

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Юрий Федоров, Александра Саввина,
Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

В результате морозного пучения грунта газопроводы подземного заложения перемещаются в вертикальной плоскости. Неравномерность этих перемещений по длине трубопровода создает изгибные деформации относительно оси трубопровода. Для прогноза напряженно-деформированного состояния подземного газопровода определяем зависимость допустимого радиуса изгиба полиэтиленовой трубы от уровня снижения температуры. Используем трехточечную схему нагружения сосредоточенной силой балки тонкого кольцевого сечения (рис. 1). Эта модель будет наиболее приближена к реальному процессу воздействия сил морозного пучения. Подставляя экспериментально полученные механические характеристики трубного полиэтилена классификации ПЭ 80, находим значения предельного радиуса изгиба по формуле теории упругости:

$$\rho(T) = \frac{E(T) \cdot J_z}{M_x} \tag{1}$$

где $E(T)$ – модуль упругости, выражаемый как функция от температуры; $J_z = \pi D^3 h / 8$ – момент инерции; $M_x = \pi \sigma_{ПВЭ}(T) D^2 h / 4$ – изгибающий момент; D – внешний диаметр трубы, м; h – толщина стенки трубы; $\sigma_{ПВЭ}(T)$ – предел вынужденной эластичности, зависящий от температуры.

Графическое отображение расчета по формуле (1) представлено на рис. 1. Из рисунка видно, что при снижении температуры предельный радиус изгиба нелинейно увеличивается в пределах исследуемого диапазона температур.

На следующем этапе проводим оценку напряжений в газопроводе при локальном пучении грунта, используя предыдущую модель изгиба трубы без учета внутреннего давления. Внутреннее давление до 1,2 МПа на показатели прочности осевого растяжения существенного влияния не оказывает. Общее

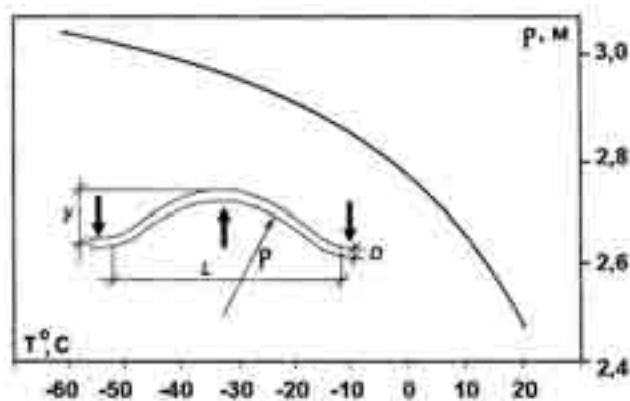


Рис.1. Расчетная кривая предельного радиуса изгиба полиэтиленовой трубы ПЭ 80 в зависимости от температуры

напряжение ($\sigma_{об}$) в осевом направлении запишем в виде суммы напряжений: температурного ($\sigma_{темп}$); изгиба от неравномерного пучения грунта ($\sigma_{изг}$); напряжения, возникающего в результате осевого растяжения при подъеме участка трубы в условиях жесткого защемления остальной части газопровода мерзлым грунтом ($\sigma_{раст}$):

$$\sigma_{об} = \sigma_{темп} + \sigma_{изг} + \sigma_{раст}$$

т.е. в конечном виде:

$$\sigma_{об} = \epsilon_T \cdot E(T) + 6yHT \frac{D}{(L)^2} + 266 \cdot E(T) \cdot \left(\frac{y}{L}\right)^2 \tag{2}$$

где ϵ_T – температурная деформация материала трубы; L – длина участка газопровода, подвергнутого изгибу неравномерным пучением, м; y – величина вертикального перемещения газопровода.

По данным многофакторного анализа температурных деформаций получена номограмма низкотемпературных деформаций частей труб, которая учитывает процесс мгновенной структурной релаксации температурных напряжений, поэтому возникающую температурную деформацию (ϵ_T) определяем по рис. 2, на котором она представлена.

