



Research Article

Received: May 11, 2023

Accepted: June 8, 2023

Published: June 15, 2023

ISSN 2658-5553

Variants of pipeline assemblies made of composite materials and their connections and technological units

Kirsanova, Tatiana Aleksandrovna¹ Shchetnikov, Alexey Viktorovich² Yakupov, Sergey Zakievich³ Vafaeva, Khristina Maksudovna⁴ Shinkareva, Maria Konstantinovna⁴ 

¹ Limited Liability Company «Construction company «Ruth», Moscow, Russian Federation; 89094001052@mail.ru

² Construction and installation management 19, Saint Petersburg, Russian Federation; aschetnikov@gmail.com

³ Limited Liability Company «Construction and Installation Corporation Engineering Systems», Saint Petersburg, Russian Federation; sergey.yakupov.z@gmail.com

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; vafaeva_hm@spbstu.ru (V.K.M.), shinkareva_mk@spbstu.ru (S.M.K.)

Correspondence: * email 89094001052@mail.ru; contact phone [+79094001052](tel:+79094001052)

Keywords:

Polymer pipelines; Composite pipelines; Polymer composite material; Connections in polymer pipes; Connections in composite pipes; Technological polymer nodes; Composite polymer nodes

Abstract:

The object of research is a polymer composite pipeline with connections and technological nodes. **Method.** During the research, methods of system analysis, methods of expert assessments, risk theory, comparative method, method of generalization, abstraction, induction, and deduction were used. **Results.** The analysis of theoretical sources, tests, scientific publications and regulatory documents was carried out, as a result of which the criteria for the characteristics of polymer composite networks were established, providing conditions for the economically and practically profitable use of polymer composite networks based on the project of a high-rise construction object, as a result of which the criteria for the characteristics of the object were established, providing conditions for the economically profitable use of self-lifting formwork, and a financial and economic model to justify the investment in this project has been invested. The pipes can operate at an operating pressure from a vacuum of 0.01-0.35 MPa and at an operating temperature from -269 to +150°C. The polymer composite material must contain a binder in the range of 28-36%, and the density of the binder varies from 1.75 to 1.85 g/cm³.

1 Introduction / Введение

Полимерный композиционный материал представляет собой специальный конструкционный материал, который включает в себя два основных компонента: полимерную матрицу и армирующий наполнитель [1].

Трубы из полимерных композитных материалов не подвержены коррозии, химстойкость их в большинстве сред выше, чем у нержавеющей стали. При этом они разрешены для питьевого водоснабжения [2]. Трубы из полимерных композитов коррозионностойкие к сероводороду и кислотам, при этом отсутствует налипание на стенках труб [3].

. В исследовании Сулу И. Ю. был рассмотрен анализ напряжений многослойных гибридных композитных труб с симметричными углами ориентации под действием внутреннего давления [4]. Kirsanova, T.; Shchetnikov A.; Yakupov, S.; Vafaeva, K.; Shinkareva M.

Variants of pipeline assemblies made of composite materials and their connections and technological units; 2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2804. doi: 10.57728/ALF.28.4



В другой своей работе исследователь анализирует напряжения и разрушения для композитных труб, соединенных с втулками, подвергнутыми внутреннему давлению. В ходе исследования композитные трубы и втулки были изготовлены из стекловолокна или эпоксидной смолы с различными углами ориентации волокон [5]. В другой работе данный исследователь описывает эксплуатационные характеристики композитных труб с использованием собственной автоматизированной процедуры испытаний, которая совместима с внутренними квалификационными требованиями производителей труб. Были испытаны композитные трубы из эпоксидной смолы, армированной стекловолокном (GRE), с тремя углами намотки, а именно, $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$, и $[\pm 63^\circ]_4$ [6].

Для изготовления композитных труб используют простой и дешевый метод укладки препрегов [7]-[8]. Например, в методе ручной укладки есть два недостатка, такие как большое время изготовления и трудозатраты. Другая возможность изготовления заключается в использовании литьевого прессования [9]-[10] для изготовления труб из тканых композитов.

Испытания на изгиб были проведены для изучения влияния длительного естественного старения на свойства при изгибе. из труб, намотанных на нити из винилового эфира, армированного стекловолокном (объемная доля волокна $\approx 68\%$) [11]. Межани Х. оценивал свойства при изгибе с использованием образцов для трехточечного изгиба, вырезанных в продольном направлении из труб с внутренним диаметром 150 мм и толщиной стенки 6 мм. Образцы на изгиб вырезали из секций труб, выдержанных по трем схемам: секции труб длиной 155 мм без колпачков, подвергнутые воздействию внешних условий, трубы длиной 1250 мм с колпачками, заполненные влажным маслом и подвергнутые воздействию внешних условий, и трубы длиной 1250 мм без колпачков, полностью погруженные в морскую воду. Интервалы воздействия составляли 12, 24, 36 и 48 месяцев.

Исследования практической долговечности под воздействием высоких температур воды изложены, в частности, в работах [12]-[13].

Трубы, армированные эпоксидной смолой из стекловолокна с многополюсным нагрузкам, были изучены на предмет их работоспособности при различных температурах и различных критериях разрушения в работе Назарах З.С. Из-за ортотропной природы труб GRE трудно проанализировать возникающие в них напряжения. Поэтому, используя конечные элементы, был проведен анализ для определения разрушения первого слоя композитных труб, которые подвергались пяти различным соотношениям напряжений, начиная от чисто кольцевых и заканчивая чисто осевыми нагрузками, при комнатной температуре 65°C и 95°C [14].

В статье Анг Дж. И. предлагается определить коэффициент безопасности композитных труб, подверженных тепловым и силовым нагрузкам. Коэффициент запаса прочности служит мерой механической надежности композитных труб. Это статистическая величина, определяемая вероятностными методами расчета, в частности отношением математического ожидания критерия прочности к математическому ожиданию значения разрушающего фактора. Методика была успешно протестирована и доказана для композитных труб для горячего и холодного водоснабжения, использующих различные полимеры [15].

В работах [16]-[17] были изучены режимы разрушения и характеристики ударопрочности интрапластичных армированных волокном труб (FRP), изготовленных из базальта и стеклопластиковой волокнистой арматуры при квазистатической компрессионной нагрузке.

В исследовании Методиева П. были изучены механические и термические свойства композитных труб на основе эпоксидной смолы и стекловолокна, полученных по технологии. Эпоксидные смолы являются широко используемыми полимерами в композитных конструкциях [18].

В статье Астана Т. представлены экспериментальные результаты проекта, направленного на оценку преимуществ добавления углеродных нанотрубок и нанопластин нитрида бора в качестве наполнителей в эпоксидную матрицу композитных труб из углеродного [19].

Анализ на разрыв композитных труб из стеклопластика рассмотрен в работах Васюткина Е.С и Прабхакара М.М. Данное важное исследование, необходимое для композитных труб для прогнозирования их характеристик в режиме реального времени в нефтегазовой, а также химической промышленности. Существует два типа испытаний давлением, а именно; открытые и закрытые концы. Их можно использовать для проведения эксперимента [20]-[21].

Испытание жесткости композитных труб, намотанных на нити, моделируется с использованием метода когезионной зоны. Моделирование выполнено для изучения влияния геометрических параметров, включая размер расслоения и его положение относительно



направления нагрузки, на жесткость композитных труб. Сначала результаты испытаний на жесткость идеальной трубы без расслоения методом конечных элементов подтверждаются экспериментальными результатами. Видно, что результаты конечных элементов хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Затем разрабатывается конечно-элементная модель для композитных труб со слоями различных первичных форм [22].

