

ОБЪЕМНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА С ВНУТРЕННИМИ КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ И РЕМОНТНОЙ СТЕКЛОПОЛИМЕРНОЙ МАНЖЕТОЙ

д.ф.-м.н. ¹Щербаков С.С., ¹Насань О.А., ¹Подгайская Д.А.

¹ Белорусский государственный университет, Минск

Введение. Анализ напряженно-деформированного состояния моделей неповрежденных участков трубопровода обычно основывается на гипотезе о его большой длине. Это позволяет перейти к двумерной постановке граничной задачи, в которой поперечное сечение моделируют кольцом. Данная постановка обычно заключается в рассмотрении влияния внутреннего давления и/или перепада температуры между стенками трубы. Решение поставленных таким образом задач дает приемлемые результаты при сравнительно несложной процедуре расчета как аналитического, так и численного. Для учета влияния коррозионного повреждения на напряженно-деформированное состояние и состояния объемной повреждаемости необходим переход к трехмерной постановке, что также связано с определением геометрических характеристик повреждения.

Постановка задачи. В работе анализируется влияние различных внутренних коррозионных дефектов на напряженно-деформированное состояние характерной секции трубы, расположенного на участке ННС Пинск нефтепровода Мозырь – Брест 3. Рассматривается труба с наиболее распространенным внешним диаметром 720 мм и толщиной стенки 8,8 мм [1]. Учитывается действие на нее внутреннего давления на воздухе и при заглублении в грунт на 0,8 м с учетом гравитационного поля и различных типов коррозионных дефектов, а также с учетом ремонта стеклополимерной манжетой «Акварэп» (см. табл. 1, 2) [2]. В качестве существенно различных внутренних дефектов выбрано одно протяженное и множество мелких, равных ему по объему, повреждений.

На рисунке 1 представлены схема нагружения, общий вид систем после ремонта на воздухе и развертка множественных внутренних повреждений. Для анализа напряженно-деформированного состояния секции трубы в силу симметрии модели использовалась лишь ее четверть.

Протяженное повреждение моделировалось как эллипсоид вращения, расположенный в центре нижней части секции трубопровода [3] с полуосями 117 мм, 1146 мм, 1,5 мм, характеризующими ширину, длину и глубину дефекта, соответственно.

Множество мелких повреждений моделировалось на основе предположения об их эллипсоидальной форме. По данным о расположении и геометрических характеристиках дефектов в секциях трубопровода были определены параметры распределений Вэйбулла, описывающих длины, ширины и глубины повреждений. Угловое положение на внутренней окружности трубы описывалось распределением Гаусса. Распределение повреждений в продольном направлении секции трубы задавалось равномерным.

Таблица 1 – Кодификация расчетов

Условия нагружения	Стальная труба на воздухе/в грунте	С композитной манжетой с ее утяжкой (при высыхании) на воздухе/в грунте
Стальная труба с протяженным внутренним повреждением	DT/DTG	DTSP/DTSPG
Стальная труба с множественными внутренними повреждениями	MDT/MDTG	MDTSP/MDTSPG

Подробные геометрические характеристики трубы и описание построения повреждений приведены в [1, с. 353, 4].

