

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОЧНОГО ПЕРЕХОДА С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НАДЗЕМНОЙ И ПОДЗЕМНЫХ ЧАСТЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

### THE ANALYSIS OF THE BEAM SPAN STRESS-DEFORMATION STATE SUBJECT TO ABOVEGROUND AND UNDERGROUND PARTS JOINT DEFORMATION AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS

В результате анализа напряженно-деформированного состояния балочного перехода трубопровода с учетом совместной деформации надземной и подземных частей и параметров эксплуатации установлено, что при ослаблении жесткости основания в прилегающих к переходу участках воздействие давления и температурных напряжений на изгиб трубопровода становится определяющим. Трубопровод испытывает чрезмерные изгибные напряжения, соизмеримые с кольцевыми от внутреннего рабочего давления и может разрушиться раньше, чем наступит потеря его устойчивости.

The article is devoted the analyses of the beam span stress-deformation state subject to aboveground and underground parts joint deformation and operational characteristics. According to this analysis when adjacent parts foundation weakens pressure and temperature stress influences are getting dominate. Pipeline is taken extreme bending stress comparable to hoop stress specified internal operating pressure and it can be broken down before stability loses.

**Р.М. Зарипов,  
Г.Е. Коробков,  
И.А. Шаммазов**

**Уфимский государственный  
нефтяной технический университет**

**R.M. Zaripov,  
G.E. Korobkov,  
I.A. Shammazov**

**Ufa State Petroleum Technological  
University**

*Ключевые слова: трубопровод, балка, напряжение, деформация, изгиб, давление, грунт, газ, уравнение, усилие, эксплуатация.*

*Key words: pipeline, beam, stress, deformation, bend, pressure, soil, gas, equation, effort, operation.*

Однопролетный надземный переход, применяемый при прокладке трубопроводов по пересеченной местности, является наиболее простым примером из всех участков, находящихся в сложных условиях эксплуатации. Исследованием его напряженно-деформированного состояния (НДС) покажем, что учет совместных деформаций надземной и подземных частей, а также параметров его эксплуатации, позволяет обоснованно выбрать мероприятия, направленные на снижение уровня напряженности перехода.

Исследуемый участок однопролетного бескомпенсаторного надземного перехода без специальных опор состоит из средней надземной части и примыкающих к ней слева и справа подземных частей. Для упрощения решения задачи рассмотрим случай, когда на этих подземных частях физико-механические свойства грунта идентичны, высота грунта засыпки является постоянной и одинаковой, трубопровод по всей длине участка составлен из прямолинейных труб. За математическую модель трубы принимается прямолинейный стержень трубчатого сечения из упругого материала. Расчетная схема рассматриваемого участка трубопровода представлена на рисунке 1, где приведены основные обозначения и направление осей координат. Начало координат находится в середине пролета надземной

части, в точке О. По горизонтальной оси в плоскости чертежа откладывается продольная осевая координата  $x$ , а по вертикальной оси — прогиб продольной оси трубы  $w$ . Ось  $OZ$  направлена перпендикулярно к плоскости чертежа, а ось  $OY$  — по вертикали вверх. Части  $AB$  и  $CD$  соответствуют подземным частям,  $BC$  — надземной части. Длины частей  $AB$  и  $CD$  обозначим через  $l_1$  и  $l_2$ , а длина части  $BC$  — через  $l$ .

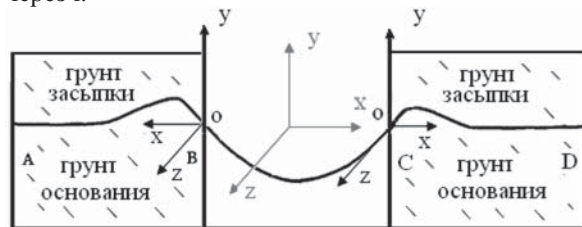


Рисунок 1. Схема нагружения трубопровода

Данная схема нагружения трубопровода является симметричной относительно середины его пролета. Среднюю надземную часть условно разобьем на две части  $OC$  и  $OB$ . Для каждой из частей  $OC$ ,  $CD$ ,  $OB$ ,  $BA$  введем локальную прямоугольную систему координат, их начала находятся, соответственно, в точках  $O$ ,  $C$ ,  $B$ .