Армированные стекловолокном эпоксидные смолы композитных труб подвергли воздействию морской воды и процессу старения на протяжении разных временных периодов (1, 2 и 3 месяца) для того, чтобы определить воздействие морской воды на обруч поглощения при растяжении на прочность [23].

Основной традиционной технологией промышленного производства композитных труб является намотка нитей, при которой угол намотки и неоднородность структуры, обусловленная начальной и конечной точками процесса намотки, являются двумя важными вопросами, вызывающими озабоченность [24].

В работе Сахира Ф. представлен системный подход к всестороннему экспериментальному исследованию их механических характеристик с точки зрения прочности на растяжение в осевом направлении и при растяжении в кольце. Дисперсные композитные трубы, использованные в текущем исследовании, имеют стеклянные волокна, армированные вдоль направления кольца примерно под углом 89° . Для обеспечения точности и достоверности экспериментальных данных были отобраны три партии, относящиеся к каждой категории труб, которые незначительно отличаются по составу своих компонентов. Было отобрано по три образца на партию и на каждом образце были проведены два типа испытаний [25].

Влияние поглощения влаги на разрушение композитных труб, армированных винилэфирным волокном, и моделирование нестационарной диффузии влаги с использованием анализа конечных элементов. Обычно водопоглощение матрицей происходит под действием капиллярности вдоль границы раздела волокно-матрица, через некоторые трещины, пустоты, присутствующие в смоле. На протяжении многих лет было предсказано множество диффузионных моделей для моделирования гигротермического эффекта в трубах из стеклопластика. Первая диффузионная модель была предложена Фиком по аналогии с моделью теплопроводности. Большинство исследователей полностью полагаются на второй закон Фика для определения моделей поглощения влаги [26].

В исследовании Рафия Р. рассматривается прогноз срока службы композитных труб, подвергнутых внутреннему циклическому гидростатическому давлению. Для оценки усталостного разрушения используется метод моделирования прогрессирующих повреждений, основанный на ухудшении жесткости [27].

В первой части исследования Бенияхия Х., состоящего из двух частей, были изготовлены гибридные композитные трубы, намотанные нитью, с различными последовательностями укладки и экспериментально исследованы механические свойства, такие как твердость, прочность на кольцевое растяжение и прочность на разрыв. После определения механических свойств были проведены испытания на сверление для исследования характеристик обрабатываемости [28].

В работе [29] рассматривается аналитический метод исследования предельных показателей прочности композиционных полимерных труб под действием внутреннего давления. Данный метод является самым простым, быстрым и точным в сравнении с остальными численными и аналитическими методами.

С помощью вероятностного анализа необходимо оценить количественный предел прочности полимерных труб вслед за влиянием случайных факторов проектных нагрузок. Обзор литературы необходим для выявления не учтенного ряда факторов, таких как температура и время воздействия. Выявить последствия фактора ограниченности области применения композитных труб с учетом отсутствия коэффициентов запаса прочности.

Обозреваемые источники литературы направлены на создание усовершенствованной расчетной методики определения коэффициентов запаса прочности, учитывающей временной и температурный фактор, в том числе, давление при эксплуатации различных видов полимерных труб.

Недостаток исследований в области влияния окружающей среды на свойства полимерных композитных труб порождает важность изучения влияния агрессивных сред, таких как химические реагенты, морская вода и другие, на коррозионную стойкость и долговечность труб.

В литературе не хватает исследований, посвященных экономической эффективности применения полимерных композитных труб. Следовательно, отсутствует оценка сравнительных



затрат на производство, установку и эксплуатацию таких трубных систем по сравнению с другими материалами.

Объектом исследования является трубопровод из полимерного композита с соединениями и технологическими узлами.

Предметом настоящего исследования является композитный полимерный материал, из которого изготавливаются трубы, а также их соединения и технологические узлы.

Цель данного исследования - провести экспериментально-теоретическое исследование композитных труб, их соединений и технологических узлов с целью выявления их поведения при эксплуатационных воздействиях внешних факторов. Дополнительно, провести аналитическое исследование предельных показателей прочности композиционных полимерных труб при действии внутреннего давления, а также оценить количественный предел прочности полимерных труб путем вероятностного анализа.

Исследование включает в себя несколько задач:

1. Экспериментально-теоретическое исследование композитных труб, их соединений и технологических узлов при эксплуатационных воздействиях внешних факторов;
2. Аналитическое исследование предельных показателей прочности композиционных полимерных труб под действием внутреннего давления;
3. Путём вероятностного анализа оценить количественный предел прочности полимерных труб.

2 Materials and Methods / Материалы и Методы

Многолетние результаты исследований механических свойств стеклопластиков при повышенных и пониженных температурах показывают, что с повышением температуры наблюдается значительное падение прочности [30].

Снижение наиболее значимого для надежности работы трубопровода параметра, такого как давление разгерметизации, происходит медленнее, чем снижение прочностных показателей полимерных композитных материалов, так как при увеличении температуры эксплуатации композитных труб несколько повышается относительное удлинение связующего. Этот фактор уменьшает вероятность образования трещин в полимерной матрице и частично компенсирует увеличение деформаций за счет снижения жесткости материала.

Влияние температуры на прочность и жесткость конструкций из полимерных композитных материалов особенно проявляется при ее длительном воздействии, причем скорость старения существенно возрастает с увеличением температуры.

В процессе исследований были использованы положения системного анализа, методы экспертных оценок, теория рисков, сравнительный метод, метод обобщения, абстракции, индукции и дедукции.

Преимущества композитов в трубопроводных системах заключается в сроке службы, долговечной надежности и технологичности монтажа.

3 Results and Discussion / Результаты и Обсуждение

Трубы, изготовленные из полимерных композиционных материалов, в том числе фасонные и соединительные части к ним применяются для монтажа систем и трубопроводов на судах и объектах нефтегазового комплекса.

Основным составляющим материалом для продукции служит базальтопластик, стеклопластик или комбинированный материал. В роли связующего вещества выступает термоактивный полимер, в основу которого ложится эпоксидная смола или иной состав, который способен изделию придать свойство долговременной работоспособности при температуре химически агрессивной транспортируемой среды до + 150°C. Трубы производятся при помощи метода непрерывной намотки армирующего ровинга, пропитанного связующим компонентом. Фитинги изготавливаются подобным методом либо при помощи выкладки арматуры, пропитанной связующим компонентом. Далее производится термообработка с отвержением связующего компонента.

Рабочее давление от вакуума 0.01–0.35 МПа, рабочая температура -269+150С.

Полимерный композиционный материал должен содержать в себе связующее вещество в пределах 28–36%, плотность связующего материала должна варьироваться от 1.75 до 1.85 г/см³

В роли матрицы может выступать:

1. Смола эпоксидно-диановая;
2. Смола химстойкая «Деракан» (производство компании «INEOS Composites», муниципалитет Арасаригуама, тат Сан-Паула, страна Бразилия);
3. Компаунды эпоксидные.

В качестве армирующих компонентов выступают:

1. Ровинг стеклянный из алюмоборосиликатного стекла;
2. Нить стеклянная крученая комплексная из алюмоборосиликатного стекла;
3. Ровинг базальтовый;
4. Углеволокно.

В роли отверждающей смеси выступает изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИЗОМТГФА) или аминный отвердитель эпоксидного компонента «Этал-370»

Внутренний диаметр труб варьируется от 20 до 800 мм, иногда до 3600 (специзделия).

