

Шишко А. Л.

**ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА СО ШТОКМАНОВСКОГО ГКМ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДЕ ДИАМЕТРОМ 1020 ММ**

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2009/6/70.html](http://www.gramota.net/materials/1/2009/6/70.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

**Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2009. № 6 (25). С. 224-230. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2009/6/](http://www.gramota.net/materials/1/2009/6/)

**© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА СО ШТОКМАНОВСКОГО ГКМ  
ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДЕ ДИАМЕТРОМ 1020 ММ

Шишко А. Л.

Мурманский государственный технический университет

### Введение

Штокмановское газоконденсатное месторождение является уникальным объектом разработки не только для отечественной, но и для мировой практики морской газодобычи. Уникальность месторождения выражается в объемах запасов продукции и условиях проведения работ по освоению месторождения.

Месторождение спроектировано по аналогии с Ormen Lange и Snohvit, но большим отличием Штокмановского месторождения является его отдаленность от побережья. В значительной степени обустройство месторождения осложняют и условия проведения работ: глубина моря, суровые климатические условия, сложный рельеф дна, вероятность распространения в придонных отложениях газогидратов и многолетнемерзлых грунтов, вероятность появления в районе крупных ледовых образований.

В данной статье показаны возможные решения проблем транспорта многофазного продукта по подводному трубопроводу от Штокмановского месторождения до пос. Терiberка, основными критериями которого являются характеристики распределения давления и температуры по всему участку трассы.

Для подачи пластового флюида, состоящего из природного газа, конденсата и воды от месторождения на берег потребуется подводный трубопровод протяженностью более 540 км. Профиль трассы газопровода имеет существенные перепады высот и максимальную глубину около 350 м. На стадии обоснования рассматривались различные варианты транспорта газа к береговым сооружениям, а именно: транспорт газового потока в однофазном, двухфазном и мультифазном состоянии. Реализованных проектов подводной транспортировки мультифазного или двухфазного потока на такие большие расстояния на сегодня не существует. Однако современные методы исследований и новейшие технологии управления подводным транспортом газа подтверждают принципиальную техническую возможность осуществления концепции мультифазного транспорта газа. Предполагается строительство трех ниток подводного магистрального трубопровода от месторождения до губы Опасово для осуществления двухфазной транспортировки газа.

### Расчет толщины стенки трубопровода

Расчет толщины стенки проводится по Норвежскому стандарту OS-F101 "Подводные трубопроводные системы" [6], где используется следующая формула для расчета кольцевых растягивающих напряжений, которая определяет напряжения на внутренней поверхности трубы:

$$\sigma_{c1} = \frac{(\Delta p)(D - \delta)}{2\delta},$$

где  $\delta$  - параметр определяющий минимально возможное значение толщины стенки в процессе эксплуатации.

$$\delta = \delta_{nom} - \delta_{fab} - \delta_{corr}$$

или в процессе строительства

$$\delta_1 = \delta_{nom} - \delta_{fab};$$

$$\delta_2 = \delta_{nom} - \delta_{corr};$$

где  $\delta_{nom}$  - номинальная толщина стенки трубы,  $\delta_{fab}$  - допуск на изготовление трубы,  $\delta_{corr}$  - припуск на коррозию в процессе эксплуатации.

Максимальная разность давлений должна удовлетворять условию:

$$p_{ii} - p_0 \leq \frac{p_b(\delta_1)}{\gamma_{sc}\gamma_m}$$

где  $p_{ii}$  - инцидентное давление в точке трубопровода,  $p_b(\delta_1)$  - рабочее давление, соответствующее минимальному пределу текучести или временному сопротивлению на разрыв,  $\gamma_{sc}$  - коэффициент сопротивления материала трубы, зависящий от способа ее производства.

Коэффициент  $\gamma_m$  равен 1.15 при (SLS/ULS/ALS) и 1.0 при (FLS).

Коэффициент класса безопасности  $\gamma_{sc}$  - зависит от расположения участка трубопровода.

$\gamma_{sc} = 1.138$  - для трубопровода в пределах 500 метров частой человеческой деятельности,

$\gamma_{sc} = 1.138$  - для трубопровода за пределами 500 метров частой человеческой деятельности.

