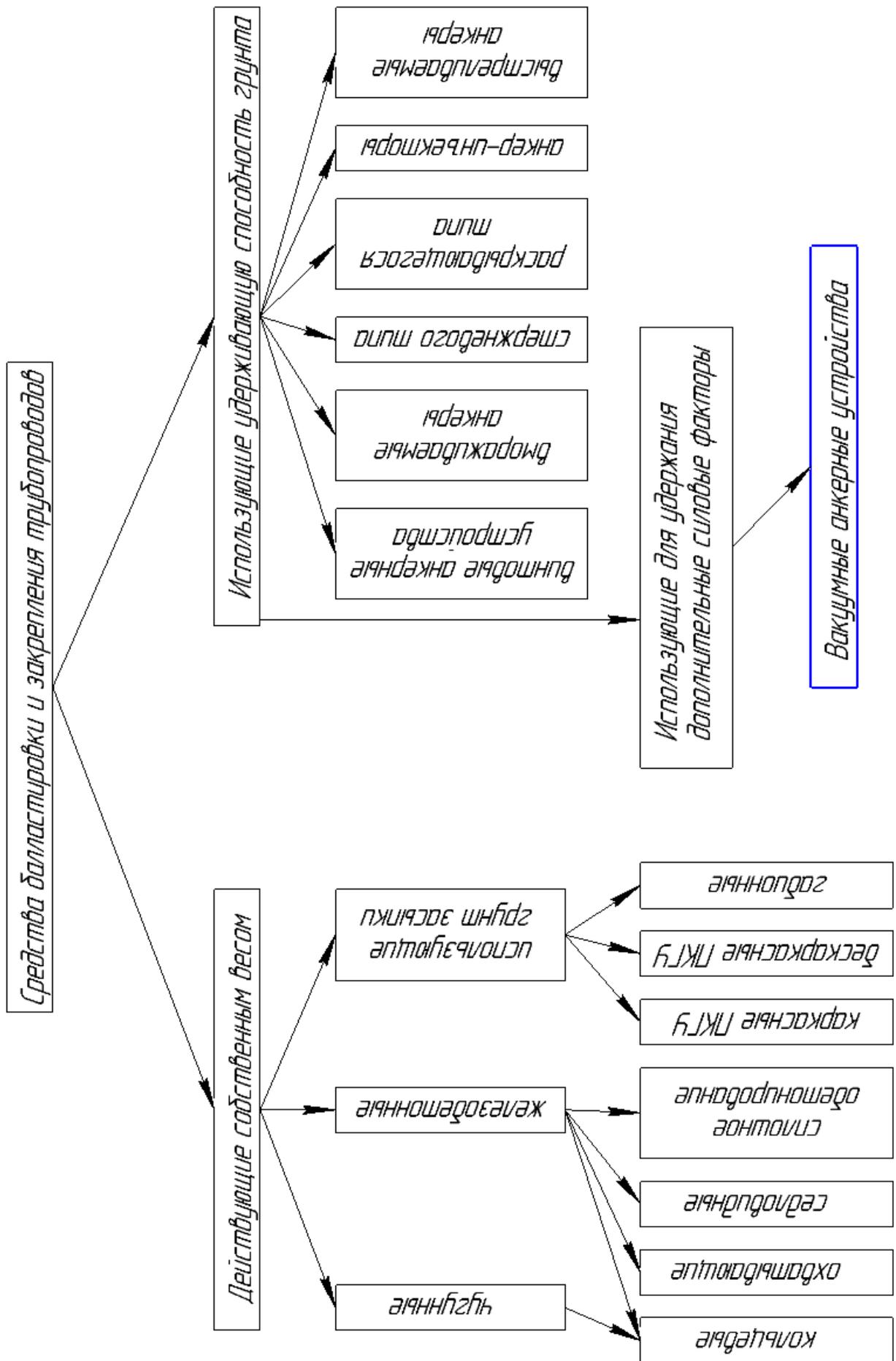


Рисунок 1 – Классификация средств балластировки и закрепления трубопроводов

Установлено, что для повышения надежности и удерживающей способности анкерных устройств необходимо усовершенствование их конструкции и один из возможных вариантов – использование усилия присоса.

**Вторая глава** посвящена разработке методики расчета удерживающей способности вакуумных анкерных устройств.

В первом разделе предложена математическая модель анкерного устройства, построенная на основе расчетной схемы (рисунок 2).