Длина трубы изготавливается от 50 до 13 000 мм

Отводы на трубах могут быть любыми в пределах от 5 до 135°

Все трубы и фитинги подразделяются на типы в зависимости от их конструктивно-технологических особенностей:

1. Традиционного типа для холодной, заборной, горячей воды для водоснабжения и отопления, пара, стоков или нефтепродуктов. Они же используются для объектов морской и портовой инфраструктуры
2. Теплоизолированные трубы и фитинги применяются в теплосетях и технологических водопроводах, требующих сохранения температуры транспортируемой среды
3. Трубы для химически агрессивных/абразивных сред
4. Насосно-компрессорные трубы и муфты
5. Диэлектрические трубы, муфты и переводники
6. Трубы для вентиляционных и газоотводных систем

Трубы и фитинги традиционного типа

Данный тип труб имеет маркировку «Т». Для их герметичности используются барьерные (наносится между защитным и основным слоем) и герметизирующие (наносится на внутреннюю поверхность) слои.

Для линейной части водопроводов с диаметром от 100 до 600 мм с давлением до 2.5 Мпа используют соединения при помощи комбинированной муфты (рисунок 1) и муфтовое соединение (рисунок 2).

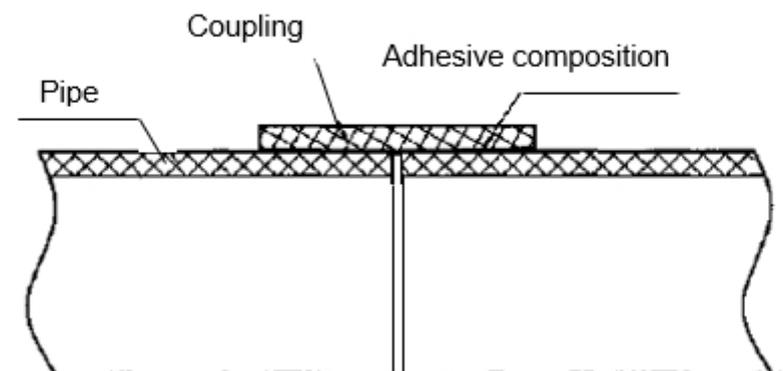


Fig. 1 - Connection diagram using a combined coupling

Рис. 1 - Схема соединения при помощи комбинированной муфты

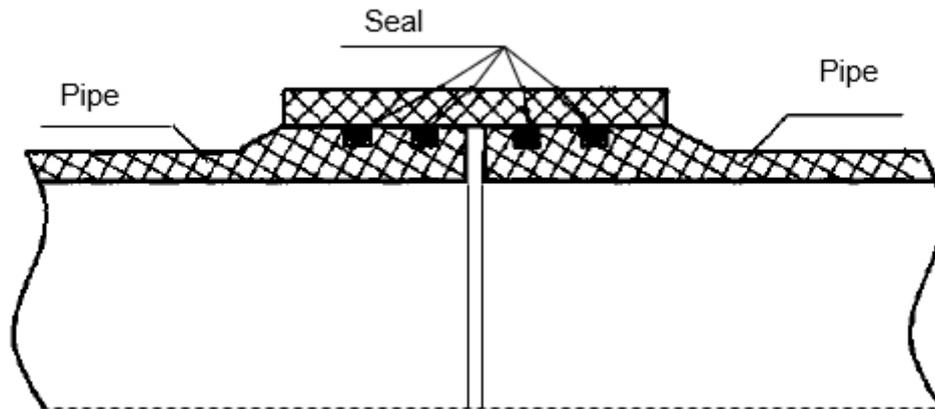


Fig. 2 - Coupling connection diagram
Рис. 2 - Схема муфтового соединения

С диаметром 20–80 мм применяют соединения при помощи комбинированной муфты или комбинированной муфты с наружной резьбой (рисунок 3) с цилиндрической резьбой для линейной части трубопровода с диаметром 50-300 и давлением 2.5-3 МПа и для внутривнепромысловых труб в нефтяной промышленности применяют соединение при помощи комбинированной муфты с наружной резьбой с конической резьбой.

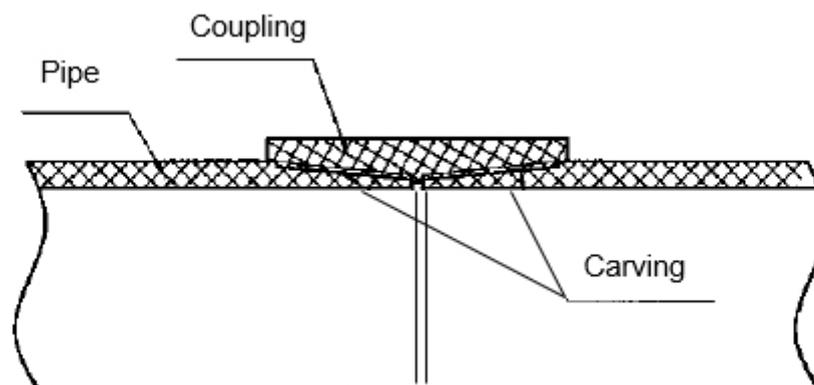


Fig. 3 - Connection diagram using a combined coupling with an external thread
Рис. 3 - Схема соединения при помощи комбинированной муфты с наружной резьбой
Схема соединения при помощи комбинированной муфты

В случае предотвращения или ограничения осевых перемещений используют соединение по принципу, изображенном на рисунке 4.

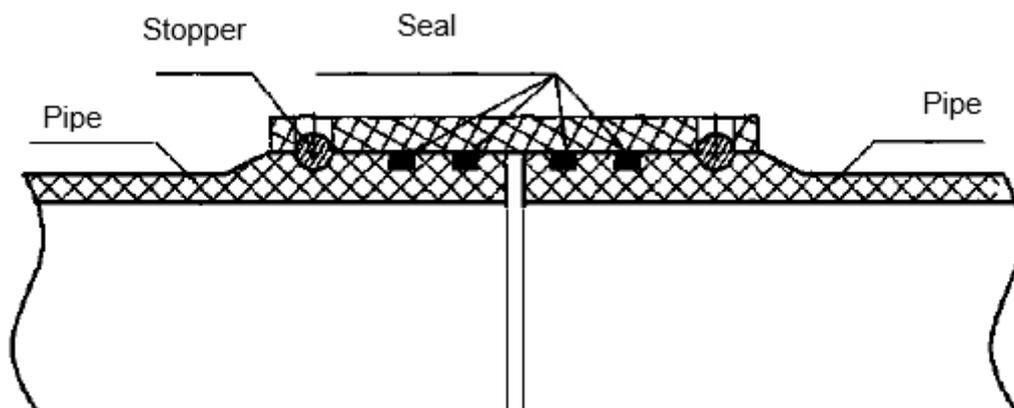


Fig. 4 - Connection diagram for preventing or limiting axial movements

Рис. 4 - Схема соединения для предотвращения или ограничения осевых перемещений

Для соединения труб и фитингов с металлическими трубами или запорной арматурой применяются фланцевые соединения (рисунок 5), при ремонте, врезке или монтаже замыкающих стыков применяется муфтовое соединение, изображенное на рисунке 6.