Величина  $p_b(\delta_1)$  определяется следующим образом:

$$p_b(x) = \text{Min}\{p_{bs}, p_{ii}(x)\};$$

$$p_{bs}(x) = \frac{2x}{D-x} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t;$$

$$p_{ii}(x) = \frac{2x}{D-x} \frac{2}{1.15\sqrt{3}} \sigma_t,$$

где  $x$ - необходимо заменить на  $\delta_1$  или  $\delta_2$ .

Расчет толщины стенки трубы производится при следующих параметрах:

- рабочее давление  $p_i = 18.5$  МПа;
- наружный диаметр трубы газопровода  $D_e = 1020 \cdot 10^{-3}$  м;
- предел текучести стали класса X-65 по спецификации API SL равен 448 МПа;
- предел прочности материала стали равен 530 МПа;
- коэффициент надежности принимаем равным 1.6.

Выполним расчет толщины стенки трубы, принимая методику расчета, предназначенную для строительства трубопровода.

Толщины стенки трубы равны.

$$\delta_1 = \delta_{nom} - \delta_{fab};$$

$$\delta_2 = \delta_{nom} - \delta_{corr};$$

Величина рабочего давления рассчитывается следующим образом:

$$p_{bs}(x) = \frac{2x}{D-x} \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t;$$

$$p_{ii}(x) = \frac{2x}{D-x} \frac{2}{1.15\sqrt{3}} \sigma_t;$$

Из этих величин выбирается минимальная.

$$p_b(x) = \text{Min}[p_{bs}(x), p_{ii}(x)]$$

$$\text{Min}\left(\frac{2.00817x\sigma_b}{D_e - x}, \frac{4x\sigma_t}{\sqrt{3}(D_e - x)}\right)$$

Далее составляем уравнение для определения номинальной толщины стенки из условия прочности трубы.

$$eq1 = \Delta p = \frac{p_b(x)}{\gamma_{sc}\gamma_m};$$

Соответствующие формулы для расчета толщины стенки имеют вид.

$$h_{N,1} = \text{First}[\text{Solve}[eq1/.x \rightarrow \delta_1, \delta_{nom}]]$$

$$h_{N,2} = \text{First}[\text{Solve}[eq1/.x \rightarrow \delta_2, \delta_{nom}]]$$

$$\{\delta_{nom} \rightarrow \frac{-1\Delta p D_e \gamma_m \gamma_{sc} - 1\Delta p \gamma_m \delta_{corr} \gamma_{sc} - 2.00817 \delta_{corr} \sigma_b + 0}{-1\Delta p \gamma_m \gamma_{sc} - 2.00817 \sigma_b}\}$$

За пределами человеческой деятельности находим номинальную толщину стенки:

$$\delta_{nom} / h_{N,1} / \{\Delta p \rightarrow 18.510^6, D_e \rightarrow 102010^{-3}, \sigma_t \rightarrow 53010^6, \gamma_{sc} \rightarrow 1.138, \gamma_m \rightarrow 1.15, \delta_{fab} \rightarrow 210^{-3};$$

$$\delta_{nom} / h_{N,2} / \{\Delta p \rightarrow 18.510^6, D_e \rightarrow 102010^{-3}, \sigma_t \rightarrow 53010^6, \gamma_{sc} \rightarrow 1.138, \gamma_m \rightarrow 1.15, \delta_{corr} \rightarrow 1.510^{-3};$$

а затем определяем ее минимальное значение, равное 0.0228864.

В зоне частой человеческой деятельности повторяем предыдущие решение:

$$\delta_{nom} / h_{N,1} / \{\Delta p \rightarrow 18.510^6, D_e \rightarrow 102010^{-3}, \sigma_t \rightarrow 53010^6, \gamma_{sc} \rightarrow 1.308, \gamma_m \rightarrow 1.15, \delta_{fab} \rightarrow 210^{-3};$$

$$\delta_{nom} / h_{N,2} / \{\Delta p \rightarrow 18.510^6, D_e \rightarrow 102010^{-3}, \sigma_t \rightarrow 53010^6, \gamma_{sc} \rightarrow 1.308, \gamma_m \rightarrow 1.15, \delta_{corr} \rightarrow 1.510^{-3};$$

и определяем минимальную толщину стенки трубы, равную 0.0261891.