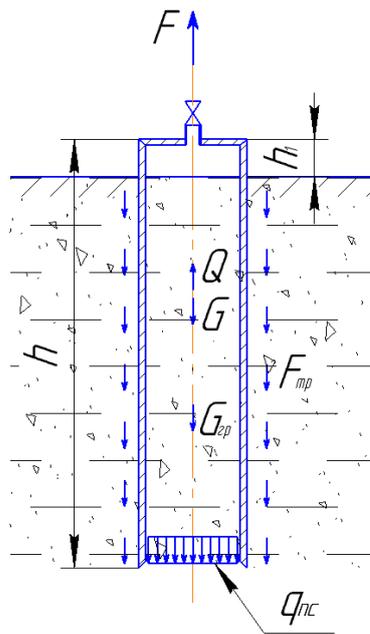


Рисунок 2 – Расчетная схема вакуумного анкера

Удерживающая способность анкерного устройства определяется на основании собственного веса анкера  $G$ ; силы трения внешней поверхности устройства о грунт  $F_{тр}$ ; силы, обусловленной разницей давления между вакуумной камере и атмосферой (сила присоса)  $P$ . Кроме того, сила присоса в вакуумной камере будет удерживать грунт, находящийся внутри анкерного устройства  $G_{гр}$ . Противоположно направленное усилие –  $Q$  – выталкивающая сила воды, действующая на анкер.

Удерживающая способность устройства:

$$F = G + F_{тр} + P + G_{гр} - Q. \quad (1)$$

Собственный вес анкера:

$$G = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_{н}^2 - D_{вн}^2) \cdot h \cdot \gamma_{м}, \quad (2)$$

где  $D_{\text{н}}$  и  $D_{\text{вн}}$  – внешний и внутренний диаметр вакуумного анкерного устройства, м;

$h$  – длина анкера, м;

$\gamma_{\text{м}}$  – удельный вес металла, Н/м<sup>3</sup>.

Силы трения о цилиндрические поверхности анкера вычисляются по известным из механики соотношениям:

$$F_{\text{тр}} = S_{\text{н}} \cdot \tau_{\text{акт}} = \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot (h - h_1) \cdot \tau_{\text{акт}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{н}}$  – площадь наружной поверхностей анкера, контактирующей с грунтом, м<sup>2</sup>;

$h_1$  – высота вакуумной камеры, м;

$\tau_{\text{акт}}$  – касательное напряжение на поверхности анкера, Па, находится по следующей формуле:

$$\tau_{\text{акт}} = e_{\text{акт}} \cdot tg\varphi = \left[ \gamma_{\text{гр}}(h - h_1) \cdot tg^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot tg \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) \right] tg\varphi, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, град.;

$c$  – сцепление грунта, Па;

$\gamma_{\text{гр}}$  – удельный вес грунта, Н/м<sup>3</sup>.

Сила присоса:

$$P = (p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}) \cdot S = (p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}) \cdot \pi \cdot \left( D_{\text{вн}} \cdot h_1 + \frac{D_{\text{вн}}^2}{4} \right), \quad (5)$$

где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление, Па;

$p_{\text{вак}}$  – давление внутри вакуумной камеры, Па;

$S$  – площадь внутренней поверхности вакуумной камеры.

Вес грунта внутри анкерного устройства:

$$G_{\text{гр}} = (h - h_1) \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot \gamma_{\text{гр}}. \quad (6)$$

Выталкивающая сила воды, действующая на анкерное устройство, обусловленная архимедовой силой:

$$Q = \pi \cdot g \cdot \frac{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2}{4} \cdot h \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды с учетом растворенных в ней солей, кг/м<sup>3</sup>.

Во втором разделе главы приведено определение удерживающей способности вакуумных анкерных устройств при различных геометрических параметрах устройства и давления внутри вакуумной камеры.

Установлено, что зависимость удерживающей способности анкера от его диаметра носит линейный характер: чем больше квадрат диаметра  $d^2$  устройства, тем больше его удерживающая способность (рисунок 3). Так, при увеличении квадрата диаметра в 13,6 раз удерживающая способность увеличивается в 13,6 раз.



Рисунок 3 – График зависимости удерживающей способности анкера от его диаметра

Зависимость удерживающей способности анкера от его длины носит параболический характер: чем больше длина устройства, тем больше его удерживающая способность. Так в данном случае, увеличение длины в 5 раз приводит к повышению удерживающей способности почти в 10 раз.

Зависимость удерживающей способности от давления внутри вакуумной камеры обратно пропорциональная: чем больше давление внутри камеры, тем меньше удерживающая способность вакуумного анкерного устройства. Например, при увеличении разницы давлений на 100 кПа, удерживающая способность уменьшается в 1,32 раза.