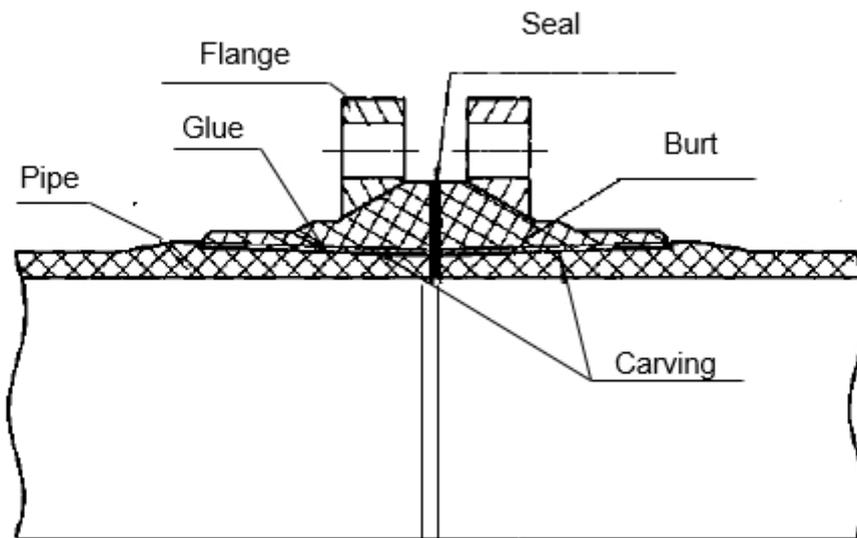


Fig. 5 - Flanged connection diagram

Рис. 5 - Схема фланцевого соединения

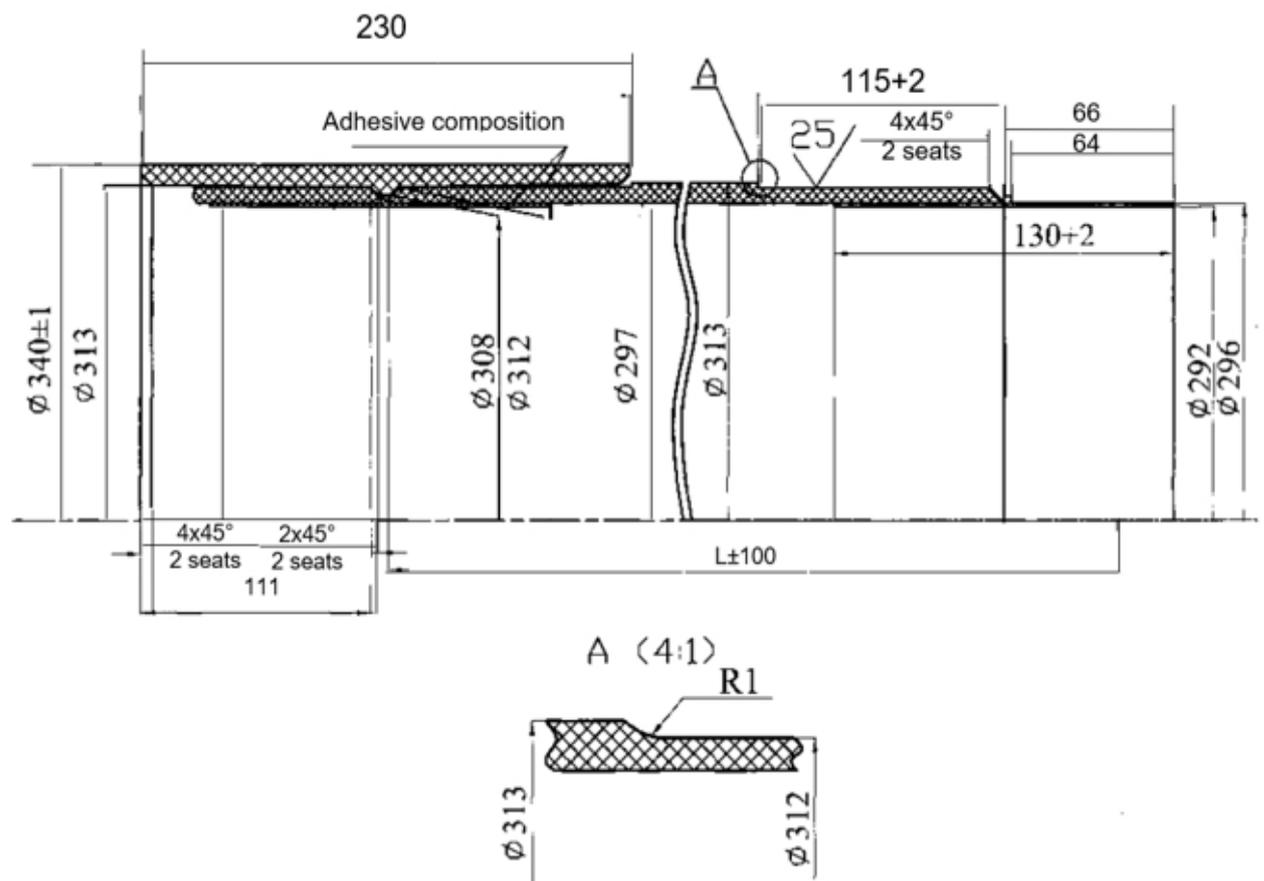


Fig. 6 - An example of a pipe coupling connection during repair, insertion or installation of closing joints

Рис. 6 - Пример муфтового соединения трубы при ремонте, врезке или монтаже замыкающих стыков

Для компенсации температурных расширений (растяжение/сжатие) следует использовать П-образные (рисунок 7) или телескопические компенсаторы (рисунок 8).

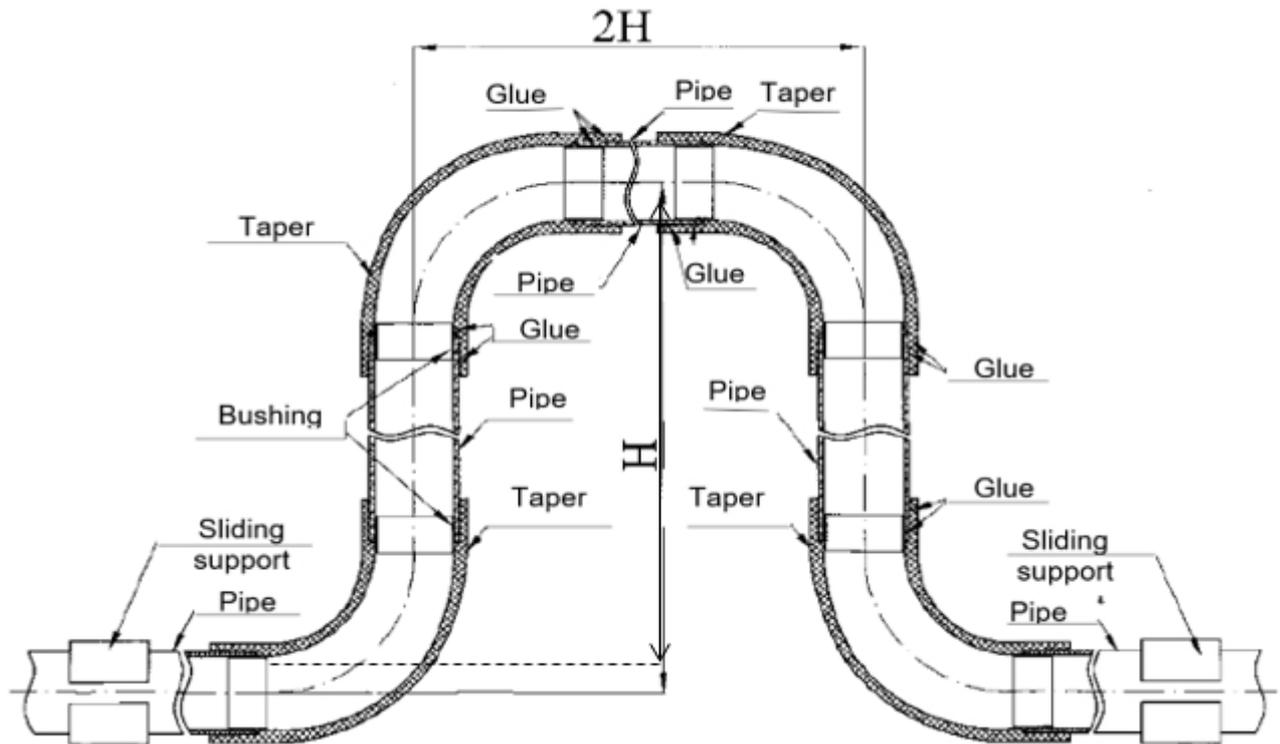


Fig. 7 - U-shaped compensator
Рис. 7 - П-образный компенсатор

Композитные смеси имеют коэффициент линейных температурных расширений подобный стали при этом их жесткость в 15–20 раз ниже. Трубы традиционного типа имеют ограниченную самокомпенсацию, которая увеличивается по мере увеличения диаметра от 80 мм и толщины стенок изделия, вследствие чего требуется нейтрализация напряжений, возникающих при растяжении и сжатии при колебаниях температур в тепловой сети. Композитные трубы имеют меньший радиус кривизны в сравнении со стальными трубами, что благоприятно сказывается на количестве компенсаторов напряжения. В связи с высокой податливостью и меньшей жесткостью их количество уменьшается в сравнении со стальными трубами. Целесообразность установки компенсатора появляется на прямолинейном участке сети более 100 м.