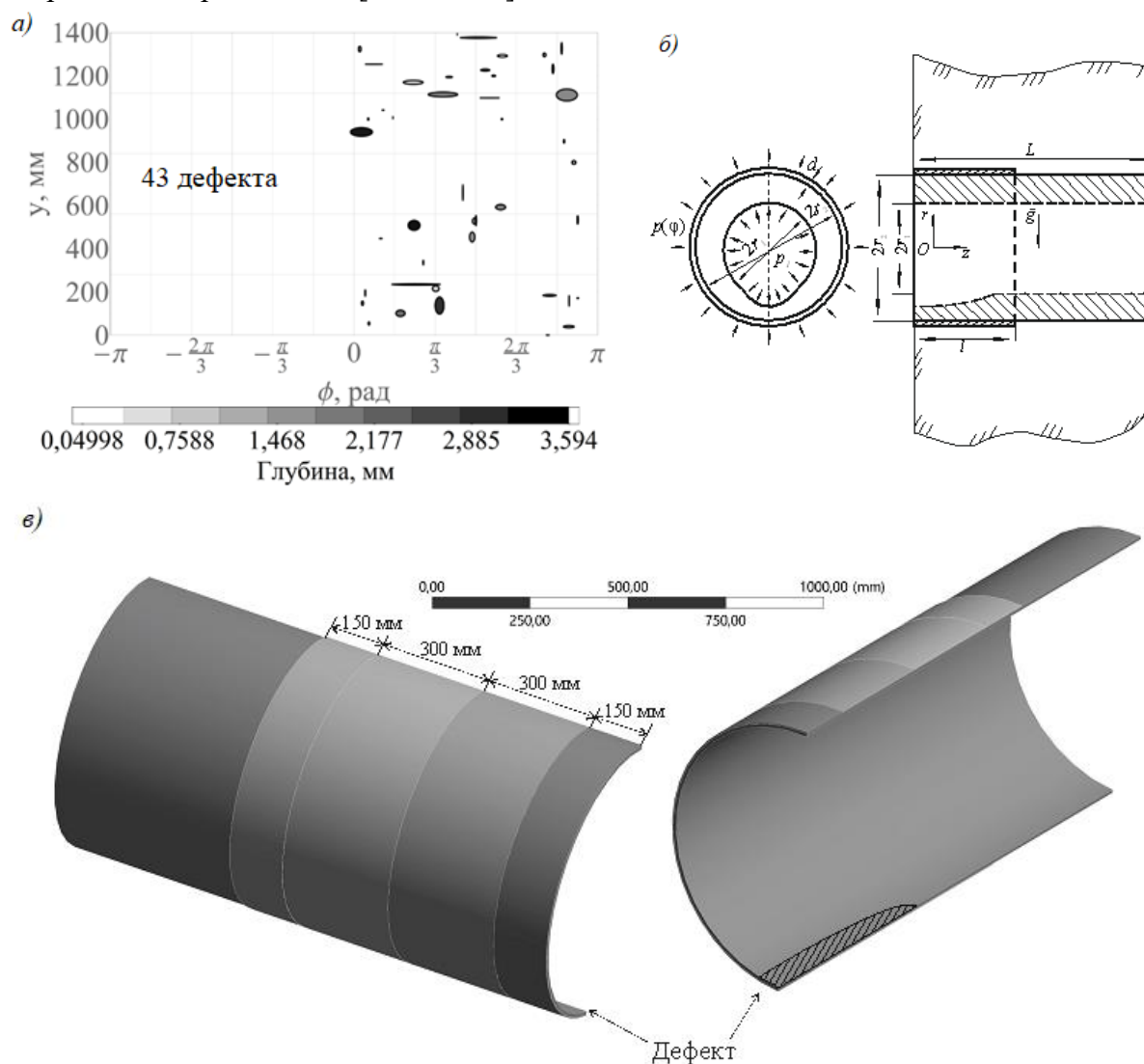


Рис. 1. Модели секции трубы: а) развертка со множественными внутренними повреждениями; б) расчетная схема; в) с повреждением и стеклополимерной манжетой

Граничные условия схемы нагружения рис. 1, в задаются следующими соотношениями

- для жесткой сцепки контактных поверхностей между композитной манжетой и секцией трубопровода:

$$\mathbf{u}^{(1)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]} = \mathbf{u}^{(2)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]}, \quad (1)$$

- для верхней, нижней и боковых поверхностей грунта:

$$\sigma_n \Big|_{y=3r} = 0, \sigma_{n\tau} \Big|_{y=3r} = 0, \mathbf{u}^{(3)} \Big|_{y=-3r_1} = 0, u_x^{(3)}, u_z^{(3)} \Big|_{x=-3r_1, -3r_1 \leq y \leq 3r_1} = 0, \quad (2)$$

