Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Факультет специальных технологий

Кафедра современных специальных материалов

Направление 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

УДК 620.22: 621.643.07 – 025.13

Допустить к защите в ГЭК

Заведующий кафедрой,
к.т.н., доцент А. А. Бердыченко

_____

«___»_____2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

БР 22.03.01.14.000 ПЗ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДА

Пояснительная записка

Студент группы МиТМ-61_____ А. А. Фишер

Руководитель проекта доцент, к.т.н., доцент _____ С. В. Ананьин

Консультанты:

Н.контроль доцент, к.т.н., доцент _____ А. А. Бердыченко

БАРНАУЛ 2020

Реферат

Работа состоит из 4 разделов и включает в себя: 63 страницы текста; 8 таблиц; 13 рисунков. В качестве литературных источников использовано 39 изданий, в том числе: справочники, сборники статей, книги отдельных авторов по соответствующей тематике.

Ключевые слова: нефтегазопровод, трубопровод, стеклопластик, стеклопластиковая труба, намотка.

Объектом исследования в работе является труба для нефтегазопровода.

Предметом исследования является материал и технология изготовления трубы для нефтегазопровода.

Цель работы: проектирование материала для изготовления труб нефтегазопровода и разработка технологии их изготовления.

В результате работы был спроектирован материал для изготовления труб нефтегазопровода, а также разработана технология для их изготовления.

Содержание

Введение.....5
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБАХ.....7
1.1 Условия эксплуатации и требования, предъявляемые к нефтегазопроводным трубам.....8
1.2 Материалы, применяемые для изготовления труб.....10
1.2.1 Стальные трубы.....11
1.2.2 Стеклопластиковые трубы.....13
1.3 Технологии изготовления стеклопластиковых труб.....17
1.3.1 Центробежное формование.....17
1.3.2 Непрерывная намотка.....18
1.3.2.1 Сухая намотка.....20
1.3.2.2 Мокрая намотка.....21
1.3.3 Метод пултрузии.....21
1.3.4 Метод экструзии.....23
1.4 Монтаж стеклопластиковых труб.....23
1.5 Выводы.....24
2 МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....26
2.1 Метод конечных элементов.....26
2.2 Сведения о программе SolidWorks.....28
2.3 Теория монолитности.....29
2.4 Выводы.....31
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБЫ.....32
3.1 Выбор материалов.....32
3.1.1 Выбор наполнителя.....32
3.1.2 Расчет характеристик связующего по теории монолитности.....34
3.1.3 Выбор связующего.....35

3.2 Размеры трубы и характиристики стеклопластика.....36
3.3 Монтаж механического (ремонтного) соединения.....38
3.4 Нагрузки, действующие на трубу.....41
3.5 Моделирование трубы в среде SolidWorks.....42
3.6 Выводы.....44
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБЫ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДА.....46
4.1 Технологический процесс и оборудование для изготовления трубы методом намотки.....46
4.2 Технологическая схема изготовления трубы.....49
4.3 Входной контроль материалов.....50
4.3.1 Входной контроль стеклоровинга.....50
4.3.2 Входной контроль связующего.....52
4.4 Подготовка оснастки.....52
4.5 Намотка.....53
4.6 Отверждение.....54
4.7 Отрезка и снятие с оправки.....55
4.8 Механическая обработка.....55
4.9 Выходной контроль.....55
4.10 Выводы.....57
Заключение.....58
Список литературы.....60

Введение

Основной сферой потребления труб в нашей стране, на данный момент, является нефтегазовая промышленность. Только в основных фондах нефтяных промыслов имеется более 20 млн. тонн газопроводных, водопроводных и насосно-компрессорных труб.

Данная работа направлена на решение проблем, связанных с произ-водством современного трубопровода для нефтегазовой промышленности. В настоящее время важной проблемой производителей трубопроводов для нефтегазовой промышленности является обеспечение долговечности и безопасности, а также снижение затрат на производство и прокладывание трубопровода.

Наиболее распространенным материалом труб, сейчас, считается сталь, так как при невысокой стоимости и длительным опыте применения трубы из стали удовлетворяют всем требованиям по надежности и ремонтопригодности. Но, стоит отметить, что втечение последних 10–15 лет в отечественном трубопроводном транспорте увеличилось число крупных аварий с увеличением тяжести экономических, экологических и социальных последствий. Учитывая, что системы нефтегазовой промышленности эксплуатируются в тяжелых условиях комплексного воздействия механических нагрузок, абразивного и химического воздействия, сероводорода и углекислого газа, теоретические сроки службы труб не совпадают с действительными, поэтому они теряют работоспособность намного раньше и служат всего от нескольких месяцев до 2–3 лет (в особо тяжелых условиях).

Необходимо изготавливать такие трубы, чтобы их срок эксплуатации увеличивался и при этом они были безопасными. Для этого в последнее время стали внедрять новые виды труб в нефтегазовую отрасль.

Потребность в эффективных материалах для изготовления труб нефтяного и газового сортаментов резко возрастает. Поэтому в последние годы особенно усилилась тенденция более широкого использования при производстве труб новых коррозионностойких материалов, в частности различных полимеров и композиционных материалов.

Они уже давно зарекомендовали себя в лучшую сторону по показателям снижения затрат на эксплуатацию и сооружение, по уровню экологической безопасности и во многих других качествах.

Цель работы заключается в проектировании материала для изготовления труб нефтегазового трубопровода и разработки технологии их изготовления.

Задачи:

1 Анализ требований эксплуатации предявляемых к трубам;

2 Качественный подбор материалов для трубы;

3 Исследование виртуальной модели трубы;

4 Разработка технологии изготовления трубопровода.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБАХ

Трубы нефтегазопроводные – трубы, соединяемые между собой для строительства трубопровода (нефтегазопровода).

Нефтегазопроводом называют трубопровод для транспортирования нефти, газа, нефтепродуктов. Нефтегазопровод состоит из отдельных линейных участков труб для перемещения транспортируемых нефтепродуктов от входа названного участка к его выходу, при этом, по меньшей мере, на части линейных участков установлена бесшовная труба. Длина трубы равна длине данного участка, диаметр до 1200 мм.

По своему назначению нефте- и нефтепродуктопроводы можно разделить на следующие группы:

1) промысловые – соединяющие скважины с различными объектами и установками подготовки нефти на промыслах;

2) магистральные – предназначенные для транспортировки товарной нефти и нефтепродуктов из районов их добычи (от промыслов), производства или хранения до мест потребления (нефтебаз, перевалочных баз, пунктов налива в цистерны, нефтеналивных терминалов, отдельных промышленных предприятий и НПЗ). Они характеризуются высокой пропускной способностью, диаметром трубопровода от 219 до 1200 мм и избыточным давлением от 1,2 до 10 МПа;

3) технологические – предназначенные для транспортировки в пределах промышленного предприятия или группы этих предприятий различных веществ (сырья, полуфабрикатов, реагентов, а также промежуточных или конечных продуктов, полученных или используемых в технологическом процессе и др.), необходимых для ведения технологического процесса [1].

Согласно СНиП 2.05.06–85 магистральные нефте- и газопроводы под-

разделяются на четыре класса в зависимости от условного диаметра труб (в мм): I – 1000 – 1200 включительно; II – 500 – 1000 включительно; III – 300 – 500 включительно; IV – 300 и менее.

Прокладку трубопроводов можно осуществлять одиночно и параллельно действующим или проектируемым магистральным трубопроводам в техническом коридоре. Под техническим коридором магистральных трубопроводов согласно СНиП 27.05.06 – 85* понимают систему параллельно проложенных трубопроводов по одной трассе [2].

1.1 Условия эксплуатации и требования, предъявляемые к нефтегазопроводным трубам

Эксплуатация нефтегазопроводных труб связана с определёнными рисками. Главный недостаток такой конструкции — склонность к коррозии. Коррозионные разрушения трубных конструкций являются основной причиной аварий на нефтегазовых трубопроводах.

Коррозия на материалах труб появляется вследствие воздействия вредных компонентов, которые содержатся в газообразных и жидких продуктах нефтегазовых месторождений. К таким веществам относятся сероводород, солёная вода, двуокись углерода, кислоты разных типов, двуокись серы, компоненты грунта. Коррозионные процессы заставляют действовать на опережение, выполняя либо работы по защите металла от коррозии, либо ремонт труб нефтепровода, либо полноценную замену таких конструкций.

Нефтегазовый трубопровод может разрушаться и под влиянием других неблагоприятных факторов. Например, на конструкцию плохо влияют нагрузки механического характера, возникающие при транспортировке и установке труб, давление внешних сред, внутреннее давление транспортируемой продукции [3].

Оптимальный уровень давления жидкости внутри нефтепровода не должен превышать 10-12 МПа. Диапазон температур при эксплуатации нефтегазовых трубопроводов составляет от –50 до +50 °С.

Качественные трубы для обустройства нефтегазовых трубопроводов должны сохранять герметичность и не разрушаться под воздействием следующих факторов:

1) избыток внутреннего гидравлического давления на протяжении 10 (± 0.5) минут, 1,5 PW (PW – это параметр рабочего давления);

2) избыток внутреннего гидравлического давления 4 PW на протяжении 25 (±5) минут;

3) избыток гидравлического давления 1,5 PW после циклического изгиба трубной конструкции;

4) появление коррозионных процессов при внутреннем давлении 2 PW и температурном режиме +80 °С;

5) рабочее внутреннее гидравлическое давление провоцирует появление нагрузок всплытия [4].

Избыток внутреннего гидравлического давления, приводящего к разрушению труб, не должен быть больше 4,5 PW.

Прочность труб должна быть такой, чтобы они смогли выдержать ударную нагрузку малой скорости с энергией на уровне 5 Дж.

Трубы, используемые в обустройстве нефтегазопроводных сетей, должны сохранять свою целостность и рабочие характеристики при воздействии циклических нагрузок внутренним давлением, в 2 раза превышающим параметры рабочего давления. Численность циклов должна составлять не меньше 300 тысяч часов, частота циклов – 1 в 4-минутном интервале. Средние параметры механических характеристик труб должны удовлетворять требованиям, которые обозначены в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Рекомендуемые механические характеристики труб [4]

Наименование показателя	Значение
Осевой предел прочности, МПа, не менее	80
Осевой модуль упругости, ГПа, не менее	18
Окружной предел прочности, МПа, не менее	180
Окружной модуль упругости, ГПа, не менее	26

Длительная прочность труб связана с коэффициентом снижения прочности, который должен удовлетворять следующим требования:

1) коэффициент снижения прочности в нормальных температурных условиях не должен превышать параметр 1,8;

2) коэффициент снижения прочности, когда температура составляет 90 ºС не должен превышать 2,1.

При изготовлении труб из композиционных материалов следует контролировать температуру стеклования полимерного композита, которая должна быть не меньше 110 ℃. Доля армирующего наполнителя в полимерном композите должна варьироваться в пределах 75–83%, а количество пустот не должно превышать 3 %. Поверхность трубы должна быть достаточно твёрдой и составлять минимум 35 единиц по шкале Баркола [4].

1.2 Материалы, применяемые для изготовления труб

В основе нефтегазовых труб может находиться металлический или неметаллический материал. Чаще всего нефтегазовые магистрали выстраивают из стеклопластиковых и стальных труб. Основные технические характеристики таких конструкций представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные характеристики труб [5]

Показатель	Стальные трубы	Стеклопластиковые трубы
Предел прочности на разрыв в окружном направлении, МПа	более 420	300–375
Модуль упругости на разрыв в окружном направлении, ГПа	210–240	35
Плотность, г/см^3	7,85	1,8–1,9
Гидроудар	большой гидроудар	наилучший показатель среди других материалов
Коррозионостой-	требуется покрытие	хорошая

кость		
Срок эксплуатации	до 25 лет	от 50 лет

1.2.1 Стальные трубы

Стальной трубопровод – один из самых популярных видов магистралей для транспортировки нефтегазовой продукции. Он является самым прочным и поэтому часто используется при строительстве систем магистрального трубопровода.

Стальные трубы имеют 3 преимущества:

1) устойчивость к коррозии. Данное преимущество имеют конструкции со специальным защитным покрытием, которое защищает от появления коррозии и ржавчины, а также нержавеющие трубы. Стальные трубы, не защищённые от коррозии, имеют маленький срок эксплуатации;

2) хорошие эксплуатационные характеристики. Конструкция может выдержать воздействие температуры до 500 °С;

3) отличное сопротивление механическим нагрузкам и большая прочность [6].