Высокая релаксация напряжений сжатия является отличительной особенностью композитного материала, что приводит к укорачиванию всех нереализованных перемещений после понижения температуры при условии снятия внешних ограничений. Наличие неподвижных опор негативно сказывается на укорочении трубы, что приводит к возникновению напряжения растяжения при спаде температур. При колебаниях температур с амплитудой более 80° в клеевых соединениях возникают предельно допустимые напряжения, что может привести к снижению качества тепловых систем. Для предотвращения этого недостатка следует применять специальные температурные компенсаторы расширений.

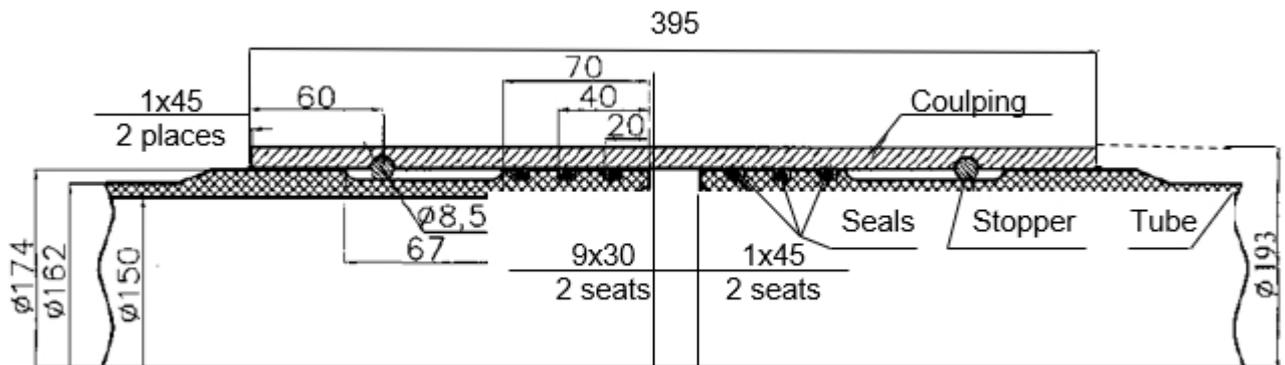


Fig. 8 - Telescopic compensator
Рис. 8 - Телескопический компенсатор

Телескопические компенсаторы (рисунок 8) целесообразно устанавливать на участках вставок между композитными трубами и более жесткими стальными трубами при условии отсутствия неподвижных опор. Конструкция данного компенсатора основана на соединении «килок», которые допускают линейные перемещения и отклонения от оси до 2° с сохранением герметичности стыков.

Теплоизолированные предизолированные трубы и фитинги

Данные трубы имеют маркировку ТИ. Целесообразность их использования заключается в необходимости сохранения температуры транспортируемой среды, например, в сетях продуктопроводов. Также данный вид трубы используется при прокладке водоводов на воздухе или при монтаже тепловых сетей.

При соединении теплоизолированных труб с фитингами рекомендуется использовать соединительные элементы типа комбинированной муфты, герметичные концевые муфты, комбинированные муфты с наружной резьбой или редукционным гидроклапаном (рисунок 9).

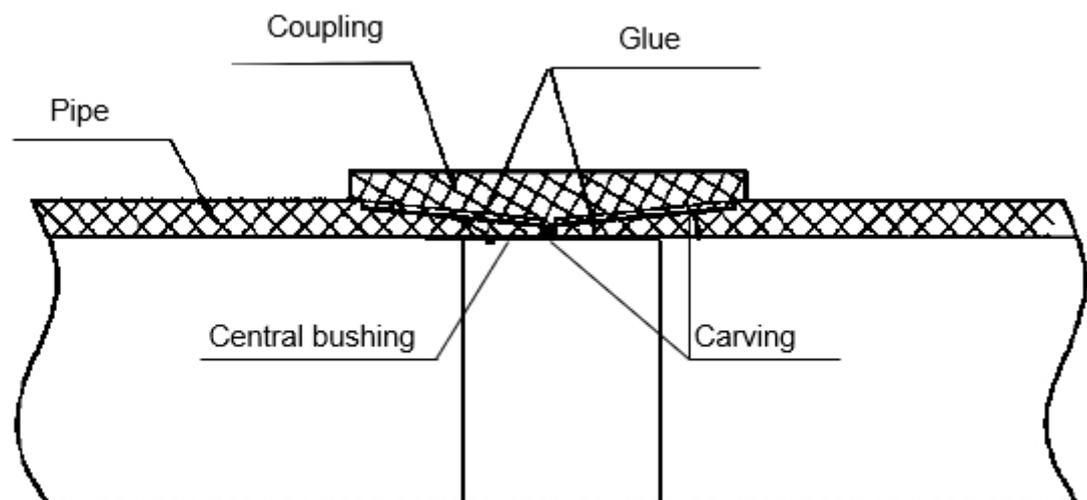


Fig. 9 - Connection diagram of the reduction hydraulic valve
Рис. 9 - Схема соединения редукционного гидроклапана

Кожух в зоне стыка производится при помощи специальных накладных элементов. При варианте бесканального монтажа все швы необходимо герметизировать.

Теплоизолированные предизолированные трубы имеют конструкцию основной трубы из полимерного композитного материала, покрытой кожухом или защитной оболочкой и теплоизоляции, размещенной в межтрубном пространстве, которая состоит из микропористого материала. Кожух выполняется из полимерного материала, оцинкованной стали или полиэтилена. В роли защитной оболочки выступают изолирующие покрытия или пергамин.

Kirsanova, T.; Shchetnikov A.; Yakupov, S.; Vafaeva, K.; Shinkareva M.

Variants of pipeline assemblies made of composite materials and their connections and technological units; 2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2804. doi: 10.57728/ALF.28.4

Обсадные трубы и муфты

Данный вид труб принято маркировать «О» (рисунок 10). Обсадные трубы предназначены для использования на объектах нефтегазового комплекса в составе обсадных колонн скважин. При эксплуатации обсадные трубы возможно подвергать значительному воздействию в момент эксплуатации, что является их отличительной особенностью.