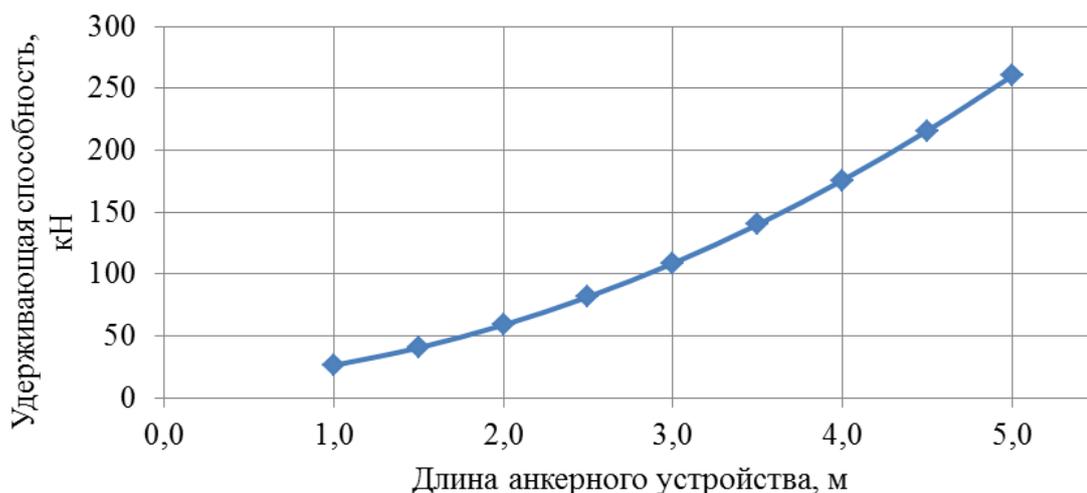


Рисунок 4 – График зависимости удерживающей способности анкера от его длины

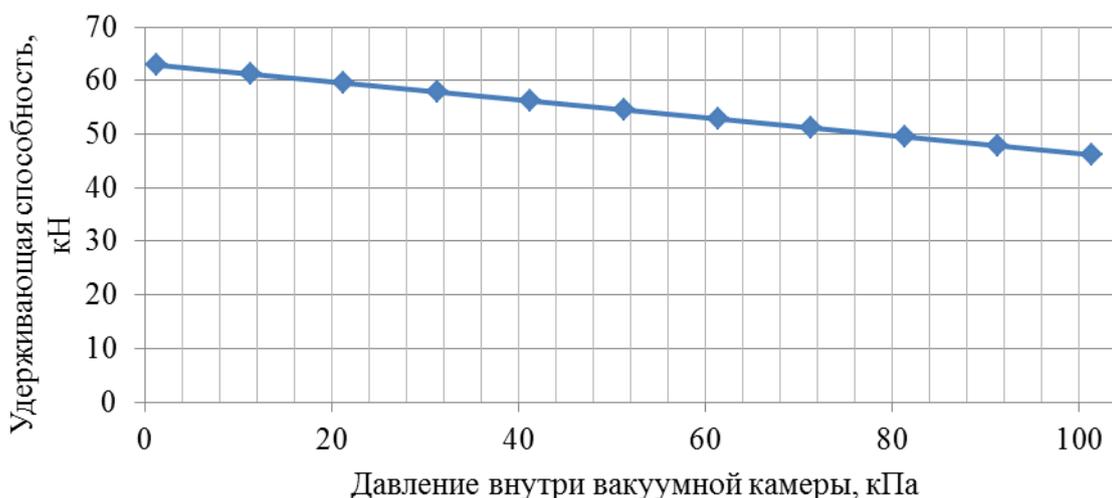


Рисунок 5 – График зависимости удерживающей способности анкера от давления внутри вакуумной камеры

В третьем разделе исследуется влияние параметров грунта и вакуумных анкерных устройств на их удерживающую способность. В качестве грунта использовался наиболее часто встречаемый на трассе магистральных нефтегазопроводов суглинок влажный с удельным весом  $\gamma_{гр.}=17$  кН/м. Значения сцепления и угла внутреннего трения изменялись в следующих интервалах в соответствии с выбранным грунтом:  $c = [6...21]$  кПа,  $\varphi = [17...22]$  град.

График влияния изменения угла внутреннего трения и сцепления грунта показан на рисунке 6.

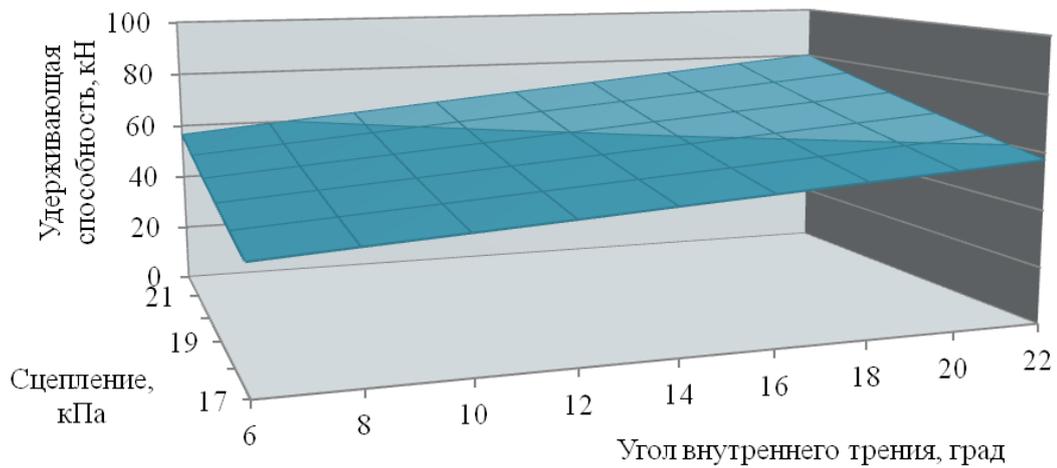


Рисунок 6 – Зависимость удерживающей способности устройства от угла внутреннего трения и сцепления грунта

Увеличение сцепления в 3,67 раза приводит к повышению удерживающей способности устройства на 39,8%, а изменение угла внутреннего трения в 1,29 раз вызывает изменение удерживающей способности на 36,8%.