Таким образом, толщина стенки трубы, рассчитанная по норвежскому стандарту равна:

- $\delta = 22$  мм для участка трубопровода, вне зоны частой деятельности человека;
- $\delta = 26$  мм для участка трубопровода, внутри зоны частой деятельности человека.

#### Решение системы уравнений стационарного течения газа для трубы диаметром 1020 мм

Ниже представлен профиль трассы:

Составляем систему дифференциальных уравнений для нахождения неизвестных давления и температуры внутри трубы [2].

Система уравнений для давления и температуры имеет вид

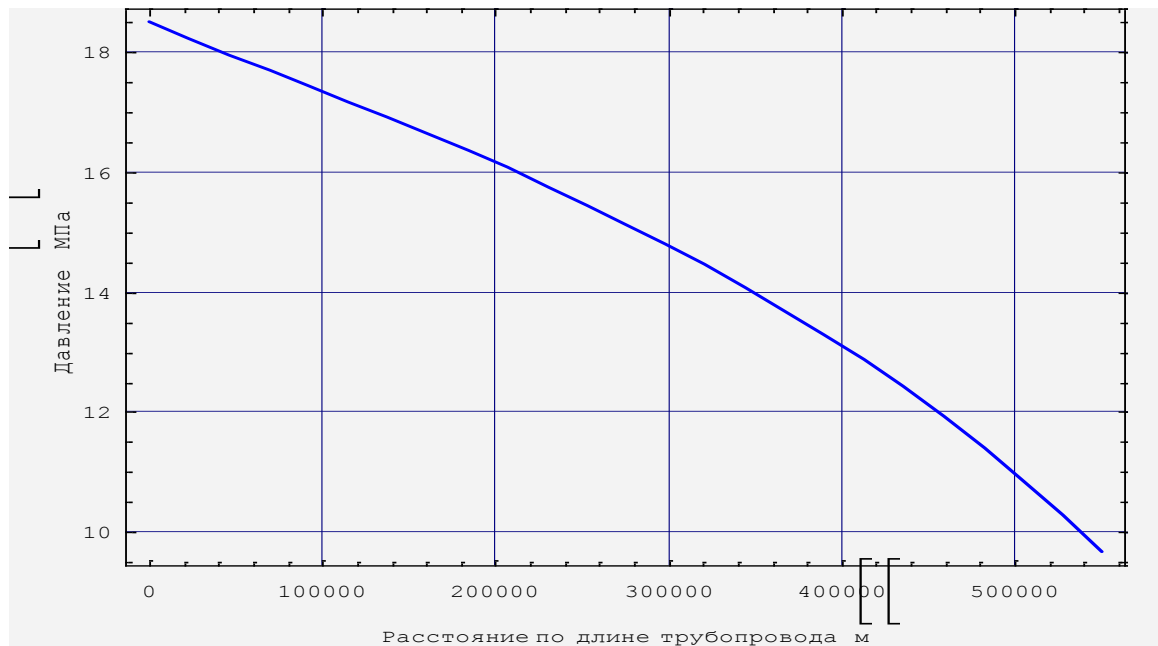
$$eq1 = \frac{dP}{dx} = -\left(\frac{g}{R_a} P \frac{\Delta}{z(P,T)T} \frac{dh}{dx}\right) - \frac{8\rho_a R_a 10^{-12} \lambda \Delta(P,T)T}{\pi^2 P D_0^5} q$$

$$eq2 = \frac{dT}{dx} - Di(P,T) \frac{dP}{dx} = -\frac{g}{10^3 c_g(P,T)} \frac{dh}{dx} - \frac{\pi}{\rho_a 10^3 c_g(P,T) q \Delta} (T - t_b)$$