В надземной части трубопровод деформируется под действием собственного веса, веса перекачиваемого продукта, а также веса находящегося на нем снега и льда. Высота засыпки грунта подземных участков соответствует проектной. Здесь трубопровод деформируется под действием собственного веса, веса перекачиваемой среды и давления грунта

на трубу. Грунт основания при совместной деформации с трубой моделируется основанием Винклера.

Рассмотрим следующие три варианта постановки задачи о напряженно — деформированном состоянии трубопровода.

### Первый вариант постановки задачи

Продольное усилие  $S_x$ , определяемое как равнодействующая воздействия внутреннего давления в поперечном сечении трубы «в свету» и продольного усилия  $N_x$  растяжения — сжатия стенки трубы, вызывает дополнительный изгиб трубопровода [1,3,5]. НДС надземной и подземных частей части перехода описываются, соответственно, следующими дифференциальными уравнениями

$$d^4w/dx^4 + S_x E J d^2 w/dx^2 = q_{yo} E J; \quad (1)$$

$$d^4 v dx^4 + S_x E J d^2 v dx^2 + c_{yo} D_{II} E J v = q_y E J \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) приняты следующие обозначения:

- $w$  — прогиб трубы в надземной части перехода;
- $v$  — прогиб трубы в подземных частях перехода;
- $E$  — модуль упругости материала трубы (стали);
- $J$  — момент инерции поперечного сечения трубы;

$$S_x = p_o \cdot F_{св} - N_x, \quad (3)$$

где  $F_{св}$  — площадь поперечного сечения трубы «в свету»;

$p_o$  — внутреннее рабочее давление;

$q_{yo}$  — вертикальная составляющая нагрузки, равная сумме веса трубы с продуктом и веса находящегося на нем снега и льда [3];

$c_{yo}$  — обобщенный коэффициент нормального сопротивления грунта, связанный с модулем деформации грунта  $E_{гр}$ , его коэффициентом Пуассона  $\mu_{гр}$ , единичной длиной  $l_o$  и наружным диаметром трубы  $D_{II}$  зависимостью

$$c_{yo} = 0,12 E_{гр} (1 - \mu_{гр}^2) l_o D_{II}; \quad (4)$$

$q_y$  — вертикальная составляющая нагрузки в подземных частях перехода, равная сумме веса трубы с продуктом и давления грунта на трубу [1,2,5].

В случае, когда трубопровод защемлен грунтом, продольное усилие  $N_x$  определяется по формуле

$$N_x = \mu \cdot \sigma_{кц} - E \alpha \Delta t F, \quad (5)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения стенки трубы;

$\Delta t$  — разность температур эксплуатации и замыкания трубопровода;

$\mu$  — коэффициент Пуассона металла трубы;

$\sigma_{кц}$  — кольцевые напряжения от рабочего давления  $p_o$ ;

$\alpha$  — коэффициент температурного расширения металла трубы.

Только в случае, когда продольное усилие  $N_x$  принимает постоянное значение, дифференциальные уравнения (1) и (2) имеют, соответственно, следующие общие решения в конечных аналитических выражениях [5]

$$w x = C_1 + C_3 \cos \beta x + q_{yo} 2 S_x x^2; \quad (6)$$

$$v x = e - \alpha x (B_1 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x) + q_{сyo} \cdot D_{II}, \quad (7)$$

где  $C_1, C_3, B_1, B_2$  — постоянные интегрирования;

$$\alpha = 4 c_{yo} \cdot D_{II} E J \cdot 1 - S_x E J \cdot c_{yo} \cdot D_{II}; \quad (8)$$

$$\beta = 4 c_{yo} \cdot D_{II} E J \cdot 1 + S_x E J \cdot c_{yo} \cdot D_{II}. \quad (9)$$

Выражения (6) и (7) получены с учетом условия симметричного нагружения надземной части перехода и затухания изгибных деформаций трубопровода на концах рассчитываемого участка.

