

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРУЖЕННОЙ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ТРУБЫ С РАЗЛИЧНЫМИ КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Сосновский Л.А.¹⁾, Журавков М.А.²⁾, Щербаков С.С.²⁾, Насань О.А.²⁾

Computer modeling of pipe with various types of corrosion defects (spherical, cylindrical and mixed) is considered. Comparison of undamaged pipe modeling results with the results of analytical calculation showed their good conformity. Change of a stress-strain state of the model loaded with internal pressure in the vicinity of defects of various types was studied.

It is shown that cylindrical damage of pipe internal surface causes occurrence of compressing circumferential stresses, that also was obtained as the result of tests by internal pressure of a pipe section.

Введение. Определение и анализ трехмерного напряженно-деформированного состояния трубопровода с коррозионным дефектом в аналитической постановке является весьма сложной задачей. Обычно она решается либо посредством значительного упрощения физической и геометрической модели, либо с применением методов компьютерного моделирования.

Задача расчета напряженно-деформированного состояния трубы кругового сечения сводится к задаче деформации кольца, нагруженного давлением, равномерно распределенным по его внутренней стенке. Для учета коррозионных повреждений, в качестве упрощения может быть рассмотрен случай довольно малого коррозионного дефекта или его однородности по длине трубы, с условием, что давление, задающее нагрузку нефтепровода, изменяется медленно вдоль центральной оси расчетной цилиндрической трубы. В таком случае можно утверждать, что полное перемещение любой точки трубы в процессе деформации, зависит лишь от удаленности точки от оси трубы.

Постановка задачи. Рассмотрим модели трубы с различными коррозионными повреждениями (рисунки 1).

Коррозионные повреждения трубы моделировались посредством выреза из толстостенного цилиндра моделирующего трубу следующих геометрических фигур:

1) части цилиндра с образующими, параллельными оси трубы (повреждение до 75 % толщины трубы), – задача с протяженным однородным коррозионным пятном;

2) части шара (повреждение до 75 % толщины трубы) – задача с эллиптическим повреждением;

3) части цилиндра с образующими, параллельными оси трубы (повреждение 37,5 % толщины трубы) и части шара (повреждение до 75 % толщины трубы).

Нагрузки задавались таким образом, чтобы внешняя поверхность трубы оставалась свободной. Так моделируются испытания внутренним давлением трубы, извлеченной из грунта (на воздухе).

$$\begin{aligned} \sigma_r|_{r=r_1} &= p, \\ \sigma_r|_{r=r_2} &= 0, \end{aligned}$$

где r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы трубы.

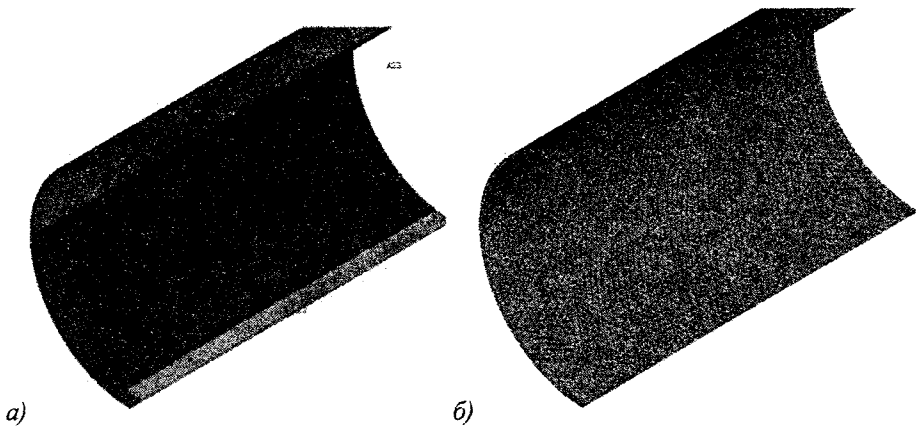


Рисунок 1 – Геометрическая модель (а) и конечно-элементное разбиение (б) трубы со смешанным коррозионным повреждением

Для конечно-элементного моделирования участка трубы были приняты следующие значения нагрузки и геометрических характеристик: $p_1 = 4$ МПа, $p_2 = 0$, $r_1 = 0,306$ м, $r_2 = 0,315$ м, длина 1 м.

Модуль Юнга для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

В силу симметрии расчет был проведен для половин начальных моделей, которые были симметрично отображены относительно плоскости симметрии при анализе результатов.

Разбиение модели на конечные элементы выполнено полуавтоматически с использованием подпрограммы MeshTool, а также твердотельных элементов SOLID95.