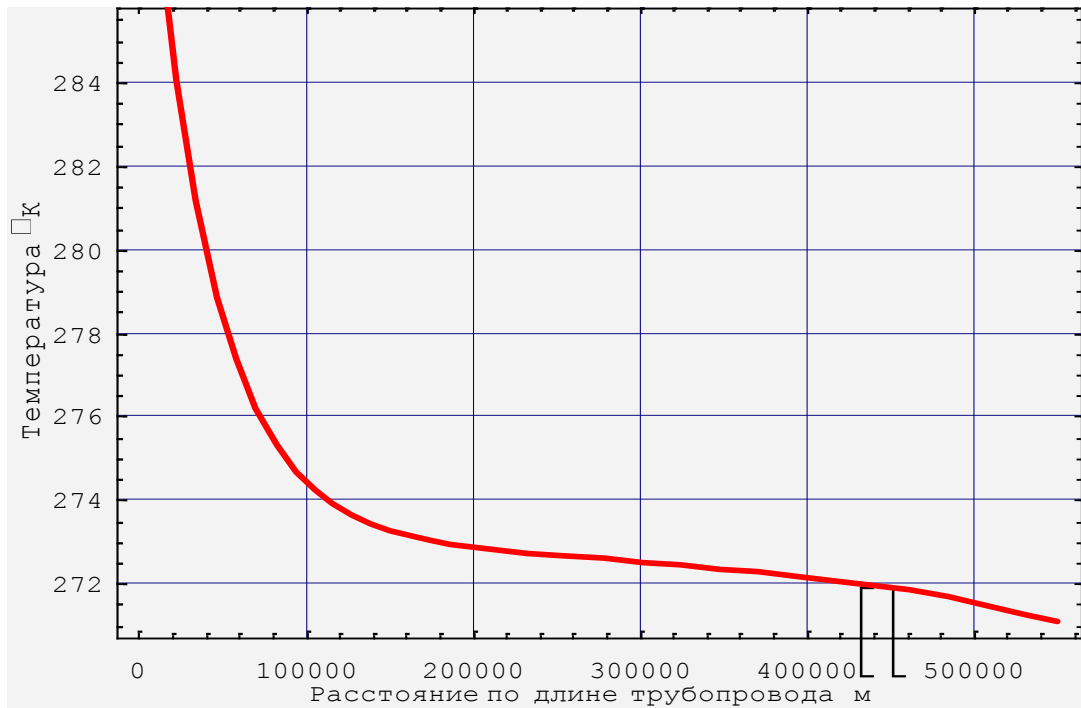
По результатам расчетов построены приведенные ниже графики в зависимости от сезонных изменений температуры на морском дне.

На Рисунке, представленном ниже, построен график распределения давления газа по трубе.

```
sol = NDSolve eq1, eq2, p 0 □ 18.5 , t 0 □ 273 + 20 .
      Δ → 0.7493 ,
      D0 → 976 10-3,
      ρa → 1.206 ,
      Ra → 287.04 ,
      λ → .009654 ,
      q → 820 ,
      g → 9.81 ,
      tb → 273 - 1.2 ,
      DH → 1020 10-3,
      Kc → 7 ,
      p x , t x , x, 0, 550 103
```



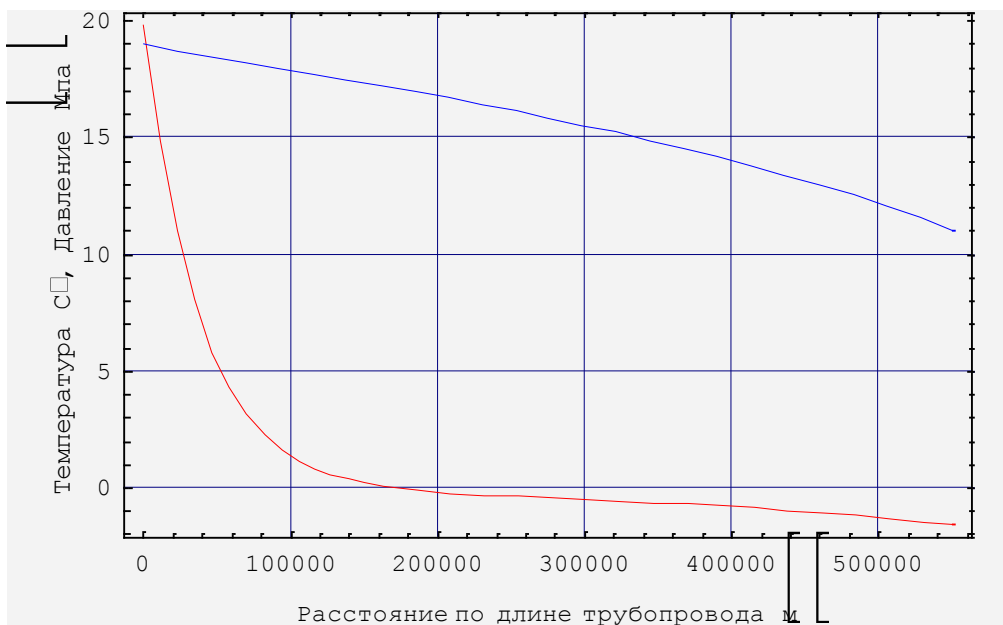
Зависимость температуры  $T(x)$  газа в трубе в зимний период ( $t_b \rightarrow 273+1.2$ ) представлена на графике ниже