Принятое здесь предположение о постоянстве продольного усилия  $N_x$ , хотя и накладывает ограничения в постановке задачи на продольное перемещение трубопровода, но позволяет выявить влияние параметров эксплуатации на изгиб трубопровода.

### Второй вариант постановки задачи

В данном варианте постановки задачи пренебрегаем воздействием внутреннего рабочего давления и температурных напряжений. Принимая в уравнениях (1) и (2) эквивалентное продольное усилие  $S_x = 0$ , имеем следующие общие решения этих уравнений

$$w x = q_y x^4 / E J 24 + C_1 \cdot x^2 / 2 + C_3; \quad (10)$$

$$v x = e - \alpha x (B_1 \cos \alpha x + B_2 \sin \alpha x) + q_{сyo} \cdot D_{II}, \quad (11)$$

где  $C_1, C_3, B_1, B_2$  — постоянные интегрирования;

$$\alpha = c_{yo} \cdot D_{II} E J. \quad (12)$$

### Третий вариант постановки задачи

В данном варианте постановки задачи трубопровод растягивается при изгибе под воздействием внутреннего рабочего давления на компенсатор, находящийся на одном из концов подземной части, например, правой части [1,3,5]. Левый конец подземной части защемлен грунтом и он не может перемещаться в продольном направлении. Если пренебречь отпором компенсатора, то продольное усилие растяжения трубопровода  $S_p = p_o F_{св}$ . В этом случае в уравнениях (1) и (2), необходимо заменить  $S_x$  на  $-S_p = -p_o F_{св}$ . Общие решения этих уравнений имеют вид

$$w x = C_1 + C_3 \cos \beta x + q_{yo} (2 S_x) x^2; \quad (13)$$

$$v x = e - \alpha x (B_1 \cos \alpha x + B_2 \sin \alpha x) + q_{сyo} \cdot D_{II}, \quad (14)$$

где  $C_1, C_3, B_1, B_2$  — постоянные интегрирования

$$\alpha = 4 c_{yo} \cdot D_{II} E J \cdot 1 + S_p E J \cdot c_{yo} \cdot D_{II}; \quad (15)$$

$$\beta = 4 c_{yo} \cdot D_{II} E J \cdot 1 - S_p E J \cdot c_{yo} \cdot D_{II}. \quad (16)$$

Поскольку в рассматриваемом переходе отсутствуют специальные опоры в узлах сопряжения надземной и подземных частей, то здесь для всех трех вариантов постановок задач должны выполняться следующие граничные условия:

$$w \pm l_2 = v 0;$$

$$w' \pm l_2 = v' 0;$$

$$M z_1 \pm l_2 = M z_2 0; \quad (17)$$

$$Q y_1 \pm l_2 = Q y_2 0,$$

где  $w', x, M z_1, x, M z_2, x$  и  $Q y_1, x, Q y_2, x$  — функции угла поворота продольной оси трубы, изгибающего

момента и поперечной силы в подводной и подземных частях, соответственно.

### Решение поставленных задач

Используя решения (6), (10) и (13) находим  $w'(x)$ ,  $Mz_1x$  и  $Qy_1x$  для надземной части, а с помощью решений (7), (11) и (14) —  $v'(x)$ ,  $Mz_2x$  и  $Qy_2x$  для подземных частей. Далее, подставляя их в граничные условия (17) для каждой постановки задачи, получим систему четырех линейных алгебраических уравнений, которая для первой постановки задачи имеет вид

$$\begin{aligned} -B_1 + 0B_2 + C_1 + C_3 \cos \beta_0 l_0 &= q_{\text{ус}0} \cdot D_n - q_{y_0} 2Sx l_0^2; \\ \alpha B_1 - \beta B_2 + 0C_3 - C_3 \beta \sin \beta_0 l_0 &= -q_0 l_0 Sx; \\ -\alpha_2 - \beta_2 B_1 + 2\alpha \beta B_2 - C_3 \beta_0 2 \cos \beta_0 l_0 &= -q_0 l_0 Sx; \\ -3\beta_2 \alpha - \alpha_3 B_1 + \beta_3 - 3\alpha_2 \beta B_2 + \beta_0 3 \sin \beta_0 C_3 &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

