

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки)

УДК 620.197.6.

DOI: 10.31660/0445-0108-2025-3-135-147

EDN: UOZPAO

Применение полимерных и композитных материалов в конструкции магистральных нефтепроводов на участках с многолетнемерзлыми грунтами

**Е. А. Макарова*, Р. Э. Алимуратов, А. М. Стрельчук, Р. А. Шырдаев,
П. В. Чепур**

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Ekaterinamakarova7833@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы в области проектирования, строительства, освоении и прокладки нефте- нефтепродуктопроводов в местах, которые относятся к группе грунтов с многолетнемерзлыми грунтами. Наилучшее логическое решение этих проблем заключается во внедрении полимерных и композитных материалов в конструкции, находящихся в арктических пустынях и тундре. Статья содержит примеры исследований об эксплуатации нефтепроводов и трубопроводов, условиями которых являлись многолетнемерзлые грунты, а также полное характеристическое описание агрессивных сред, воздействующих на надежность труб.

Цель статьи — обоснование возможности использования полимерных и композитных материалов для трубопроводов, проложенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, что в конечном итоге позволит обеспечить снижение затрат на обслуживание и ремонт соответствующей инфраструктуры. В работе использованы методы анализа химической стойкости труб. В результате исследования установлено, что увеличение высоты опор приводит к росту напряжений в стенке трубопровода, что может быть вызвано изменением частоты свободных колебаний системы, и появлению дополнительных перемещений трубопровода как в продольном, так и поперечном направлениях.

Результаты показывают влияние элементов на рабочую среду нефтепровода в условиях многолетнемерзлых грунтов. Выявлен наиболее подходящий материал для конечно-элементного моделирования с учетом сезонных деформаций мерзлых грунтов. Труба из полиэтилена низкого давления устойчива к агрессивной среде, создающейся из-за содержания примесей в нефти, делающей ее наиболее пригодным вариантом для строительства нефтепровода в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Практическая значимость исследования состоит в использовании композитных и полимерных материалов в условиях многолетнемерзлых грунтов, уменьшающем воздействие агрессивных сред на внутреннюю стенку трубопровода, изготовленного из полиэтилена низкого давления, который зарекомендовал себя наилучшими свойствами и стоимостью на рынке.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, магистральный трубопровод, полимерные и композитные трубы

Для цитирования: Применение полимерных и композитных материалов в конструкции магистральных нефтепроводов на участках с многолетнемерзлыми грунтами / Е. А. Макарова, Р. Э. Алимуратов, А. М. Стрельчук [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-3-135-147 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 3. – С. 135–147. – EDN: UOZPAO

Application of polymer and composite materials in the construction of main oil pipelines in areas with permafrost soils

**Ekaterina A. Makarova, Raul E. Alimuradov, Alena M. Strelchuk,
Renat A. Shyrdaev, Petr V. Chepur**

Abstract. This article discusses problems with the design, construction, and operation of oil and petroleum product pipelines in regions characterized by permafrost soils. The best way of solving these problems involves polymer implementation and composite materials in pipeline structures, particularly in arctic desert and tundra zones. The paper presents case studies and research results concerning the performance of pipelines operating in permafrost conditions, along with a complete characterization of the aggressive environments affecting pipe reliability.

The aim of this study is to substantiate the feasibility of using polymer and composite materials in oil transportation systems to reduce maintenance and repair costs in permafrost areas. We applied methods of an analysis of the chemical resistance of pipes. The study found that increasing the height of pipeline support s—necessary for aboveground installations in permafrost terrain — can lead to higher stress levels, potentially creating unfavourable operating conditions.

The results also demonstrate the influence of structural elements on the pipeline's performance in permafrost environments and help to identify the most suitable material for finite element modelling that takes into account seasonal ground deformations. The findings indicate that low-density polyethylene (LDPE) pipes exhibit high resistance to the aggressive environments caused by impurities in crude oil. This makes LDPE a strong candidate for pipeline construction in permafrost zones.

The significance of this study lies in demonstrating that the use of polymer and composite materials can reduce the impact of aggressive media on pipeline interiors. Among these materials, LDPE offers an optimal balance of performance and cost-effectiveness for use in such demanding conditions.

