

**Экологическая безопасность подземных магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов при эксплуатации**

© 2012. Ю. В. Дудников<sup>1</sup>, к.т.н., руководитель, Х. А. Азметов<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, гл.н.с.,

<sup>1</sup>Управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по Республике Башкортостан,  
<sup>2</sup>Государственное унитарное предприятие «Институт проблем транспорта энергоресурсов» Республики Башкортостан,  
 e-mail: prirodnadzor\_rb@ufanet.ru, ipter@anrb.ru

В статье представлены результаты исследований по обеспечению экологической безопасности подземных магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов при их эксплуатации. Проведена оценка уровня механического напряжения в стенке труб подземного нефте- и нефтепродуктопровода. Превышение этими напряжениями предельного значения связано с потерей герметичности трубопровода, выходом перекачиваемого продукта в окружающую среду, её загрязнением. Даны рекомендации по снижению уровня напряжений и обеспечению экологической безопасности сооружения.

The article presents results of study relating to ecological safety of the underground main oil- and oil product pipelines during operation. Stress level in the pipe wall of the underground oil pipeline and oil product pipeline was evaluated. Excess of these stresses over ultimate value is associated with the loss of pipeline tightness, escape of the pumped product and pollution of environment. Recommendations are given concerning stress level reduction and provision for ecological safety of the structure.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, магистральный нефте- и нефтепродуктопровод, механическое напряжение, продольно-поперечные перемещения трубопровода, предельное проектное напряжение

**Keywords:** ecological safety, main oil- and oil product pipeline, stress, longitudinal-lateral pipeline movements, ultimate design stress

Особое место для магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов отводится экологической безопасности при эксплуатации. Это связано с тем, что перекачиваемые продукты ядовиты для растений и животного мира, химически агрессивны и огнеопасны. Важным условием обеспечения экологической безопасности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов является исправность отдельных его участков и технических объектов [1 – 3].

Магистральные трубопроводы любого назначения имеют повороты трассы при изменении её направлений или обходе каких-либо препятствий, населённых пунктов, образуя криволинейность в горизонтальной плоскости. Криволинейные участки конструктивно выполняются упругим изгибом трубопровода, отводами холодного гнущего и крутоизогнутыми отводами [4, 5].

В случаях сооружения магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов при отрицательной температуре и перекачке продукта, имеющего положительную температуру, в трубопроводе возникают значительные про-

дольные сжимающие усилия [6]. На углах поворота подземных трубопроводов под действием продольных сжимающих усилий происходят их продольно-поперечные перемещения с возникновением значительных дополнительных механических напряжений в стенке труб [7]. Эти напряжения в сумме с напряжениями, учтёнными в проекте, могут превысить несущую способность трубопровода и привести к его повреждению с потерей герметичности, выходом перекачиваемого продукта в окружающую среду с тяжёлыми экологическими последствиями.

Действующие строительные нормы и правила [5] при проверке прочности подземных трубопроводов предусматривают определить максимальные суммарные продольные напряжения от всех нагрузок и воздействий с учётом поперечных и продольных перемещений трубопровода. В то же время указанные нормы и правила [5] и другие соответствующие нормативные документы содержат только расчётные формулы по определению максимальных продольных напряжений при отсутствии перемещений трубопровода.

**Цели и задачи**

Получить аналитические зависимости для определения напряжений и оценить экологическую безопасность подземных трубопроводов в зависимости от условий их сооружения и эксплуатации.

**Методы**

Проведено теоретическое исследование напряжённно-деформированного состояния подземного трубопровода на углах поворота в горизонтальной плоскости. Трубопровод рассматривается как длинная гибкая балка, находящаяся под действием изменяющихся с ростом прогиба продольного усилия и поперечной нагрузки [8 – 10]. Продольное усилие в процессе изгиба уменьшается от первоначального до равновесного и формируется изогнутый участок, где величина прогиба снижается от наибольшего значения в вершине угла поворота до нулевого значения на определённом расстоянии от вершины угла поворота [11]. Поперечная нагрузка представляет собой сопротивление грунта прогибу трубопровода и которое возрастает прямопропорционально с увеличением прогиба. При решении задачи учтён и тот факт, что прогибы подземного трубопровода соизмеримы с зазором между стенками трубы и траншеи и прогибу оказывает сопротивление грунт нарушенной (при сооружении трубопровода) структуры с пониженным (по сравнению с грунтом ненарушенной структуры) коэффициентом пропорциональности при сжатии [12].