Стальные трубы, используемые в обустройстве нефтегазопроводов, бывают электросварными с прямым швом, а также бесшовными. Нефтегазопроводные магистрали обустраиваются с использованием труб большого диаметра, который может варьироваться в диапазоне от 50 см до 120 см. Трубные конструкции могут отличаться и по толщине стенок, которая может составлять от 0,7 до 4,8 см. Трубы изготавливаются только из качественной стали (углеродистой или низколегированной с высокой степенью прочности). Как правило, для труб с малым диаметром (до 50 см) выбирается низкоуглеродистая, полуспокойная или спокойная углеродистая сталь. Трубы с диаметром до 102 см содержат в своей основе спокойную и полуспокойную низколегированную сталь. Конструкции, которые имеют самый большой диаметр, изготавливаются из материала высокой прочности, прошедшего термическую обработку [7].

ГОСТ Р 55989-2014 диктует свои требования к материалам, используемым для производства бесшовных труб. Такие изделия должны изготавливаться из стали непрерывного литья, катанных и кованых заготовок низколегированной и углеродистой стали, а кроме того – проходить контроль качества с использованием неразрушающих методик. Производство электросварных труб осуществляется рулонной или листовой, низколегированной или углеродистой спокойной стали, прошедшей обкатку. Электросварные трубы, в которых сварной шов выполнен с использованием тока высокой частоты, проходят процедуру локальной или объёмной обработки сварного шва. Максимальная длина труб указывается в заказе. Данный параметр варьируется в диапазонах 16,5–18,3 м и 10,5–12,4 м [6].

Трубы с защитным покрытием представлены на рисунке 1 [8].



Рисунок 1 – Трубы стальные [8]

Главные минусы стальных труб таковы:

1) технологические ограничения на производство трубных конструкций большого диаметра не позволяют нарастить производительность трубопровода. Кроме того, стальные трубы имеют минимальную устойчивость к коррозионному воздействию, из-за чего срок службы трубопровода сокращается;

2) высокие материальные расходы на трубы, которые не берут во внимание значительное снижение давления в магистралях на перегонах между насосными станциями при транспортировке нефтегазовой продукции;

3) большие расходы на строительство газопроводов, связанные с доставкой конструкций к месту строительства трубопровода, используемых отдельных отрезков труб 10-20 м для обустройства магистралей [6].

1.2.2 Стеклопластиковые трубы

Производство труб из стеклопластика осуществляется из эпоксидных или полиэфирных смол. Диаметр таких конструкций больше по сравнению с другими пластмассовыми трубами. Стеклопластиковые трубные конструкции прочны, выдерживают давление до 28 МПа. Малая теплопроводность изделий в совокупности с отличными диэлектрическими качествами, высокой устойчивостью к коррозии и воздействию химических веществ, минимальной гигроскопичностью, высокой огнестойкостью делает готовую конструкцию лёгкой и наделяет её способностью переносить воздействие температур до +150 ℃.

В соответствии с Техническим руководством ТСТ-002-2004, стеклопластиковые трубы могут быть многослойными. Стенка изделия, в основе которого находится стеклопластик, в соответствии с ТУ 2296-011- 26598466-96 имеет 3 слоя:

1) внутренний, обеспечивающий герметичность изделия, его стойкость к агрессивным средам и абразивам;

2) силовой, обеспечивающий механическую прочность трубопровода при совместном влиянии на него внешних и внутренних нагрузок;

3) внешний, который является гарантом устойчивости трубной конструкции при воздействии неблагоприятных внешних факторов (агрессивные среды, влага, ультрафиолетовое излучение) [9].

В зависимости от особенностей эксплуатации трубы из стеклопластика могут быть однослойными, двухслойными или трёхслойными. Каждый новый слой делает изделие более прочным и устойчивым к воздействиям извне.

Стеклопластиковые трубы с тремя слоями создают по технологии непрерывной намотки. Число слоёв в таких конструкциях будет зависеть от того, в каких сферах в дальнейшем будет использована готовая продукция. Например, однослойные трубные конструкции имеют только один слой, содержащий стекловолокно и специальные добавки. В двухслойной продукции есть второй слой, выполняющий защитные функции. Он расположен с внешней стороны трубы и предназначен для противодействия агрессивным веществам из почвы, а также ультрафиолетовым лучам (если монтаж труб выполнен по поверхности земли). Трёхслойные трубы из стеклопластика сохраняют свои эксплуатационные характеристики в условиях высокого давления. В таких изделиях есть основной, защитный (наружный) слой, а также силовая прослойка, которая находится между конструктивной и защитной. Он делает трубу ещё прочнее, а также убирает разницу между температурами внутри и снаружи, а также внутренним и наружным давлением. Многослойные трубы применяются в специфических отраслях промышленной деятельности [9].

Стеклопластиковые трубы представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Стеклопластиковые трубы [10]

Область использования стеклопластиковых труб достаточно широка. Конструкции применяют для обустройства систем канализации и водоотведения. Незаменимы стеклопластиковые трубы в процессе тушения пожаров, транспортировке технической и питьевой воды. С помощью труб такого типа можно организовать отток отходов различных типов. Также их используют для обустройства трубопроводов на электростанциях.

Трубы из стеклопластика широко применяют для прокладки разных типов коммуникаций:

1) системы канализации;
2) водопроводные и смежные с ними системы;
3) газовые и нефтяные трубопроводы;
4) магистральные коммуникации [11].

Производство стеклопластиковых труб осуществляется с использованием стандартных технологических процессов. В продаже обычно можно найти трубные конструкции стандартного диаметра, но их производители предлагают и услугу индивидуального изготовления труб с другими характеристиками и нужным диаметром.

Параметры стандартной стеклопластиковой трубы должны быть такими:

1) длина трубы не должна превышать 18 м;
2) диаметр трубы должен варьироваться в диапазоне от 3 до 400 см;
3) стеклопластиковые трубы могут иметь разный класс давления (всего таких классов насчитывается 6);
4) изделие имеет 3 уровня прочности.

Все эти качества наделяют стеклопластиковые трубы долговечностью.

Трубы из стеклопластика имеют свои недостатки и преимущества. Отрицательные аспекты таких конструкций незначительные и касаются, в основном, особенностей монтажа (его рекомендуется выполнять в соответствии с инструкцией, иначе проблем с дальнейшей эксплуатацией — не избежать).

Также трубы из стеклопластика имеют малую трещиностойкость, но это можно исправить модификацией стеклопластика.

Изготовление стеклопластиковых труб осуществляется по стандартной технологии, что позволяет получить изделие с нужными характеристиками и параметрами. В большинстве своём такие трубы создаются по стандартным параметрам. Процесс предусматривает непрерывную намотку стекловолоконных нитей на оправу. Чтобы конструкция получилась прочной, нити армируются стекловолоконным составом, затем пропитывается смесью из смол, мелким песком и измельчённым стекловолокном. Готовый продукт имеет внушительный эксплуатационный срок (минимум 50 лет). О более продолжительном сроке эксплуатации таких труб пока говорить нельзя, потому что эксплуатационный период первых изготовленных стеклопластиковых труб пока ещё не закончился. Эксперты считают, что конструкции из стеклопластика могут служить намного дольше сроков, заявленных производителем [11].

Достоинства стеклопластиковых труб:

1) продолжительный эксплуатационный период;

2) стеклопластиковые трубы монтируются в кратчайшие сроки, при этом финансовые расходы на эту процедуру минимальны (оптимальный вариант монтажа конструкций — муфтовое соединение, сварку использовать не нужно);

3) стеклопластиковые трубы весят немного, их масса составляет около 80 % от общей массы металлических аналогов;

4) трубы из стеклопластика неподвластны воздействию коррозии;

5) износоустойчивый материал не подвержен воздействию разнообразных агрессивных сред;

6) стеклопластиковые трубы можно использовать в любое время года, независимо от температурных параметров и каких-либо факторов окружающей среды;

7) сырьё для производства данного материала имеет низкую стоимость, поэтому готовые стеклопластиковые трубы по цене тоже обойдутся недорого;

8) трубы из стеклопластика соответствуют всем экологическим нормам;

9) стеклопластик может выдерживать колебания температур в широком диапазоне (от –65ºС до +155 ℃) [11].

1.3 Технологии изготовления стеклопластиковых труб

Физико-механические характеристики готового изделия зависят от технологии его производства. Стеклопластиковые трубы для нефтегазопроводов производят несколькими способами:

1) центробежное формование, с помощью армирования смолами готового стеклотканевого рукава;

2) непрерывная намотка пропитанного стекловолокна на цилиндрическую оправку;

3) метод пултрузии (протяжка);

4) метод экструзии (выдавливание);

1.3.1 Центробежное формование

Центробежная формовка — один из методов производства стеклопластиковых труб, предусматривающий изготовление изделия от наружной поверхности трубы к внутренней. В данном процессе используется вращающаяся форма. В основе трубы находятся так называемые ровинги (измельчённые стеклянные жгуты волокнистой структуры), песок и полиэфирная смола.

Использование метода центробежной формовки позволяет создавать стеклопластиковые трубы из полиэфирной смолы с добавлением активного наполнителя. Сырьё подаётся в матрицу, которая вращается, и в результате из него получается готовая труба. Её формирование начинается со внешнего слоя. Производственный процесс предусматривает добавление твёрдых

компонентов, наполнителя и стекловолокна в жидкую смолу. Под действием катализатора смола полимеризуется, а ускорение этого процесса происходит вследствие воздействия нагрева. Трёхмерные пространственные химические связи обеспечивают необратимость процесса полимеризации смолы. Таким образом, стеклопластик характеризуется термоустойчивостью, может сохранять стабильность в пространстве при высокой температуре окружающей среды.

Преимущества описанного производственного метода:

1) можно создать трубу со стенкой любой толщины;

2) полимерный композит имеет большую кольцевую жёсткость;

3) арматура трубы имеет гладкую поверхность как снаружи, так и внутри изделия.

Основной недостаток метода центробежного формования заключается в том, что готовая продукция получается дорогостоящей, имеет энергоёмкие затраты [12].

1.3.2 Непрерывная намотка

Изготовить стеклопластиковые трубы можно и с помощью метода непрерывной намотки стекловолокон на оправку вместе со связующим компонентом (это может быть эпоксидная или полиэфирная смола). После завершения намотки происходит отверждение трубы, потом её снимают с оправки, тестируют и отгружают заказчику.

В производственном процессе при создании такой трубы используется «шагающая» оправка, а процесс охлаждения имеет ступенчатую структуру. Сектор оправки двигается продольно, продвигая намотанную трубу через печи с целью предварительной термической обработки. Затем труба сходит с оправки, а в следующих печах происходит окончательное отверждение изделия. Готовая труба разрезается на части с помощью абразивного «алмазного» диска.

Технологическая особенность производства стеклопластиковых труб заключается в нанесении стекломатериалов на оправку из стали послойно. Используемые стекломатериалы пропитываются смолой холодного отверждения. Тип смолы может быть разным, он должен соответствовать тем свойствам, которыми обладает среда, транспортируемая по трубопроводу из такого материала. Заданные условия монтажа и дальнейшей эксплуатации трубопровода становятся базой для расчётов, позволяющих определить оптимальную схему армирования. Расчёты выполняются в соответствии с международными стандартами [12].

После того, как готовая конструкция полимеризуется, формируется инертная, монолитная структура высокой прочности. Её стенка имеет следующее строение:

1) внутренняя стенка содержит стеклопластиковый, термореактивный армированный лейнер. Такая структура делает трубную конструкцию не только герметичной, но и устойчивой к воздействию абразивных и агрессивных сред, которые транспортируются по трубопроводу. Абсолютная шероховатость поверхности внутренней трубопроводной стенки достигает 23 мкм;

2) усиливающий слой из стеклопластика. Гарантирует механическую прочность при одновременном воздействии внутренних и внешних нагрузок, возникающих в ходе использования трубопровода;

3) внешний слой, который называют гель-коутом. Делает внешнюю поверхность трубы гладкой, устойчивой к воздействию влаги, химических веществ, ультрафиолетового излучения, различных атмосферных явлений.

Структура стеклопластиковой трубы представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структура стеклопласиковой трубы [12]

Технология намотки, используемая для производства стеклопластиковых труб, других тел и ёмкостей, предусматривает использование специализированного оборудования, которое включает в себя следующие компоненты:

1) секция, из которой подают стеклянный ровинг;

2) установка для производства связующего вещества (катализирующей смолы, полиэфирной смеси или другого связующего компонента);

3) ванна со связующим веществом (например, катализированная полиэфирная смола или другой тип смолистого вещества, в котором намачивают ровинговые нити);

4) управленческие механизмы для намоточного оборудования;

5) секция намотки за вращательными валами (размер этих валов определяется в соответствии с диаметром конечной стеклопластиковой продукции) [12].

Преимущества использования труб, изготовленных по технологии непрерывной намотки:

1) большая удельная прочность;

2) высокая стойкость к коррозии;

3) маленький вес (в 4 раза меньше по сравнению с массой стальных труб);

4) долговечность и надёжность изделия;

5) небольшие расходы на обслуживание и монтаж, высокая пригодность к ремонту;

6) минимальное гидравлическое сопротивление;

7) экологически чистые и безопасные продукты, транспортируемые по трубопроводам из стеклопластиковых труб;

8) продолжительный эксплуатационный период без необходимости ремонта (до 60 лет) [12].