Keywords: permafrost soils, main pipeline, polymer and composite pipes

For citation: Makarova, E. A., Alimuradov, R. E., Strelchuk, A. M., Shyrdaev, R. A. & Chepur, P. V. (2025). Application of polymer and composite materials in the construction of main oil pipelines in areas with permafrost soils. *Oil and Gas Studies*, (3), pp. 00-00. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-3-00-00

Введение

Многолетнемерзлые грунты оснащают не менее 60 % территории России, в которой залегают около 30 % нефти от общего исследованного объема [1]. Трубопроводный транспорт нефти происходит благодаря стальным трубам. Стальные трубы, произведенные из специализированных сталей, обладают улучшенными характеристиками прочности, коррозионной стойкости и долговечности, что делает их пригодными для использования в различных отраслях промышленности и инфраструктуры.

Многолетнемерзлый грунт затрудняет освоение магистральных нефтепроводов — требуются большие финансовые затраты на обслуживание, ремонт, диагностирование.

Согласно ГОСТ 1510–84. «Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение» нефть транспортируют с температурой не более 30 °C¹. В среднем местности грунтов пустынь Арктики и тундры находятся в пределах –3°C. Металл имеет высокое значение теплопроводности, даже с учетом добавления различных сплавов, поэтому скорость коррозии повышается из-за увеличения жидкости.

Цель — собрать данные о возможности безопасно, инфраструктурно и экономично использовать те полимерные и композитные материалы, которые подходят для эксплуатации в условиях многолетнемерзлых грунтов в транспорте нефти.

¹ ГОСТ 1510-84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78214/>

Задачи:

- 1) проанализировать современное состояние мировых и отечественных исследований в области применения полимерных и композитных материалов в нефтегазовой отрасли;
- 2) сравнить рынок в области полимерных и композитных труб, выявив преимущества и недостатки каждого типа, подходящего для строительства магистрального нефтепровода;
- 3) произвести анализ химической стойкости полимерных труб в местностях с многолетнемерзлыми грунтами;
- 4) провести эксперимент модельно-конечного характера, доказывающий возможность внедрения полимерных и композитных составляющих в трубах;
- 5) проанализировать, как опоры для труб при своей неравномерности повышают напряжение, с увеличением высоты относительно поверхности земли.

Объект и методы исследования

Перед проектированием магистральных трубопроводов в районах с многолетнемерзлыми грунтами необходимо провести обязательную проверку в соответствии с требованиями СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы».

В процессе освоения таких грунтов первоочередное внимание уделяется анализу методов прокладки труб, эксплуатационным условиям, инженерно-геокриологическим характеристикам и оценке изменений свойств основания для обеспечения эффективной транспортировки.²

- 1) принцип I — грунты, в эксплуатации которых наблюдается постоянно отрицательная температура, характеризующаяся агрегатным состоянием, как твердый замороженный грунт, поддерживающийся на всех этапах и всей эксплуатации;
- 2) принцип II — многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии.

Высокая отрицательная температура многолетнемерзлых грунтов остается постоянной в течение всего года. Она приводит к деформации и разрушению трубопроводов, из-за чего создаются предпосылки для аварий и увеличиваются значения вероятности чрезвычайной ситуации.

Деформации многолетнемерзлых грунтов могут быть нескольких видов:

- 1) морозное пучение — увеличение объема грунта при замерзании из-за образования ледяных линз внутри него;
- 2) морозное выдавливание — поднятие и деформация грунтов вследствие морозного пучения нижележащих слоев;

² СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. — URL: <https://www.fkr-spb.ru/upload/iblock/546/w10pt1os411mtl2i9h948sqmxs77crg6.pdf>

3) морозное растрескивание — появление трещин в грунтах при их замерзании и охлаждении;

4) морозная коррозия — разрушение поверхности грунтов под воздействием талых вод, проникающих в трещины и увеличивающих их размер при замерзании.

Вышеперечисленными фактами обуславливается необходимость внедрения труб из полимерных и композитных материалов в нефтегазовой промышленности в местах арктических пустынь и тундры.

Эти материалы используют такие компании, как: Total (Франция); Amoco, ExxonMobil (США); Shell (США/Канада).