для второй постановки задачи

$$\begin{aligned} -B_1 + 0B_2 + C_1 + C_3 l_0^2 &= q_{\text{ус}0} \cdot D_n - q_{y_0} l_0 424EJ; \\ \alpha B_1 - \alpha B_2 + 0C_1 + 2l_0 C_3 &= -q_0 l_0 36EJ; \\ 0B_1 + 2\alpha_2 B_2 + 0C_1 + 2C_3 &= -q_0 l_0 22EJ; \\ -2\alpha_3 B_1 - 2\alpha_3 B_2 + 0C_1 + 0C_3 &= -q_0 l_0 EJ \end{aligned} \quad (19)$$

и для третьей постановки задачи

$$\begin{aligned} -B_1 + 0B_2 + C_1 + C_3 \operatorname{ch} \beta_0 l_0 &= q_0 l_0 22Sx + q_{\text{ус}0} D_n; \\ \alpha B_1 - \beta B_2 + 0C_1 + C_3 \beta \operatorname{osh} \beta_0 l_0 &= q_0 l_0 Sx; \\ -\alpha_2 - \beta_2 B_1 + 2\alpha \beta B_2 + 0C_1 + C_3 \beta_0 2 \operatorname{ch} \beta_0 l_0 &= q_0 Sx; \\ -3\beta_2 \alpha - \alpha_3 B_1 + \beta_3 - 3\alpha_2 \beta B_2 + 0C_1 + C_3 \beta_0 3 \operatorname{sh} \beta_0 l_0 &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

где неизвестными являются  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ .

Для решения систем линейных алгебраических уравнений (18) — (20) методом Гаусса, а также для расчета основных характеристик НДС трубопровода (прогиба, угла поворота продольной оси трубы, изгибных напряжений, поперечной силы) для подводной и подземных частей трубопровода составлена программа для компьютера. Эта же программа позволяет построить эпюры основных характеристик НДС по всей длине рассчитываемого участка для всех трех вариантов постановки задачи, а также с ее помощью можно выполнить оценку прочности трубопровода согласно положений СНиП 2.05.06-85\*.

Пример расчета НДС балочного перехода с учетом его совместной деформации с прилегающими подземными участками и параметрами эксплуатации

Приведем пример расчета НДС балочного перехода газопровода для длины надземной части  $l=59,3$  м с учетом совместной деформации с прилегающими подземными участками и параметрами эксплуатации при следующих значениях исходных данных [2]:

- категория участка — III;
- наружный диаметр  $D_n$  и толщина стенки трубы  $\sigma$  —  $1020 \times 14,3$  мм;
- вес единицы длины трубы —  $q_{\text{тр}} = 3890$  Н/м;
- вес газа под давлением 7,5 МПа в единице длины трубы —  $q_{\text{газ}} = 737$  Н/м;

- вес снега на единице длины трубы —  $q_{\text{сн}} = 490$  Н/м;
- вес льда на единице длины трубы —  $q_{\text{лед}} = 220$  Н/м;

Были рассмотрены два типа грунта (жесткий и мягкий ослабленный грунт), которые имели, соответственно, следующие значения модуля деформации  $E_{\text{гр}} = 40$  МПа,  $E_{\text{гр}} = 10$  МПа и коэффициента Пуассона  $\mu_{\text{гр}} = 0,2$ ,  $\mu_{\text{гр}} = 0,4$ . Высота засыпки грунта соответствует проектной.

