

# ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ НА ВЫСОТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА И ЕГО НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Горковенко А.И.

Тюменский государственный нефтегазовый университет

Сезонное промерзание талых грунтов оказывает существенное тепловое воздействие на подземные трубопроводы. Одним из результатов такого воздействия является возникновение морозного пучения промерзающих грунтов – сложного многофакторного физико-химического процесса.

Автором исследовался тепловой режим конденсатопровода «Н-Уренгой – Сургут» на участке длиной 93 км от КС-02 «Пурпейская» до КС-03 «Губкинская» [1]. Расчетами было установлено, что к концу холодного периода (начало мая для климатических условий Нового Уренгоя) при малоснежной зиме под конденсатопроводом формируется слой мерзлого грунта, достигающий толщины 0,6 м в районе, примыкающем к КС-03. При наличии морозного пучения грунтов на этом участке возможно изменение высотного положения конденсатопровода и его напряженно-деформированного состояния.

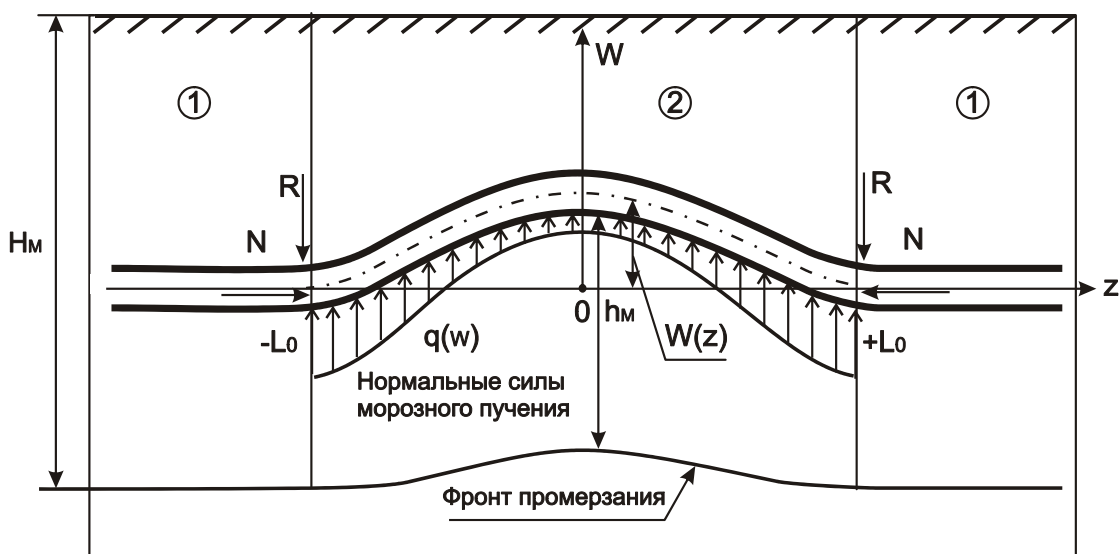


Рис.1. Расчетная схема силового взаимодействия подземного трубопровода с пучинистым грунтом

- 1 – непучинистый грунт; 2 – пучинистый грунт;
- $q(W)$  - погонная величина нормальных сил морозного пучения;
- $R$  - уравновешивающий отпор непучинистого грунта;
- $N$  - продольная сила в стенке трубопровода.

На рис.1 приведена расчетная схема для определения уравнения упругой линии трубопровода под воздействием нормальных сил морозного пучения. Трубопровод имеет прогиб, описываемый функцией  $W(z)$ , а сам он считается жестко заземленным на концах участка пучения длины  $2L_0$ .

В таком случае математическая постановка задачи сводится к уравнению продольно-поперечного изгиба трубопровода с соответствующими краевыми условиями:

$$\begin{aligned} EIW'' + NW'' - q_n &= 0; \\ W(-L_0) = W(L_0) = 0; \quad W'(-L_0) = W'(L_0) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $EI$  - изгибная жесткость трубопровода;

$N$  - продольное усилие в его стенке;

$q_n(W)$  - погонное значение нормальных сил морозного пучения.

Сила  $N$  определяется уровнем продольных напряжений  $\sigma_2$  в стенке трубопровода по известной формуле:

$$N = \sigma_2 F = (-\alpha \Delta t E + \nu \sigma_1) F, \quad (2)$$

где  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  и  $\nu = 0,3$  соответственно коэффициент линейного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона стали [2];

$\sigma_1 = p \frac{D_{\text{вн}}}{2\delta}$  - кольцевое напряжение, вычисляемое через давление конденсата

$p$ , внутренний диаметр  $D_{\text{вн}}$  и толщину стенки  $\delta$  трубопровода;

$\Delta t$  - расчетный температурный перепад, равный разности температуры стенки  $t_{\text{ст}}$  в выбранном сечении трубопровода и температуры захлеста  $t_3$ ;

$F$  - площадь стенки в поперечном сечении.

Если сила  $N < 0$  (сжимающее усилие), то в уравнении (1) она берется по модулю, в случае  $N > 0$  она входит в это уравнение со знаком «-».

Указанные граничные условия предполагают отсутствие деформации в мерзлом непучинистом грунте.

Такое допущение приводит к максимальным дополнительным продольным напряжениям, появляющимся в стенке трубопровода при его изгибе на участке пучения.

Погонная плотность нормальных сил морозного пучения может быть рассчитана двумя способами. Первый из них предполагает линейную зависимость  $q_n(W)$  от перемещения  $W$  [3]:

$$q_n(W) = D_n p_n^{\text{max}} \left( 1 - \frac{W}{h_f} \right) = q_{\text{max}} \left( 1 - \frac{W}{h_f} \right), \quad (3)$$

где  $D_n$  - наружный диаметр трубопровода;

$p_n^{\text{max}}$  - максимальное давление нормальных сил морозного пучения;

$h_f = fh_m$  - величина свободного пучения, определяемая через относительное пучение  $f$  и толщину мерзлого грунта  $h_m$  под трубопроводом.