ЗАО «НПП Композит-нефть» занимается производством и продажей изготовленных из стеклопластика продуктов, помогающих транспортировать нефть в условиях многолетнемерзлых грунтов и входящих в класс комбинированных труб, чей диаметр варьируется от 75 до 300 мм [2]. Также предприятие воспроизвело трубопровод наибольшего диаметра, а именно в 1 200 мм, рабочее давление которого составляло 7,5 МПа [3].

На Варад и Сим-Сим, двух ключевых месторождениях, происходило до 45 % утечек. В связи с этим было принято обоснованное техническое решение о замене низконапорных стальных труб на полиэтиленовые трубы высокого давления от компании Borealis [4].

Ниже представлены ведущие компании, специализирующиеся на производстве материалов, используемых для решения вопросов эксплуатации в условиях отрицательных температур грунтов, и приведена таблица с продукцией зарубежных и отечественных производителей.

NOV-Fiberspar (США) — линейная труба, наматываемая на барабан, состоящая из внутреннего термопластического слоя, армированного высокопрочным стекловолокном, внедренным в эпоксидную матрицу. Первая гибкая труба, соответствующая трем стандартам [5, 6].

Soluforce (Нидерланды) — гибкая композитная труба, уникально изготовленная из связующего алюминиевого слоя, благодаря которому проникают газы из трубы. Все это способствует устранению возможных проблем безопасности окружающей среды [7].

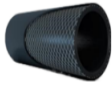
ANACONDA (Россия) — гибкая полиэтиленовая высоконапорная труба монолитной конструкции. Обладает высокой коррозионной и гидроабразивной стойкостью, повышенной пропускной способностью. Армирование трубы производится полиэфирными малоусадочными нитями с повышенной адгезией с пределом прочности 900 МПа [8].

Проанализировав таблицу 1, заключим, что трубы, изготовленные российским предприятием, во многом уступают продуктам из США и Нидерландов по таким показателям, как:

- 1) диаметр, который за рубежом на 20–30 % больше, чем в России;
- 2) рабочее давление в России составляет всего 4 МПа, в чем уступает международным предприятиям с давлением в 13,8 МПа;
- 3) температура рабочей эксплуатации материала США не более 104,4 °С, а в России — не выше 80 °С.

Таблица 1

Рынок полимерных и композитных труб

Название	Страна	Ассортимент	Давление, МПа	Температура, °С	Вид
NOV-Fiberspar	США	Диаметр 50–254 мм, армирование высокопрочными нитями	до 13,8	до 104,4	
Soluforce	Нидерланды	Диаметр 101–177 мм, армирование нитями	до 8,0	до 100	
ANACONDA	Россия	Диаметр 74–160 мм, армирование трубы полиэфирными малоусадочными нитями с повышенной адгезией	от 1,2 до 4,0	до 65	

При проведении анализа стоимости труб ПНД необходимо учитывать следующие аспекты:

- Сырье. Сырьем для производства труб ПНД является полиэтилен, который может быть получен из различных источников, таких как нефть или природный газ.
- Производственные затраты. Включают расходы на оборудование, электроэнергию и пр.
- Логистика. Доставка сырья и готовой продукции влияет на конечную стоимость труб.
- Рыночные условия. Спрос и предложение на рынке труб ПНД сказываются на их стоимости.



Рис. 1. Индекс цен на ПНД в России

На рисунке 1 видно, что последняя цена за тонну 24 мая 2023 не изменялась вплоть до 2024 года и составила 151 583 Р

Результаты и обсуждения

Направление, связанное с областью промышленности труб из полиэтилена низкого давления (ПНД), нашло обширное применение в отраслях промышленности и строительства из-за таких критериев надежности, как: долговечность, прочность и устойчивость к воздействию факторов, неблагоприятно влияющих извне.

Для выполнения расчетов используются международные стандарты, поскольку в зарубежных странах производство труб находится на более высоком уровне развития. Согласно стандартам ISO 12162 и ISO 9080 допустимая нагрузка на трубу определяется минимальной длительной прочностью материала MRS (Minimum Required Strength). Высокое значение MRS свидетельствует о большей прочности материала и его устойчивости к различным нагрузкам. Согласно графикам, представленным на рисунке 2, можно сделать вывод о том, что напряжение зависит от температуры, которая оказывает влияние на давление, толщину стенки и радиус трубы.