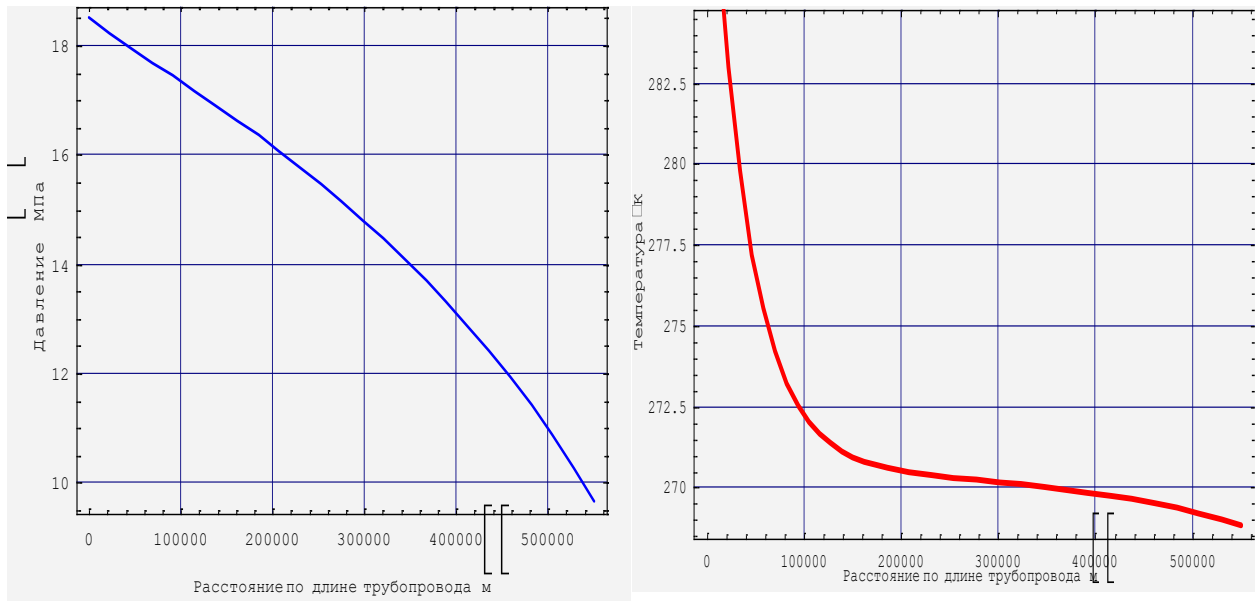
Как видно из приведенных графиков, приведенные зависимости фактически соответствуют закону сохранения массы при стационарном течении. Из представленного графика, температура также как и давление понижаются по трассе, причем градиент понижения температуры меньше чем градиент давления.

Кроме того, падение температуры ниже нуля может способствовать образованию гидратов на поверхности стенки трубы.

