

УДК 622.691.4

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕМОНТЕ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Берг В.И., Чепур П.В., Якупов А.У.

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень,*

*e-mail: berg\_vi@rambler.ru, chepur\_p\_v@mail.ru, ya.yakupov-azamat@yandex.ru*

В работе получены результаты напряженно-деформированного состояния трубопровода 1220×16 мм при воздействии эксплуатационной коррозии, до и после использования технологии ремонта с применением волокнистых композитных материалов. Определены значения напряжений в стенке трубопровода, а также точное месторасположение максимальных напряжений. Для этого авторами была предложена и реализована расчетная схема: модель трубопровода с коррозионным дефектом, учитывающая воздействие гидростатической нагрузки от транспортируемого продукта, а также равномерно распределенную нагрузку от веса обвалования на оболочечную конструкцию трубопровода. И модель отремонтированного трубопровода с помощью волокнисто-композитного материала путем намотки стекловолкна E-glass на дефектный участок. Разработана конечно-элементная модель трубопровода в программном комплексе ANSYS. По результатам численного эксперимента установлено, что предложенный метод имеет перспективы к внедрению на реальном производстве после проведения реальных экспериментов и испытаний.

**Ключевые слова:** трубопровод, коррозия, авария, стекловолкно, композит, ANSYS, НДС, прочность, напряжения

## THE USE OF FIBROUS COMPOSITES IN THE REPAIR OF CORROSION DEFECTS FOR LONG-HAUL PIPELINES

Berg V.I., Chepur P.V., Yakupov A.U.

*Tyumen Industrial University, Tyumen,*

*e-mail: berg\_vi@rambler.ru, chepur\_p\_v@mail.ru, ya.yakupov-azamat@yandex.ru*

In the work they obtained results of stress-strain state of the pipeline 1220×16 mm under operating corrosion, before and after the use of technology of repair with the use of fibrous composite materials. The calculated values of stresses in the pipe wall, as well as the exact location of maximum stress. For this, the authors proposed and implemented a design scheme: the model of pipeline with corrosion defect, taking into account the influence of the hydrostatic pressure from the transported product, as well as uniformly distributed load from the weight of the embankment on the shell pipeline design. And model of the repaired pipeline using fibrous composite material by winding the optical fiber E-glass on the defective area. Developed finite element model of the pipeline using ANSYS software. According to the result of numerical experiment the method recommended for implementation in production and identified the need to conduct a real experiment.

**Keywords:** pipeline, corrosion, accident, fiberglass, composite, ANSYS, stress-strain state, strength, stress

Разветвленная сеть магистральных трубопроводов РФ представляет собой сложную инженерно-техническую систему, состоящую из большого количества элементов и подверженную влиянию большого количества контролируемых и неконтролируемых факторов. Надежность нефтегазотранспортной сети в целом во многом зависит от показателей надежности линейной части магистрального трубопровода [6]. Несмотря на комплекс защитных мероприятий, выполняемых в процессе производства и прокладки, трубопровод подвержен коррозионному разрушению [1]. Кроме этого, трубопровод может испытывать значительные напряжения, возникающие при нарушении технологии строительства и ремонта [8], которые приводят к возникновению таких дефектов, как вмятины и гофры [5]. Дефекты геометрии трубы совместно

с дефектами изоляционного покрытия ускоряют процесс коррозии трубопровода. Основной задачей в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов, помимо обеспечения требуемой производительности, является обеспечение надежности линейной части магистрального трубопровода (МТ) с целью предотвращения утечек продукта перекачки при авариях, которые приводят к загрязнению окружающей среды и большим материальным затратам. По данным АК «Транснефть» на 1000 км нефтепроводов приходится 4–5 аварий в год. Причем вероятность возникновения аварий от внешних воздействий коррозии достигает 90%. Аварии на трубопроводе ведут к остановке перекачки, из-за этого транспортирующие компании несут колоссальные убытки по устранению последствий аварий и невыполнению сроков поставок

перекачиваемой продукции [4]. Поэтому существует необходимость устранения обнаруженных критических деформаций трубопровода в кратчайшие сроки с минимальным срывом транспортировки.