При проведении конечно-элементного расчета напряженно-деформируемое состояние моделей трубы считалось линейным.

Конечноэлементное моделирование. Сравним распределение напряжений, вычисленных аналитически для неповрежденной трубы [4] с результатами ANSYS.

Используя формулы

$$\sigma_r^{(p)} = -p \frac{r_1^2 r^2 (1 + \mu) - r_2^2 (\mu - 1)}{r^2 r_1^2 (1 + \mu) - r_2^2 (\mu - 1)},$$

$$\sigma_\phi^{(p)} = -p \frac{r_1^2 r^2 (1 + \mu) + r_2^2 (\mu - 1)}{r^2 r_1^2 (1 + \mu) - r_2^2 (\mu - 1)},$$

в которых $\mu = 7,69231 \cdot 10^{10}$ Па, что соответствует стали с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$, были построены распределения напряжений по толщине трубы (рисунок 2).

Как видно из графиков, результаты аналитического и конечноэлементных расчетов практически совпадают.

Рассмотрим теперь распределения напряжений по наименьшей толщине трубы в центре дефекта (рисунок 3). Отметим, что свести эллиптическое, а тем более смешанное повреждение к двумерной модели нельзя, т.к. оно неоднородно по длине трубы.

Как видно из рисунков 2 и 3 окружные напряжения на трубе без повреждений меньше окружных напряжений на трубе с протяженным цилиндрическим повреждением глубиной до 75 % стенки трубы более чем в 11 раз, а радиальные напряжения на поврежденной трубе имеют не только отрицательные, но и положительные значения.

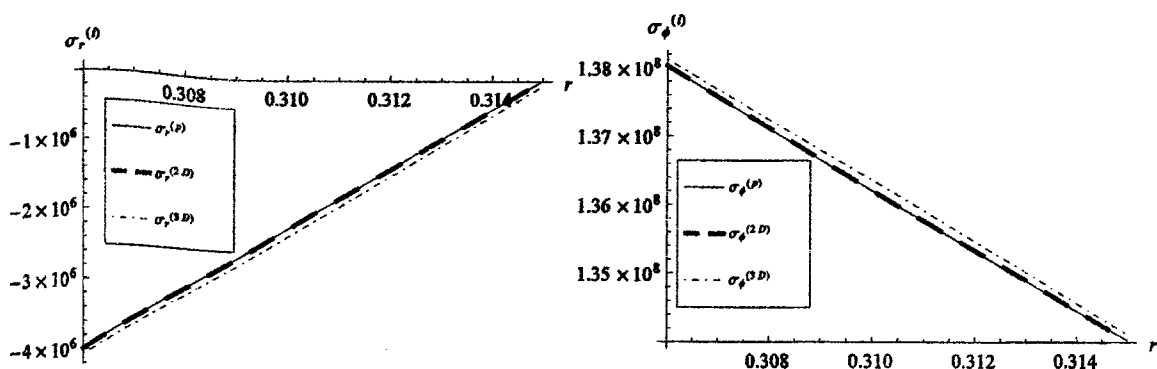


Рисунок 2 – Распределение радиальных σ_r и окружных σ_ϕ напряжений для аналитического расчета, для двумерной компьютерной модели, для трехмерной компьютерной модели

Особенно значимым является появление сжимающих окружных напряжений σ_ϕ (рисунок 3) на внешней поверхности трубы напротив цилиндрического дефекта.

Появление сжимающих напряжений в данной области имело место и при испытаниях внутренним давлением участка трубы с коррозионным повреждением. Характер разрушения трубы на последней стадии эксперимента и коррозионные повреждения показаны на рисунке 4.

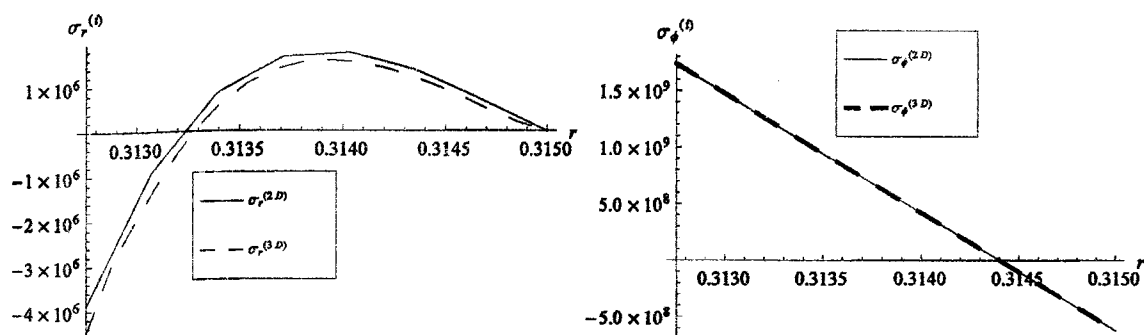


Рисунок 3 – Распределение радиальных и окружных напряжений для двумерной и трехмерной моделей