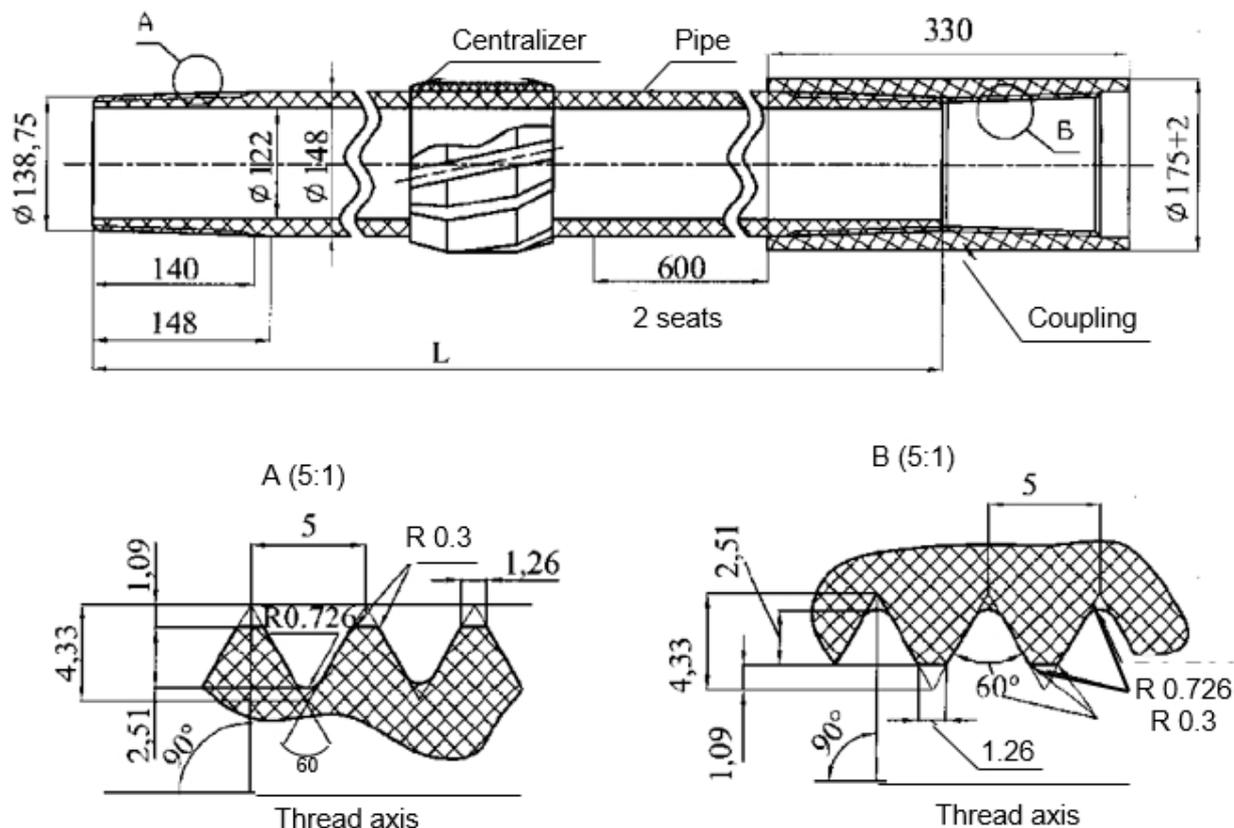


Fig. 10 - Example of a casing pipe with a coupling and a centralizer
Рис. 10 - Пример исполнения обсадной трубы с муфтой и центратором

Строительство скважин вызывает растяжение осевых усилий от веса колонн и внутреннее давление при опрессовке кадров. До затвердения цементного раствора после стадии опрессовки возникает наружное сминающее давление вследствие разности удельного веса воды и раствора.

Допустимые нагрузки заключаются в:

1. Внутреннее избыточное давление до 30 Мпа
2. Наружное сминающее давление до 100 Мпа
3. Максимальное осевое усилие на растяжение 350 кН
4. Допустимое осевое усилие при сжатии 520 кН

Обсадные трубы принято соединять при помощи комбинированной муфты с наружной резьбой с конической или упорной резьбой

Насосно-компрессорные трубы и муфты

Насосно-компрессорные трубы маркируются буквой «Н» (рисунок 11). Целесообразность использования возникает при монтаже сетей для нефтяной промышленности, в фонтанных скважинах, в нагнетательных скважинах систем поддержки пластового давления или в скважинах с погружными электроцентробежными насосами.

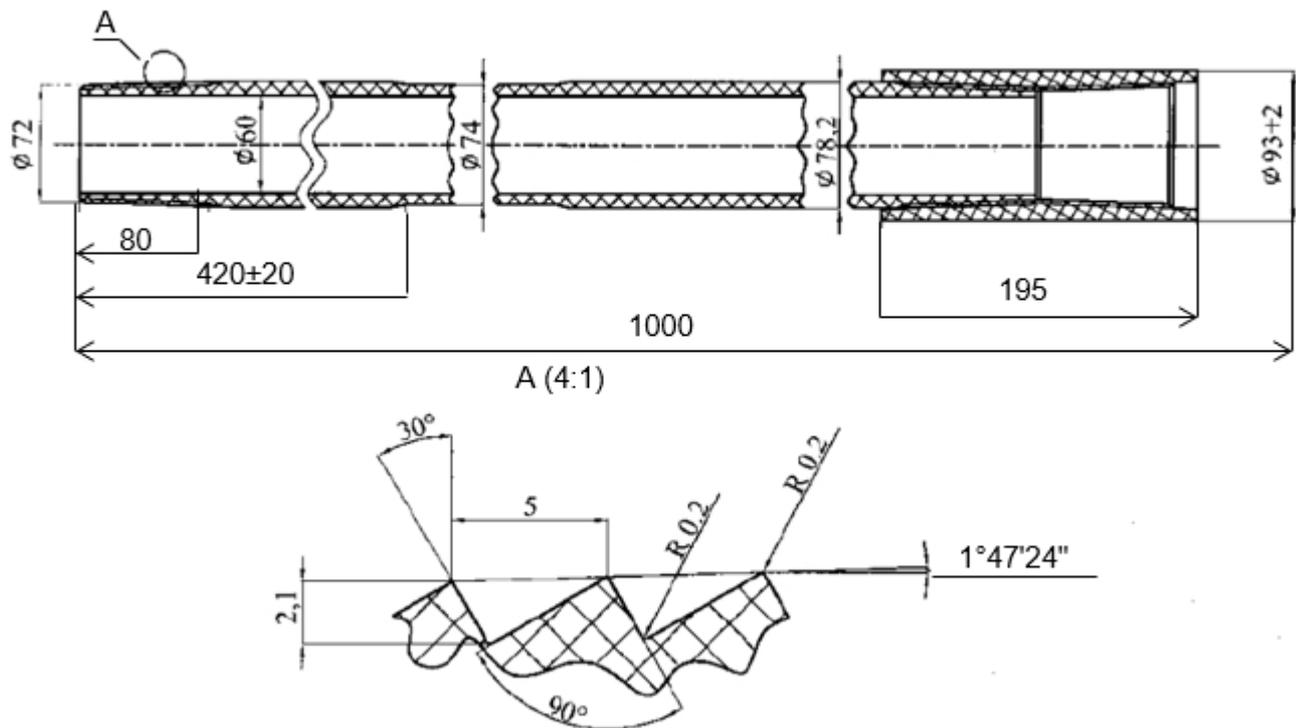


Fig. 11 - Example of a pump and compressor pipe (type "H") with a coupling

Рис. 11 - Пример исполнения насосно-компрессорной трубы (типа «Н») с муфтой

Возможность использования насосно-компрессорных труб в условиях повышенного содержания сероводорода, парафинов, углекислого газа и других асфальтенов рождает их отличительную особенность в сравнении с другими полимерными трубами.