Проанализировав многолетний российский и зарубежный опыт ремонта трубопроводного транспорта, можно выделить следующие преимущества и недостатки применяемых методов ремонта:

- Вырезка дефектного участка. Недостатки: остановка перекачки продукта или применение дорогостоящих технологий ремонта без остановки перекачки; освобождение ремонтируемого участка от продукта перекачки, что требует больших материальных затрат; производство сварочных (огневых) работ и, как следствие, дополнительные температурные напряжения в стенке трубы. Достоинства: полное восстановление работоспособности участка трубопровода.

- Ремонт с помощью отечественных стальных муфт. Достоинства: ремонт без остановки перекачки; меньшая стоимость ремонта в сравнении с вырезкой дефектного участка. Недостатки: необходимость применения сварки на поверхности трубопровода; отсутствие универсальной конструкции муфты применяемой для любых классов дефектов; отсутствие возможности ремонта трещин; вероятность недостаточного контакта муфты с дефектным трубопроводом и, как следствие, возникновение коррозионных процессов на отремонтированном участке.

- Ремонт с помощью композитно-муфтовой технологии. Достоинства: ремонт без остановки перекачки; ремонт трещин длиной до радиуса трубы и глубиной до 70% от толщины стенки, расслоений, вмятин и гофр; ремонт дефектов во всех сварочных швах; ремонт дефектов типа «потеря металла» коррозионного или механического происхождения протяженностью до 18 м и глубиной до 90% от толщины стенки. Недостатки: обязательная дробеструйная, а зачастую и пескоструйная обработка поверхности трубы и внутренней поверхности муфты; повышенная трудоемкость ремонта в зимних условиях из-за необходимости обеспечения температуры застывания композитного состава; необходимость снижения давления на время установления муфты на 10–15% от рабочего и поддержание на постоянном уровне на протяжении 24 часов; необходимость специального насосного оборудования для закачивания композита; для фиксации манжеты требуется большой объем композитного материала.

- Ремонт с использованием композитной манжеты «Clock SPRING». Достоинства: армирующая лента имеет вторичную матричную память, которая исключает все нестабильности и вариабельность. Недостатки: ремонт дефектов с плоскими очертаниями; дефекты длиной до 18 сантиметров; применение для небольших диаметров.

Композитные материалы произвели революцию во многих отраслях промышленности [2] и стали популярными благодаря высокой стойкости к механическим нагрузкам при небольшом весе [3]. Но при жестком закреплении краёв полумуфт, в местах их крепления на трубопроводе, при малочисленных деформациях возникают дополнительные напряжения, из-за чего возникает угроза деформации на этом участке трубопровода.

Авторами статьи предложен метод ремонта трубопровода с применением волокнистых композитных материалов, технология которого не предполагает остановки перекачки, проведение огневых работ и не ограничивается в протяженности ремонтируемого участка трубопровода. Предлагается использовать алюмо-боро-силикатное стекловолокно E-glass. Этот вид стекла нашел широчайшее применение в промышленности. Толщина нити всего около 10 мкм, но при этом обладает высокой прочностью. В такой форме стекловолокно демонстрирует неожиданные свойства: упруго деформируется без хрупкого разрушения под действием нагрузок. Оксид бора придает этому стеклу свойства тугоплавкости, стойкости к резким температурным скачкам из-за низкого коэффициента теплового расширения и стойкости к агрессивным средам, в том числе к щелочам и некоторым кислотам. Плотность стекловолокна в 3 раза ниже плотности стали, но при этом предел прочности выше предела прочности стали в 2 раза. Другие виды стекловолокна, которые могут быть использованы в качестве материала: S-glass, R-glass, M-glass, A-glass и т.д.

Предлагается, уменьшив давление в трубопроводе, на предварительно зачищенную поверхность дефектного трубопровода наносить способом намотки стекловолокно E-glass в два слоя. Перед нанесением стекловолокно проходит через емкость, наполненную пропиточным компаундом для скрепления волокон между собой и для адгезии с трубопроводом. Наматываются волокна при заданных величинах угла скрещивания витков и силы натяжения.

В результате работы по нанесению стекловолокна формируется армирующая паковка, полностью восстанавливающая прочность поврежденного участка трубопровода, увеличивающая жесткость и создающая слой, препятствующий развитию наружной коррозии.

Для подтверждения адекватности идеи были проведены расчеты НДС трубопровода диаметром 1220 мм при действительной эксплуатационной коррозии по НТД (РД, СНиП и т.д.). По расчетной классификации трубопровод представляет собой бесконечную трубчатую балку, имеющую зоны упругого защемления по краям.

