

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СЕКЦИИ НЕФТЕПРОВОДА С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И РЕМОНТНЫХ РАБОТ

д.ф.-м.н. <sup>1</sup>Щербаков С.С., к.т.н. <sup>2</sup>Козик А.Н., <sup>1</sup>Насань О.А., <sup>1</sup>Подгайская Д.А.

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск

<sup>2</sup>ОАО «Гомельтранснефть Дружба», Гомель

**Введение.** При анализе напряженно-деформированного состояния моделей неповрежденных участков трубопровода достаточно гипотезы о большой длине трубопровода для перехода к двумерной постановке, в которой поперечное сечение моделируют кольцом. Постановка граничной задачи обычно заключается в рассмотрении внутреннего давления или температуры. Решение поставленных таким образом задач дает приемлемые результаты при сравнительно несложной процедуре расчета как аналитического, так и численного. Для учета влияния коррозионного дефекта на напряженно-деформированное состояние чаще всего необходим переход к трехмерной постановке, что также связано с определением геометрических характеристик дефекта. В данной работе рассматриваются внутренние дефекты наиболее распространенной трубы с внешним диаметром 720 мм и толщиной стенки 8,8 мм [1].

**Постановка задачи.** В данной работе рассмотрено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния характерной секции трубы, расположенной на участке ННС Пинск нефтепровода Мозырь – Брест 3, при действии на нее внутреннего давления и заглублении в грунт на 0,8 м с учетом гравитационного поля и различных типов коррозионных дефектов, а также с учетом проводимых ремонтных работ по различным технологиям (см. табл. 1) [2]. В качестве ремонтных конструкций рассмотрены обжимная стальная муфта с набивными кольцами (см. рис. 1,в), а также стеклополимерная манжета «Акварэп» (см. рис. 1,г).

Для анализа были выбраны существенно отличающиеся внутренние дефекты: отдельный крупный протяженный дефект и множество мелких, суммарно равных ему по объему. Механические характеристики трубы и ремонтных конструкций приведены в табл. 2.

Протяженный дефект моделировался 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 дефектов. Угловое положение на внутренней окружности трубы описывалось распределением Гаусса. Распределение дефектов в продольном направлении секции трубы задавалось равномерным. Подробное описание параметров соответствующих распределений проведено в работах [1, 6]. На рис. 1,а представлены сгенерированные по данным распределениям дефекты на развертке секции трубы, имеющие тот же объем, что и протяженное повреждение.

Для анализа напряженно-деформированного состояния в силу симметрии модели рассмотрены четверти секций труб в линейной статической постановке.

Технологии ремонта обжимной муфтой и стеклополимерной манжетой, а также метод моделирования изотропной усадки манжеты изложены в [6].