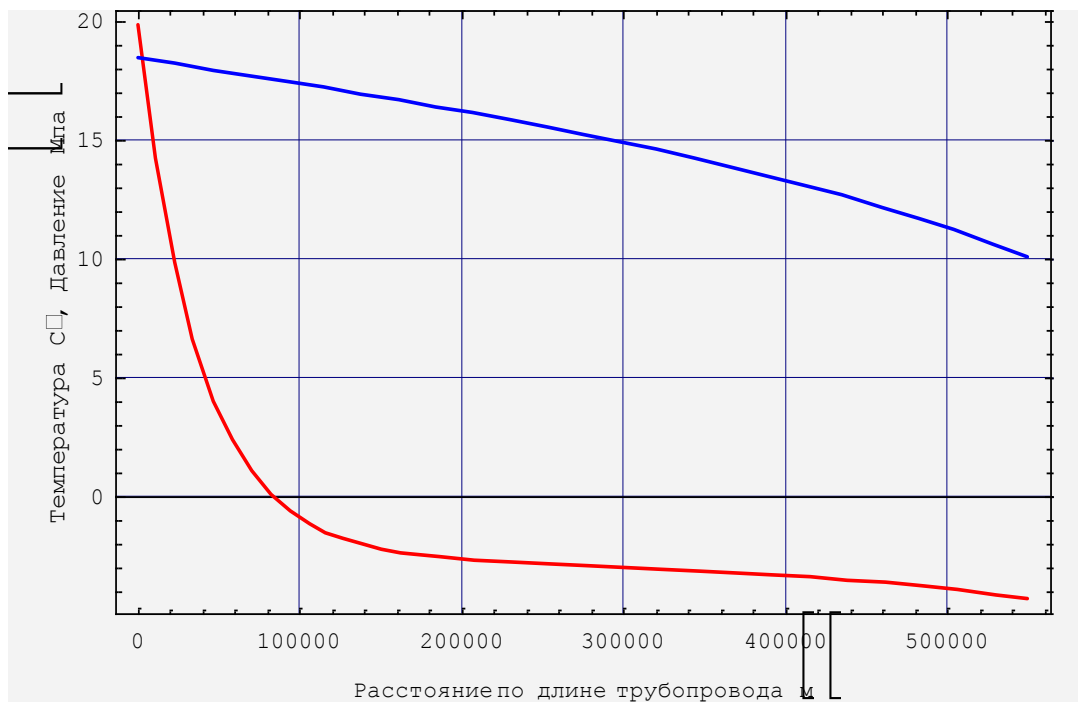
Ниже представлен совмещенный график распределения давления и температуры



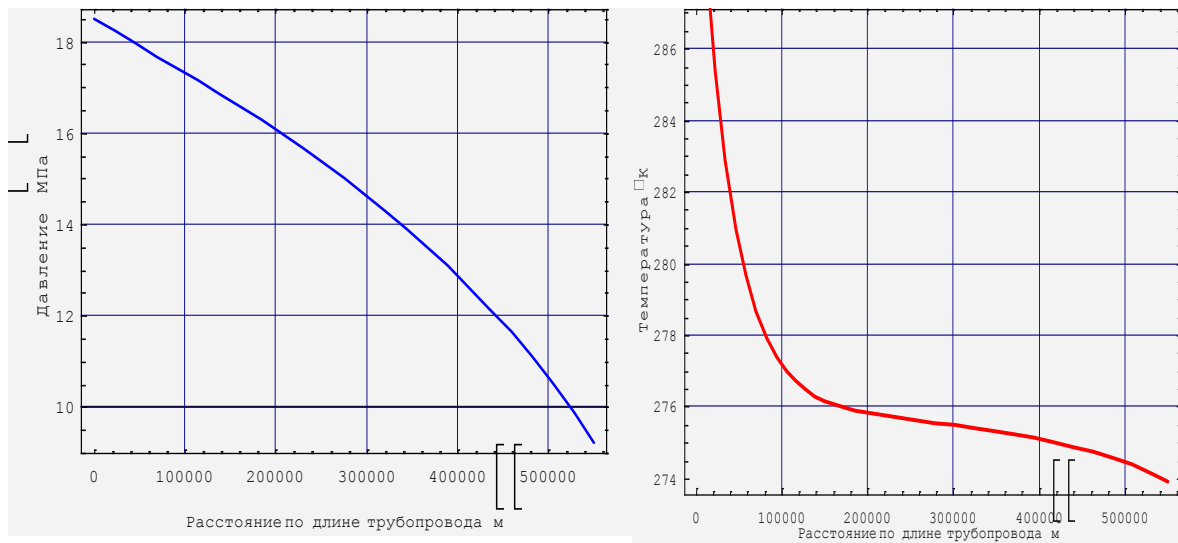
Распределение давления и температуры газа при отрицательных температурах на дне моря ( $t_b \rightarrow 273-1.2$ )- температура на дне моря.