Авторами статьи предложена и реализована расчетная схема: модель трубопровода с коррозионным дефектом, учитывающая воздействие гидростатической нагрузки от транспортируемого продукта, а также равномерно распределенную нагрузку от веса обвалования на оболочечную конструкцию трубопровода. И модель отремонтированного трубопровода с помощью волокнистых композитных материалов, а именно намоткой стекловолокна E-glass на дефектный участок. Расчетная схема участка трубопровода представлена на рис. 1.

С использованием программного комплекса ANSYS была создана конечно-элементная модель участка трубопровода согласно предложенной расчетной схеме.

Геометрическая модель участка трубопровода была построена в модуле DesignModeller, где были учтены все действительные размеры трубы, дефекта, а также использованной защитной изоляции.

После построения геометрической модели участка трубопровода выполнялось разбиение модели на конечно-элементную сетку. Размеры элементов (стороны элементарного примитива – квадрата или треугольника) варьировались в пределах от 10 до 100 мм. Были использованы различные типы конечных элементов: SOLID186 (изоляция), SOLID187 (металлическая оболочка трубопровода), CONTA174, TARGE170 (для решения контактной задачи), SURF154, COMBIN14 (приложение нагрузок).

Граничные условия исходят из постановки, заключающейся в том, что трубопровод расположен под защитным обвалованием с действующей распределенной нагрузкой 13927 Па. Трубопровод имеет песчано-глинистое основание с прочностными свойствами, заданными коэффициентом постели  $k = 2 \text{ МН/м}^3$ .

Модель трубопровода учитывает свойства стали 09Г2С с пределом текучести  $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ .

Для стекловолокна E-Glass были приняты следующие характеристики, которые учтены в модели. Характеристики приведены в табл. 1.