Произведены расчеты удерживающей способности в зависимости от угла внутреннего трения и удельного веса грунта. Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

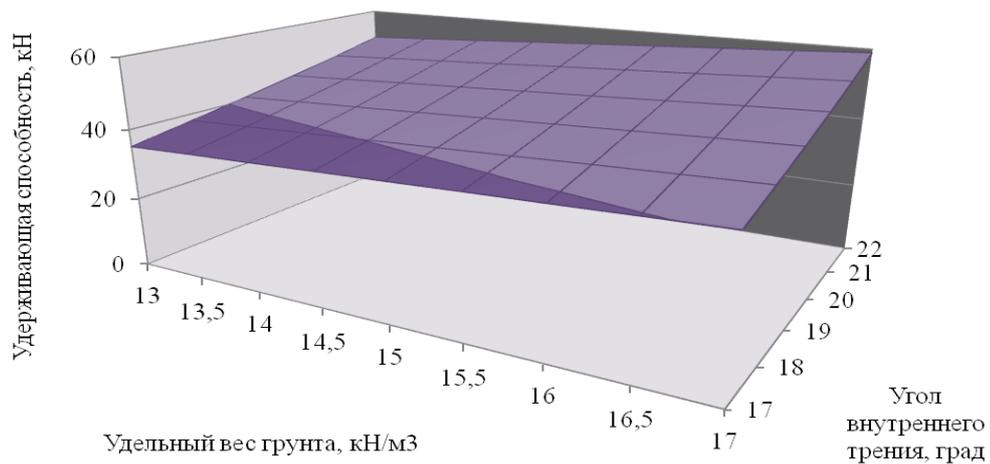


Рисунок 7 – Зависимость удерживающей способности устройства от угла внутреннего трения и удельного веса грунта

Изменение угла внутреннего трения  $\varphi$  в 1,3 раза вызывает изменение удерживающей способности устройства на 44,0 %, а при увеличении удельного

веса грунта  $\gamma_{гр}$ . в 1,3 раза удерживающая способность изменяется всего на 14,7 %.

Установлено, что использование при строительстве трубопроводов вакуумных анкерных устройств, а также их характеристики, такие как диаметр, длина, давление в вакуумной камере, будут зависеть от конкретных условий строительства – диаметра трубопровода, вида грунта, вида перекачиваемого продукта, а основным расчетным показателем будет являться шаг расстановки вакуумных анкерных устройств по длине трубопровода.

Предложено использовать марку устройств в формате ВА – X/Y, где X – диаметр в мм, Y – длина анкера в мм.

В четвертом разделе второй главы произведен расчет анкерного устройства на прочность.

Установлено, что наибольшие напряжения возникают на стенке анкера в месте соединения заглушки и вакуумной камеры, рисунок 8.

На основании расчета и программного моделирования в комплексе ANSYS определен запас прочности устройства при условии недопущения возникновения пластических деформаций. Допустимые усилия в устройстве и коэффициент запаса прочности для анкерных устройств, изготовленных из стали 20 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Допустимые растягивающие усилия и коэффициент запаса прочности

Дх $\delta$	Допустимые усилия, кН	Коэффициент запаса прочности
32х3,5	108,11	8,83
57х3,5	202,95	9,06
76х4	312,15	10,35
89х4	368,51	10,36
114х4	476,89	10,34
159х4	671,99	10,26
219х4	932,11	10,12
273х5	1452,36	12,44
325х5	1734,16	12,27
377х5	2015,96	12,1