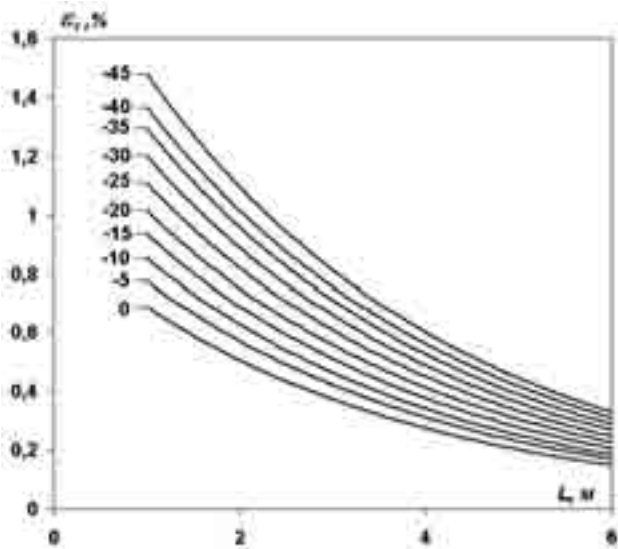


Рис. 2. Номограмма низкотемпературных деформаций частей труб

Используя экспериментальные данные пучения грунтов и уравнение (2), рассчитано осевое напряжение в зависимости от глубины заложения газопровода (табл. 1). Для расчетов использовались данные вертикальных перемещений (y), вызванных пучением, и распределение температур по глубине слоев грунта. В качестве критерия использовался предельный радиус изгиба (ρ) полиэтиленовой трубы ПЭ 80 диаметром 110 мм. Температурная зависимость приведена на рис. 1. При реализации модели изгиба было получено, что радиус кривизны газопровода не достигает критических значений.

Из табл.1 видно, что величина осевых напряжений при воздействии фактора пучения грунта возрастает со снижением глубины заложения. Коэффициент

запаса прочности при этом не достигает нормативного значения 2,8. Следовательно, глубину заложения газопровода можно снизить до 0,8 метра, при этом запас прочности составит $C=4,9$. Такая глубина заложения $H_0=0,8$ м является нормативно предельным ограничением от воздействия внешних гидростатических сил, возникающих от давления массы грунта и колесных транспортных средств на поверхность трубопровода в условиях теплого климата или в летнее время в условиях холодного климата.

По результатам мониторинга общее напряжение реального пучения составляет $\sigma_{об}=2,65$ МПа, оно ниже предела вынужденной эластичности при растяжении в 10,5 раз. Наибольшее давление обжатия мерзлых грунтов (промерзающих с поверхности и с вечной мерзлоты) может достигать 0,3 МПа, что далеко не безопасно для труб ПЭ 80. Величина напряжений отрыва адгезионного прилипания влажного грунта на поверхности полиэтиленовой трубы при смерзании грунта составляет порядка 0,7 МПа. Отсюда следует, что возникающие осевые напряжения будут сдвигать трубопровод в осевом направлении, тем самым снижая общее напряжение, поэтому значения реальных напряжений не будут достигать теоретических.

Задача длительного прогноза напряженно-деформированного состояния подземного газопровода, возникающего при локальном пучении грунта, решается также с помощью модели изгиба трубы, но с учетом вязкоупругих свойств материала. Общую анализируемую осевую деформацию трубы при подъеме некоторого участка L в условиях жесткого защемления остальной части газопровода запишем в виде уравнения Вольтера II рода с разностным ядром:

$$\epsilon(t) = \sigma(t)E^{-1}(T) + \int_0^t \sum_{i=1}^m \frac{l_{oi}}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-s}{\tau_i}\right) \sigma(s) ds,$$

где l_{oi} и τ_i – спектры равновесных податливостей и времен релаксации материала при $i=1, \dots, m$ (m – реологическая характеристика материала, для ПЭ 80 в диапазоне рассматриваемых температур $m=3$).