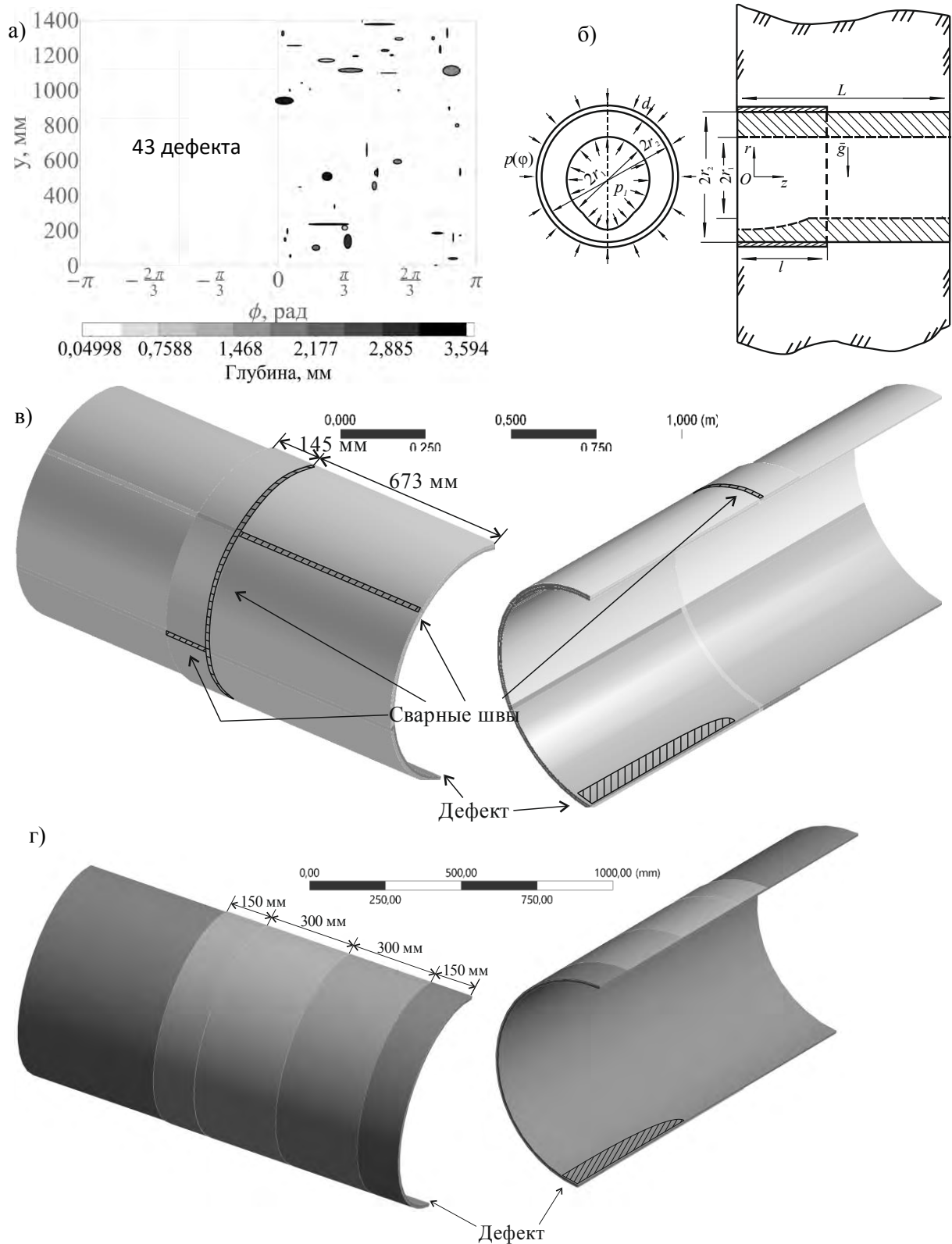


Рис. 4. Модели секции трубы: а) развертка со множественными внутренними дефектами; б) расчетная схема; в) с дефектом и приварной муфтой; г) с дефектом и стеклополимерной манжетой

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

- для внутренней поверхности секции трубопровода:

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

- для контактных поверхностей между муфтой длины  $l$  и секцией трубопровода, между муфтой (композитной манжетой) длины  $l$  и грунтом, секцией трубопровода и грунтом:

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

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

$$\mathbf{u}^{(1)} \Big|_{r=r_2, z \in [0; l]} = \mathbf{u}^{(2)} \Big|_{r=r_2, z \in [0; l]}, \quad (3)$$

- для верхней, нижней и боковых поверхностей грунта:

$$\sigma_n \Big|_{y=3r} = 0, \sigma_{n\tau}^{(3)} \Big|_{y=3r} = 0, \mathbf{u}^{(3)} \Big|_{y=-3r_1} = 0, u_x^{(3)}, u_z^{(3)} \Big|_{x=-3r_1, -3r_1 \leq y \leq 3r_1} = 0, \quad (4)$$