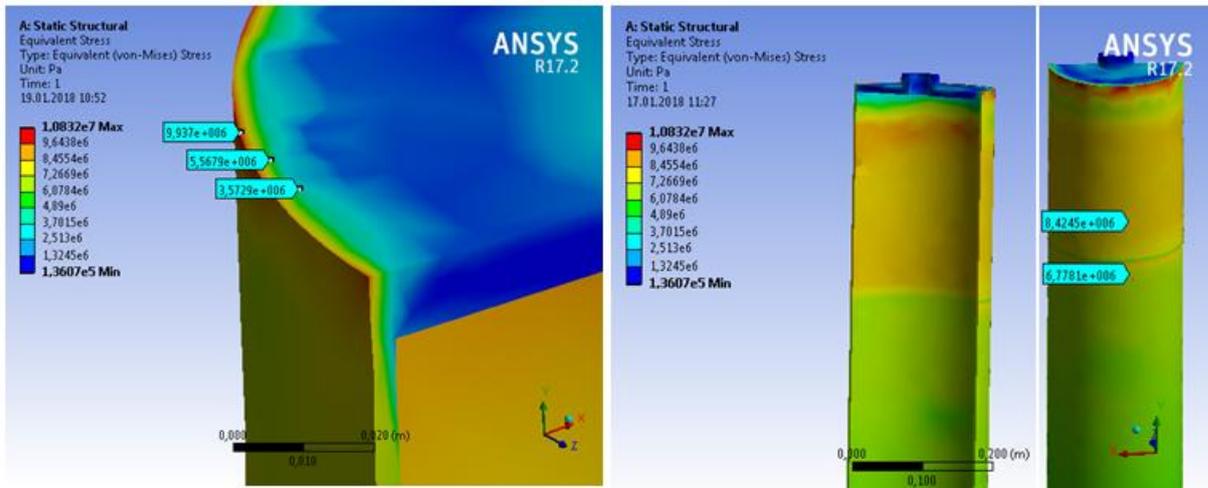


Рисунок 8 – Напряжения в корпусе вакуумного анкера

Пятый раздел посвящен прогнозированию фильтрационных процессов для различных грунтов с различными коэффициентами фильтрации, рисунок 9. Расчет проводился на основе метода смены стационарных состояний с использованием закона Дарси, связывающего коэффициент фильтрации воды в грунте  $k_f$  (м/сут), разность напоров  $\Delta H$  (м), длину пути фильтрации  $L$  (м) и площадь поперечного сечения фильтруемой среды  $S$  (м<sup>2</sup>):

$$Q = \frac{k_f \cdot \Delta H}{L} \cdot S. \quad (8)$$

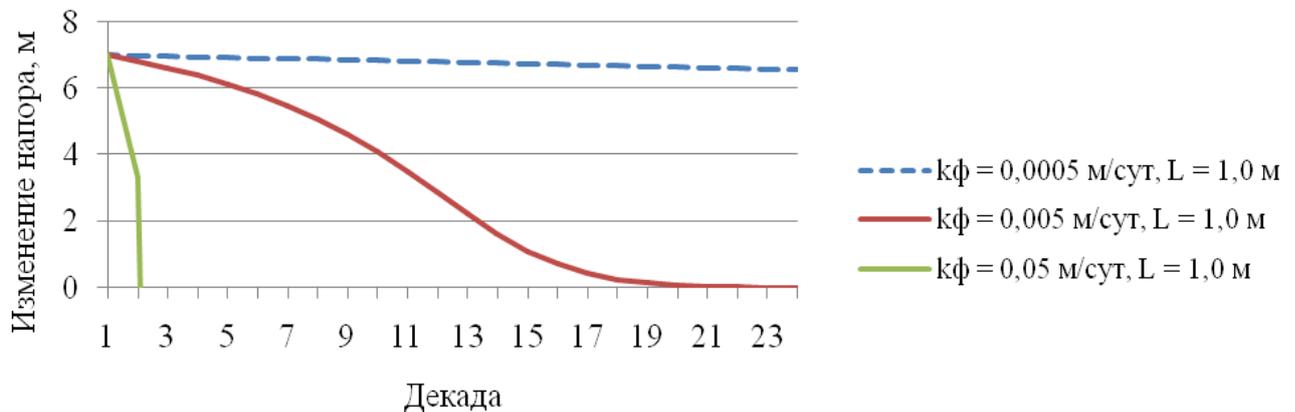


Рисунок 9 – Результаты расчетов для различных коэффициентов фильтрации

Дальнейшее определение несущей способности и шага расстановки анкерных устройств по длине трубопровода производится по существующей методике СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы».

**В третьей главе** описана разработанная конструкция вакуумного анкерного устройства, а также представлены экспериментальные и теоретические исследования удерживающей способности вакуумных анкеров предлагаемой конструкции.

В первом разделе предложена разработка конструкции вакуумного анкерного устройства. Вакуумное анкерное устройство состоит из корпуса – трубы, заглушенной с одной стороны. Посередине заглушки монтируется патрубок, к которому перед началом строительно-монтажных работ присоединяется кран и тройник. К тройнику устанавливается вакуумметр, для контроля давления в камере анкера в процессе монтажа и эксплуатации, а также клапан, через который будет производиться откачивание воздуха из камеры, с целью получения необходимого вакуумметрического давления.

Открытый снизу корпус предварительно углубляют в грунт. В процессе монтажа образуется вакуумная камера, которая снизу ограничена поверхностью грунта, сверху – заглушкой с патрубком, по бокам – стенками корпуса. Через клапан производится откачка воздуха, при этом в камере анкера происходит разрежение, и стенка корпуса может дополнительно погрузиться в грунт под действием усилия действующего на корпус из-за разности давлений. С помощью вакуумметра контролируется давление в вакуумной камере, откачка осуществляется до тех пор, пока давление не опустится до заданного.

Во втором разделе приведено обоснование оптимальных размеров геометрических параметров вакуумного анкерного устройства:

- диаметр и толщина стенки;
- длина анкера;
- высота вакуумной камеры.

Обоснование диаметра устройства произведено из учета минимально возможных земляных работ при строительстве, так как ширина траншеи по дну при балластировке трубопровода утяжеляющими грузами или закреплении

анкерными устройствами назначается из условия обеспечения расстояния между балластирующим устройством и стенкой траншеи не менее 0,2 м.

Кроме того, на основании расчета определено, что оптимальная длина анкерного устройства – 3 м.