- для внутренней поверхности секции трубопровода:

$$\sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_1} = p_1, \quad (3)$$

- для контактных поверхностей между композитной манжетой длины l и грунтом, секцией трубопровода и грунтом:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]} &= -\sigma_r^{(2)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]}, \sigma_{r\tau}^{(1)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]} = -\sigma_{r\tau}^{(2)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]} \leq f_{12} \sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_2, z \in [0;l]}, \\ \sigma_r^{(2)} \Big|_{r=r_2+d, z \in [0;l]} &= -\sigma_r^{(3)} \Big|_{r=r_2+d, z \in [0;l]}, \sigma_{r\tau}^{(2)} \Big|_{r=r_2+d, z \in [0;l]} = -\sigma_{r\tau}^{(3)} \Big|_{r=r_2+d, z \in [0;l]} \leq f_{12} \sigma_r^{(2)} \Big|_{r=r_2+d, z \in [0;l]}, \\ \sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_2, z > l} &= -\sigma_r^{(3)} \Big|_{r=r_2, z > l}, \sigma_{r\tau}^{(1)} \Big|_{r=r_2, z > l} = -\sigma_{r\tau}^{(3)} \Big|_{r=r_2, z > l} \leq f_{13} \sigma_r^{(1)} \Big|_{r=r_2, z > l}, \end{aligned} \quad (4)$$

где индекс 1 соответствует трубе, 2 – манжете, 3 – грунту, d – толщина манжеты, $\tau = \varphi, z, f$ – соответствующие коэффициенты трения, определяемые из таблицы 3.

Таблица 2 – Механические характеристики материалов системы

Название материала	Механические характеристики			
	E , ГПа	ν	σ_T , МПа	ρ , кг/м ³
17ГС (секция трубопровода)	210	0,3	360	7850
Грунт [4]	0,0051	0,25	–	2500
Стеклополимерная лента «Акварэп»[5]	25,786	0,4	–	1800

Таблица 3 – Коэффициенты трения скольжения

Пара трения	Коэффициент трения	Пара трения	Коэффициент трения
«Акварэп» – «Акварэп»	0,4	«Акварэп» – грунт	0,8
17ГС – грунт	0,8	«Акварэп» – 17ГС	жесткая сцепка

Напряженно-деформированное состояние. Напряжения максимальной интенсивности сосредоточены в области повреждений во всех моделях. В области ремонтных работ происходят значительные как количественные, так и качественные изменения в напряженно-деформированном состоянии. На рисунке 2 показано, что множественные повреждения по сравнению с одним протяженным приводят к увеличению интенсивности напряжений σ_{int} на 46 % и 37 % для расчетов со свободной поверхностью и в грунте соответственно. Максимальные значения эквивалентных напряжений σ_{int} в области ремонта увеличиваются на 17,7 % и 15,3 % при сравнении единичного крупного протяженного повреждения с множественными для расчетов DTSP и MDTSP, DTSPG и MDTSPG соответственно. На напряженно-деформированное состояние модели с множественными повреждениями грунт оказывает меньшее воздействие, чем на модель с внутренним протяженным дефектом.

Подробный анализ напряженно-деформированного состояния секции магистрального нефтепровода с учетом различных видов коррозионных дефектов и ремонтных работ представлен в [5].

Объёмная повреждаемость. Оценка повреждаемости проводилась на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [6]. В связи с тем, что в области дефектов напряженно-деформируемое состояние секций трубы является существенно трехмерным, их оценка проводилась с помощью четвертой, энергетической, теории прочности в напряжениях:

$$\sigma_{int} = \sigma_{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3}. \quad (5)$$

Опасный объем рассчитывался как сумма объемов конечных элементов, в которых действующие напряжения превышают предельные значения. В этом случае функции локальной повреждаемости единицы объема имели вид:

$$\psi_{IV} = \sigma_{IV} / \sigma_{IV}^{(lim)}. \quad (6)$$

Тогда формулы для расчета опасных объемов и интегральной повреждаемости будут следующими:

$$V_{IV} = \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} dV, \quad \Psi_{IV} = \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} \psi_{IV}(V) dV \quad (7)$$

где $\sigma_{IV}^{(lim)}$ – предельное напряжение, V_{IV} – рабочий объем деформированного тела.