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

Таблица 1 – Кодификация расчетов

| Условия нагружения                                    | Стальная труба на воздухе | Со стальной обжимной муфтой и набивным кольцом | С композитной манжетой с ее утяжкой (при высыхании) |
|---|---------------------------|--|---|
| Стальная труба с протяженным внутренним дефектом      | DTG                       | DTIG   | DTSPG   |
| Стальная труба с множественными внутренними дефектами | MDTG                      | MDTIG  | MDTSPG  |

Таблица 2 – Механические характеристики материалов системы

| Название материала                  | Механические характеристики |       |                  |                            |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------|----------------------------|
|                                     | $E$ , ГПа                   | $\nu$ | $\sigma_t$ , МПа | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
| 09Г2С (обжимная муфта)              | 210                         | 0,3   | 395              | 7850                       |
| 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 |
|---------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 09Г2С – 17ГС  | 0,18               | «Акварэп» – «Акварэп» | 0,4                |
| 09Г2С – грунт | 0,8                | «Акварэп» – грунт     | 0,8                |
| 17ГС – грунт  | 0,8                | «Акварэп» – 17ГС      | жесткая сцепка     |

**Напряженное состояние. Максимальные напряжения** сосредоточены в области дефектов во всех моделях. На рисунке 2 показано, что в модели с грунтом и множественными повреждениями максимальная интенсивность напряжений  $\sigma_{int}$  примерно на 35 % больше чем в модели с одним крупным повреждением. Максимальные значения эквивалентных напряжений  $\sigma_{int}$  в области ремонта увеличиваются на 15,7 % и 15,3 %

при сравнении единичного крупного протяженного повреждения со множественными для расчетов DTIG и MDTIG, DTSPG и MDTSPG соответственно.

Согласно данным рис. 3, максимальные окружные напряжения  $\sigma_\phi$  на внутренней поверхности трубы в наиболее поврежденной области и на внутренней бездефектной поверхности трубы увеличиваются на 23 %, 37 % при переходе от расчета DTIG к DTSPG соответственно.