Предлагается монтаж устройств производить до работ по подготовке мягкого основания. Как известно, его толщина составляет 0,2 м, поэтому принимаем высоту вакуумной камеры  $h_1 = 0,2 \dots 0,3$  м.

Третий раздел третьей главы посвящен планированию и проведению эксперимента по определению удерживающей способности вакуумных анкерных устройств.

Установлено, что для каждого из факторов  $i$  ( $i = 4$  – диаметр, высота анкера, высота вакуумной камеры, вакуумметрическое давление) требуется три опыта. Поэтому общее число опытов составит  $3 \times 4 = 12$ . Для увеличения точности аппроксимации величины факторов  $x_i$  при опытах должны включать максимальные и минимальные значения из области существования.

Исследования проводились на пойменной части реки Юрюзань на территории города Усть-Катав Челябинской области.

Результаты проведенных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментального определения удерживающей способности вакуумного анкерного устройства

№ п/п	Диаметр, мм	Тол.стенки, мм	Длина, мм	Выс. вак. камеры, мм	Перепад давления, кПа	Расчетные значения, кН	Экспериментальные значения, кН	Погрешность, %
1	76	6	500	100	80	2,72	3,14	15,44
2	76	6	700	110	80	3,64	4,07	11,81
3	76	6	991	110	60	4,77	4,71	-1,26
4	76	6	991	110	80	5,3	5,2	-1,89
5	108	4	600	100	80	4,81	5,3	10,19
6	108	4	903	130	40	5,5	6,03	9,64
7	108	4	903	130	60	6,5	6,77	4,15
8	108	4	903	130	80	7,5	7,36	-1,87
9	159	4,5	700	120	80	9,15	9,61	5,03
10	159	4,5	922	105	40	8,51	9,42	10,69
11	159	4,5	922	105	60	9,89	10,69	8,09
12	159	4,5	922	105	80	11,28	11,87	5,23
Среднее значение погрешности, %								7,11

Проведенные исследования показали, что такие изменяемые параметры, как длина анкера, его диаметр, давление внутри вакуумной камеры и ее высота влияют на удерживающую способность вакуумных анкеров предлагаемой конструкции по зависимостям, определенным в главе 2.

Четвертый раздел главы посвящен обработке экспериментальных данных и их сравнению результатов эксперимента с расчетными значениями.

Эксперименты подтвердили, что зависимость удерживающей способности от глубины погружения анкера и его диаметра носит параболический характер, а удерживающей силы от разницы атмосферного давления и давления внутри камеры – линейный.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований по прогнозированию изменения давления внутри вакуумной камеры с течением времени в условиях изменения температуры окружающей среды, площадка исследований – ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Уфа».

Установлено, что понижение температуры ведет к понижению вакуумметрического давления. При этом, снижение температуры оказывает незначительное влияние – за время наблюдения давление не снизилось более, чем на 3,5 %.

В шестом разделе проработаны вопросы о погрешностях измерений и расчетов. Установлено, что отклонения экспериментальных значений от расчетных находится на допустимом уровне, для экспериментов, проводимых в грунтах.

В седьмом разделе предложены рекомендации по применению вакуумных анкерных устройств.

Анкерное устройство допускается применять в грунтах с наибольшими параметрами удельного веса и сцепления, грунт должен быть водонасыщенным и без скальных включений. Кроме того, на участках строительства уровень грунтовых вод не должен опускаться ниже глубины погружения анкерного устройства. Коэффициент фильтрации грунтов должен быть не менее 0,005 м/сут. Геометрические параметры анкера назначаются по результатам расчетов.

**Четвертая глава** посвящена разработке новой технологии работ по закреплению трубопроводов вакуумными анкерными устройствами.

Краткая технология закрепления трубопровода с использованием вакуумных анкерных устройств: после укладки трубопровода в проектное положение, осуществляется монтаж вакуумного анкерного устройства. Совокупность операций следующая:

- раскладка устройств на берме траншеи;
- забивка корпуса устройств по обе стороны трубопровода с использованием сваебойных машин;
- сварочно-монтажные работы;
- установка футеровочных матов и силовых поясов;
- отладка устройств.

Первый и второй разделы работы посвящены описанию строительно-монтажных работ. Общая схема монтажа устройства приведена на рисунке 10.

В третьем разделе представлены требования по контролю качества производства работ: контролируемые параметры, последовательность производства работ по контролю качества, уровни контроля.

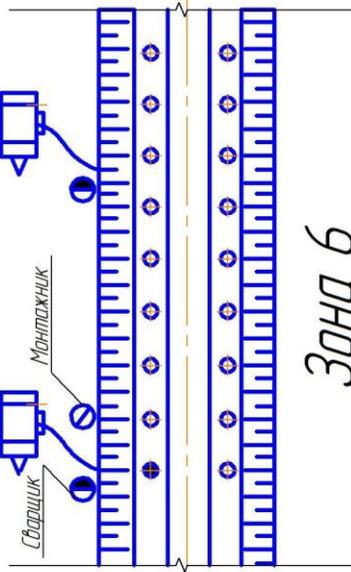
В четвертом и пятом разделах рассмотрены вопросы техники безопасности при производстве работ и охране окружающей среды. Указано, что при закреплении трубопроводов следует руководствоваться правилами техники безопасности, изложенными в соответствующих нормативных документах.