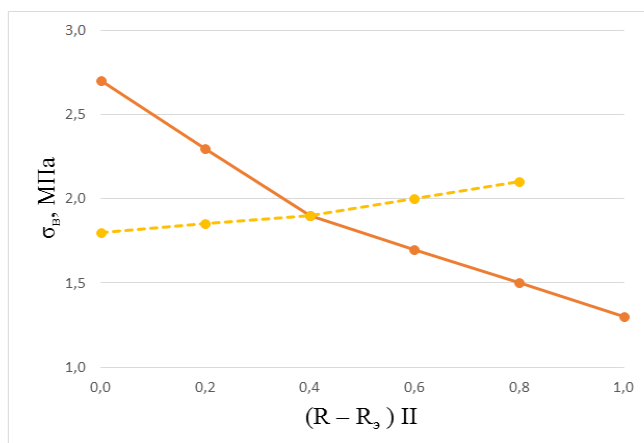


Рис. 2. Напряжение в полиэтилене от температуры в стенке трубы (прерывистая) и при постоянной температуре [5]

MOP (Maximum Allowable Operating Pressure) — максимальное допустимое рабочее давление, значение которого рассчитывается по формуле (1) согласно нормативам^{3,4}.

³ ГОСТ ISO 12162 Материалы термопластичных для напорных труб и соединительных деталей. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293741/4293741059.pdf?ysclid=m4uuysjnn511835463>

⁴ ГОСТ ISO 9080 Трубы из термопластичных материалов. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/4293741/4293741059.pdf?ysclid=m4uuw723h7700915067>

$$MOP = \frac{2 \cdot MRS}{C \cdot (SDR - 1)} \quad (1)$$

где MRS — минимальная длительная прочность материала; C — коэффициент запаса прочности; SDR — стандартное размерное соотношение определяется по формуле (2) согласно^{3,4}.

$$SDR = \frac{d_n}{e} \quad (2)$$

где d_n — наружный диаметр трубы; e — толщина стенки

Максимальное рабочее давление рассчитывается по формуле (3):

$$p = \frac{2 \sigma \cdot e}{d - e} \quad (3)$$

где σ — допускаемое напряжение в стенке трубы, МПа.

$$\sigma = \frac{MRS}{C}, \quad (4)$$

где $\sigma_{кц}$ — кольцевые напряжения, МПа; $\sigma_{пр}$ — продольные напряжения, МПа; P — давление в трубопроводе, МПа; δ — толщина стенки, мм; $D_{вн}$ — внутренний диаметр, мм; $D_{нар}$ — наружный диаметр, мм.

На рисунке 3 представлена схема с действием кольцевых и продольных напряжений в стенке трубопровода для срединного слоя.

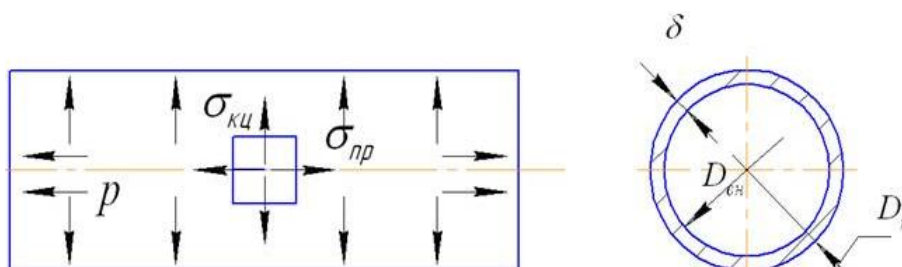


Рис. 3. Напряжения, происходящие в стенке трубопровода

Таким образом, математические модели дают возможность провести всестороннюю оценку долговременной гидростатической прочности термостатических материалов.

Для определения несущей способности труб необходимо учитывать информацию, характерную для того или иного полимерного материала из таблицы 2⁵.