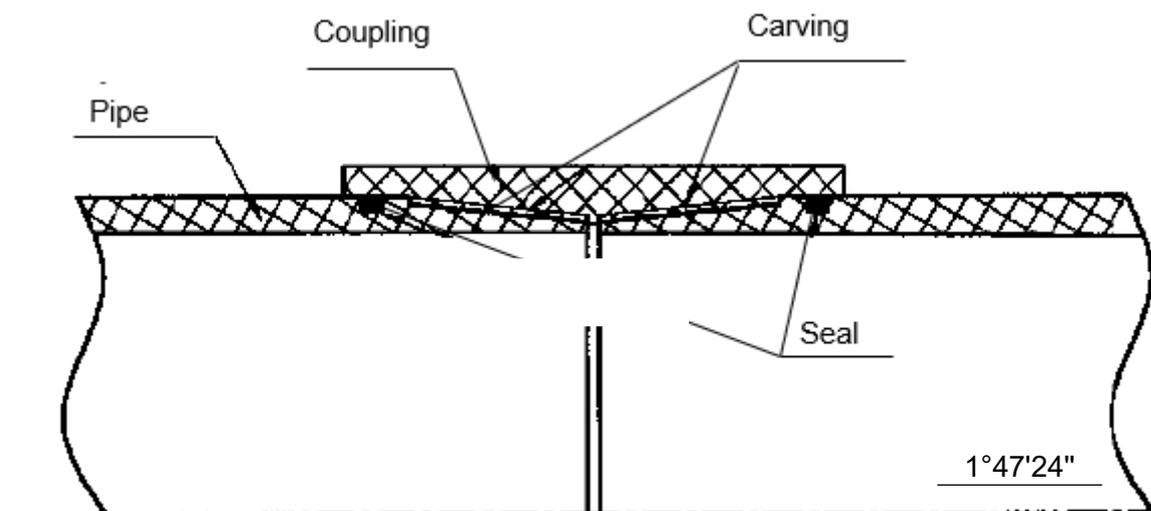


Fig. 12 - Connection diagram with conical thread

Рис. 12 - Схема соединения с конической резьбой

Уровень допустимых нагрузок в условиях эксплуатации заключается в следующем:

1. Внутреннее избыточное давление до 30 Мпа;
2. Максимальное осевое усилие на растяжение равно 100 кН;
3. Допустимое осевое усилие при сжатии 160 кН;
4. Максимальная температура водонефтяной среды 0,4 г/м³;
5. Количество циклов «свинчивание/развинчивание» равны не менее 30.

Для соединения данного вида труб рекомендуется использовать соединение со специальной конической или упорной резьбой (рисунок 12).

Kirsanova, T.; Shchetnikov A.; Yakupov, S.; Vafaeva, K.; Shinkareva M.

Variants of pipeline assemblies made of composite materials and their connections and technological units;

2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2804. doi: 10.57728/ALF.28.4

Диэлектрические трубы и муфты

Диэлектрические трубы маркируются буквой «Д» и отличаются способностью обеспечивать электрическую изоляцию отдельных участков сети трубопровода (рисунок 13).

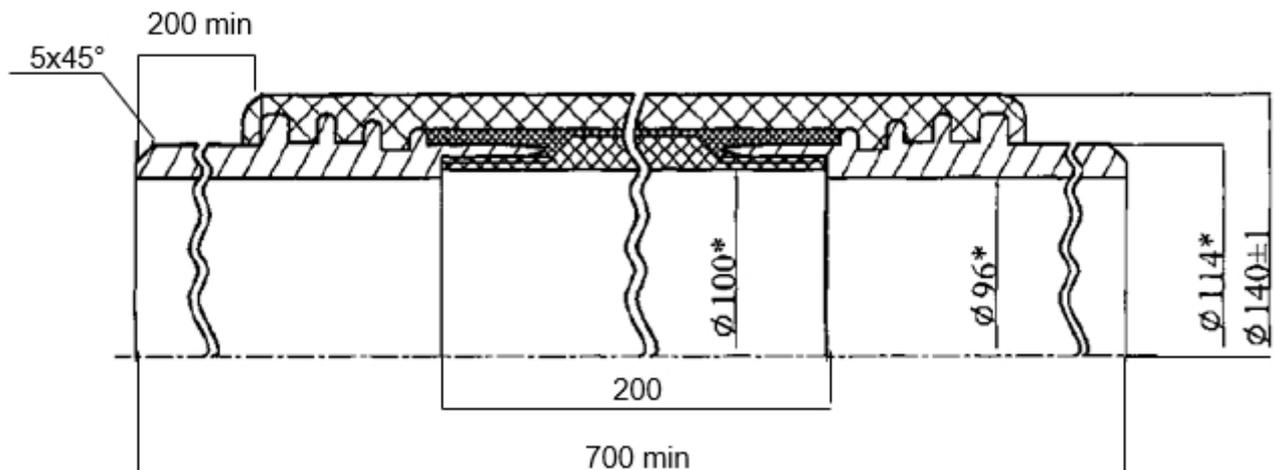


Fig. 13 - Example of a dielectric coupling with an adapter

Рис. 13 - Пример исполнения диэлектрической муфты с переводником

Данные функции диэлектрических труб созданы с целью повышения анодной изоляции. Также подобная продукция применяется в энергетических установках для создания конструктивных элементов электроизоляции.

Трубы вентиляционных воздухопроводов и газоотводных систем

данный вид труб имеет маркировку «В» и имеют аналогичную конструкцию с традиционными трубами, при этом обладающие дополнительными характеристиками относительно правил безопасности в условиях возникшего вакуума и больших перепадах давления. Трубы вентиляционных воздухопроводов и газоотводных систем имеют класс пожарной опасности «трудногорючие».

Все трубы, изготовленные из полимерных композитов, не излучают радиоактивного воздействия, они взрывобезопасны, не токсичны и искробезопасны.

4 Conclusions / Заключение

Преимущества композитов в трубопроводных системах заключается в сроке службы, долговечной надежности и технологичности монтажа.

В процессе исследований были использованы положения системного анализа, методы экспертных оценок, теория рисков, сравнительный метод, метод обобщения, абстракции, индукции и дедукции.

Итоговые выводы заключаются в следующих аспектах:

1. Проведено экспериментально-теоретическое исследование композитных труб, их соединений и технологических узлов при эксплуатационных воздействиях внешних факторов. Разработана методика испытаний и выбраны соответствующие нагрузки и условия эксплуатации.

2. Аналитическое исследование предельных показателей прочности композиционных полимерных труб под действием внутреннего давления позволило определить максимальное значение давления, которое материал может выдержать без разрушения.

3. Проведение вероятностного анализа позволило оценить количественный предел прочности полимерных труб с учетом статистической вариации параметров материала.

Данное исследование позволит:

1. разработанная методика испытаний и выбранных соответствующих нагрузок и условий эксплуатации поможет определить прочностные характеристики материала и дать рекомендации по его применению;

2. аналитическое исследование предельных показателей прочности композиционных полимерных труб под действием внутреннего давления поможет оптимизировать конструкцию трубы и обеспечить безопасность ее эксплуатации;



3. результаты проведенного вероятностного анализа позволит установить вероятность возникновения разрушения трубы при заданных условиях эксплуатации и разработать рекомендации по усовершенствованию конструкции или выбору материала;

Проведен анализ теоретических источников на основе испытаний, научных публикаций и регламентирующих документов, вследствие чего установлены критерии характеристик полимерных композиционных сетей, обеспечивающих условия экономически и практически выгодного использования полимерных композиционных сетей.