1.3.2.1 Сухая намотка

«Сухая» намотка стекловолоконных нитей предполагает использование препрегов. Такая технология гарантирует равномерное распределение связующего вещества в общей массе, которое задаётся в момент производства препрегов. Это обеспечивает стабильную прочность готовых изделий. В процессе «сухой» намотки коэффициент трения в 2 раза выше, чем при мокрой. Благодаря этому сухой метод позволяет формировать изделия более сложных форм. Кроме того, технология увеличивает культуру производства и производительность. Однако при использовании этой техники важно обеспечить значительное натяжение арматуры [13].

1.3.2.2 Мокрая намотка

«Мокрая» намотка — технология, предполагающая нанесение смолы на армирующий волокнистый материал в ходе выполнения самой намотки. В рамках данной технологии используется оборудование, включающее в себя такие инструменты:

1) механизм для производства связующего вещества (эпокксидная смола, смесь, катализатор или другой тип связующего вещества, в котором намачивают и через который пропускют ровинговые нити);

2) подающая секция, из которой исходит стеклянный ровинг;

3) ванна со связующим веществом (катализированная полиэфирная смола или другое вещество);

4) намоточная секция, имеющая валы вращения, размер которых определяет диаметр конечной продукции;

5) управленческие механизмы для намоточного оборудования.

«Мокрая» намотка обеспечивает лучшую формуемость для конструкций, поэтому данную технологию часто используют для производства крупногабаритных оболочек со сложной структурой и ёмкостей высокого давления [13].

1.3.3 Метод пултрузии

Пултрузия – технология, используемая для производства композитных длинномерных элементов малого диаметра со статическим поперечным сечением. Детали, сделанные из стекловолокна со смолистой термореактивной пропиткой, вытягиваются в момент прохождения через горячую фильеру, придающую изделию необходимую форму (температура устройства составляет +140 ºС).

Если в экструзивном процессе основным фактором является давление, то пултрузионный агрегат использует тянущее воздействие. Технологический процесс пултрузии состоит из таких этапов:

1) волокнистые нити направляются с катушки в ванну с полимерным материалом, где осуществляется их пропитка термопластичными смолами;

2) после обработки такие волокна проходят через преформовочную установку, в результате которой нити выравниваются и приобретают требуемую форму;

3) до момента затвердевания полимер попадает на фильеру. Несколько нагревателей помогают создать оптимальный режим для полимеризации изделия, а также выбирается скорость протяжки [14].

Тянущая машинка вытягивает продукт после отверждения и разделяет его на отдельные элементы.

Особенности технологии пултрузии:

1) обрабатывать при помощи этого метода можно эпоксидные смолы, винилы, полиэфирные смолы;

2) скорость протяжки волокнистых нитей можно увеличить до 4-6 м/мин. за счёт использования инновационных пултрузионных полимерных составов (при стандартной скорости 2-3 м/мин.);

3) минимальный разброс рабочей зоны составляет 3,05×1 м (протяжка усиливается до 5.5 т), максимальный разброс будет составлять 1,27×3,05 м (усилие – 18 т).

Готовая труба имеет внешние и внутренние стенки идеальной гладкости. Изделие имеет высокий уровень качества и отличные параметры прочности. Основной недостаток метода пултрузии заключается в самой технологии. Производственный процесс занимает много времени и стоит дорого. С его помощью нельзя создать трубы большого диаметра, которые смогут выдерживать серьёзные нагрузки [14].

1.3.4 Метод экструзии

Экструзия – ещё один технологический метод производства стеклопластиковых труб. Он базируется на продавливании пастообразного материала высокой вязкости, выполняемом непрерывно и через специальный, формующий инструмент. Перед подачей в экструдер смола перемешивается с пластичным отвердителем и дроблённым стекловолокном.

Сплошной армированный каркас в готовом изделии отсутствует, поскольку связующий компонент хаотично наполняется стекловолокном. Отсутствующий армирующий пояс приводит к снижению прочности готовых труб.

Благодаря высокопроизводительной экструзивной линии получается бескаркасная композитная конструкция по низкой стоимости, однако спрос на неё ограничивается небольшими механическими свойствами. Полимерная матрица включает в себя полиэтилен и полипропилен [14].

1.4 Монтаж стеклопластиковых труб

Монтаж труб выполняется различными способами. Способы соединения могут быть как разъемными, так и неразъемными. Рассмотрим наиболее доступные и эффективные.

Разъемные соединения:

1) Соединение труб фланцевым методом. Каждая труба на торце оснащена специальным фланцем (кольцом) с отверстиями для крепежных элементов. При транспортировке агрессивных сред требуется периодическая замена прокладки.

2) Муфтовые соединения – применяются для труб любых видов. Можно дополнительно устанавливать съемные соединения или конструкции без последующей разборки (применение клеящих материалов).

3) Механическое (ремонтное) соединение – разновидность муфтового монтажа. Это специальное приспособление, при помощи которого можно легко состыковать трубы хомутом (муфтой), а затем соединить их крепежными элементам (болтами).

Неразъемные соединения:

1) Раструбное соединение. При монтаже следует придерживаться определенной последовательности – вставлять одну трубу в расширение (раструб) следующей.

2) Клеевое соединение. На концы труб наносится склеивающее вещество холодного отверждения или мастика, трубы соединяются, а снаружи покрываются композитом. Используется в узких пространствах.

3) В некоторых случаях допускается применение винтового и резьбового соединения труб.

Неразъемные соединения делают трубопровод прочным. Однако целесообразно применять разъемные соединения, так как при необходимости ремонта или замены трубы, ее можно с легкостью снять [15].

1.5 Выводы

Из всего представленного выше, можно сделать следующие выводы:

1) Нефтегазопровод работает в следующих условиях:

– рабочее давление до 10 МПа;

– температура эксплуатации от –50 ℃ до +50 ℃.

2) Нефтеазопровод должен обладать следующими свойствами:

– срок службы не менее 50 лет;

– твердость поверхности труб и деталей трубопроводов должна быть не менее 35 единиц по Барколу;

– осевой предел прочности при растяжении, не менее 80 МПа;

– окружной предел прочности при растяжении, не менее 180 МПа;

– окружной модуль упругости при растяжении, не менее 26 ГПа;

– осевой модуль упругости при растяжении, не менее 18 ГПа;

3) Из предложенных материалов в качестве материала лучшим является стеклопластик.

Все показатели стеклопластика являются преимуществами и позволяют считать стеклопластиковые трубы универсальной продукцией. Использование труб из стеклопластика решет задачу увеличения производительности магистрального нефтегазопровода, повышения его срока службы, предотвращения коррозии, снижения затрат на его сооружение.

4) Наиболее подходящим способом изготовления труб магистрального нефтегазопровода является метод непрерывной намотки.

Несмотря на его дороговизну, этот способ имеет значительные эксплуатационные преимущества, такие как: высокой гибкости с сохранением прочности; большой долговечности.

5) Монтаж целесообразно проводить с помощью механического (ремонтного) соединения муфтой. Этот метод универсален, так как используется при соединении и при ремонте трубопроводов.

2 МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений, широко используемый в различных областях техники (ракето- и самолетостроение, кораблестроение, строительство и др.).

Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную в некоторой области величину (например, внутреннее усилие в фундаментной балке, перемещение в плите перекрытия и т.п.) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая создается из множества кусочно-непрерывных функций, определенных в конечном числе подобластей (элементов). Обычно такими функциями являются полиномы – линейные, квадратичные, кубичные и т.д. Кусочно-непрерывные функции строятся с помощью значений непрерывной величины в точках соединения элементов (в узлах). То есть, чтобы определить неизвестную величину, нужно определить значения в узлах.

Основные этапы создания дискретной модели неизвестной величины следующие:

1) в исследуемой области задается конечное число точек (узлов);

2) значения непрерывной величины в каждом узле считаются неизвестными, они должны быть определены;

3) исследуемая область разбивается на конечное число подобластей (элементов), имеющих общие точки (узлы);

4) непрерывная величина в каждом элементе аппроксимируется полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины: для каждого элемента определяется свой полином, но его коэффициенты подбираются так, чтобы сохранялась непрерывность величины на каждой границе элемента [16].

Основными преимуществами МКЭ являются следующие:

1) возможность исследовать тела (конструкции), составленные из нескольких материалов (так как свойства материалов соседних элементов могут быть разными);

2) возможность исследовать области (конструкции) любой формы (так как криволинейная область аппроксимируется прямолинейными элементами или точно описывается криволинейными элементами) ;

3) возможность учета различных граничных условий: с разрывной нагрузкой, смешанных;

4) возможность составления общих методик и программ для решения различных по физике задач одного определенного вида (например, программа осесимметричной задачи о распространении тепла может быть использована для решения любой задачи данного типа: о распределении напряжений в осесимметричной конструкции и т.п.) [16].

Дискретизация области. Разбиение области на подобласти – первый этап в решении задачи МКЭ. Эта операция требует инженерных навыков и опыта. Неудачное разбиение приведет к ошибочным результатам решения задачи. При разбиении области необходимо уже иметь некоторые общие представления о результатах решения задачи, чтоб уменьшить размеры элементов в тех частях области, где ожидаемый результат может резко меняться, и увеличить размеры в тех частях, где ожидаемый результат близок к постоянному. Вообще, при разбиении области всегда идет поиск золотой середины: с одной стороны, элементы должны быть достаточно малыми, чтоб получить результаты необходимой точности; с другой стороны, чем крупнее элементы, тем меньше вычислительной работы.

Основные этапы расчета конструкции по МКЭ:

1) разбиение рассматриваемой конструкции на конечные элементы и подготовка топологической, геометрической и физической информации, а также установление факторов взаимодействия с окружающей средой;

2) построение для выделенных конечных элементов соответствующих матриц – жесткости, напряжения – деформации, деформаций – перемещений, а также векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элемента;

3) формирование системы линейных алгебраических и дифференциально-алгебраических уравнений;

4) решение полученных систем;

5) обработка результатов и анализ работы конструкции [16].

2.2 Сведения о программе SolidWorks

Программа SolidWorks® - это система автоматизированного проектирования, использующая графический интерфейс пользователя Microsoft® Windows®. Эта программа позволяет проектировщикам быстро отображать свои идеи в эскизе, экспериментировать с элементами и размерами, а также создавать модели и подробные чертежи:

1) модель SolidWorks состоит из деталей, сборок и чертежей;
2) обычно сначала рисуется эскиз, создается основание, а затем в модель добавляются многочисленные элементы;
3) можно сколько угодно совершенствовать чертеж, добавляя, изменяя элементы и их порядок;
4) связь между деталями, сборками и чертежами гарантирует, что изменения, сделанные в одном виде, автоматически выполняются во всех других видах;
5) чертежи или сборки можно создавать на любом этапе в процессе проектирования;
6) приложение SolidWorks позволяет создавать собственную настройку функций, отвечающую конкретным требованиям [17].

Знание основ компьютерного моделирования и опыт практического его применения в среде САПР SolidWorks позволит с большей эффективностью выполнять реальные проектные задачи [18].

2.3 Теория монолитности

Как правило, композиционный материал представляет собой гетерофазную структуру из двух или более компонентов с четко выраженной границей раздела. Эти компоненты должны быть подобраны не только по предполагаемым свойствам создаваемого изделия (физическим, механическим), но и по совместимости, т.е. должно обеспечиваться хорошее адгезионное взаимодействие матрицы и наполнителя на границе раздела.

Одна из возможных классификаций взаимодействия полимер – наполнитель выглядит следующим образом:

1) простая механическая смесь наполнителя с неполярным полимером обеспечивает простое разбавление и снижение прочности композита;

2) смачивание поверхности наполнителя полимером улучшает взаимодействие и, соответственно, свойства композита;

3) Химические связи на границе раздела фаз – тот вариант, к которому следует стремиться, так как хороший контакт наполнителя с полимером всегда является фактором, способствующим улучшению свойств композита [19].

При рассмотрении вопроса о выборе компонентов композиционного материала, условий его эксплуатации важное значение имеет термомеханическая совместимость на уровне соответствия термических коэффициентов расширения и упругих характеристик материалов (модуль упругости, деформативность).

Главные особенности формирования композита – адгезионное взаимодействие связующего с поверхностью наполнителя. Усадка при отверждении связующего является причиной возникновения напряжения сжатия на границе с волокном. Если усадка значительна, а жесткость полимера велика, то такие напряжения могут явиться причиной образования микротрещин, расслоений и даже деформации волокна.

Большинство КМ – представители термодинамически неравновесных систем, для которых характерно наличие развитой сети внутренних границ раздела и градиентов химических потенциалов элементов в матрице и

армирующих элементах. Эти градиенты являются движущей силой процессов межфазного взаимодействия, в частности взаимной диффузии и химических реакций. Межфазное взаимодействие в ограниченной степени необходимо для получения КМ с оптимальными свойствами, однако интенсивное взаимодействие обычно приводит к ухудшению механических свойств КМ [19].