**Пятая глава** включает в себя расчет экономической эффективности вакуумных анкерных устройств. Определена сметная стоимость строительства участка газопровода с применением различных средств балластировки и закрепления трубопроводов – балластирующие устройства охватывающего типа, кольцевые утяжелители и винтовые анкерные и вакуумные анкерные устройства.

Определены основные показатели экономической эффективности вышеперечисленных средств балластировки и закрепления трубопроводов, такие как чистый дисконтированный доход, срок окупаемости, индекс доходности и внутренняя норма доходности.

Зона 3

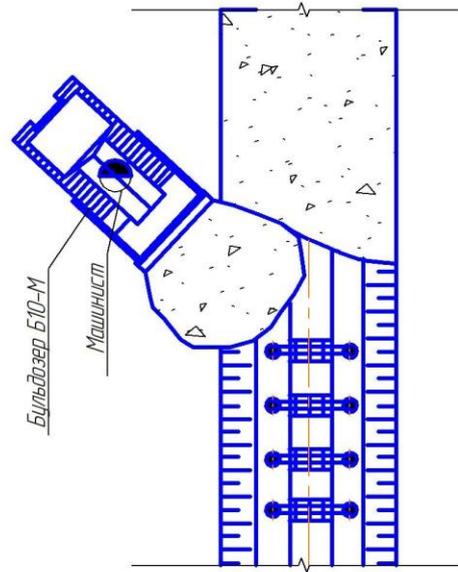
Сварщик  
Сварочный агрегат АДЛ-303  
Монтажник



Зона 6

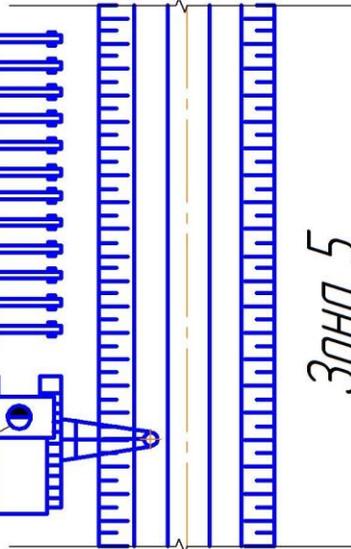
Бульдозер Б10-М

Машинист



Зона 2

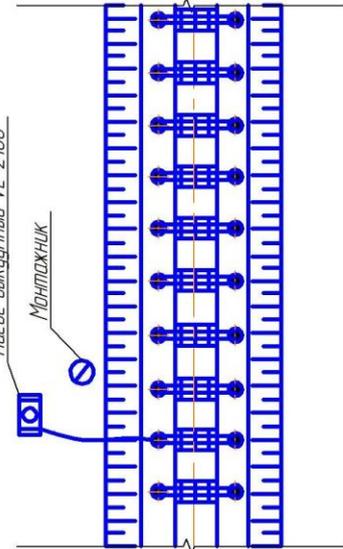
Машинист  
Копер СП4.9  
Такелажник



Зона 5

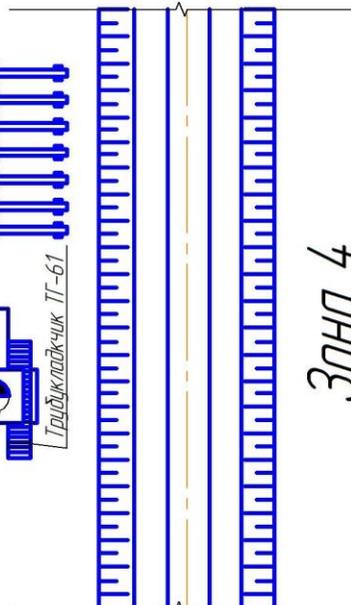
Насос выжигательный VE-2100

Монтажник



Зона 1

Урал-5557  
Водитель  
Корпус анкера  
Такелажник  
Гриджладжчик ТГ-61  
Машинист



Зона 4

Мат футеровочный  
Пояс соединительный

Монтажник

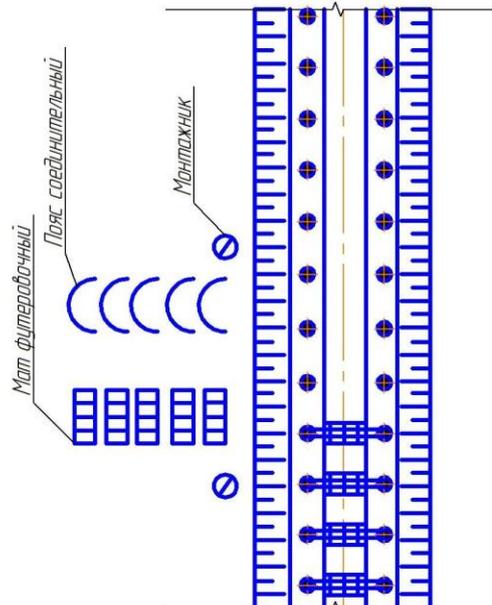


Рисунок 10 – Общая схема монтажа вакуумного анкерного устройства

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполненный сравнительный анализ существующих конструкций, применяемых при закреплении трубопроводов в условиях слабонесущих грунтов показал, что наиболее экономичный способ – применение анкерных устройств. Установлено, что для повышения надежности и удерживающей способности анкерных устройств необходимо усовершенствование их конструкции.