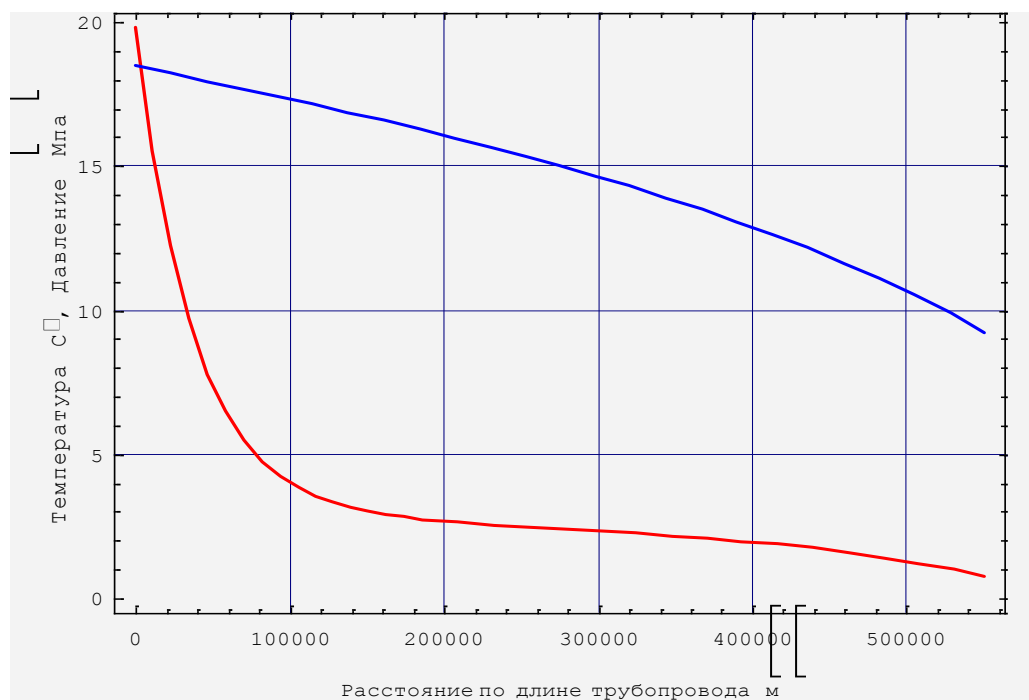
Ниже представлен совмещенный график распределения давления и температуры при отрицательных температурах на дне моря.



Распределение давления и температуры газа на летний период ( $t_b \rightarrow 273 + 4.2$ )



Ниже представлен совмещенный график распределения давления и температуры в летний период.



### Заключение

Из приведенных графиков видно, что падение давления в газопроводе не превышает 10% от начального, а падение температуры не достигает 0°C на протяжении всего подводного участка трубопровода.

Таким образом, повышение рабочего давления менее чем 9.2%, т.е. повышение давления от 15.1 МПа до 16.5 МПа, позволяет избежать понижения температуры в газопроводе ниже 0°C на всем подводном участке.