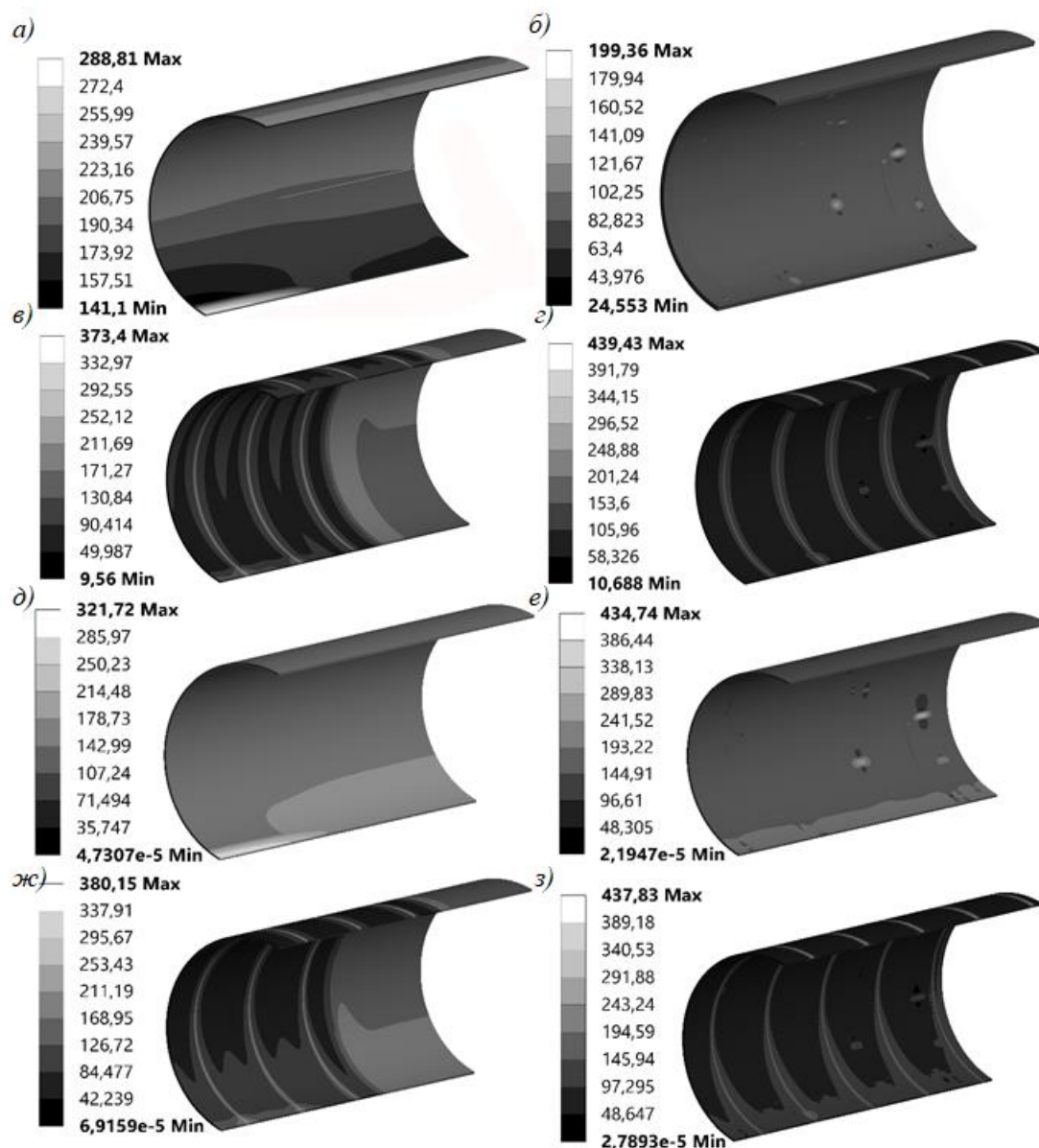


Рис.2. Распределения интенсивности напряжений σ_{int} в сечении трубы: а) DT; б) MDT; в) DTSP; г) MDTP; д) DTG; е) MDTG; ж) DTSPG; з) MDTSPG