На рисунках 2, 3 представлены эпюры изгибных напряжений и прогиба перехода для всех трех вариантов постановки задачи для этих типов грунта, а в таблицах 1, 2 — максимальные значения прогиба в середине пролета и изгибные напряжения от пролетных и опорных изгибающих моментов. Эти характеристики НДС трубопровода для первого, второго и третьего вариантов постановки задачи имеют, соответственно, следующие обозначения:  $mz_s = mz_{sx}$ ,  $my_z = my_{zx}$ ,  $mr_z = mr_{zx}$  — изгибные напряжения;  $ws = ws_x$ ,  $wy = wy_x$ ,  $wr = wr_x$  — стрела подъема трубы.

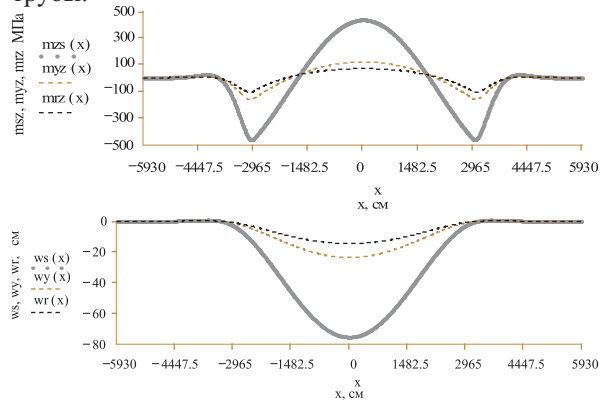


Рисунок 2. Эпюры изгибных напряжений и прогиба балочного перехода ( $E_{\text{гр}} = 40$  МПа,  $\mu_{\text{гр}} = 0,4$ ,  $p_0 = 7,5$  МПа,  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ ,  $S_x = 7110$  кН,  $S_p = 6369$  кН,  $N_x = -675,3$  кН)

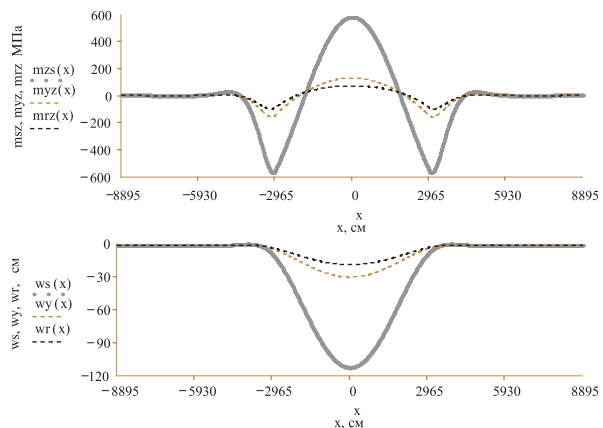


Рисунок 3. Эпюры изгибных напряжений и прогиба балочного перехода в мягком ослабленном грунте ( $E_{\text{гр}} = 10$  МПа,  $\mu_{\text{гр}} = 0,4$ ,  $p_0 = 7,5$  МПа,  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ ,  $S_x = 7110$  кН,  $S_p = 6369$  кН,  $N_x = -675,3$  кН)

**Таблица 1.** Максимальные значения прогиба и значения изгибных напряжений от пролетных и опорных изгибающих моментов ( $E_{гр} = 40$  МПа,  $\mu_{гр} = 0,2$ ,  $p_0 = 7,5$  МПа,  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ )

Вариант постановки задачи	Прогиб, см	Изгибные напряжения, МПа	
		от пролетных изгибающих моментов	от опорных изгибающих моментов
Первый	$ws(0) = -75,8$	$mzs0 = 429,1$	$mzs \pm 12 = -467,0$
Второй	$wy(0) = -24,2$	$myz0 = 117,5$	$myz \pm 12 = -164,3$
Третий	$wr(0) = -15,2$	$mrz0 = 66,6$	$mrz \pm 12 = -109,5$

Анализ данных таблицы 1 показывает, что воздействие внутреннего рабочего давления и температурных напряжений приводит к увеличению прогиба и изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов в 3 раза, а изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов — в 3,5 раза.