Процесс механического совмещения компонентов ПКМ представляет собой два следующих друг за другом процесса:

1) смачивание полимером поверхности наполнителя;

2) адсорбция.

Смачивание – одна из важных характеристик межфазного взаимодействия в КМ. Получение КМ методом пропитки и обеспечение прочной связи между компонентами возможно только при условии, что жидкая матрица смачивает поверхность армирующих элементов. Силы сцепления жидкости с поверхностью характеризуются работой адгезии W_a, равной работе разделения их по межфазной границе.

Адсорбция приводит к установлению адгезионного контакта на границе раздела волокно – матрица. При этом надо учитывать кинетику процесса (скорость растекания, установления адсорбционного равновесия), принимая во внимание особенности равновесия адгезива, т.к. в реальных условиях не всегда достигается состояние термодинамического равновесия.

Процессы смачивания определяются изменением поверхностной энергии системы в результате взаимодействия компонентов. Протекание этих процессов зависит от числа и природы функциональных групп на поверхности и ее дефектности.

Кроме того важна термодинамическая совместимость компонентов, то есть способность матрицы и армирующих элементов находиться в состоянии термодинамического равновесия неограниченное время при температурах получения и эксплуатации. Таким образом, после выбора наполнителя

следующим шагом будет проверка совместимости и расчет физико-механических характеристик, требуемых при выборе связующего [20].

2.4 Выводы

В данной главе были рассмотрены необходимые для проектирования материала и изделия методики. Из всего представленного выше, можно сделать следующие выводы:

1) Применение метода конечных элементов позволяет разбивать сложные объекты на более простые и путем решения систем уравнений определяется работа конструкции.

2) Знание основ компьютерного моделирования и опыт практического его применения в среде SolidWorks позволит с большей эффективностью выполнять реальные проектные задачи.

3) Теория монолитности и правильный подбор компонентов композита позволяют обеспечить хорошее адгезионное взаимодействие матрицы и наполнителя на границе раздела и улучшить свойства.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБЫ

3.1 Выбор материалов

Из рассмотренных материалов наиболее подходящим для изготовления нефтегазопровода является стеклопластик. Этот материал в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к изделиям для трубопровода.

Стеклопластик это многокомпонентный материал, стостоящий из стекляного наполнителя (армирующий элемент) и полимерного связующего (матрица). Наполнителем могут быть стеклянные волокна в виде нитей, ровингов, тканей или рубленых волокон. В качестве связующего полиэфирные, фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремний-органические смолы, полиимиды, поликорбонаты.

В ходе эксплуатации основную нагрузку принимают на себя стеклянные волокна, а матрица необходима для поддержания монолитности системы и перераспределения нагрузок между волокнами. Поэтому очень важно обращать внимание именно на их состав и свойства.

3.1.1 Выбор наполнителя

Стеклянные волокна имеют малую стоимость, небольшую плотность, низкую теплопроводность, высокую прочность. Обладают высокой химической стойкостью, не горючи.

Прочность стеклянных волокон 2–6 ГПа, что больше прочности массивного стекла. Модуль упругости стекловолокна 50–130 ГПа, плотность 2500–2600 кг/м^3. Прочность стеклянных волокон возрастает с уменьшением их диаметра. [21], [22].

Существует несколько типов стеклянных волокон. Характеристики их представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Механические характеристики различных типов [22], [23]

Свойство	E	S	AR	E-CR	D
Плотность, кг/м^3	2620	2480–2490	2600–2700	2660–2680	2160
Прочность, МПа	3100–3500	4380–4590	3100–3500	3100–3500	2410
Модуль упругости, ГПа	80–81	88–91	72–74	80–81	52
Удлинение при разрыве, %	4,6	4,5–4,9	2–2,4	4,5–4,9	–

Для изготовления изделий методом намотки применяются директ-ровинги. Директ-ровинги представляют собой некрученую прядь из стеклянных элементарных нитей, которая состоит из одной комплексной нити. В современном производстве используют ровинги диаметром 9–20 мкм. Для изделий различных диаметров методом намотки стоит применять алюмоборосиликатное Е-стекло общего назначения, оно стойко к коррозии и не дорогое [22].

Некоторые марки директ-ровингов, используемых для намотки представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики директ-ровингов из Е-стекла [24]

Тип ровинга	EC11H-300	EC11H-300	EC13H-400	EC16H-600	EC18H-1600
Диаметр, мкм	11	11	13	16	18
Линейная плотность ровинга, текс	200	300	400	600	1600
Комплексных нитей в ровинге, шт	1	1	1	1	1
Удельная разрывная нагрузка, мН/текс	250	300	300	250	250
Замасливатель	крахмал	силан	силан	крахмал	крахмал

Так как прочность стеклянных волокон возрастает с уменьшением их диаметра, то не стоит выбирать ровинг с большим диаметром. Таким образом, наиболее оптимальным для изготовления проектируемого материала нефтегазопровода будет директ-ровинг марки ЕС13Н-400 на основе Е стекла с линейной плотностью 400 текс [22], [24].

3.1.2 Расчет характеристик связующего по теории монолитности

После выбора наполнителя следующим шагом является проверка совместимости и расчет физико-механических характеристик, требуемых при выборе связующего.

Ниже приведена система уравнений (1), которая позволяют, учитывая физико-механические показатели наполнителя, проверить его совместимость со связующим и определить требования к связующему:

$$\begin{cases} \dfrac{\tau_{адг}}{\sigma_в^+} \geq \dfrac{V_в\sqrt{V_в}}{\sqrt{1+\mu_c}} K_u\left(1-K_u\right); \\ \dfrac{\sigma_c^+}{\sigma_в^+} \geq \left(1{,}4\ldots1{,}7\right)\dfrac{V_в\sqrt{V_в}}{\sqrt{1+\mu_c}} K_u\left(1-K_u\right) \quad ; \\ \dfrac{E_c^+}{E_в^+} \geq \dfrac{2\left(1+\mu_c\right)\left(1-V_в\right)}{225V_в} \ln^2\dfrac{1}{\left(1-K_u\right)} \quad ; \end{cases} \tag{1}$$

где $\tau_{адг}$ – адгезионная прочность; σ_c^+и $\sigma_в^+$ – прочность при растяжении связующего и волокна; E_c^+ и $E_в^+$– модуль упругости при растяжении связующего и волокна; $V_в$ – относительное содержание волокна; K_u – коэффициент использования прочности армирующего материала; μ_c – коэффициент Пуассона связующего [19], [20].

Для расчета используем следующие параметры:

$V_в$=0,75, K_u=0,9, μ_c=0,3, $E_в$=80 ГПа, $\sigma_в$=3,1 ГПа.

Произведя расчет и подставив все параметры получаем систему уравнений (2):

$$\begin{cases} \dfrac{\tau_{адг}}{\sigma_в^+} \geq 0{,}05; \\ \dfrac{\sigma_c^+}{\sigma_в^+} \geq 0{,}07; \\ \dfrac{E_c^+}{E_в^+} \geq 0{,}02; \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, связующее должно иметь следующие характеристики: $\tau_{адг} \geq 155$ МПа, $\sigma_c^+ \geq 217$ МПа, $E_c^+ \geq 1600$ МПа.

Данные параметры являются рекомендованными и идеальными. Допускается несоответствие какого-либо параметра.

3.1.3 Выбор связующего

Выбирать связующее необходимо с учетом теории монолитности, связующее должно хорошо вступать во взаимодействие с наполнителем и раскрывать его армирующие свойства.

Для изготовления нефтегазопровода из стеклопластика чаще всего применяют эпоксидные связующие. Эпоксидные связующие в наиболее полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к связующим для изготовления армированных пластиков. Они обладают высокими адгезионными и механическими характеристиками, позволяющими полно использовать свойства армирующих волокон. Они стойки к действию растворителей и агрессивных сред. Влагостойки и эксплуатируются до 200°С. Основные параметры отвержденных связующих, которые возможно применененять для трубопровода представлены в таблице 5 [21].

Таблица 5 – Типы отвержденных связующих и их характеристики [21]

Характеристика	Фенолформальдегидное	Полиэфирное	Эпоксидное	Полиимидное
Предел прочности при растяжении и сжатии, МПа	40–70 100–125	30–70 80–150	35–100 90–160	90–95 250–280
Модуль упругости, ГПа	7–11	2,8–3,8	2,4–4,2	3,2–5
Плотность, г/см^3	1,2–1,3	1,2–1,35	1,2–1,3	1,41–1,43
Относительное удлине-	0,4–0,5	1–5	2–9	1–2,5

ние, %				
Усадка, %	15–25	5–10	1–5	15–20
Рабочая температура,℃	260	120	200	400

Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что эпоксидная смола в качестве связующего материала для трубопровода подходит, так как у данного вида связующего значение модуля упругости удовлетворяют требованиям, значение прочности при растяжении данного связующего более близко соответствует требуемому значению. При этом связующее имеет малую усадку и обладают наиболее низкой ценной. Особенно важно то, что эпоксидное связующее является химически стойким к вредным средам [21].

Эпоксидные связующие бывают различных марок. Для выбора подходящей смолы, сравним некоторые связующие высшего сорта и первый сорт ЭД-22 (в настоящий момент никто из отечественных производителей не выпускает качественную смолу ЭД-22 высшего сорта) согласно ГОСТ 10587-84 «Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия» (таблица 6) [25].

Таблица 6 – Некоторые эпоксидные связующие [25]

Характеристика	ЭД-16 (высший сорт)	ЭД-20 (высший сорт)	ЭД-22 (первый сорт)
Массовая доля эпоксидных групп, %	16,0–18,0	19,9–22,0	22,1–23,6
Массовая доля летучих веществ, % не более	0,2	0,2	0,1
Динамическая вязкость при 25 ℃, Па	5–18	13–20	7–12
Время желатинизации, ч не менее	4	8	9
На внешний вид	высоковязкая	вязкая	низковязкая

С учетом приведенных данных, нам подходит эпоксидное связующее марки ЭД-22, так как при большей массовой доли эпоксидных групп она имеет небольшую вязкость, что позволяет хорошо распределить связующее по волокну. Кроме того, связующее имеет меньшее количество летучих

веществ, что является безопасней для персонала в ходе изготовления, а так же при эксплуатации [25].

3.2 Размеры трубы и характиристики стеклопластика

Трубы стеклопластиковые изготавливают с учетом того, что длина должна соответствовать диаметру. При диаметре от 114 до 219 мм длина составляет от 6 до 9 м; при диаметре свыше 219 мм – от 10 до 12 м. Индивидуально, по заказу, длина трубы может быть изменена.

В этой работе спроектируем трубу диаметром 300 мм, длиной 8 м. Для обеспечения целостности трубы при нагрузках 10 МПа, а также в соответствии ГОСТ Р 53201-2008 «Трубы стеклопластиковые и фитинги. Технические условия» для трубы такого диаметра требуется толщина стенки более 10 мм, поэтому мы спроектируем трубу толщиной 15 мм [26].

Для проектирования трубы необходимо задать физико-механические характеристики стеклопластика. Так как в композитах характеристики зависят от соотношения количества и свойств компонентов, то их мы будем рассчитывать по правилу смеси.

Расчет плотности:

$$\rho_{км} = \rho_в V_в + \rho_с (1 - V_в); \quad (3)$$

где $\rho_{км}$ – плотность композиционного материала, $\rho_в$ – плотность волокна, $V_в$ – объемная доля волокна, $\rho_с$ – плотность связующего. Подставим в уравнение 3 следующие данные: $V_в$ =0,75, $\rho_в$=2620 кг/м^3, $\rho_с$=1200 кг/м^3. Рассчитываем и получаем:

$\rho_{км}$=2265 кг/м^3;

Расчет прочности:

$$\sigma_{км} = \sigma_в V_в + \sigma_с (1 - V_в); \quad (4)$$

где $\sigma_{км}$ – прочность композиционного материала, $\sigma_в$ – прочность волокна, $V_в$ – объемная доля волокна, $\sigma_с$ – прочность связующего. Подставим в уравнение 3 следующие данные: $V_в$ =0,75, $\sigma_в$=3100 МПа, $\sigma_с$=35 МПа. Рассчитываем и получаем:

$\sigma_{км}$=2333 МПа;

Расчет модуля упругости:

$$E_{км} = E_в V_в + E_с (1 - V_в); \quad (5)$$

где $E_{км}$ – прочность композиционного материала, $E_в$ – прочность волокна, $V_в$ – объемная доля волокна, $E_с$ – прочность связующего. Подставим в уравнение 3 следующие данные: $V_в$ =0,75, $E_в$=80 ГПа, $E_с$=2,4 ГПа. Рассчитываем и получаем:

$E_{км}$=60 ГПа;

Предел текучести рассчитывается по формуле 6:

$$\sigma_т = P_р \times \frac{R}{h}; \quad (6)$$

Где $P_р$ – разрушающее давление (30 МПа), R – внутренний радиус трубы (150 мм), h – толщина стенки (15 мм).