**Результаты**

В результате проведённых исследований получены зависимости параметров напряжённно-деформированного состояния трубопровода на углах поворота в горизонтальной плоскости от характеристик трубопровода, свойств грунта, нормативных нагрузок и воздействий с учётом продольно-поперечных перемещений трубопровода.

Были рассмотрены углы поворота, конструктивно выполненные крутоизогнутыми отводами, отводами холодного гнутья и упругим изгибом трубопровода. В результате для каждого конструктивного решения получены зависимости, устанавливающие влияние начального продольного сжимающего усилия  $N_0$  на прогиб и напряжения в трубопроводе, а также расчётные формулы для определения наибольшего прогиба  $v_0$ , продольного усилия  $N$  и максимального изгибающего момента  $M$ .

Так, например, для углов поворота, конструктивно выполненных крутоизогнутыми отводами получены следующие аналитические выражения:

$$\begin{aligned} & (\bar{N}_0 - \alpha)^2 + Z_1(\bar{N}_0 - \alpha) \cdot \frac{a}{\sqrt{\alpha}} - \\ & - Z_2 \bar{v} \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{4} \right)^2 \cdot \frac{\bar{v} \sqrt{\alpha}}{a} \right] = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$v_0 = \bar{v} \sqrt[3]{\frac{EJ}{q} \operatorname{tg}^4 \varphi} \quad (2)$$

$$M = \bar{M} \sqrt[3]{q(EJ \operatorname{tg} \varphi)^2} \quad (3)$$

$$N = \alpha \sqrt[3]{\left( \frac{q}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^2 EJ} \quad (4)$$

где  $\bar{N}_0$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  – безразмерные параметры, характеризующие исходные данные, в т. ч. начальное усилие  $N_0$ , геометрические характеристики трубопровода и угла поворота, свойства грунта;

$\alpha$ ,  $a$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{M}$  – безразмерные параметры, определяемые в зависимости от исходных данных по полученным нами формулам;

$E$  – модуль упругости материала трубы;

$J$  – момент инерции сечения трубы;

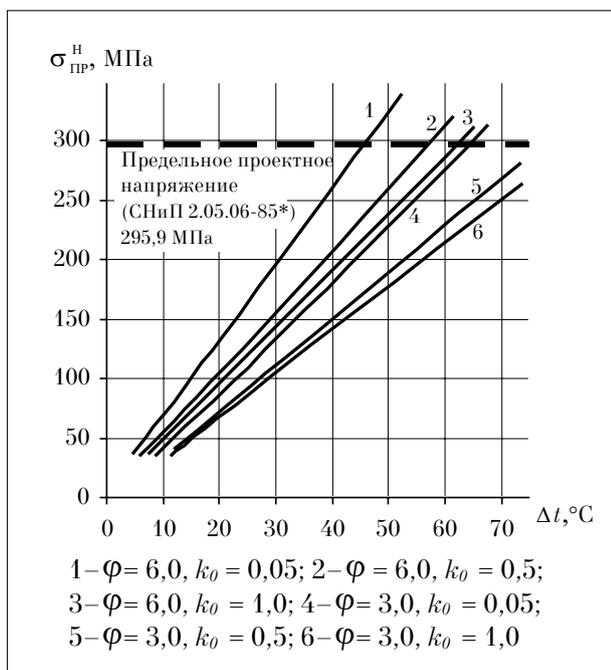
$2\varphi$  – угол поворота трубопровода;

$q$  – сопротивление грунта поперечному перемещению трубопровода единичной длины с наружным диаметром  $D$  и определяется из выражения  $q = k_0 Dw + q_1$ , где  $w = 1,0$  и имеет размерность длины;

$q_1$  – сила трения трубопровода единичной длины по грунту при его поперечном горизонтальном перемещении.