Растяжение трубопровода под воздействием внутреннего рабочего давления на закрытую задвижку (заглушку), которая моделирует работу компенсатора, приводит к уменьшению максимального значения прогиба в середине пролета в 5 раз, изгибных напряжений от пролетных — в 6 раз, опорных изгибающих моментов — в 4,5 раза.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что воздействие внутреннего рабочего давления и температурных напряжений приводит к увеличению прогиба и изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов в 3,5 раза, а изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов — в 4,5 раза.

Выполненный анализ НДС перехода показывает, что при ослаблении жесткости основания в прилегающих участках воздействие давления и температурных напряжений на изгиб трубопровода становится определяющим. Трубопровод испытывает чрезмерные изгибные напряжения, соизмеримые с кольцевыми от внутреннего рабочего давления

**Таблица 2.** Максимальные значения прогиба и значения изгибных напряжений от пролетных и опорных изгибающих моментов ( $E_{гр} = 10$  МПа,  $\mu_{гр} = 0,4$ ,  $p_0 = 7,5$  МПа,  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ )

Вариант постановки задачи	Прогиб, см	Изгибные напряжения, МПа	
		от пролетных изгибающих моментов	от опорных изгибающих моментов
Первый	$ws(0) = -112,9$	$mzs0 = 580,3$	$mzs \pm 12 = -571,3$
Второй	$wy(0) = -30,8$	$myz0 = 128,8$	$myz \pm 12 = -158,8$
Третий	$wr(0) = -19,6$	$mrz0 = 70,5$	$mrz \pm 12 = -91,6$

и может разрушиться раньше, чем наступит его потеря устойчивости.

Растяжение трубопровода под воздействием внутреннего рабочего давления на закрытую задвижку (заглушку), которая моделирует работу компенсатора, приводит к уменьшению максимального значения прогиба в середине пролета в 6 раз, изгибных напряжений от пролетных — в 8 раз, опорных изгибающих моментов — в 6 раз. Следовательно, установка компенсирующих устройств на рассматриваемом участке при ослаблении жесткости грунта приведет к снижению уровня напряженности трубопровода и сохранению его проектного положения.

Приведенный в статье научный материал представлен на основании выполнения Государственной научно-технической программы Академии наук РБ «Критические технологии Республики Башкортостан: физико-математические основы и технические решения» по теме «Прочность и надежность оборудования нефтедобычи, транспорта и нефтехимии».

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Айнбиндер А. Б., Камерштейн А. Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1982. 340 с.
  - 2 Быков Л.И., Мустафин Ф.М., Рафиков С.К. и др. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие. СПб.: Недра, 2006. 824 с.
  - 3 Строительные нормы и правила СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы / Минстрой России. М.: ГУПЦПП, 1997. 52 с.
  - 4 Харионовский В. В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. С. 318 – 358.
  - 5 Шаммазов А. М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. / Шаммазов А. М., Зарипов Р. М., Чичелов В. А., Коробков Г. Е. М.: Интер, 2005. — Т. 1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. 706 с.
- Р.М. Зарипов*  
д.т.н., доцент каф. Математики, УГНТУ  
R.M. Zaripov
- PhD, assistant professor, Chair of Mathematics, USPTU*
- И.А. Шаммазов*  
УГНТУ  
к.т.н., старший преподаватель кафедры ТХНГ УГНТУ  
I. A. Shammazov  
USPTU  
senior teacher, Chair of Transport and Sdovage Oil and Gas USPTU  
mel. 2725-054
- Г.Е. Коробков*  
к.т.н., зам. зав. кафедрой ТХНГ УГНТУ  
G.E. Korobkov  
head of Chair of Transport and Sdovage Oil and Gas USPTU