Получаем:

$\sigma_т$=300 МПа.

Полученные физико-механические характеристики стеклопластика заносим в таблицу 7.

Таблица 7 – Физико-механические характеристики [27]

Плотность (кг/м^3)	2265
Модуль упругости, ГПа	60
Предел прочности при растяжении, МПа	2333
Предел текучести, МПа	300
Теплопроводность, Вт/мК	0,3
Коэффициент линейного расширения, ×10^6 град $^{-1}$	0,45–8,3
Гигроскопичность, %	0,5

3.3 Монтаж механического (ремонтного) соединения

Для монтажа трубопровода эффективно применять механическое муфтовое соединение. Так как механическое (ремонтное) соединение при помощи стяжной стальной муфты применяется как при прокладке трубопровода, так и при ремонте труб, то оно универсально.

Механическое (ремонтное) соединение выполнено в виде стального хомута (муфты) с внутренними уплотнителями из синтетического эластомера. На изделие наносят антикоррозионное покрытие, а для защиты соединения стык труб также подвергается обработке антикоррозионным покрытием. Муфта имеет приспособления для стяжки, например болты. Важно правильно проводить стяжку, чтобы не разрушить трубу. Данный вид соединения не требует никакого обслуживания. После проведения механического соединения трубопровод сохраняет все физико-механические свойства, в том числе и гидравлические характеристики. Такое соединение представлено на рисунке 4 [28].

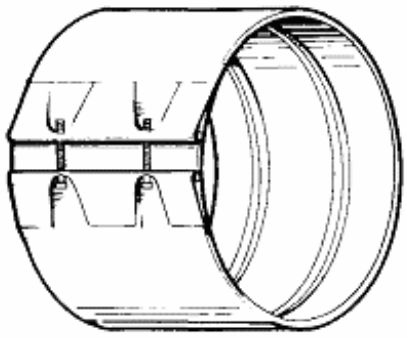


Рисунок 4 – Механическое соединение [28]

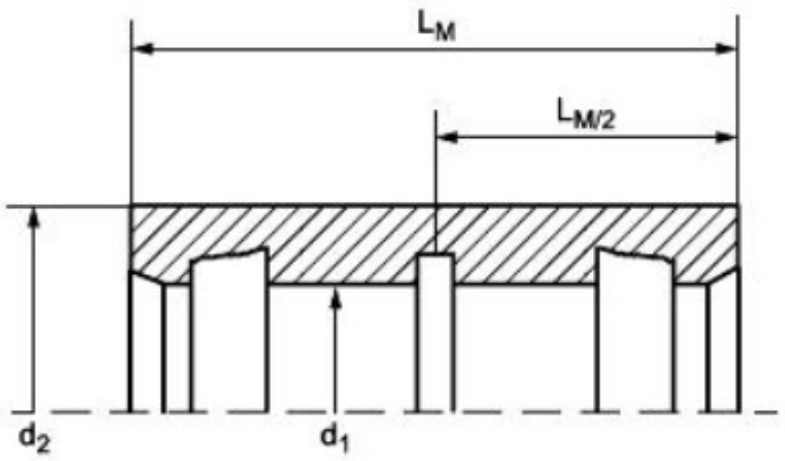
При монтаже, соблюдая требования по чистоте уплотнений муфты и по недопущению попадания посторонних предметов на соединяемые поверхности труб, надвигается муфта на неподвижную трубу с зазором, обеспечивающим свободное перемещение муфты по трубе. Затем пристыковывается соединяемая труба. Надвигается стяжная муфта до границ отметок на стыкуемых трубах. Затем производится затяжка болтов на муфте. После первоначального стягивания болтами муфта простукивается обрезиненным

деревянным молотком, чтобы улучшить посадку муфты и добиться полного прилегания уплотнения. Затем муфту затягивают с заданным крутящим моментом на болтах затяжки. В зависимости от диаметра муфты может потребоваться несколько повторений этой процедуры. Важно не превышать крутящий момент [28].

В соответствии с ГОСТ Р 54560-2015 «Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном, для водоснабжения, водоотведения, дренажа и канализации. Технические условия», определяются геометрические размеры муфт. Так для номинального диаметра 300 мм размеры представлены в таблице 8, а схема муфты представлена на рисунках 5 и 6 [29].

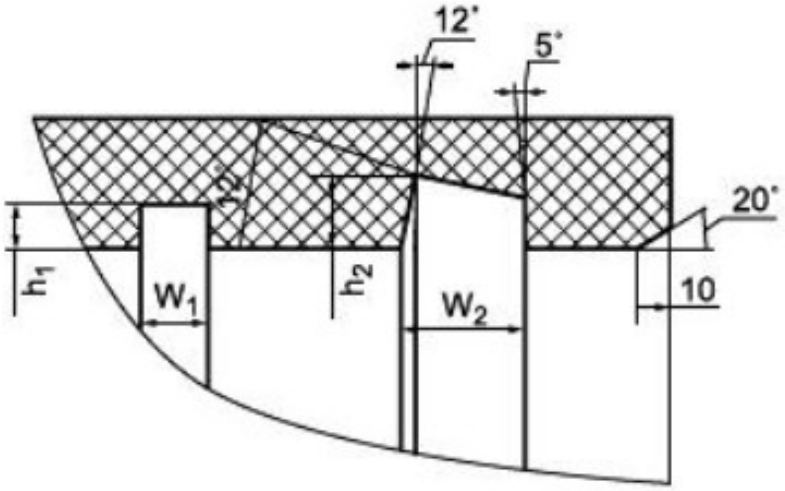
Таблица 8 – Геометрические размеры муфты [29]

d_1, мм	d_2, мм	L_m, мм	$L_{m/2}$, мм	W_1, мм	W_2, мм	h_1, мм	h_2, мм
310	370	270	135	16	24,5	10,5	11,5



d_1 – внутренний диаметр муфты; d_2 – наружный диаметр муфты; L_1 – длина муфты

Рисунок 5 – Геометрические размеры муфты [29]



h_1 – глубина канавки под центральный ограничитель; h_2 – глубина канавки под уплотнительные кольца; W_1 – ширина канавки под центральный ограничитель; W_2 – ширина канавки под уплотнительные кольца

Рисунок 6 – Геометрические размеры канавок [29]

3.4 Нагрузки, действующие на трубу

Согласно своду правил СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85» на трубопровод воздействуют нагрузки двух типов: постоянные и временные. К постоянным нагрузкам относятся: вес конструкции, вес транспортируемой среды, внутреннее гидростатическое давление. При проектировании важно учитывать значения этих параметров [30].

Вес единицы длины трубопровода:

$$q_{mp} = \pi \times \gamma_{mp} \times \left(\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) = 0{,}33 \text{ кПа}; \quad (7)$$

где $\gamma_{ср}$ – объемный вес стеклопластика (2194 кг/м^3); D – наружный диаметр; h – внутренний диаметр.

Вес перекачиваемой среды на единицу длины трубопровода определяют по формуле:

$$q_{ср} = \frac{\pi}{4} \times \gamma_{ср} \times (D - 2h) = 2{,}36 \text{ кПа}; \quad (8)$$

где $\gamma_{ср}$ – объемный вес транспортируемой среды (для нефти 1000 кг/м^3); D – наружный диаметр; h – толщина стенки.

Так как временные нагрузки воздействуют лишь некоторое время, а некоторые из них вовсе могут отсутствовать, то, скорее всего воздействие их на трубы будет недостаточным для разрушения. Кроме того, трубы будут изготавливаться с учетом запаса прочности на непредвиденные ситуации.

Мы учтем лишь весовые нагрузки снега. Снеговая нагрузка на единицу трубы:

$$q_c = 0{,}4 \times S_c = 2{,}24 \text{ кПа}; \quad (9)$$

где S_c – объемный вес снега на 1 м^2 (5,6 кПа для заснеженных районов); 0,4 – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Схема распределения нагрузок на трубу представлена на рисунке 7.

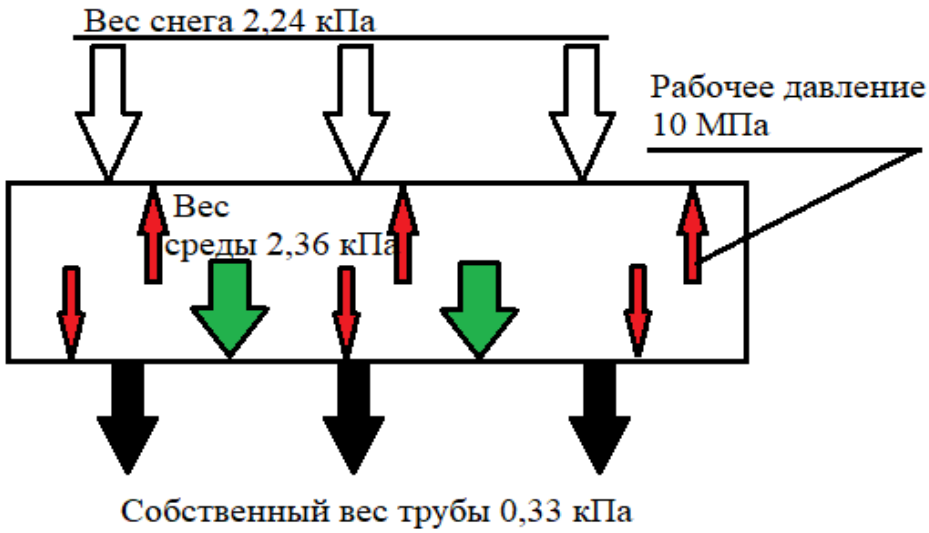


Рисунок 7 – Схема распределения нагрузок

3.5 Моделирование трубы в среде SolidWorks

В среде SolidWorks была построена модель трубы, имеющая следующие размеры: длиной 8 м, внутренним диаметром 300 мм и толщиной стенки 15 мм.

К модели быль применен материал стеклопластик имеющий характеристики согласно таблице 7.

Модель закреплена фиксированной геометрией на краях трубы.

К модели приложены действующие нагрузки: сила тяжести, внутреннее рабочее давление в трубе равное 10 МПа, снеговые нагрузки 0,002 МПа, весовая нагрузка перекачиваемой среды 0,002 МПа, нагрузка собственного веса трубы 0,0003 МПа.

В процессе исследования трубы следует учитывать, что модель является объектом в условиях идеальной среды и учитываются в процессе исследования не все факторы.

Все результаты, которые будут получены в программе SolidWorks приближены к идеальным, а на практике в реальных условиях они могут быть другими.

Модель трубы с приложенными нагрузками представлена на рисунке 8.

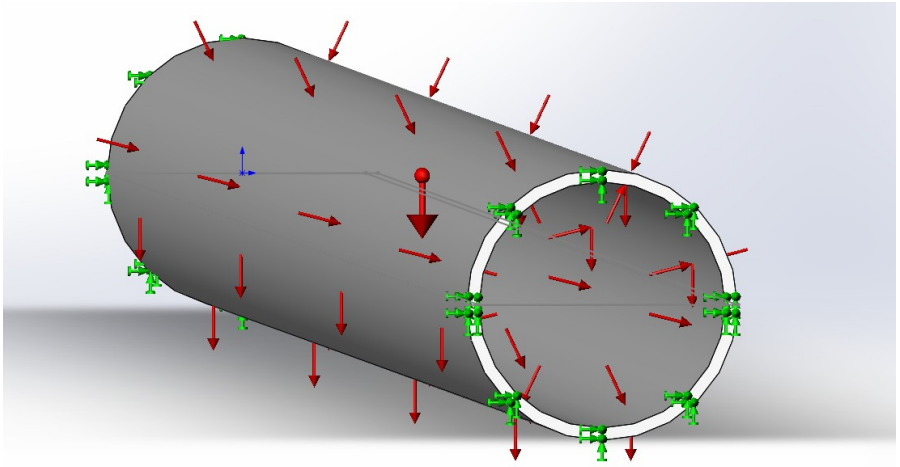


Рисунок 8 – Модель трубы

В процессе исследования трубы следует учитывать, что модель является объектом в условиях идеальной среды и учитываются в процессе исследования не все факторы. Все результаты, которые будут получены в программе SolidWorks приближены к идеальным, а на практике в реальных условиях они могут быть другими.

Итак, в результате исследования труба выдерживает приложенные нагрузки. Коэффициент запаса прочности трубы равен 2,3. Что обеспечивает ее надежность и безопасность. Увидеть это можно на рисунке 9.