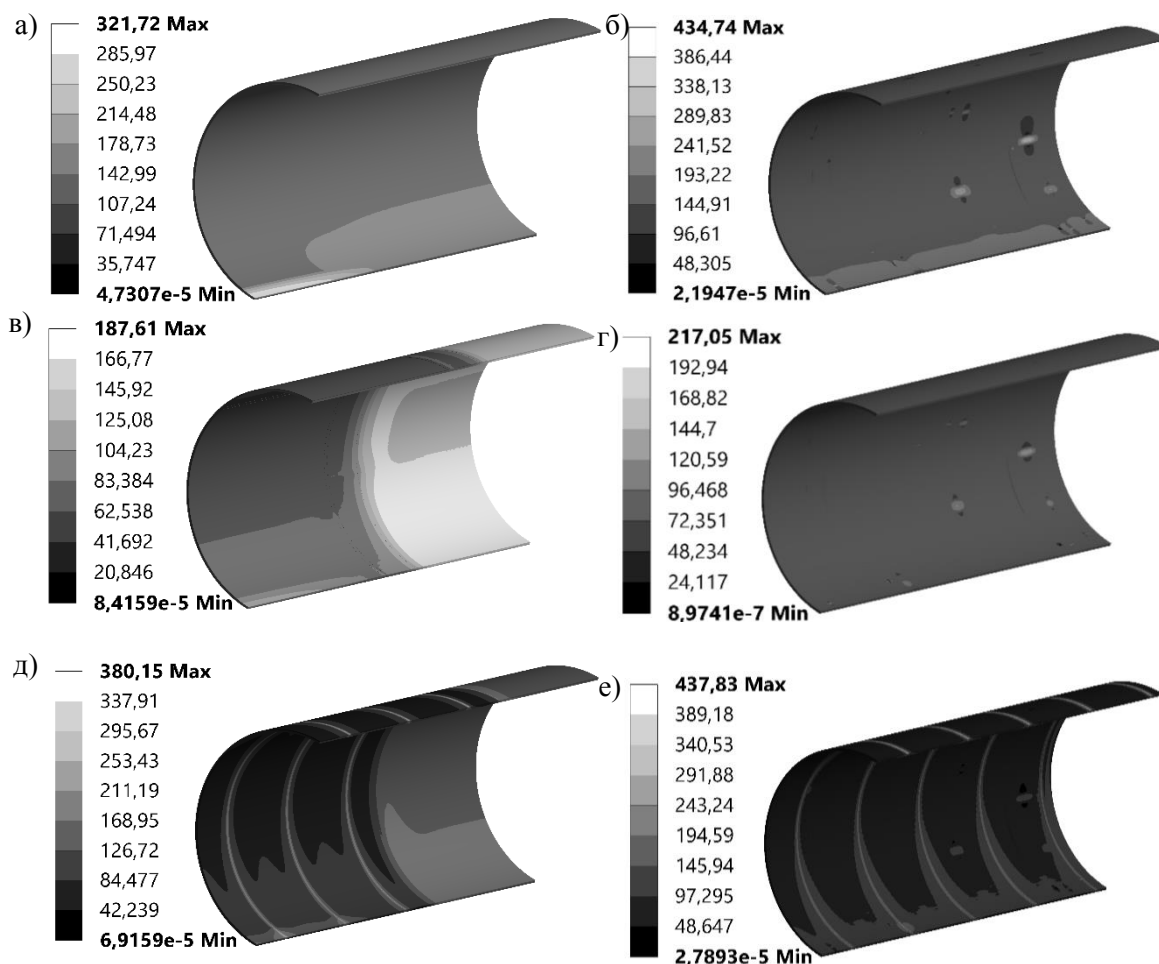


Рис. 2. Распределения интенсивности напряжений  $\sigma_{int}$  в сечении трубы: а) DTG; б) MDTG; в) DTIG; г) MDTIG; д) DTSPG; е) MDTSPG

В поврежденной трубе стальная муфта и композитная манжета в грунте уменьшают максимальные  $\sigma_\phi$  в области протяженного дефекта на 58,6 % и на 35,7 % соответственно. В свою очередь у трубы с множественными повреждениями стальная муфта и композитная манжета на внутренней поверхности уменьшают максимальные  $\sigma_\phi$  на 54 % и на 40,7 % соответственно. В целом, у трубы с множественными повреждениями стальная муфта и композитная манжета уменьшают максимальные  $\sigma_\phi$  на 40,6 % и на 40,7 % соответственно.

В модели со множественными повреждениями появляются сжимающие окружные напряжения. Данный эффект уточняет обнаруженное ранее влияние коррозионных повреждений цилиндрического вида на формирование сжимающих окружных напряжений на внешней стенке сечения трубы [7].

Из рисунка 4 видно, что максимальные растягивающие продольные напряжения  $\sigma_z$  увеличиваются в 5,7 и в 5,8 раза при замене стальной муфты стеклополимерной манжетой в расчетах DTIG и MDTIG соответственно. Максимальные сжимающие продольные напряжения  $\sigma_z$  увеличиваются в 6,8 и в 5,7 раза при замене стальной муфты

стеклополимерной манжетой в расчетах DTIG и MDTIG соответственно. Данные значительные увеличения напряжений имеют место только в окрестности стыков рулонов манжеты.

Влияние грунта увеличивает окружные напряжения  $\sigma_\phi$  на внутренней поверхности трубы в наиболее поврежденной области на 18 % и 10 %, продольные напряжения  $\sigma_z$  на 70 % и 50 % при сравнении с результатами на воздухе для моделей DTSP и DTI соответственно. В случае ремонта секции с протяженным дефектом стальной муфтой, грунт продлевает ремонтное действие на расстояние около 15 см в осевом направлении трубы по сравнению с той же моделью на воздухе [6].