Процесс очистки на установке подготовки нефти не обеспечивает полного удаления солей и кислот, в связи с чем материалы разделяются на различные классы в зависимости от их сопротивления в образовании различных химических реакций [9]:

1) класс 1: высокий уровень химстойкости (антикоррозионный) всех материалов;

⁵ ГОСТ ISO 9080 Трубы из термопластичных материалов. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/4293741/4293741059.pdf?ysclid=m4uuw723h7700915067>

- 2) класс 2: ограниченный уровень химстойкости всех материалов (период эксплуатации сокращается);
- 3) класс 3: отсутствие химической стойкости у всех материалов (транспортировка жидкости невозможна).

Таблица 2

Краткая информация об исследуемых материалах

Материал	Рабочая температура, °С	Химическая стойкость
Поливинилхлорид (ПВХ)	60	Устойчив к кислотам, щелочам, солям и большинству органических соединений
Полиэтилен (ПЭ)	60	Тоже что и у ПВХ
Акрилонитрил бутадиенстирольный пластик (АБС)	60	Тоже что и у ПВХ и ПЭ, а также стойкость к смазочным маслам
Полипропилен (ПП)	90	Химическая стойкость как у ПЭ, но при высоких t (температурах)
Хлорированный поливинил хлорид (ХПВХ)	90	Химическая стойкость как у ПВХ
Поливинил денфторид (ПВДФ)	140	Устойчив к действиям кислот, растворов солей, алифатических ароматических

По результатам химического анализа в качестве материала для магистрального нефтепровода выбран полиэтилен низкого давления (ПНД), на основе которого была разработана модель трубопровода.

Расчетная схема (рис. 4.) магистрального нефтепровода в условиях многолетнемерзлых грунтов — это сложная система, состоящая из трубопровода, грунта и других элементов.

Она учитывает взаимодействие всех этих компонентов и их влияние на работу системы, включающей следующие основные элементы:

- 1) Снеговая нагрузка на трубопровод — сила, которая действует на трубопровод из-за веса снега, лежащего на его поверхности.
- 2) Зона упругого защемления трубопровода — область, в которой трубопровод закреплен на опорах и может свободно перемещаться в пределах упругой деформации материала.
- 3) Зона свободного провисания трубопровода — участок, где трубопровод не закреплен на опорах и может свободно провисать под действием собственного веса.