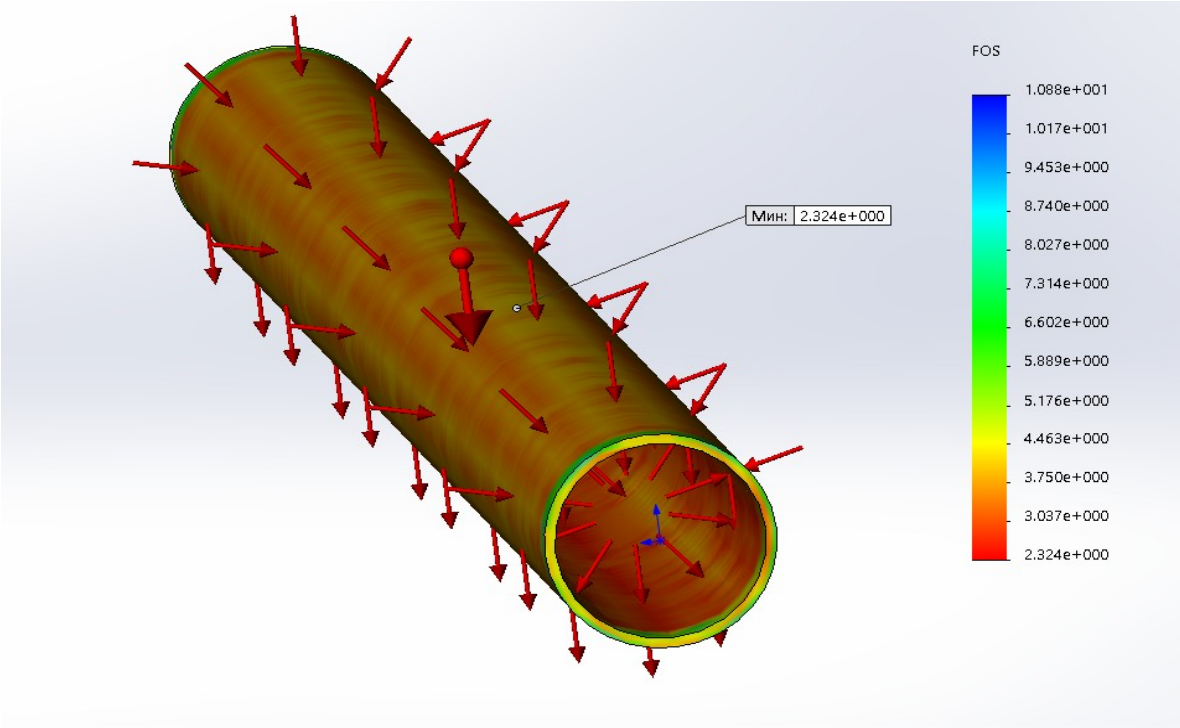


Рисунок 9 – Коэффициент запаса прочности

Перемещение составляет не более 2 мм. Напряжения, вызываемые в трубе, распределены равномерно (max=129 МПа), так же как и эквивалентная деформация (max=0,0017). Распределение напряжений на рисунке 10.

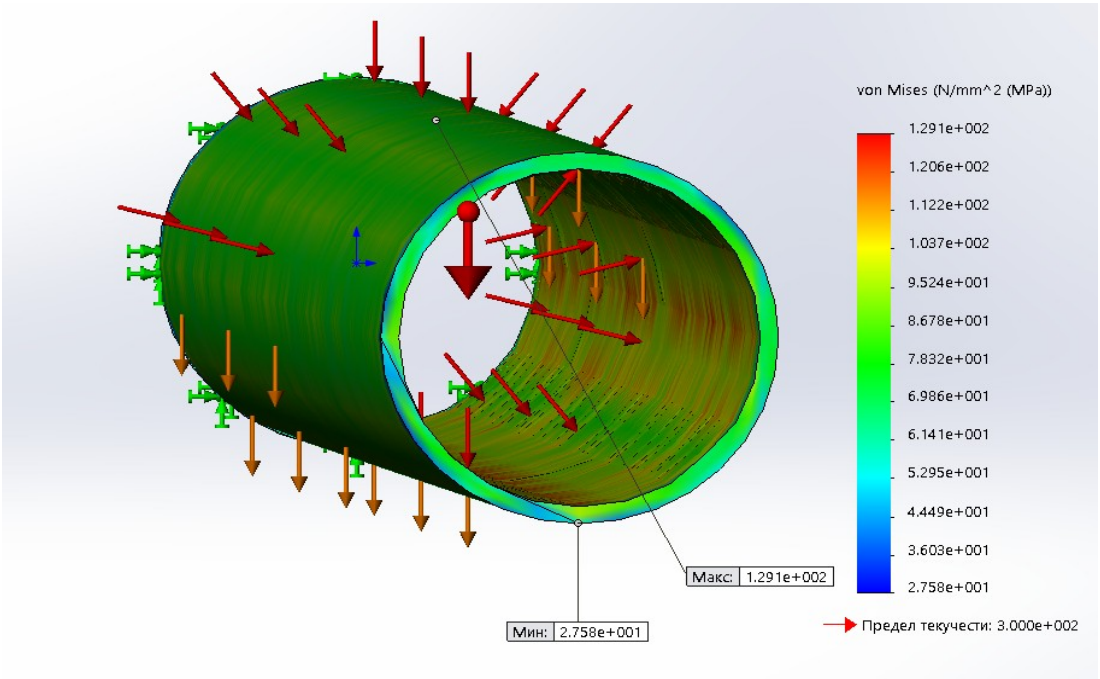


Рисунок 10 – Напряжения в трубе

Полученные результаты удовлетворяют требованиям предъявляемым к трубам, значит материал подобран, верно.

3.6 Выводы

В этой главе были подобраны материалы для изготовления трубы, подобран способ монтажа и проведено виртуальное исследование трубы. Результаты следующие:

1) подобран стеклопластик на основе стеклянного директ-ровинга марки ЕС13Н-400 и эпоксидного связующего марки ЭД-22:

– связующее ЭД-22 обладает небольшой, но достаточной вязкостью для равномерного распреенияить связующего по волокну. Работает при температурах до 200 градусов и имеет небольшую усадку при отверждении, стоек к большенству агрессивным средам и коррозии;

– стеклоровинг марки ЕС13Н-400, в основе которого алюмоборосиликатное Е-стекло, хорошо подходит для стеклопластиковых изделий методом намотки. Он имеет удельную разрывную нагрузку 300 мН/текс, химостоек, обладает небольшой плотностью и теплопроводностью;

2) для монтажа трубопровода выбран способ механического (ремонтного) муфтового соединения. Он универсален;

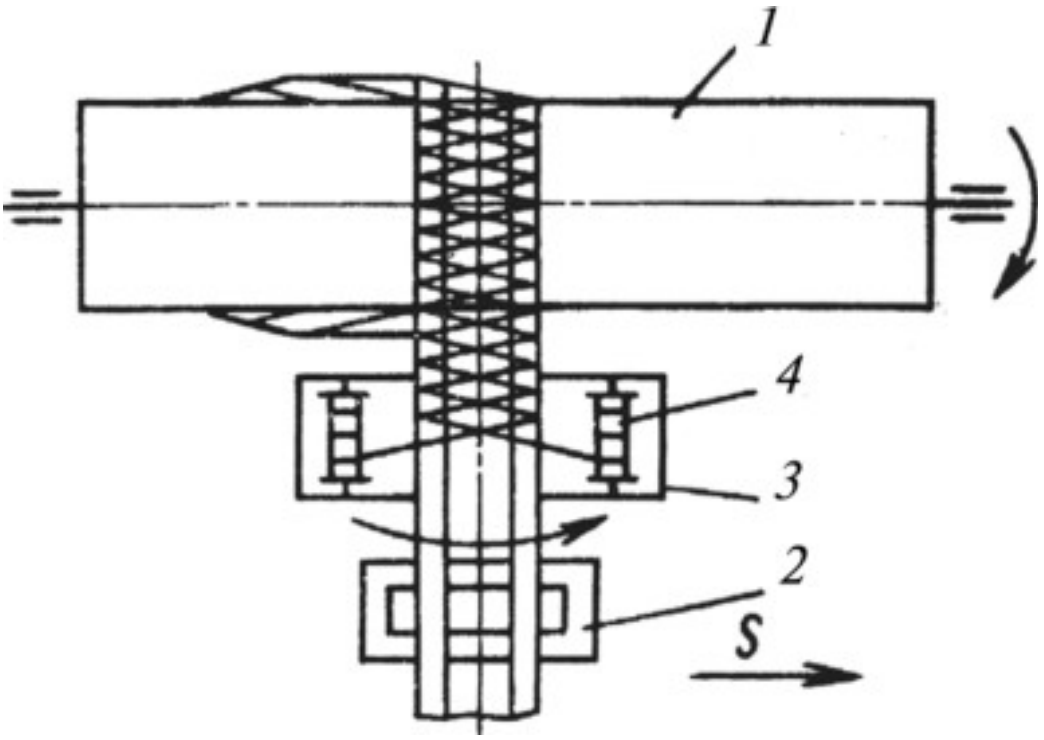
3) модель трубы на основе виртуальных исследований выдерживает рабочее давление 10 МПа, нагрузки снега и веса среды и самой конструкции. Труба имеет коэффициент запаса прочности равный 2,3. Все напряжения распределены равномерно, а деформации небольшие. Что говорит о прочности, безопасности изделия и о правильном выборе материала.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБЫ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДА

4.1 Технологический процесс и оборудование для изготовления трубы методом намотки

Процесс намотки может быть выполнен различным методом. Методы намотки отличаются по способу укладки стеклянных волокон на оправку. От способа намотки будут в дальнейшем зависеть свойства изделия.

В нашем случае трубы изготавливаются методом мокрой косослойной продольно-поперечной непрерывной намотки. Схема косослойной продольно-поперечной намотки представлена на рисунке 11 [31].



1 – оправка; 2 – ванна для пропитки кольцевых жгутов; 3 – вертлюг для укладки осевых нитей; 4 – катушки

Рисунок 11 – Схема КППН [31]

Поточная линия по производству труб из стеклопластика методом намотки изображена на рисунке 12.

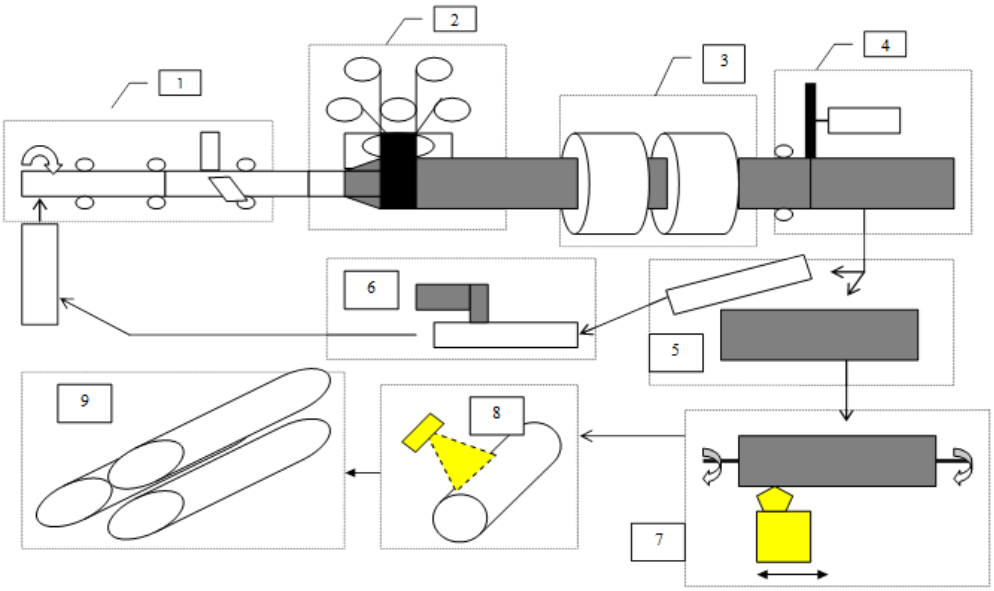


Рисунок 12 – Поточное производство стеклопластиковых труб [32]

Процесс производства композитных труб состоит из операций, отраженных на рисунке 12:

1) сборка оправки, размещение ее в станке и нанесение антиадгезива;

2) намотка, включающая предварительные операции:

подготовка ровинга волокна;

подготовка связующего для пропитки;

подготовка вертлюжного волокна;

основные этапы – пропитка, удаление лишнего связующего, намотка;

3) отверждение;

4) автоматическая резка фрагмента трубы по месту соединения оправок и отделение фрагмента;

5) снятие трубы с оправки с помощью кабестана;

6) подготовка оправки методом подшлифовки (при необходимости) для передачи на сборку;

7) механическая обработка трубы (точение, нарезка резьбы, подшлифовка и т.д.);

8) контроль качества трубы;

9) складирование [32].