5 Fundings / Финансирование

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-19-00324, <https://tscf.ru/project/21-19-00324/>

References

- 1 Nikitina I.N. and Ereemeev A.V. (2015) Possibilities of the use of GRP piping in the construction and reconstruction of engineering networks. *IOP Conference Series: Construction: Science and education*, **1083**. <http://www.nso-journal.ru>.
- 2 Kavkazskiy N.V. and Dmitriev A.N. (2023) Composite pipers for the metro. *Underground horizons*, **18**. <http://www.techinform-press.ru/8-iz-novogo-nomera-iz-novogo-nomera/299-podzemnye-gorizonty>
- 3 Bakaiyan, H., Hosseini, H. and Ameri, E. (2009) Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading with Thermal Variations. *Composite Structures*, **88**. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.017>.
- 4 Saad, A.M. and Dulaimi, M. (2015) Analyses of Multi-Layered Composite Pipes. *Academic Journal of Science*, **4**. <https://scholar.google.com/citations?user=CC20G-cAAAAJ&hl=ru>
- 5 Sulu, I.Y. and Temiz, S. (2018) Failure and Stress Analysis of Internal Pressurized Composite Pipes Joined with Sleeves. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **32**. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1385376>.
- 6 Sulu, I.Y. and Temiz, S. (2023) Mechanical Characterization of Composite Pipe Systems Joined Using Different Radii Pipes Subject to Internal Pressure. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, **51**. <https://doi.org/10.1080/15397734.2020.1848590>.
- 7 Bobba, S., Lemana, Z., Zainuddin, E.S. and Sapuan, S.M. (2019) Effects of Ageing on the Mechanical and Structural Properties of Glass/Epoxy Composite Pipes in Seawater. *JEC Composites Magazine*, **56**. https://www.researchgate.net/publication/335014135_Effects_of_ageing_on_the_mechanical_and_structural_properties_of_glassepoxy_composite_pipes_in_seawater
- 8 Mishnev, M. V. (2018) Estimation of Sandwich Cylindrical Shells with the FRP Skins and the Core of the Mineral Wool Plates. Shell Structures: Theory and Applications Volume 4 - Proceedings of the 11th International Conference on Shell Structures: Theory and Applications, SSTA 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315166605-87>.
- 9 Korolev, A., Mishnev, M., Zherebtsov, D., Vatin, N.I. and Karelina, M. (2021) Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting. *Polymers*, **13**. <https://doi.org/10.3390/polym13030428>.
- 10 Toh, W., Tan, L. Bin, Tse, K.M., Giam, A., Raju, K., Lee, H.P. and Tan, V.B.C. (2018) Material Characterization of Filament-Wound Composite Pipes. *Composite Structures*, **206**. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.049>.
- 11 Mezghani, K. (2012) Long Term Environmental Effects on Physical Properties of Vinylester Composite Pipes. *Polymer Testing*, **31**. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.10.001>.
- 12 Azizian, M., Azizian, M., Rashed, G., Mohtadi-Bonab, M.A. and Abazadeh, B. (2021) A Novel Strategy for Comparative Numerical Analysis of the Response of Buried Composite and Steel Pipes Subjected to Realistic Loading Scenarios: FEA in Cooperation with Taguchi Approach. *Engineering Failure Analysis*, **122**. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105228>.



- 13 Abdul Majid, M.S., Daud, R., Afendi, M., Amin, N.A.M., Cheng, E.M., Gibson, A.G. and Hekman, M. (2014) Stress-Strain Response Modelling of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composite Pipes under Multiaxial Loadings. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, **6**. <https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.18.0088>.
- 14 Nazirah, Z.S., Abdul Majid, M.S., Amin, N.A.M. and Gibson, A.G. (2016) Modelling of Glass Fibre/Epoxy Composite Pipes under Multi-Axial Loadings Using Finite Element Analysis. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, **16**. https://www.researchgate.net/publication/308882134_Modelling_of_Glass_FibreEpoxy_Composite_Pipes_Under_Multi-Axial_Loadings_Using_Finite_Element_Analysis
- 15 Ang, J.Y., Abdul Majid, M.S., Mohd Nor, A., Yaacob, S. and Ridzuan, M.J.M. (2018) First-Ply Failure Prediction of Glass/Epoxy Composite Pipes Using an Artificial Neural Network Model. *Composite Structures*, **200**. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.139>.
- 16 Vatin, N., Ilizar, M. and Nurmukhametov, R. (2020) Composite Helical Micro Pile's Bearing Capacity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012037>.
- 17 Özbek, Ö., Bozkurt, Ö.Y. and Erkliğ, A. (2019) An Experimental Study on Intraply Fiber Hybridization of Filament Wound Composite Pipes Subjected to Quasi-Static Compression Loading. *Polymer Testing*, **79**. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106082>.
- 18 Metodieva, P., Zhezhova, S., Srebrenkoska, S., Naseva, S. and Srebrenkoska, V. (2015) Design of Polymer Composite Pipes Produced By Filament Winding Technology. *Scientific Proceedings XII International Congress "Machines, Technologies, Materials,"* **1**. <https://snio.org.ua/information/94-xii-mezhdunarodnyy-kongress-mashiny-tehnologii-materialy15.html>
- 19 Üstün, T., Ulus, H., Karabulut, S.E., Eskizeybek, V., Şahin, Ö.S., Avci, A. and Demir, O. (2016) Evaluating the Effectiveness of Nanofillers in Filament Wound Carbon/Epoxy Multiscale Composite Pipes. *Composites Part B: Engineering*, **96**. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.031>.
- 20 Vasiutkin E.S. and Glushko M.M. (2022) Strength calculation of a suspended bridge tray made of polymer composite materials. *Travel navigator*, **50**. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48698591>
- 21 Manoj Prabhakar, M., Rajini, N., Ayrilmis, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., Karthikeyan, S. and Ismail, S.O. (2019) An Overview of Burst, Buckling, Durability and Corrosion Analysis of Lightweight FRP Composite Pipes and Their Applicability. *Composite Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419>.
- 22 Maleki, S., Rafiee, R., Hasannia, A. and Habibagahi, M.R. (2019) Investigating the Influence of Delamination on the Stiffness of Composite Pipes under Compressive Transverse Loading Using Cohesive Zone Method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **13**. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0555-1>.
- 23 Gunoz, A., Kepir, Y. and Kara, M. (2020) Tensile Strength Alteration of GFRP Composite Pipes Under Seawater-Dominated Conditions. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **20**. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00962-2>.
- 24 Amid, H., Jeddi, A.A.A., Salehi, M., Dabiryan, H. and Pejman, R. (2016) Investigation of Circular Woven Composite Preforms for Composite Pipes. *Autex Research Journal*, **16**. <https://doi.org/10.1515/aut-2015-0036>.
- 25 Saghri, F., Gohari, S., Mozafari, F., Moslemi, N., Burvill, C., Smith, A. and Lucas, S. (2021) Mechanical Characterization of Particulated FRP Composite Pipes: A Comprehensive Experimental Study. *Polymer Testing*, **93**. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107001>.
- 26 Gopi, S., Loganathan, G.B., Sekar, B.K., Krishnamoorthy, R.K., Sekaran, V. and Mohan, A.R. (2019) Influence of Water Absorption on Glass Fibre Reinforced IPN Composite Pipes. *Polimeros*, **29**. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.02818>.
- 27 Rafiee, R. and Elasmı, F. (2017) Theoretical Modeling of Fatigue Phenomenon in Composite Pipes. *Composite Structures*, **161**. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.054>.
- 28 Benyahia, H., Tarfaoui, M., El Moumen, A., Ouinas, D. and Hassoon, O.H. (2018) Mechanical Properties of Offshoring Polymer Composite Pipes at Various Temperatures. *Composites Part B: Engineering*, **152**. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.014>.



- 29 Oke, W.A. and Khulief, Y.A. (2020) Dynamic Response Analysis of Composite Pipes Conveying Fluid in the Presence of Internal Wall Thinning. *Journal of Engineering Mechanics*, **146**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001842](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001842).
- 30 Bouhafs, M., Sereir, Z. and Chateauneuf, A. (2012) Probabilistic Analysis of the Mechanical Response of Thick Composite Pipes under Internal Pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **95**. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.001>.