По результатам испытаний предел выносливости σ_{-1} образцов с надрезом из стали 09Г2С равен 120 МПа, для гладких лабораторных образцов предел выносливости составляет около 235 МПа. В случае предельного напряжения $\sigma = 235$ МПа были получены распределения опасных объемов и интегральной повреждаемости для всех исследованных моделей. Из рисунка 3 видно, что несмотря на то, что по абсолютному значению максимальные величины компонент тензора напряжений сечения трубы с множественными дефектами MDT значительно превышают величины соответствующих распределений модели трубы с протяженным дефектом DT, опасные объемы модели DT больше, чем те же показатели модели MDT, составляя 62283,4 мм³ против 24235,4 мм³. Учет влияния веса грунта на стенку трубы приводит к увеличению значения опасных объемов на 8,3 % для единичного протяженного повреждения и к уменьшению на 68,28% для множественных. Использование композитной манжеты в качестве ремонтной конструкции приводит к уменьшению величин опасных объемов на 85,04 % и 85,27 % для расчетов сечения трубы с протяженным повреждением на воздухе и в грунте соответственно, а также к увеличению на 34,8 % и на 654,8 % для расчетов

секции трубы с множественными повреждениями на воздухе и в грунте соответственно.

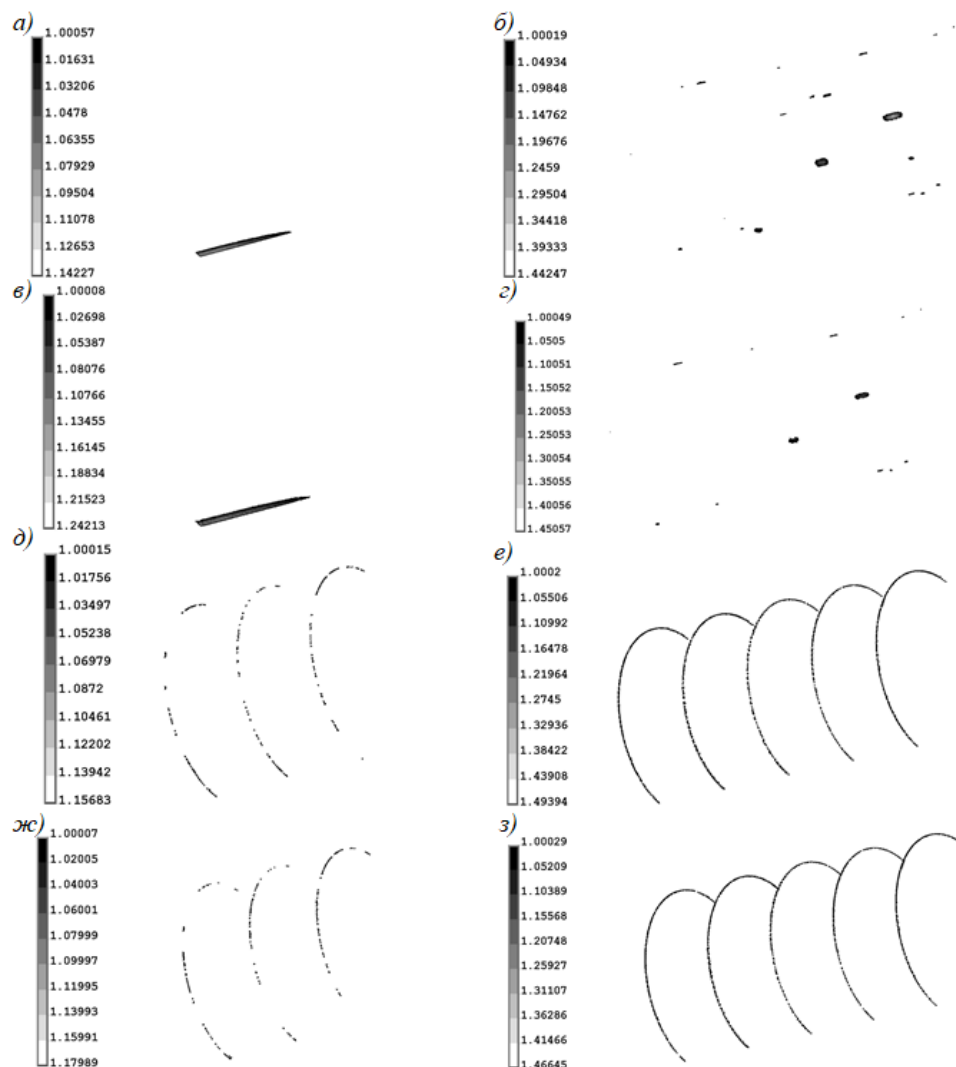


Рис.3. Характерные виды опасных объемов, рассчитанных по четвертой теории прочности при $\sigma_{lim} = 235$ МПа: а) DT; б) MDT; в) DTG; г) MDTG; д) DTSP; е) MDTSP; ж) DTSPG; з) MDTSPG

При применении стеклополимерной композитной манжеты одинаковой длины для всех расчетов на внешней поверхности трубы возникают значительные концентраторы осевых напряжений и опасных объемов на границах полос манжеты. Данный эффект наблюдается вследствие усадки манжеты при ее высыхании в статической упругой постановке задачи для жесткой сцепки внешней поверхности трубы и манжеты и вносит значительный вклад в модели с множественными дефектами. Значения опасных объемов увеличиваются на 250,8 % и 237 % при сравнении моделей DTSP и MDTSP, DTSPG и MDTSPG соответственно.

Заключение. Проведено моделирование опасных объемов для секции трубы с единичным протяженным и множественными мелкими повреждениями на воздухе и в грунте с учетом влияния ремонта композитной манжетой. Показано, что опасные объемы появляются в окрестности коррозионных повреждений. Кроме того, применение стеклополимерной композитной манжеты на внешней поверхности трубы привело к возникновению концентраторов осевых напряжений, что вызвало появление соответствующих опасных объемов на границах полос манжеты. Данный эффект