## Список использованной литературы

1. Lee A. L., Gonzalez M. H. The Viscosity of Natural Gases // J. Petr. Technol. 1966. № 8. Pp. 997-1000.
2. **Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Ч. 1. ОНТП 51-85.** М.: Мингазпром, 1985. 220 с.
3. Губин В. Е., Губин В. В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1982. 296 с.
4. Папуша А. Н. Проектирование морского подводного трубопровода: расчет на прочность, изгиб и устойчивость морского трубопровода в среде Mathematica. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. 238 с.
5. Сухарев М. Г., Карасевич А. М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. М.: Нефть и газ, 2000. 272 с.
6. **Offshore Standard DNV-OS-F101. Submarine Pipelines Systems** [Электронный ресурс]. URL: www.dnv.com

НЕСВЯЗАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ПРЯМОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА  
ДЛЯ РАДИАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЦИЛИНДРА

Шляхин Д. А.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

**1. Постановка задачи.** В настоящей работе исследуется полый анизотропный цилиндр, занимающий в цилиндрической системе координат  $(r_*, \theta, z_*)$  область  $\Omega: \{a \leq r_* \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq z_* \leq h\}$ , и выполненный из пьезокерамического материала с наведенной радиальной поляризацией.

Краевая задача моделирует работу пьезоэлементов в приборах прямого при действии на внешней криволинейной поверхности цилиндра нормальных напряжений  $q(z_*, t_*)$ . Принимаем неэлектропроводные торцевые плоскости свободными от механических напряжений, а радиальные поверхности электропроводными с заземлением закрепленной внутренней ее части.

При решении несвязанной задачи прямого пьезоэффекта используется допущение, что индуцируемое в пьезокерамической среде электрическое поле не оказывает влияние на механические напряжения.

В результате получаем систему дифференциальных уравнений, граничные и начальные условия динамической задачи теории упругости в безразмерной форме [Партон, 1988]:

$$\nabla^2 U - \frac{C_{11}}{C_{33}} \frac{U}{r^2} + \frac{C_{55}}{C_{33}} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{(C_{13} + C_{55})}{C_{33}} \frac{\partial^2 W}{\partial r \partial z} + \frac{(C_{13} - C_{12})}{C_{33}} \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{C_{55}}{C_{33}} \nabla^2 W + \frac{C_{11}}{C_{33}} \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{(C_{13} + C_{55})}{C_{33}} \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial z} + \frac{(C_{12} + C_{55})}{C_{33}} \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0$$

$$z = 0, L \quad C_{13} \frac{\partial U}{\partial r} + C_{12} \frac{U}{r} + C_{11} \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

$$U(r, 0, t) = U_1(r, t), \quad U(r, L, t) = U_2(r, t)$$

$$r = 1, k \quad U(k, z, t) = W(k, z, t) = 0 \quad (1.3)$$

$$C_{33} \frac{\partial U}{\partial r} + C_{13} \left( U + \frac{\partial W}{\partial z} \right) = q(z, t) \Big|_{r=1}, \quad \left( \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) \Big|_{r=1} = 0$$

$$t = 0 \quad U(r, z, 0) = U_0(r, z), \quad \dot{U}(r, z, 0) = \dot{U}_0(r, z) \quad (1.4)$$

$$W(r, z, 0) = W_0(r, z), \quad \dot{W}(r, z, 0) = \dot{W}_0(r, z)$$

где  $U^*(r_*, z_*, t_*)$ ,  $W^*(r_*, z_*, t_*)$  – компоненты вектора перемещений  $(j, k = r_*, \theta, z_*)$ ;  $\varphi^*(r_*, z_*, t_*)$  – потенциал электрического поля;  $\rho$ ,  $C_{ms}$ ,  $e_{ms}$  – объемная плотность, модули упругости, а также пьезомодули электроупругого материала  $(m, s = \overline{1, 5})$ ;  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}$  – диэлектрические проницаемости;

$\{U, W, r, z, L, k\} = \{U^*, W^*, r_*, z_*, h, a\} / b$ ,  $t = t_* b^{-1} \sqrt{C_{33} / \rho}$ ,  $U_1, U_2$  – известные радиальные перемещения торцов на криволинейных поверхностях;  $U_0, \dot{U}_0$ , известные в начальный момент времени перемещения, скорости перемещений;  $\nabla^2 = \partial^2 / \partial r^2 + r^{-1} \partial / \partial r$ .

Точка означает дифференцирование по  $t$ .

На втором этапе исследования рассматривается задача электроупругости, считая известными (найденными) компоненты вектора перемещений  $U, W$ .

В результате получаем такое дифференциальное уравнение и краевые условия для электрического потенциала в безразмерной форме :