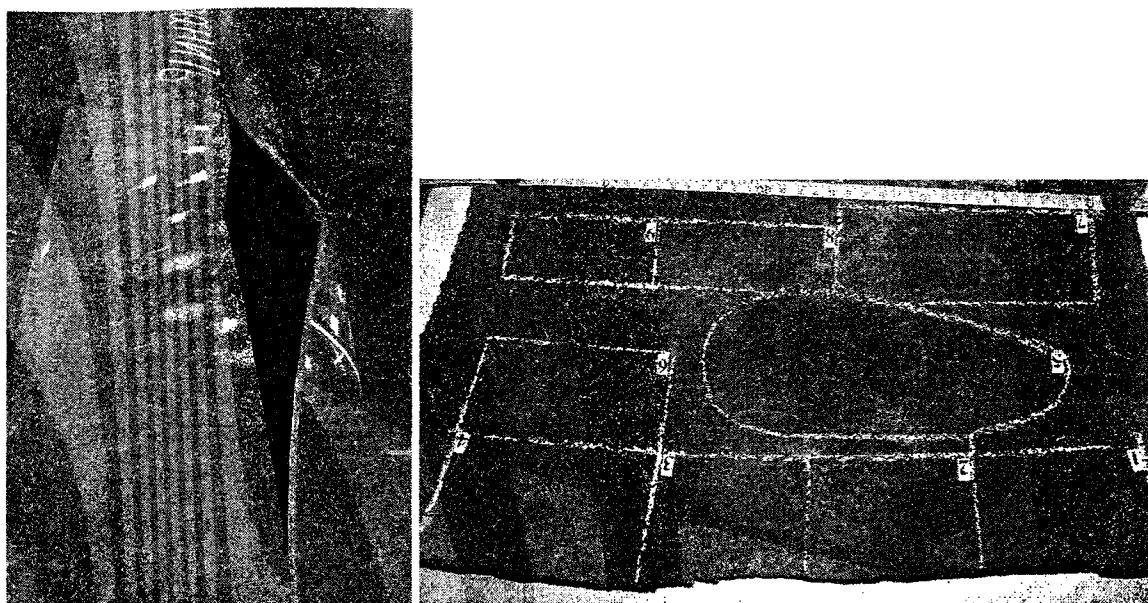
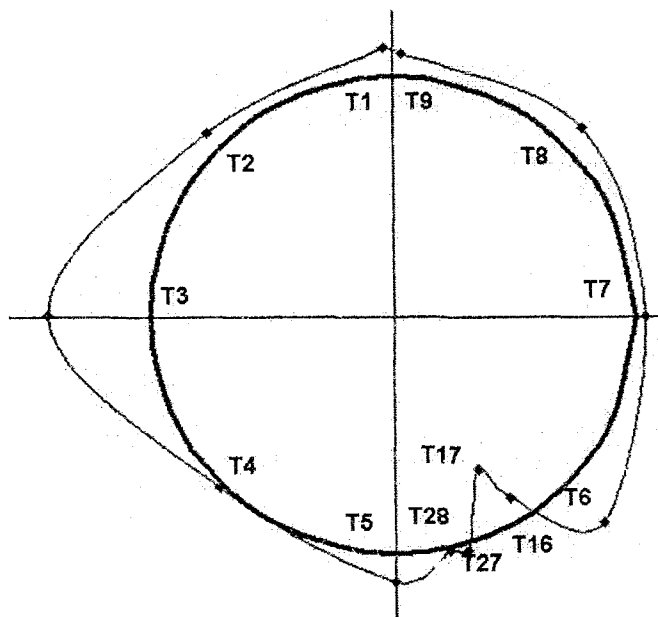


Рисунок 4 – Разрушенная труба и ее фрагмент из очага разрушения

Несмотря на то, что разрушение на последней стадии произошло в окрестности дефекта в силу наибольших в этой области растягивающих напряжений σ_φ , на первых этапах напряжения на внешней поверхности трубы над дефектом были сжимающими (см. рисунок 5).