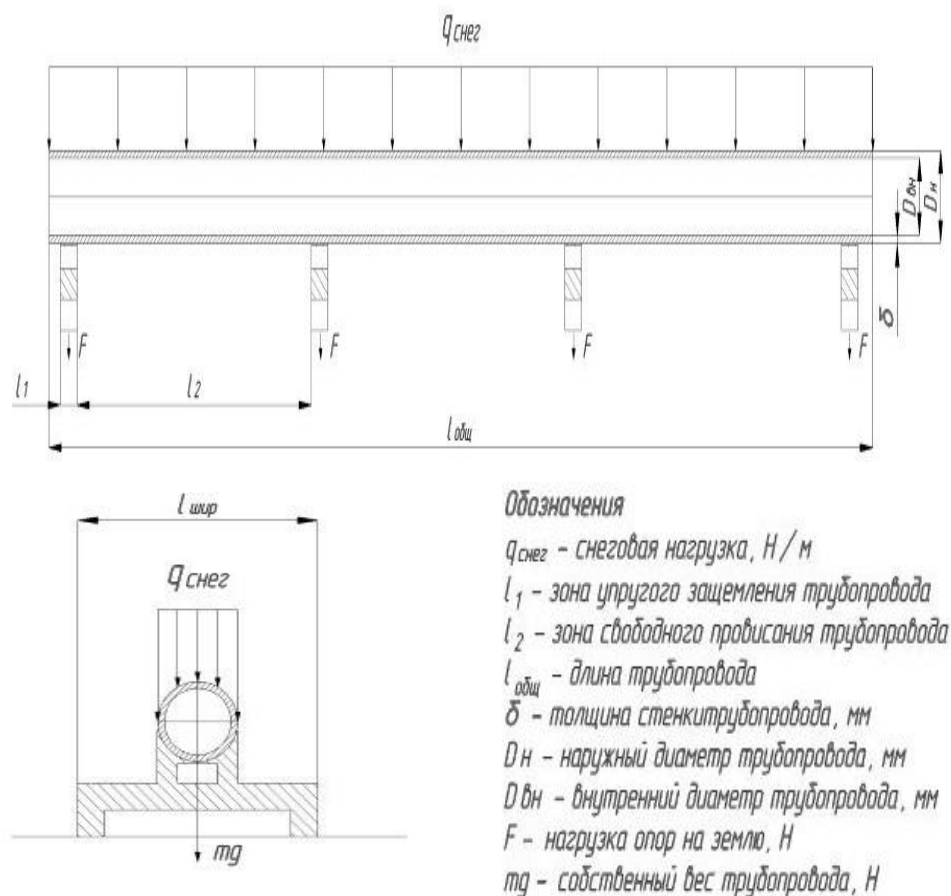


Рис. 4. Расчетная схема

Одной из самых часто встречающихся проблем является неравномерная осадка опор трубопроводов.

Для решения проблемы неравномерной осадки опор трубопроводов был применен метод конечных элементов (МКЭ). Это мощный инструмент, позволяющий эффективно моделировать сложные конструкции, включая трубопроводы любой конфигурации, а также анализировать их поведение при воздействии различных нагрузок.

В рамках работы мы создали модель трубопровода с учетом следующих параметров (рис. 5):

- геометрические характеристики (диаметр, длина, количество опор);
- физико-механические свойства материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона);
- нагрузки (собственный вес трубопровода, вес транспортируемого продукта, внешние нагрузки).

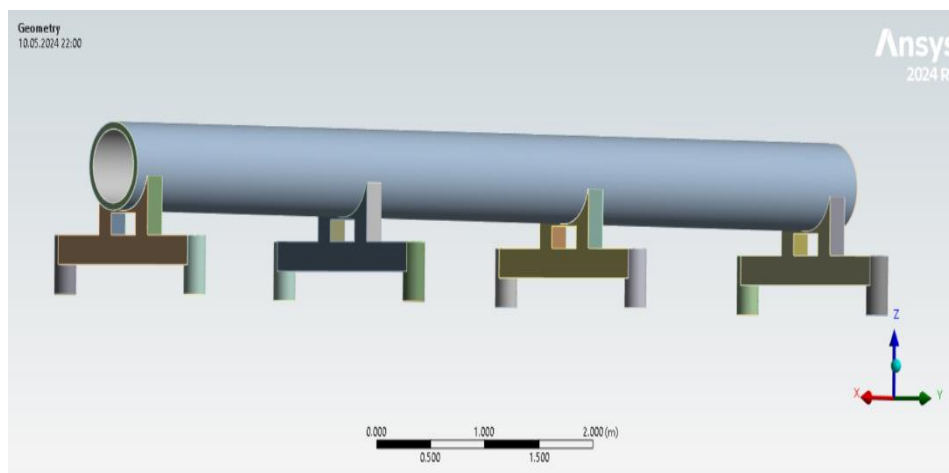


Рис. 5. 3D модель трубы в МКЭ-программном комплексе

С целью выявить оптимальные параметры, обеспечивающие равномерную осадку, мы выполнили ряд расчетов для различных вариантов расположения опор и распределения нагрузок. Результаты показали визуальное увеличение нагрузки с ростом высоты опор (рис 6.).