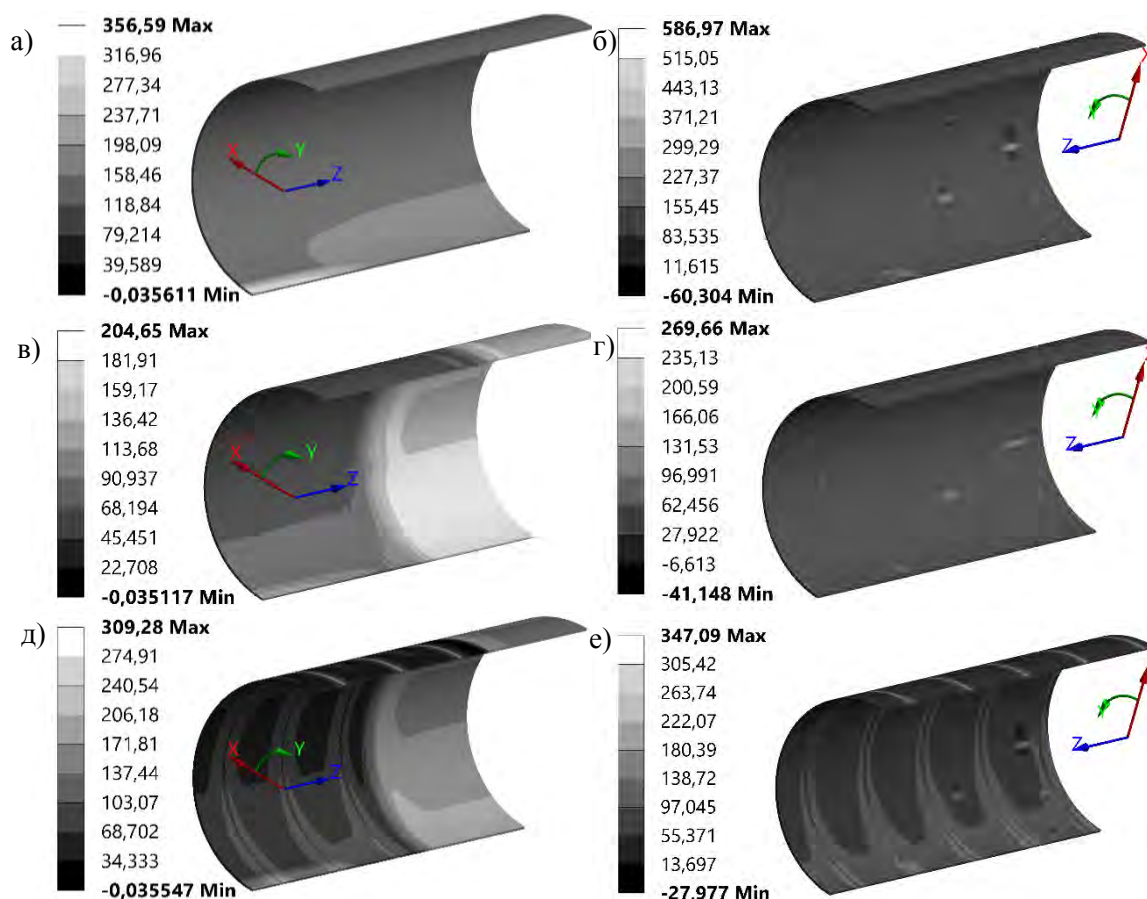


Рис. 3. Распределения окружных напряжений  $\sigma_\phi$  в секции трубы: а) DTG; б) MDTG; в) DTIG; г) MDTIG; д) DTSPG; е) MDTSPG

В поврежденной трубе стальная муфта и композитная манжета уменьшают максимальные  $\sigma_z$  в области протяженного дефекта на 57 % и на 40 % соответственно. В свою очередь у трубы с множественными повреждениями  $\sigma_z$  на внутренней поверхности уменьшается на 40,6 % и увеличивается на 31,9 % при ремонте стальной муфтой и композитной манжетой соответственно.