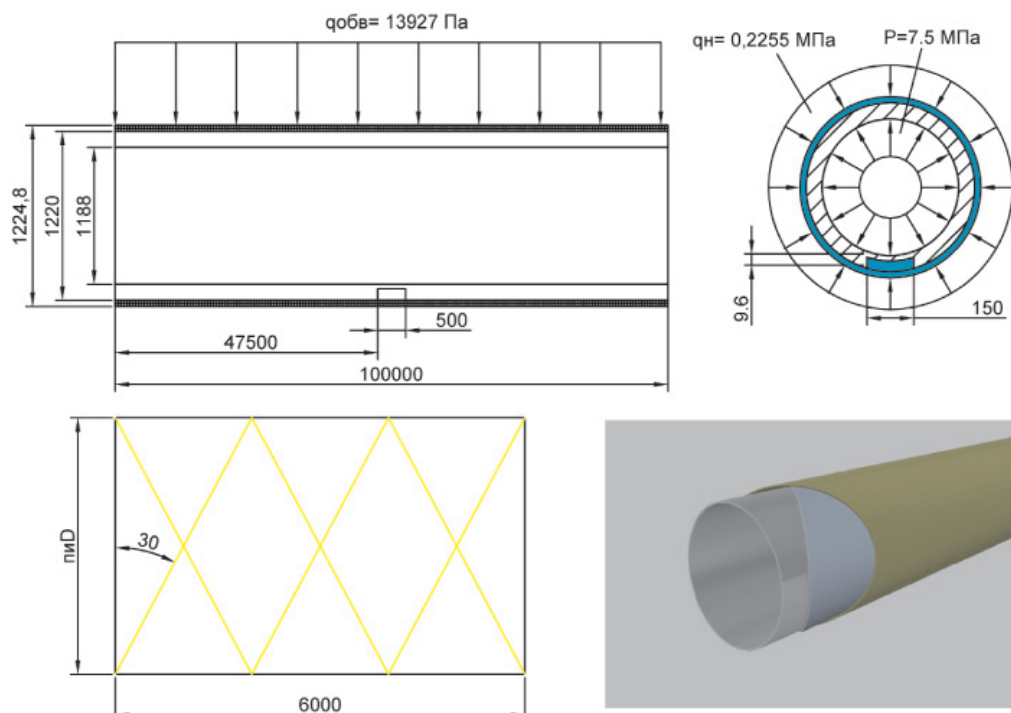


Рис. 1. Расчетная схема участка трубопровода

Таблица 1

Свойства стекловолокна E-Glass

Характеристика	Значение	Ед. измерения
Модуль Юнга (в направлении длины нити)	45000	МПа
Модуль Юнга (в направлениях плоскости сечения нити)	10000	МПа
Коэффициент Пуассона (в направлении длины нити)	0,4	–
Коэффициент Пуассона (в направлениях плоскости сечения нити)	0,3	–
Предел текучести при растяжении (в направлении длины нити)	1100	МПа
Предел текучести при растяжении (в направлениях плоскости сечения нити)	35	МПа
Модуль сдвига (в направлении длины нити)	3846,2	МПа
Модуль сдвига (в направлениях плоскости сечения нити)	5000	МПа
Плотность	2000	кг/м <sup>3</sup>

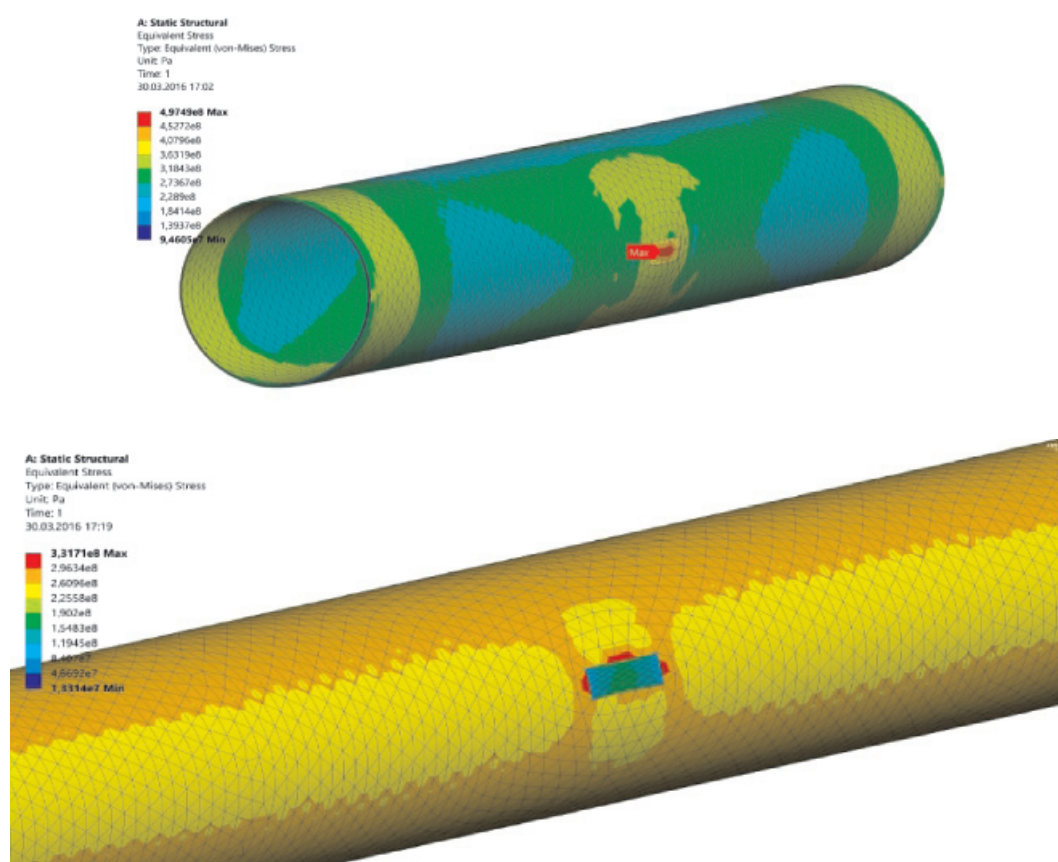


Рис. 2. Распределение напряжений в стенке трубопровода

На рис. 2 представлены эпюры с распределением напряжений в стенке трубопровода.

Результаты численного эксперимента с использованием программного комплекса ANSYS показаны в табл. 2.