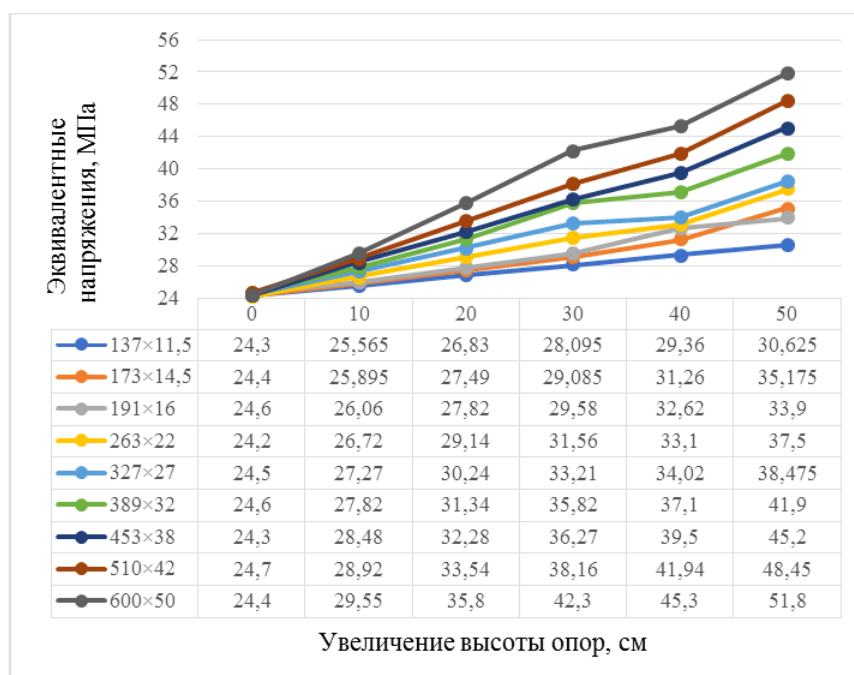


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений с увеличением высоты опор

Из результатов расчетов следует, что для обеспечения равномерной осадки опор необходимо учитывать следующее:

- количество и расположение опор должны быть подобраны так, чтобы они равномерно осуществили нагрузку на грунт;
- диаметр и длина опор зависят от эксплуатации трубопровода.
- материалы, из которых изготовлены опоры, должны обладать достаточной прочностью и жесткостью.

График демонстрирует, что изменение высоты опор влияет на эквивалентные напряжения в материале трубы. С уменьшением высоты опор напряжения снижаются, а с увеличением — возрастают. Это обусловлено перераспределением нагрузки по трубопроводу и изменением его прогиба.

Выводы

Применение полимерных и композитных материалов в условиях арктических пустынь и тундры с многолетнемерзлыми грунтами возможно, но их использование необходимо тщательно анализировать и учитывать особенности эксплуатации.

1) Проведен сравнительный анализ мировых и отечественных исследований в области композитных и полимерных материалов в трубопроводном транспорте нефти. Выявлено, что зарубежные страны опережают Россию: им удалось разработать трубы с рабочим давлением 13,8 МПа. В России тоже проводятся исследования и разработки в этой области, однако к настоящему времени максимальное рабочее давление российских полимерных труб составляет 4 МПа, что значительно ниже показателей зарубежных производителей.

2) Сравнены показатели в области рыночных отношений полимерных труб, используемых в нефтегазовой отрасли. Стоимость труб из полиэтилена низкого давления составляет 160 000 рублей за тонну, а стоимость труб из стали 09Г2С — 225 000 рублей за тонну. Это означает, что трубы из стали 09Г2С примерно на 40 % дороже, чем трубы из полиэтилена низкого давления.

3) Проанализирована химическая стойкость в условиях многолетнемерзлых грунтов, в которой трубы, изготовленные из ПЭ, ПП и ПВДФ, показали высокие результаты.

4) По результатам конечно-элементного моделирования описана характеристика используемого материала и влияние элементов на рабочую среду нефтепровода в условиях многолетнемерзлых грунтов;

5) Рассчитаны показатели неравномерности опор, влияющие на повышения напряжений трубопровода с увеличением их высоты, благодаря которым происходит необходимость в более детальном этапе проектирования.

Для эффективного использования полимерных и композитных материалов в многолетнемерзлых грунтах необходимо провести тщательный

анализ и соблюсти все ключевые требования условий эксплуатации, разработать специализированные технологии монтажа и гарантировать долговечность нефтепровода в условиях воздействия вечной мерзлоты.