Характерные для каждого из коррозионных повреждений отличия в распределении σ_φ и σ_r представлены на рисунке 6. Из данного рисунка видно значительное увеличение уровня напряжений в окрестности повреждения.



№ Т/д	$\varepsilon, 10^{-6}$	$\sigma, \text{МПа}$
T1	364	72,8
T2	258	51,6
T3	1332	266,4
T4	46	9,2
T5	372	74,4
T6	688	137,6
T7	116	23,2
T8	328	65,6
T9	284	56,8
T16	-316	-63,2
T17	-864	-172,8
T27	102	20,4
T28	30	6

Рисунок 5 – Распределение деформаций и показания тензодатчиков по сечению трубы при $p_1 = 4 \text{ МПа}$

Следует отметить, что повреждения эллиптического типа менее опасны: максимальные окружные напряжения на эллиптическом повреждении в 5 раз меньше, чем на цилиндрическом. Для эллиптического типа повреждений окружные и продольные напряжения в отличие от цилиндрического типа повреждения принимают только положительные значения.

На рисунке 7 графики симметрично отображены относительно центра дефекта для большей наглядности. Минимум окружных напряжений приходится на стык стенки трубы и повреждения, причем труба с эллиптическим типом повреждения в отличие от трубы с цилиндрическим типом повреждения достигает установившегося значения окружных напряжений намного ближе к повреждению.

На рисунке 7 графики симметрично отображены относительно центра дефекта для большей наглядности. На стыке стенки трубы и повреждения имеет место минимум окружных напряжений в трубе с эллиптическим повреждением и максимум в трубе с остальными двумя типами повреждений. Кроме того, в трубе с цилиндрическим повреждением имеются зоны перехода окружных напряжений от растягивающих (над неповрежденной частью) к сжимающим (над поврежденной частью) и обратно. Этот эффект и был обнаружен при проведении испытаний (ср. с рисунка 5).