В продольном направлении значительный эффект оказывают технологии ремонта: в местах сварки со стальной муфтой и стыках композитной манжеты на поверхности трубы образуются концентраторы напряжений, причем окружные напряжения растягивающие, а продольные сжимающие. Данные всплески являются следствием отсутствия учета пластических течений. В целом, при замене стальной муфты на манжету  $\sigma_\phi$  в области повреждения в среднем увеличивается примерно на 50 МПа.

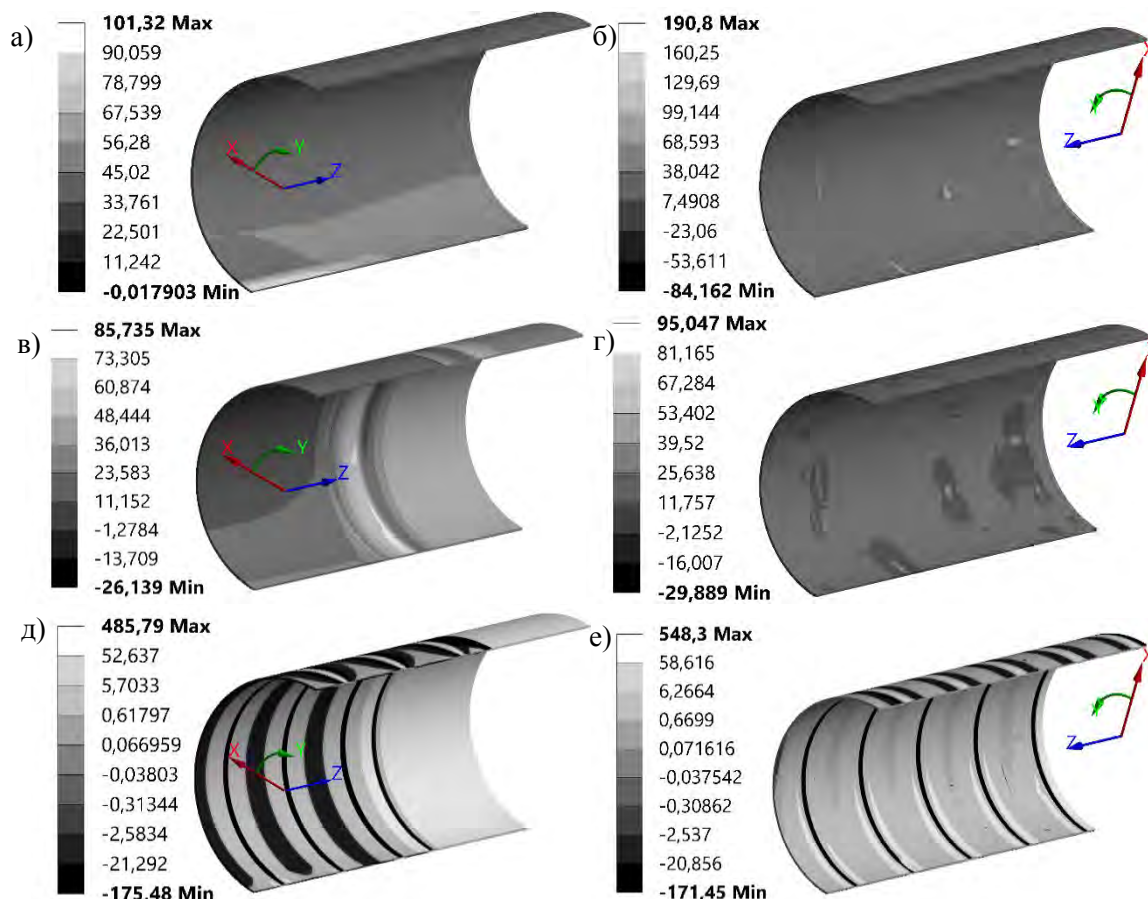


Рис. 4. Распределения продольных напряжений  $\sigma_z$  в сечении трубы: а) DTG; б) MDTG; в) DTIG; г) MDTIG; д) DTSPG; е) MDTSPG