2. На основе составленной математической модели определено влияние геометрических параметров устройства, давления внутри вакуумной камеры и ее высоты на удерживающую способность. Так, увеличение квадрата диаметра анкера  $d^2$  в 13,6 раз удерживающая способность увеличивается в 13,6 раз. При пятикратном увеличении длины анкера – десятикратное повышение удерживающей способности.

Установлено, что наибольшее влияние на удерживающую способность устройства из характеристик грунта оказывает угол внутреннего трения. При его изменении на 30%, удерживающая способность увеличится на 36,8 %.

На основе экспериментального исследования подтверждена предложенная математическая модель. Среднее значение погрешности – 7,11 %.

3. На основании прогнозирования фильтрационных процессов определена область применения анкерных устройств. Наибольшая работоспособность обеспечивается в грунтах с коэффициентом фильтрации  $< 0,0005$  м/сут. При больших значениях коэффициента для увеличения длины фильтрационного пути предлагается применять устройства большей длины.

4. Разработана новая конструкция вакуумного анкерного устройства и технология работ по закреплению трубопроводов вакуумными анкерными устройствами. Составлены основные организационно-технологические схемы производства строительно-монтажных работ, а также их комплектация людскими ресурсами, механизмами, оборудованием и машинами, применяемыми при закреплении трубопроводов анкерными устройствами предлагаемой конструкции.

5. Получен экономический эффект использования вакуумных анкерных устройств для закрепления трубопроводов. На примере газопровода диаметром 720 мм определен срок окупаемости проекта применения

вакуумных анкеров, который ниже на 20,5-82,4 % по сравнению с другими конструкциями средств балластировки и закрепления трубопровода.

**Основные положения диссертационной работы отражены в следующих работах:**

**В ведущих рецензируемых научных журналах и печатных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1 Гулин, Д.А. О закреплении подземных магистральных трубопроводов на болотах / Д.А. Гулин, Х.Ш. Шамилов, Р.Р.Хасанов, С.М. Султанмагомедов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». –2015. – №3 – С. 330–345. URL.: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p330-345\\_GulinDA\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p330-345_GulinDA_ru.pdf)

2 Гулин, Д.А. Анализ конструктивных решений средств балластировки магистральных трубопроводов / Д.А. Гулин, О.И. Гайлунь, Р.Р. Хасанов, С.М. Султанмагомедов // Научный информационный сборник «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». – Москва. – 2017. – №4.– С.5-9.

3 Гулин, Д.А. Расчет удерживающей способности вакуумного анкерного устройства / Д.А. Гулин, Б.И. Салихов, Т.С. Султанмагомедов, С.М. Султанмагомедов // Научный информационный сборник «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». – Москва – 2017. – №3.– С.33-37.

4 Габбасов, Д.Д. Экономическая эффективность применения вакуумных анкерных устройств для закрепления трубопроводов в слабонесущих грунтах / Д.Д. Габбасов, Д.А. Гулин, С.М. Султанмагомедов // Научно-технический журнал «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов». – 2018. - №6. – С. 99-109.

**В других изданиях:**

5 Пат. 168768 Российская Федерация, МПК E02 D5/80. Вакуумное анкерное устройство [Текст] / Гулин Д.А., Шамилов Х.Ш., Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М., Гайлунь О.И., Салихов Б.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГНТУ. – № 2016141765; заявл. 24.10.2016; опубл. 17.02.2017, Бюл. № 5. – 2 с.

6 Гулин, Д.А. Закрепление трубопроводов в слабонесущих грунтах / Д.А. Гулин, Р.Р. Хасанов, С.М. Султанмагомедов // Сборник тезисов 69-ой международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2015». Том 1. – Москва. – 2015. – 110 с.

7 Гулин, Д.А. Конструкция вакуумного анкера / Д.А. Гулин, Р.Р. Хасанов, С.М. Султанмагомедов // Материалы X Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2015».– Уфа, 2015. –С. 267-269.

8 Gulin, D. The design of the vacuum anchor device / D. Gulin, H. Shamilov, R. Khasanov, S. Sultanmagomedov // VI International Conference of Young Scientists and Students “Multidisciplinary approach to solving problems of geology and geophysics”. – Baku, 2015. – 162 p.

9 Гайлунь, О.И. Технологические решения по закреплению трубопроводов с использованием вакуумных анкерных устройств / О.И. Гайлунь, Д.А. Гулин // Тезисы докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2018». – Уфа, 2018. – С. 194-195.