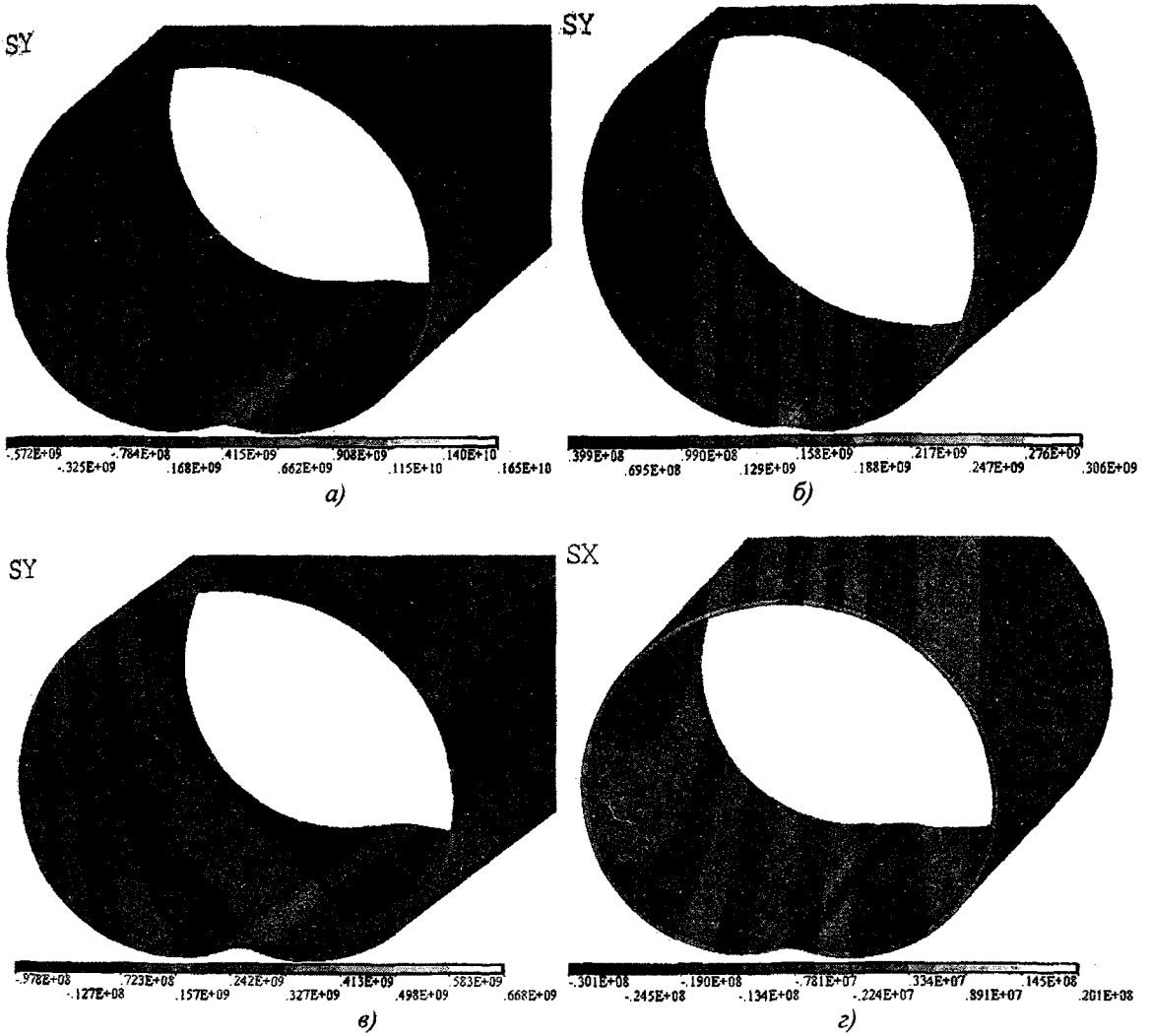


Рисунок 6 – Распределения σ_ϕ в трубе с протяженным цилиндрическим (а), эллиптическим повреждением (б) и смешанным повреждением (в), σ_r в трубе с протяженным цилиндрическим повреждением (г)

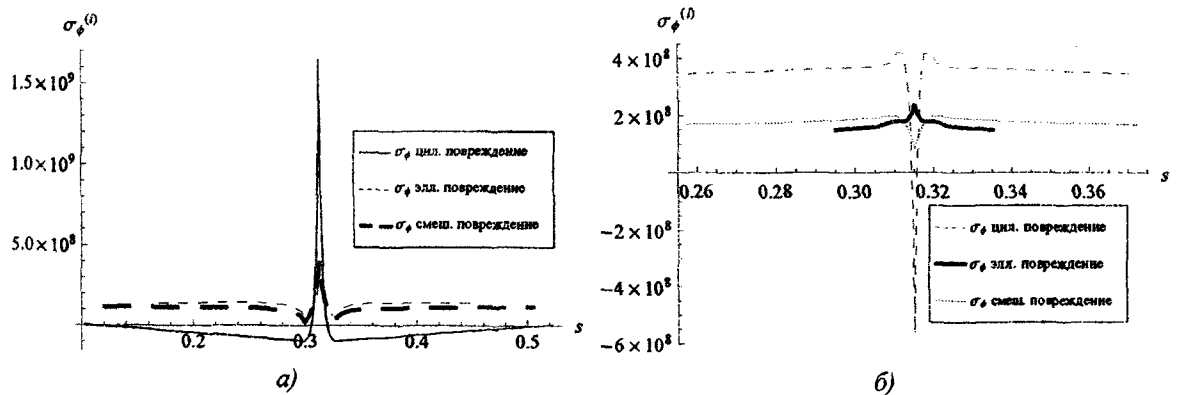


Рисунок 7 – Распределение окружных напряжений по окружному пути внутри (а), снаружи (б) трубы для наиболее поврежденной части

Заключение. Для конечно-элементных моделей трубы с граничными условиями типа (1) в основном рассматривались окружные напряжения σ_ϕ , которые были наибольшими.

При сравнении напряжений для цилиндрического, эллиптического и смешанного повреждений, самыми большими оказываются напряжения на протяженном цилиндрическом повреждении.

На нижней части трубы в области протяженного цилиндрического повреждения окружные напряжения принимают отрицательное значение, что согласуется с результатами испытаний отрезков труб внутренним давлением. Т.е. присутствует парадоксальный факт: при наличии внутреннего давления, труба распирается наружу во всех областях, кроме поврежденной, которая втягивается внутрь. Геометрия повреждения так перераспределяет давление, что в некоторой области окружные напряжения меняют свой знак.

Данная перемена знака окружными напряжениями при изменении внутреннего давления свидетельствует о существенно усталостном характере нагружения материала трубы в окрестности коррозионного повреждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель, БелГУТ, 2007, – 434 с.
2. Напряженно-деформированное состояние нагруженной внутренним давлением модели трубы с учетом влияния различных коррозионных повреждений, намоток и грунта / С.С. Щербаков [и др.] // Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 821–832.
3. Компьютерное моделирование линейного участка нефтепровода как трибофатической системы / М.А. Журавков [и др.] // Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 609–614.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев [и др.]. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. – Т. 2. – 974 с.

Поступила 18.10.11