**Закключение.** Разработаны компьютерные модели для расчета напряженно-деформированного состояния секций труб магистрального нефтепровода «Дружба» диаметром 720 мм после длительной эксплуатации. С помощью данных моделей были проанализированы секции трубы с внутренними единичным крупным протяженным коррозионным дефектом и с множественными небольшими дефектами в грунте с учетом гравитационного поля. Проведена сравнительная оценка эффективности способов ремонта секции трубы обжимной муфтой с технологическими кольцами и стеклополимерной лентой «Акварэп».

В модели со множественными коррозионными дефектами без ремонтных конструкций максимальная интенсивность напряжений  $\sigma_{int}$  больше чем в модели с одним крупным дефектом примерно на 35,1 %. Этот эффект обусловлен большой глубиной одного из множественных мелких дефектов.

Для трубы с крупным протяженным внутренним дефектом в грунте стальная муфта уменьшает  $\sigma_\phi$  и  $\sigma_z$  в области дефекта примерно на 58,6 % и 57 % соответственно. Стеклополимерная композитная манжета в этом случае уменьшает максимальные  $\sigma_\phi$  и  $\sigma_z$  на 35,7 % и 40 %.

По сравнению со стальной муфтой при применении полимерной манжеты в расчетах с крупным дефектом максимальные окружные напряжения  $\sigma_\phi$  в наиболее поврежденной области увеличиваются на 16 %.

В области ремонтных работ происходят значительные как количественные, так и качественные изменения в напряженно-деформированном состоянии. В целом, ремонт стальной муфтой уменьшает максимальные окружные  $\sigma_\phi$  напряжения в области дефекта не менее чем в 2 раза. Также стальная муфта в секции трубопровода обеспечивает



окажные напряжения в среднем на 50 МПа меньше чем композитная манжета с учетом ее усадки.

При применении стеклополимерной композитной манжеты на внешней поверхности трубы возникают значительные концентраторы осевых напряжений  $\sigma_z$  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. Жесткая сцепка моделирует адгезионное действие праймера, наносимого на поверхности контакта трубы и манжеты.

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать использование стеклополимерной манжеты из ленты вместо стальной муфты в силу ее умеренной стоимости, простоты использования и сравнимой эффективности ремонта, оцениваемой по степени снижения максимальных напряжений.

Также представляется целесообразным рассчитывать толщину стеклополимерной манжеты из ленты не по требуемому усилению в единицах внутреннего давления, как предлагается в инструкции по эксплуатации [5], а по требуемому снижению максимальных напряжений для реальных внутренних коррозионных дефектов, определенных методами внутритрубной диагностики. Например, в условиях проведенных расчетов толщину муфты следовало бы увеличить на 10-20 %, чтобы получить эффект уменьшения напряжений сравнимый с эффектом от применения стальной муфты.

#### 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», 2017г., Минск (Беларусь) / Редкол.: А.В. Чигарев [и др.] – БНТУ, 2017. – 381 с. – 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, А.Б. // 2013. 326 с.
4. Болдырев Г.Г., Муйземнек А.Ю., Малышев И.М. Моделирование деформационных процессов в грунтах с использованием программ ANSYS и LS-DYNA. Сб. трудов шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH 20-21 апреля 2006 г., с. 9 – 20. <http://www.cadfem.ru>.
5. Композитные материалы «Акварэн» для ремонта трубопроводов. Технический паспорт и инструкция по применению. Лондон, 2007. 21 с.
6. 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.
7. Щербаков, С.С. Напряженно-деформированное состояние и повреждаемость линейного участка нефтепровода с учетом коррозионных дефектов / С.С. Щербаков, О.А. Насань, А.Н. Козик // Актуальные вопросы машиноведения. Выпуск 5, 2016. – С. 223-227.