Чтобы изготавливать стеклопластиковые трубы, которые имеют диаметр до 1300 мм, используется станок СНИТ. Это станок непрерывного изготовления труб.

Станки СНИТ позволяют изготавливать трубы и использовать термореактивные смолы и армирующие наполнители в виде волокон, тканей, жгутов, нитей или ровингов.

Вместе со станком поставляется сменная оправка, которая определяет внутренний диаметр трубы. Вариация ее размеров от 20 мм до 1300 мм. Требования заказчика позволяют заказать любые размеры оправки у производителя.

СНИТ устройства поставляются в комплекте, который содержит в себе следующее оборудование:

– основной привод;

– укладчик продольной арматуры;

– катушка;

– оправка;

– тележка приема;

– осушитель ровничный;

– диспенсер, чтобы подготовить связующее;

– инфракрасные обогреватели.

Поставка станков СНИТ осуществляется с промышленным контроллером. Панель контроллера позволяет управлять станком. С Заказчиком также согласовывается наличие или отсутствие в комплекте контроллера. При этом силовой шкаф имеет панель управления, которая управляет главным приводом. Выносной кнопочный пост управления позволяет контролировать порезку и тележку [33].

Чтобы обеспечить готовый продукт высокими качественными показателями, каждый этап производственных процессов находится под контролем.

4.2 Технологическая схема изготовления трубы

Был разработан технологический процесс изготовления трубы из стеклопластика, схема которого представлена на рисунке 13.

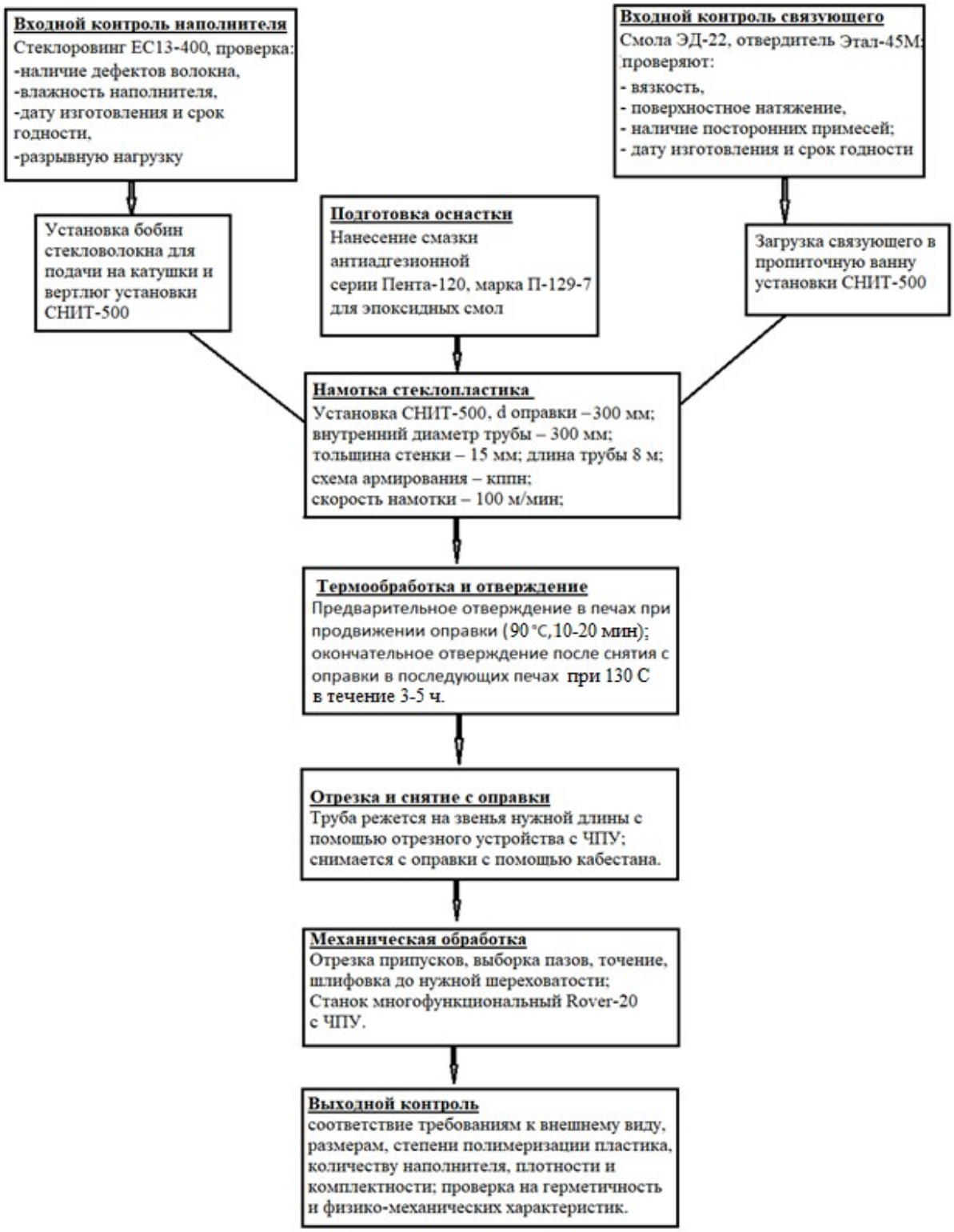


Рисунок 13 – Технологическая схема

4.3 Входной контроль материалов

Входному контролю подвергаются все материалы, из которых изготавливается труба. От партии выбираются образцы и отправляются на контрольные эксперименты:

1) контроль качества поступившей продукции;

2) контроль наличия сопроводительной документации, удостоверяющей качество и комплектность продукции;

3) контроль соответствия характеристик материалов паспортным данным.

Входной контроль проходят:

1) стеклянный директ-ровинг марки ЕС13Н-400;

2) эпоксидная смола марки ЭД–22;

3) отвердитель марки Этал–45М.

4.3.1 Входной контроль стеклоровинга

Из всего объема ровинга отбирается 5 % для проверки. 5 % объема армирующих материалов, которые находятся под контролем, подвергаются проверке на соответствие требованиям нормативной и технической документации, соответствие заданным геометрическим размерам, а также осматривается внешний вид.

Физико-механические показатели проверяются у 10% отобранных образцов из партии. Если хотя бы один показатель при проверке получает неудовлетворительный результат, то проводится повторная проверка по данному показателю, и количество единиц продукции для повторной проверки удваивается. Распространение повторных результатов осуществляется на всю партию [34].

Армирующий материал подвергается определению содержания влаги (ГОСТ 24297-87 «Входной контроль продукции»), разрывной нагрузки (ГОСТ 6611.2-73 «Нити текстильные. Методы определения разрывной

нагрузки и удлинения при разрыве»), удлинения при разрыве, а также линейной плотности для ровинга.

Чтобы определить содержание влаги, от бобины отматывают и отрезают 1-2 образца массой более 5 г. Далее, с использованием лабораторных весов с погрешностью до ±0,001 г материал взвешивают. Для каждого образца имеется отдельный тигель или держатель известной массы. Затем, материал подвергается высушиванию в сушильном шкафу на протяжении более 30 минут и при температуре 107 ±2 ℃. После этого образцы охлаждают до комнатной температуры и вновь производят взвешивание и определение влажности (Вп), влагосодержания (Вс) у каждого образца. Содержание влаги должно быть не более 0,1 %.

Чтобы определить разрывную нагрузку и удлинение ровинга, от бобины отматывают и отрезают 5 отрезков по 220 мм в длину. Далее, концы отрезков ровинга проклеивают бумагой с использованием клея. Остается непроклеенный отрезок длиной 80 мм. Чтобы отвердить клей, образцы необходимо выдержать в сушильном шкафу на протяжении более 30 минут при температуре 107 ±2 °С.

После помещения образцов в зажимы разрывного устройства настраивают скорость нагружения, которая должна составлять не менее 60 мм/мин и не более 100 мм/мин. Выдерживается расстояние между зажимами равное 100 ±1 мм.

Для определения линейной плотности имеется формула:

$$T=1000\times\frac{m}{L}, \qquad (10)$$

где, m – масса отрезка нити, г; L – его длина, м.

3 образца материала длиной 1 м от бобины отматывают и отрезают, чтобы определить линейную плотность, которая должна составлять 400 текс для выбранного ровинга. Отдельно для каждого отрезка материала производится взвешивание, погрешность при этом не должна превышать 0,5 % от взвешиваемой массы [35].

4.3.2 Входной контроль связующего

Проверка сроков годности компонентов связующего перед использованием проводится под строгим контролем.

Каждая партия связующего подвергается взятию проб, чтобы контролировать плотность, поверхностное натяжение, вязкость, концентрацию связующего и смачиваемость .

В целях определения плотности используют прибор ареометр с погрешностью не более 0,001 г/см^3, а для определения температуры – термометр с погрешность не более 0,5 ℃. По номограмме определяют показатели плотности и температуры, а далее на основании этих результатов концентрацию связующего.

Метод падающего шарика лежит в основе определения вязкости раствора связующего.

Прибор под названием сталагмометр используют для определения поверхностного натяжения связующего, применяя метод взвешивания капли. Прибор заполняется используемым раствором. Сила собственного веса капли позволяет обеспечить ее свободное падение в приборе из-за превышения силы поверхностного натяжения, когда капля отрывается.

Краевой угол смачивания определяет показатель смачиваемости твердого тела жидкостью [36].

4.4 Подготовка оснастки

Чтобы защитить секторы оправки от появления на них связующего предварительно наматывается защитное покрытие (тефлоновая лента, воск или смазка). В качестве антиадгезионного покрытия была выбрана смазка серии Пента-120 **(**ТУ 2257-041-40245042-2009 «Смазки антиадгезионные серии Пента-120»**).** Смазка марки П-129-7 представляет собой мягкую пасту и работает при температурах до 160 ℃. Данная смазка применяется в качестве антиадгезива при изготовлении изделий на основе эпоксидных смол.

В нашем случае покрытие необходимо для легкого отделения трубы от оправки после процесса намотки и отверждения. Смазка наносится равномерным тонким (но достаточным) слоем на поверхность оправки кистью или тампоном. Смазка имеет разовое применение, необходимо наносить перед каждой последующей намоткой.

4.5 Намотка

В качестве армирующего расходного материала выступает ровинг. Его помещают в отдельный шпулярник с размещением с противоположной стороны от намотчика за пропиточной ванной.

Подготовка связующего и внесение его в ванну по результатам выработки производится в специальном отделении. Комплектование станков СНИТ устройствами, автоматически подающими связующее согласовывается с заказчиком.

Перемещение наматываемого материала позволяет осуществить процесс непрерывного формирования трубы. Наматывающий материал – это армирующий наполнитель покрытый связующим. Труба формируется непрерывно вследствие того, что сектора, которые образуют цилиндрическую поверхность оправки, совершают возвратно-поступательные движения.

Структура стенки трубы формируется с помощью армирующего наполнителя, который имеет поперечное и продольное направление в укладке на оправку.

Укладка армирующего наполнителя в поперечном и продольном направлении обеспечивается КППН. Такая технология намотки позволяет контролировать количество материала в обоих направлениях, и соответственно, контролировать прочность трубы. При этом стенка трубы выступает в качестве анизотропного тела с небольшим расходом вещества [37].

Косослойная продольно-поперечная намотка позволяет произвести формирование ленты, которая состоит из параллельного пучка волокон, которые в свою очередь пропитываются связующим. Пучок под небольшим

углом наматывается по поверхности оправки. Таким образом, формируется кольцевая арматура. Пучок предварительно подвергается обмотке непропитанными волокнами под углом примерно ±45 градусов. Оправка подвергается укладке ленты внахлест на предыдущий виток.

Ролики используются для прикатывания слоев ленты после ее укладки на оправку. Ролики имеют винтовые линии на внешней поверхности. Слой арматуры уплотняется прикатыванием с удалением лишних связующих. Таким образом, получается добиться очень плотной укладки волокон с минимальной толщиной слоев связующего между ними, в результате чего прочностные характеристики стеклопластика имеют положительный эффект. Прикатка позволяет сохранить 70 % и более стекла в стеклопластике. Другие способы намотки не позволяют добиться подобных результатов. При изменении нахлеста изменяется толщина стенки трубы, которая укладывается за один проход [38].

4.6 Отверждение

Эпоксидные связующие могут быть как холодного, так и горячего отверждения. В нашем случае оборудование для намотки предусматривает наличие полимеризационных печей, где происходит предварительное отверждение.

Инфракрасные нагреватели, следующие по пути продвижения оправки по станку, используются для предварительного отвержения трубы. При этом учитывают достаточную прочность и твердость изготавливаемой трубы. Структура и состав связующего, которое используется при изготовлении трубы, определяет температуру отвержения (90 °С в течение 10–20 мин).

Окончательное отверждение производится после снятия трубы в печах при 130 °С в течение 3–5 ч.