наблюдался вследствие усадки манжеты при жесткой сцепке внешней поверхности трубы и манжеты.

Таким образом, учитывая работу трубопровода в условиях многоциклового усталости, целесообразно предположить, что протяженный дефект является более опасным, чем конгломерат мелких до проведения ремонтных работ. Ремонт трубы с множественными дефектами рекомендуется проводить при помощи стеклополимерной манжеты только при приближении эквивалентных напряжений в области дефекта к пределу текучести материала трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков, С.С. *Напряженно-деформированное состояние линейного участка нефтепровода с учетом коррозионных дефектов и ремонтных работ* / С.С. Щербаков, А.Н. Козик, О.А. Насань // *Тр. 32-й Международной научно-технической конференции «Теоретическая и прикладная механика», 2017 г., Минск (Беларусь)* / Редкол.: А.В. Чигарев [и др.] – БНТУ, 2017. –381с. – С. 352 – 358.
2. *Перечень методов ремонта по РД-23.040.00-КТН-140-11 ОАО «АК «Транснефть».*
3. Тюрин, И.Г. *Технический отчет по диагностическому обследованию нефтепровода внутритрубными инспекционными приборами «Многоканальный профилемер ПРН», «Дефектоскоп внутритрубный магнитный МСК», «Комбинированный ультразвуковой дефектоскоп ДКУ»* / И.Г. Тюрин, В.П. Авдеев, М.В. Масленников // 2013. 326 с.
4. Щербаков, С.С. *Сравнительный анализ напряженно-деформированных состояний участков трубопровода с коррозионными дефектами при комплексном нагружении* / / С.С. Щербаков, А.Н. Козик, О.А. Насань // *Актуальные вопросы машиноведения, 2017. №6. С. 78 – 84.*
5. Щербаков, С.С. *Напряженно-деформированное состояние секции нефтепровода с учетом различных видов коррозионных дефектов и ремонтных работ*/ С.С. Щербаков, А.Н. Козик, О.А. Насань, Д.А. Подгайская // *Тр. 33-й Международной научно-технической конференции «Теоретическая и прикладная механика», 2018 г., Минск (Беларусь)* / Редкол.: А.В. Чигарев [и др.] – БНТУ, 2017. –450с. – С. 173 – 179.
6. *Композитные материалы «Акварэп» для ремонта трубопроводов. Технический паспорт и инструкция по применению. Лондон, 2007. 21 с.*