Второй способ нахождения погонных сил пучения использует квадратичную зависимость  $q_n(W)$  от  $W$  [4]:

$$q_n(W) = D_n p_n^{\text{max}} \left( 1 - \frac{W}{h_f} \right)^2 = q_{\text{max}} \left( 1 - \frac{W}{h_f} \right)^2. \quad (4)$$

При определении величины  $p_n^{\text{max}}$  в статье используется гипотеза Айнбиндера [3], согласно которой  $p_n^{\text{max}}$  равняется пассивному давлению талого

грунта на глубине промерзания  $H_M$ :

$$p_n^{\max} = \gamma H_M \operatorname{tg}^2 (45^\circ + 0,5\varphi_{ep})^2 + 2c_{ep} \operatorname{tg} (45^\circ + 0,5\varphi_{ep}), \quad (5)$$

где  $\gamma$ ,  $c_{ep}$  и  $\varphi_{ep}$  удельный вес, сцепление и угол внутреннего трения талого грунта.

Решение уравнения (1) с различными вариантами определения  $q_n(W)$  находилось численными методами.

В таблице 1 представлены результаты расчетов стрелы прогиба  $W(0)$ , дополнительных  $\Delta\sigma_2(L_0) = \pm 0,5ED_n W''(L_0)$ , полных  $\sigma_{2п}(L_0) = \sigma_2 + \Delta\sigma_2(L_0)$  продольных напряжений и эквивалентного напряжения  $\sigma_{экс} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_{2п} + \sigma_{2п}^2}$  для обеих закономерностей пучения при следующих численных значениях параметров:

$$\begin{aligned} D_n &= 720 \text{ мм}; D_{ен} = 702 \text{ мм}; \delta = 9 \text{ мм}; h_m = 0,5 \text{ м}; \\ H_M &= 2,20 \text{ м}; h_f = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м (среднепучинистые грунты с } f = 0,05); \\ F &= 2,01 \cdot 10^{-2} \text{ м}; EI = 2,87 \cdot 10^8 \text{ Нм}^2; t_{cm} = -1^\circ\text{C}; t_z = -25^\circ\text{C}; \\ p &= 2,5 \text{ МПа}; \sigma_1 = 107 \text{ МПа}; \sigma_2 = -27,1 \text{ МПа}; N = -545 \text{ кН}; \\ \gamma &= 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}; c_{ep} = 28 \text{ кПа}; \varphi_{ep} = 22^\circ; p_n^{\max} = 0,165 \text{ МПа}; q_{\max} = 119 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таблица 1

Параметры напряженно-деформированного состояния трубопровода на участке пучения

Величина \ Длина $2L_0$ , м	5	15	40
Стрела изгиба, см	0,066 (0,065)	2,24 (1,73)	2,87 (2,17)
Дополнительное напряжение $\Delta\sigma_2$ , МПа: верхняя образующая нижняя образующая	-63 (-62) +63 (+62)	-236 (-182) +236 (+182)	-283 (-214) +283 (+214)
Полное продольное напряжение $\sigma_{2п}$ , МПа: верхняя образующая нижняя образующая	-90 (-89) +36 (+35)	-263 (-209) +209 (+155)	-310 (-241) +256 (+187)
Эквивалентное напряжение $\sigma_{экс}$ , МПа: верхняя образующая нижняя образующая	171 (170) 99,6 (99,2)	330 (278) 189 (137)	375 (309) 273 (209)

- Примечания: 1. Значения  $\Delta\sigma_2$  соответствуют экстремальным значениям  $\Delta\sigma_2(z)$ ;  
2. В круглых скобках приведены результаты расчетов для квадратичной зависимости (4);  
3. Предел текучести металла трубы (сталь 09 ГС 2) равен 350 МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что при  $2L_0 \geq 30$  м с учетом зависимости (3) распределения  $W(z)$  и  $\Delta\sigma_2(z)$  носят платообразный характер (площадка пучения), при этом в области плато  $W = h_f = 2,88$  см и  $\Delta\sigma_2 = 0$ , а на концах участка пучения напряжение  $\Delta\sigma_2(\pm L_0)$  стабилизируется на уровне 285 МПа.

Из данных таблицы 1 следует, что при длине участка пучения более 40 м максимальное эквивалентное напряжение превышает предел текучести, что может привести к отказу.

При использовании в расчетах зависимости (4) область плато появляется при  $2L_0 \geq 50$  м со стабилизированным значением  $\Delta\sigma_2(\pm L_0) = 220$  МПа, т.е. воздействие нормальных сил морозного пучения на трубопровод в этом случае является менее интенсивным.

При размере участка  $2L_0 \leq 10$  м («бугор» пучения) обе зависимости дают практически одинаковые результаты.

### Литература

1. Горковенко А.И, Даниэлян Ю.С., Иванов И.А. расчет температурных полей и тепловых потерь трубопроводов большого диаметра в сезонно мерзлых грунтах // Тезисы докладов международной конференции «Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты». Пущино, 2002. - с. 38-41
2. СНиП 2.05.06-85\* Магистральные трубопроводы/Госстрой России – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 60 с.
3. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие . М.: Недра, 1991. – 287 с.
4. Голли О.Р. Некоторые закономерности морозного пучения грунтов и перспективы их использования в строительстве/ Сборник «Проблемы инженерного мерзлотоведения в гидротехническом строительстве» М.: Наука, 1986. – С. 53-61.