Параметры  $\alpha$  и  $\bar{v}$  определяются через параметр  $a$ , значения  $\bar{N}_0$ ,  $Z_1$  и  $Z_2$  вычисляются по исходным данным, и поэтому в уравнении (1) неизвестным является только параметр  $a$ . Находя  $a$  по (1), вычисляются  $\bar{v}$ ,  $\bar{M}$  и  $\alpha$ , затем  $v_0$ ,  $M$  и  $N$ .

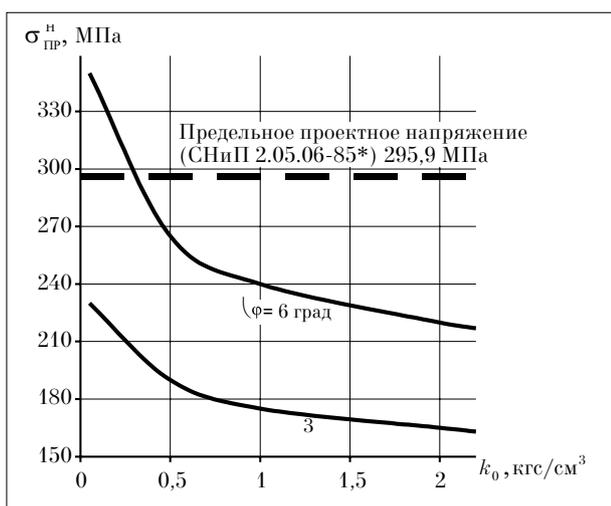
На рисунках 1 и 2 представлены зависимости максимальных суммарных продольных напряжений  $\sigma_{\text{ПР}}^{\text{H}}$  в трубопроводе  $\varnothing 1020 \times 11$  мм от исходных данных на углах поворота, конструктивно выполненных крутоизогнутым отводом. Трубопровод проложен в супесчаном грунте. Свойство грунта и его сопротивление продольно-поперечным перемещениям трубопровода определены по рекомендациям [8, 12]. Металл трубы имеет предел текучести  $\sigma_{\text{T}} = 366,0$  МПа. Рабочее давление в трубопроводе



**Рис. 1.** Зависимости максимальных суммарных продольных напряжений  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}}$  в трубопроводе  $\text{Ø} 1020 \times 11$  мм от положительного температурного перепада  $\Delta t$  для различных значений угла поворота  $\varphi$  (град) и коэффициента  $k_0$  (кгс/см<sup>3</sup>)

воде 2,5 МПа. Начальное сжимающее усилие  $N_0$  определяется по [5].

В соответствии с [5] предельное проектное напряжение равно 295,9 МПа. Напряжение  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}}$  определено по формуле  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}} = \mu \sigma_{\text{КЦ}}^{\text{H}} \pm \frac{M}{W} - \frac{N}{F}$ , где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma_{\text{КЦ}}^{\text{H}}$  – кольцевые напряжения от рабочего давления;  $W$  – момент сопротивления сечения трубы;  $F$  – площадь поперечного сечения трубы.



**Рис. 2.** Зависимости максимальных суммарных продольных напряжений  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}}$  в трубопроводе  $\text{Ø} 1020 \times 11$  мм от коэффициента  $k_0$  для различных значений угла поворота  $\varphi$  (град) при  $\Delta t = 50$  °С

На основании проведённых нами расчётов установлено, что увеличение положительного температурного перепада и угла поворота приводят к существенному повышению максимальных суммарных продольных напряжений в трубопроводе. Снижение коэффициента  $k_0$  грунта вызывает рост уровня напряжений, особенно в области  $k_0 < 0,5$  кгс/см<sup>3</sup>. Для некоторых сочетаний исходных данных  $\Delta t$ ,  $\varphi$  и  $k_0$  напряжения превышают предельное проектное, что представляет реальную опасность целостности сооружения.