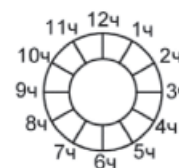
Технология ремонта коррозионного дефекта трубопровода с применением композитных волокнистых материалов показала уменьшение максимальных напряжений в 1,5 раза в зоне дефекта

и уменьшение максимальных деформаций на 78%. Наблюдается увеличение зоны с равномерно распределенным напряжением в стенке трубопровода. На внешней поверхности трубы прослеживаются остаточные напряжения вокруг области дефекта. В результате численного эксперимента подтвердилась эффективность применения предложенной технологии ремонта.

Таблица 2

## Результаты численного эксперимента

	Ось x	Положение	Без усиления	С покрытием
$\sigma_{\max}$ , МПа	0	6	491	331
$\sigma_1$ , МПа	0,15	6	393	275
$\sigma_2$ , МПа	0,3	6	322	267
$\sigma_3$ , МПа	-0,15	6	482	285
$\sigma_4$ , МПа	-0,3	6	406	291
$\sigma_5$ , МПа	0	4,3	339	265
$\sigma_6$ , МПа	0	7,3	340	253
$\delta_{\max}$ , мм	0	6	0,0748	0,017
$\delta_1$ , мм	0,15	6	0,061	0,0167
$\delta_2$ , мм	0,3	6	0,051	0,0165
$\delta_3$ , мм	-0,15	6	0,072	0,0166
$\delta_4$ , мм	-0,3	6	0,0632	0,0165
$\delta_5$ , мм	0	4,3	0,0539	0,0138
$\delta_6$ , мм	0	7,3	0,5316	0,0178



## Выводы

1. Авторами разработана конечно-элементная модель трубопровода, учитывающая реальное взаимодействие трубопровода с грунтовым основанием и позволяющая рассчитывать НДС конструкции при изменяемой нагрузке от намотанного стекловолокна. Свойства грунта задаются с помощью коэффициента постели по упрощенной модели – гипотезе Винклера. Для реализации конечно-элементной модели использован программный пакет ANSYS.

2. Авторами статьи предложена и реализована расчетная схема: модель трубопровода с коррозионным дефектом, учитывающая воздействие гидростатической нагрузки от транспортируемого продукта, а также равномерно распределенную нагрузку от веса обвалования на оболочечную конструкцию трубопровода. И модель отремонтированного трубопровода с помощью волокнисто-композитного материала путем намотки стекловолокна E-glass на дефектный участок.

3. Для внедрения рассмотренной технологии ремонта трубопроводов на реальном производстве требуется проведение реального эксперимента для дополнительного подтверждения полученных результатов. Необходимо разработать и провести апробацию технологического процесса нанесения стекловолокна на стенку трубопровода.

4. Есть перспектива рассчитать предложенную модель дефектного участка трубопровода с намоткой на нее другого подвита стекловолокна S-glass. Стекловолокно E-glass уступает по своим физическим и хи-

мическим характеристикам стекловолокну S-glass, но выигрывает в стоимости, что является немаловажным фактором при выборе метода ремонта трубопровода.

## Список литературы

1. Алиев Р.А., Белоусов В.Д., Немудров А.Г. Трубопроводный транспорт нефти и газа. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра 1988. – 368 с.
2. Давыдов А.Н., Завьялов А.Е., Берг В.И. Использование волокнистых композитов для ремонта трубопроводов // Проблемы функционирования систем транспорта. – Тюмень, 2010. – С. 83–85.
3. Давыдов А.Н., Серебrenников Д.А., Перспективы использования стеклопластиковых труб для трубопроводного транспорта нефти // Проблемы эксплуатации систем транспорта. – Тюмень, 2009. – С. 79–82.
4. Еловиков В.В., Берг В.И. Анализ отказов линейной части магистрального газопровода // Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта. – Тюмень, 2004. – С. 76–79.
5. РД 153-112-014-97. Инструкция по ликвидации аварий и повреждений на магистральных нефтепроводах. Министерство нефтяной и газовой промышленности.
6. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\* – М.: Федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой), 2012.
7. Тарасенко А.А., Редутинский М.Н., Чепур П.В. Обоснование возможности подземной прокладки нефтепроводов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12-1. – С. 47–52.
8. ТУ 1381-147-00186654-2009. Технические условия. Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 1020–1220 мм для нефтепроводов – ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», 2009.
9. Чепур П.В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадков его основания: дис. ... канд. техн. наук. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – 181 с.
10. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Создание и верификация численной модели резервуара РВСПК-50000 // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-1. – С. 95–100.