Важно соблюдать температурный режим и оберегать изделия от попадания пыли.

4.7 Отрезка и снятие с оправки

Применяя резное устройство или ручной инструмент, отрезают готовую трубу на мерные звенья. Готовая труба режется на звенья необходимой длины с помощью отрезного устройства с ЧПУ, наличие которого предусмотрено в оборудовании. Снятие производится кабестаном.

4.8 Механическая обработка

Механическая обработка заключается в отрезке припусков, выборки пазов, точении, доведения поверхности до нужной шероховатости. Механическая обработка производится на станке с ЧПУ Rover 20, который имеет многофункциональное оборудование: вертикальные и горизонтальные шпиндели для сверления, циркулярную пилу.

4.9 Выходной контроль

При выходе готовой трубы с производственной линии проводится контроль ее качества, соответствие требованиям к внешнему виду, геометрическим размерам, степени полимеризации отвержденного пластика, соотношению наполнитель-связующее, плотности и комплектности. Контроль может использовать разрушающие и неразрушающие методы.

Если потребитель потребует проверку герметичности, то проводится испытание на пробное гидравлическое давление. Испытания проводят для образов до 2 м или для целой трубы с последующим ее восстановлением.

Контроль может быть сплошным (т.е. для всей партии) и выборочным.

При выборочном контроле 5 образцов проверяют на соответствие размерам, а 20 % образцов проверяют на герметичность пробным давлением.

Проверка степени полимеризации и соотношения наполнитель-связующее проводится для 5 % образцов.

Партия принимается, если нет ни одного несоответствия. Если несоответствия имеются, то проводится их анализ, исправление дефектов и

повторные испытания для удвоенной выборки. Если снова несоответствия, то испытания проводят для всей партии.

При невозможности устранить причину несоответствия партия считается бракованной.

Контроль степени полимеризации, плотности и соотношения наполнитель-связующее проводится в соответствии с ОСТ 92-0903-78 «Материалы неметаллические теплозащитного и конструкционного назначения. Методы определения технологических и физико-механических характеристик».

Герметичность определяется по методу № 10А, разработанному ЗАО «Прогресс-Инвест».

Гидравлические испытания проводятся по методу АОП 425.000 ИМ2 «Инструкция по монтажу трубопроводов из стеклопластиковых труб».

Контроль диаметра, толщины стенки и округлости труб проводится штангенциркулем, трубным микрометром, стенкомером.

Внутренний диаметр и округлость определяется в 2 взаимно перпендикулярных плоскостях.

Толщина определяется в 4 равномерно расположенных точках.

Длина проверяется рулеткой.

Внешний вид контролируется визуально на основании утвержденного контрольного образца.

Контроль качества трубы, распределения связующего и волокна, наличия дефектов проводят акустическим импедансным дефектоском АД-60К.

А также проводятся разрушающие испытания с целью проверки соответствия физико-механическим требованиям, предъявляемым к стеклопластиковым трубам. Испытания проводятся на испытательных машинах, обеспечивающих сжатие и растяжение образца в окружном и осевом направлении, и погрешностью измерения нагрузки 1 % [39].

Далее труба маркируется, укомплектовывается соединительным элементом (ремонтной муфтой) и отправляется на склад.

4.10 Выводы

1) в качестве технологии изготовления стеклопластиковых труб для нефтегазопровода в этой работе была предложена мокрая косослойная продольно-поперечная намотка. Преимущества данной технологии: увеличение производительности при сравнительно небольших затратах; плотная структура стенки трубы, за счет достижения большого содержания волокна (более 75 %);

2) был разработан технологический процесс производства стеклопластиковых труб, включающий основные операции: входной контроль материалов, подготовку оснастки, процесс намотки и отверждения, механическую обработку, выходной контроль качества трубы.

Заключение

В данной работе были спроектированы материал и технология изготовления труб необходимых для проведения нефтегазопровода. В ходе работы удалось достичь поставленной цели путем решения следующих задач:

1) был сделан анализ требований эксплуатации предъявляемых к трубам:

– давление внутри нефтегазопровода не более 10-12 МПа;

– температура эксплуатации от –50 ℃ до +50 ℃;

– срок службы не менее 50 лет;

2) нефтеазопровод должен обладать следующими свойствами:

– осевой предел прочности при растяжении, не менее 80 МПа;

– окружной предел прочности при растяжении, не менее 180 МПа;

– окружной модуль упругости при растяжении, не менее 26 ГПа;

– осевой модуль упругости при растяжении, не менее 18 ГПа;

3) был выполнен качественный подбор материалов для изготовления трубы. Был подобран материал, а именно стеклопластик на основе директ-ровинга ЕС13-400 и связующего ЭД-22. Стеклопластик имеет следующие характеристики: плотность – 2194 кг/м^3; модуль упругости – 57,26 ГПА; предел прочности при растяжении – 2480 МПа; предел текучести – 300 МПа; теплопроводность – 0,3 Вт/мК;

4) для монтажа трубопровода выбран способ механического (ремонтного) муфтового соединения. Он универсален, так как подходит для основного монтажа и для ремонта;

5) было выполнено исследование виртуальной модели трубы с целью проверки на прочность и безопасность. Модель трубы выдерживает рабочее давление 10 МПа, вес транспортируемой среды, собственный вес и снеговые нагрузки. Труба имеет запас прочности 2,3. То есть трубы выдерживают рабочее давление и с учетом запаса прочности выдержат и большее давление, что говорит о безопасности изделия и о правильном выборе материала;

6) была выбрана технология изготовления труб с помощью метота мокрой косослойной продольно-поперечной намотки. Данный метод преобладает над другими благодаря своей производительности и сравнительно небольшой себестоимости трубы, достигается плотная структура стенки трубы за счет достижения большого содержания волокна (более 75 %);

7) был разработан технологический процесс производства стеклопластиковых труб, включающий основные операции: входной контроль материалов, подготовку оснастки, процесс намотки и отверждения, механическую обработку, выходной контроль качества трубы;

8) использование стеклопластиковых труб повышает срок службы нефтегазопровода до 50 и более лет, предотвращает образование коррозии, снижает затраты на его сооружение благодаря легкости материала.

Список литературы

1. Трубы нефтегазопроводные. Руководствово по эксплуатации. ЗАО «ВНИИТнефть». Самара – 2010 г. (дата обращения: 20.03.2020).
2. Трубопровод нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / В.С. Серебренников. − Электрон. дан. − Омск: СибАДИ, 2018 // URL: http://bek.sibadi.org/fulltext/esd827.pdf (дата обращения: 20.03.2020).
3. Ягубов Эмин Зафар оглы. Разработка принципов обеспечения конструктивной надежности нефтегазопроводных систем на основе коррозионностойких композитных труб. Дис. д-ра тех. наук. УГТУ, Ухта, 2012г. (дата обращения: 20.03.2020).
4. ГОСТ Р 56277-2014 Трубы и фитинги композитные полимерные для внутрипромысловых трубопроводов. Технические условия [Электронный ресурс] // URL: http://docs.cntd.ru/document/1200115876 (дата обращения: 20.03.2020).
5. Композитные стеклопластиковые трубы [Электронный ресурс] // URL: http://www.s-kompozit.ru/production/comparison/ (дата обращения: 01.04.2020).
6. ГОСТ Р 55989-2014 Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования [Электронный ресурс] // URL: http://docs.cntd.ru/document/1200110075 (дата обращения: 01.04.2020).
7. СНиП 2.05.13-90 Нефтепродуктопроводы, прокладываемые на территрии городов и других населенных пунктов [Электронный ресурс] // URL: http://docs.cntd.ru/document/871001047 (дата обращения: 01.04.2020).
8. Изолированные стальные трубы [Электронный ресурс] // URL: https://vse-o-trubah.ru/izoliatsia-stalnyh-trub.html (дата обращения: 01.04.2020).

9. Стеклопластиковые трубы [Электронный ресурс] // URL : http://ros-pipe.ru/ (дата обращения: 10.04.2020).

10. Производство и правила монтажа стеклопластиковых труб [Электронный ресурс] // URL : https://infotruby.ru/material/stekloplastikovye-truby (дата обращения: 10.04.2020).

11. Как выбрать стеклопластиковые трубы, специфика производства и обзор ведущих производителей [Электронный ресурс] // URL: https://remstroy-uslugi.ru/ (дата обращения: 10.04.2020).

12. Стеклопластиковые трубы: время производить [Электронный ресурс] // URL: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1388 (дата обращения: 10.04.2020).

13. Намотка [Электронный ресурс] // URL: https://raduga-sintez.ru/technology/namotka.html (дата обращения: 15.04.2020).

14. Как выбрать стеклопластиковые трубы, специфика производства и обзор ведущих производителей [Электронный ресурс] // URL: https://sovet-ingenera.com/ (дата обращения: 15.04.2020).

15. Стеклопластиковые трубы : особенности и монтаж [Электронный ресурс] // URL : http://recn.ru/stekloplastikovye-truby-osobennosti-i-montazh (дата обращения: 20.04.2020).

16. Основы метода конечных элементов: Введение. Расчет стержневых систем: конспект лекций / Владим. гос. ун-т; сост. Л.Е. Кондратьева. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 36 с. (дата обращения: 28.04.2020).

17. Основы моделирования в Solid Works : методические указания / С. А. Сухов. - Ульяновск: УлГТУ, 2007. - 48 с. (дата обращения: 28.04.2020).

18. SolidWorks [Электронный ресурс] // URL : https://www.solidworks.com/ru (дата обращения: 28.04.2020).

19. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров – М.: Химия, 1991. – 266 с. (дата обращения: 28.04.2020).

20. Берлин А.А., Вольфасон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов – М.: Химия, 1990. – 240 с. (дата обращения: 28.04.2020).

21. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. Издательство: Машиностроение – 1988 г. (дата обращения: 05.05.2020).

22. Аношкин А.Н. Теория и технология намотки конструкций из полимерных композиционных материалов: Учеб. Пособие/ Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2004 – 118 с. (дата обращения: 05.05.2020).

23. Дж. Любин. Справочник по композиционным материалам. В двух томах. Под редакцией Дж.Любина. М., "Машиностроение", 1988г (дата обращения: 05.05.2020).

24. Стеклонити, ровинги, волокно рубленое [Электронный ресурс] // URL: http://www.polotsk-psv.by/production/catalog/roving/ (дата обращения: 05.05.2020).

25. ГОСТ 10587-84 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия [Электронный ресурс] // URL: (дата обращения: 05.05.2020).

26. ГОСТ Р 53201-2008 Трубы стеклопластиковые и фитинги. Технические условия [Электронный ресурс] // URL : http://docs.cntd.ru/ (дата обращения: 10.05.2020).

27. Характеристики стеклопластика [Электронный ресурс] // URL: http://www.steklo-tech.ru/About/characterist.html (дата обращения: 10.05.2020).

28. Механическое (ремонтное) соединение Электронный ресурс] // URL : http://www.ntt.su/ (дата обращения: 16.05.2020).

29. ГОСТ Р 54560-2015 Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном, для водоснабжения, водоотведения, дренажа и канализации. Технические условия [Электронный ресурс] // URL: http://docs.cntd.ru/document/1200129496 (дата обращения: 16.05.2020).

30. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 [Электронный ресурс] // URL : http://docs.cntd.ru/document/1200084848 (дата обращения: 16.05.2020).

31. Технологии намотки [Электронный ресурс] // URL : https://studref.com/642947/tehnika/tehnologii_namotki (дата обращения: 20.05.2020).

32. Организация производства намоточных изделий из композиционных материалов [Электронный ресурс] // URL : https://studbooks.net/ (дата обращения: 20.05.2020).

33. Комплекс оборудования для производства труб из композитных материалов [Электронный ресурс] // URL: https://www.fiberplastpipes.com.ua/ (дата обращения: 23.05.2020).

34. ГОСТ 6943.0-93 Стекловолокно. Правила приемки [Электронный ресурс] // URL : https://files.stroyinf.ru/Data/278/27882.pdf (дата обращения: 23.05.2020).

35. Авиационнное материаловедение. Ч. 2. Неметалические материалы / Я. С. Карпов, В. В. Остапчук, Н. Д. Сазоненко, Н. И. Семишов, М. А. Шевцова. – Учеб. Пособие по лаб. практикуму. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – 107 с. (дата обращения: 23.05.2020).

36. Технология производства изделий из композиционных материалов [Электронный ресурс] // URL : https://prod.bobrodobro.ru/82681 (дата обращения: 24.05.2020).

37. Стеклопластиковые трубопроводы для нефтяной промышленности [Электронный ресурс] // URL: https://docplayer.ru/ (дата обращения: 24.05.2020).

38. Стеклопластиковые трубы [Электронный ресурс] // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 24.05.2020).

39. ТУ 2296-250-24046478-95 Трубы стеклопластиковые и соединительные детали. Общие технические условия (дата обращения: 24.05.2020).