Следует отметить, что расчёт напряжений без учёта продольно-поперечных перемещений даёт существенно заниженные результаты. Так, например, для рассматриваемого трубопровода  $\text{Ø} 1020 \times 11$  мм при  $\varphi = 6$  град,  $k_0 = 0,05$  кгс/см<sup>3</sup> и  $\Delta t = 50$  °С при расчёте по полученным нами формулам  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}} = 156$  МПа, при расчёте без учёта перемещений  $\sigma_{\text{пр}}^{\text{H}} = 65$  МПа. Конструктивное выполнение угла поворота отводом холодного гнущья и упругим изгибом трубопровода позволяют существенно снизить дополнительные напряжения в процессе эксплуатации. Анализ показал, что с целью снижения уровня напряжений в трубопроводе, тем самым обеспечения экологической безопасности следует уменьшить величину угла поворота трубопровода и разность температур сооружения и эксплуатации, а так же для сооружения углов поворота выбрать участки с прочным грунтом.

### Выводы

Получены аналитические зависимости напряжённо-деформированного состояния подземного нефте- и нефтепродуктопровода на углах поворота в горизонтальной плоскости, позволяющие оценить экологическую безопасность сооружения в процессе эксплуатации. Определены основные технические и технологические меры обеспечения экологической безопасности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов на сложных участках трассы.

### Литература

1. Губайдуллин М.Г., Калашников А.В., Макаровский Н.А. Оценка и прогнозирование экологического состояния геологической среды при освоении севера Тимано-Печерской нефтегазопасной провинции. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 207 с.
2. Мазур И.И., Иванцов О.М., Молдованов О.И. Конструктивная надёжность и экологическая безопасность трубопроводов. М.: Недра, 1990. 264 с.

3. Телегин Л.Г., Ким Б.И., Зоненко В.И. Охрана окружающей среды при сооружении и эксплуатации газонефтепроводов. М.: Недра, 1988. 188 с.
4. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). М.: Недра, 1982. 384 с.
5. СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы. Минстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1997. 60 с.
6. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1968. 120 с.
7. Азметов Х.А., Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов. СПб.: Недра, 2005. 248 с.
8. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1976. 224 с.
9. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Недра, 1970. 544 с.
10. Филоненко-Бородич М.М., Изюмов С.М., Олисов Б.А. и др. Курс сопротивления материалов. Часть II. М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1956. 540 с.
11. Айнбиндер А.Б. Расчёт магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1970. 544 с.
12. Клейн Г.К. Расчёт подземных трубопроводов. М.: Издательство литературы по строительству, 1969. 240 с.

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН  
Институт экологии растений и животных УрО РАН  
Научный совет по изучению, охране  
и рациональному использованию животного мира  
Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми  
Управление Федеральной службы по надзору  
в сфере природопользования по Республике Коми  
Проект ПРООН/ГЭФ ООПТ Республики Коми

**Вторая Всероссийская конференция с международным участием  
«ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ЖИВОТНОГО МИРА НА СЕВЕРЕ»**

8–12 апреля 2013 г.

Сыктывкар, Республика Коми, Россия

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе II Всероссийской научной конференции с международным участием «ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ЖИВОТНОГО МИРА НА СЕВЕРЕ».

Работа конференции будет проходить в форме пленарных и секционных заседаний и стендовых сессий. На конференции будут рассмотрены проблемы изучения позвоночных, а также почвенных, наземных и водных беспозвоночных на Севере.

**Основные направления работы конференции**

- Фауна, систематика, зоогеография и адаптация животных к условиям Севера
- Структура и динамика сообществ и популяций
- Влияние естественных и антропогенных факторов на фауну и население животных
- Охрана животных в системе ООПТ

**Ключевые даты**

Прием заявок	до 20 сентября 2012 г.
Прием материалов	до 10 октября 2012 г.
Перечисление оргвзноса	до 1 ноября 2012 г.
Второе письмо	январь 2013 г.
Бронирование гостиницы	до 1 марта 2013 г.
Регистрация участников	8–9 апреля 2013 г.
Открытие конференции	9 апреля 2013 г.

**Контакты**

167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28  
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Мария Батурина  
Тел.: (8212) 436384; факс: (8212) 240163  
E-mail: animals:@ib.komisc.ru  
Сайт: [http://ib.komisc.ru/abb/conf/animals\\_2013](http://ib.komisc.ru/abb/conf/animals_2013)