Список источников

1. Котляков, В. М. Россия. Природа. Многолетняя мерзлота / В. М. Котляков – Текст : электронный // Большая Российская Энциклопедия: [сайт]. — 2023. — 1 июня. — URL: <https://bigenc.ru/c/rossiia-priroda-mnogoletniaia-merzlota-7b5b33> (дата обращения: 1.04.2024).
2. Трухонин, А. Н. Счет на километры / А. Н. Трухонин // РГК Пермская нефть. — 2004. — № 8.
3. Миллер, А. А. Сделан важный шаг по использованию композитных труб в «Газпроме» / А. А. Миллер. — Текст : электронный // Пресс-центр Газпром : сайт. — 2014. — 24 авг. — URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2014/august/article199561/>
4. Иран планирует серьезно модернизировать свою трубопроводную инфраструктуру. — Текст : электронный // Транспортировка и хранение : сайт. — 2016. — 13 июня. — URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/218598-iran-planiruet-serezno-modernizirovat-svoyu-truboprovodnuyu-infrastrukturu/>
5. FIBERSPAR. — Текст : электронный // Линейная труба FIBERSPAR : сайт. — 2019. — URL: <https://fg-rus.ru/products/lineynye-truby-dlya-neftedobychi-gibkiy-truboprovod-fiberspar/> (дата обращения : 01.04.2024)
6. FlexSteel Pipe. — Текст : электронный // FlexSteel Pipeline Technologies : сайт. — URL: <https://www.flexsteelpipe.com/flexsteel-pipe.html>
7. Advanced Flexible Pipeline Systems for Oil, Gas and Water – Текст : электронный // Solu Force : сайт. — URL: <https://www.soluforce.com/content/dam/pipeline/soluforce/marketing/general/brochures/soluforce-general-brochure.pdf>
8. Производство полиэтиленовых труб ANACONDA. — Текст : электронный // Технология композитов : сайт. — URL: <https://www.tk.perm.ru/anakonda/>
9. Классы химической стойкости. — Текст : электронный // Таблица химической стойкости пластиков : сайт. — URL: https://izpolimera.ru/docs/him_stoykost_polimerov.pdf

References

1. Kotlyakov, V. M. (2023). Russia. Nature. Permafrost. Large Russian Encyclopedia. (In Russian). Available at: <https://bigenc.ru/c/rossiia-priroda-mnogoletniaia-merzlota-7b5b33> (accessed 1.04.2024).
2. Trukhonin, A. N. (2004). The bill for kilometers. RGK Permskaya Neft. (8). (In Russian).
3. Miller, A. A. (2014) Russia. important step has been taken on the use of composite pipes in Gazprom. (In Russian). Available at: <https://www.gazprom.ru/press/news/2014/august/article199561/> (accessed 04.04.2024).
4. Iran plans to seriously modernize its pipeline infrastructure. (2016). (In Russian). Available at: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/218598-iran-planiruet-serezno-modernizirovat-svoyu-truboprovodnuyu-infrastrukturu/> (accessed 06.05.2024).
5. FIBERSPAR USA. Linear pipe FIBERSPAR. (2019). (In English). Available at: <https://fg-rus.ru/products/lineynye-truby-dlya-neftedobychi-gibkiy-truboprovod-fiberspar/> (accessed 01.04.2024).

6. USA. FlexSteel Pipe. FlexSteel Pipeline Technologies. (In English). Available at: <https://www.flexsteelpipe.com/flexsteel-pipe.html> (accessed 08.05.2024).
7. USA. Advanced Flexible Pipeline Systems for Oil. Gas and Water. (In English). Available at: <https://www.soluforce.com/content/dam/pipelife/soluforce/marketing/general/brochures/soluforce-general-brochure.pdf> (accessed 22.04.2024).
8. Production of ANAKONDA polyethylene pipes. (In Russian). Available at: (accessed 08.05.2024). <https://www.tk.perm.ru/anakonda/> (accessed 25.07.2024).
9. Chemical resistance classes. Table of chemical resistance of plastics. (In Russian). Available at: https://izpolimera.ru/docs/him_stoykost_polimerov.pdf (accessed 31.08.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Макарова Екатерина Александровна, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Ekaterinamakarova7833@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7438-6600>

Ekaterina A. Makarova, Student, Industrial University of Tyumen, Ekaterinamakarova7833@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7438-6600>

Алимуратов Рауль Эльханович студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4828-1255>

Raul E. Alimuradov, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4828-1255>

Стрельчук Алена Максимовна студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4435-5561>

Alena M. Strelchuk, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4435-5561>

Шырдаев Ренат Аскарлович. студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1515-7715>

Renat A. Shyrdaev, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1515-7715>

Чепур Петр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>. Web of Science Researcher ID: L-1887-2015, SCOPUS ID: 56491219700

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Building Mechanics, Industrial University of Tyumen, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>. Web of Science Researcher ID: L-1887-2015, SCOPUS ID: 56491219700

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена после рецензирования 10.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.
The article was submitted 02.12.2024; approved after reviewing 10.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.