Таблица 1. Результаты расчетной оценки осевых напряжений от глубины заложения газопровода

Исходные данные						Результаты						
H_0 , м	T , °C	ΔT , °C	L , м	y , м	ϵ , %	E , МПа	$\sigma_{пред}$, МПа	$\sigma_{общ}$, МПа	$\sigma_{сжат}$, МПа	$\sigma_{обж}$, МПа	$\sigma_{сдв}$, МПа	C
0.5	-15	35	6	0.085	0.21	1650	32	3.46	2.47	0.87	6.8	4.70
0.8	-13	33	6	0.07	0.20	1600	31	3.2	2.4	0.84	6.44	4.80
1.0	-10	30	6	0.065	0.19	1550	29.5	2.94	2.32	0.82	6.08	4.85
1.5	-8	28	6	0.045	0.18	1450	28	2.61	2.17	0.77	5.55	5.04

ΔT – разность температур относительно нормальной; $C = \sigma_{пред} / \sigma_{общ}$ – коэффициент запаса прочности

Напряжения в изделии находим из механических условий изгиба, введя функцию вертикальных перемещений $B(t)$, зависящую от временной координаты где $K_1=6DL^{-2}$ и $K_2=2,66L^{-2}$ – известные по формуле (2) коэффициенты, зависящие от линейных размеров

$$\sigma(t) = E(T)[\epsilon_r + K_1 B(t) + K_2 B^2(t)],$$

исследуемого трубопровода. Функция вертикального перемещения газопровода оценивается как $B(t)|_{t=1} = \theta(t)(1 - H_0/\gamma_{кр})$ с ограничениями $H_0 > \gamma_{кр}$ и $B(t)|_{t>1} < \theta(t)$, где H_0 – глубина заложения трубопровода, м; $\theta(t)$ – функция кубического сплайна, отражающая пучение грунта, вычисляется по экспериментальным данным, м.

Результаты модельных расчетов и экспериментальные зависимости представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, наблюдается снижение со временем осевых деформаций газопровода, при этом расчетные результаты вертикальных перемещений достаточно хорошо согласуются с измерениями, полученными при мониторинге подземного газопровода. Температурные изменения упруго-прочностных свойств, эластичность труб (включая сварные соединения) и экспериментальные результаты по температурным напряжениям не ограничивают применения труб ПЭ 80 до температуры -60°C , что является гарантией механической стойкости материала при уменьшении глубины заложения газо-

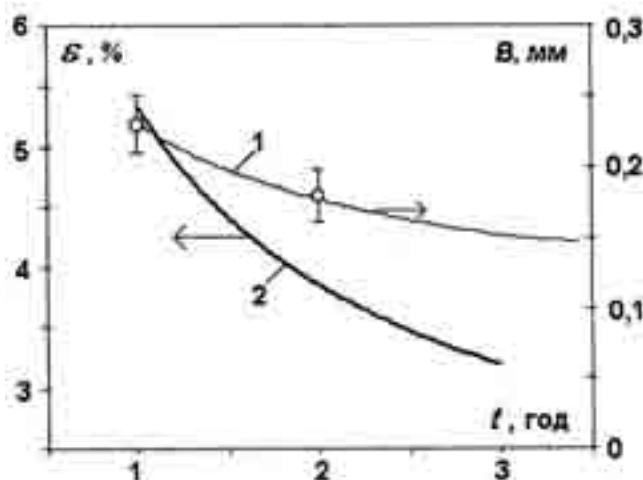


Рис. 3. Временные зависимости осевых деформаций (2) исследуемого участка трубопровода и экспериментально-расчетные показатели вертикальных перемещений трубы (1): сплошные кривые – расчетные; о – экспериментальные данные.

провода.

Таким образом, прогноз напряженного состояния на основе данных морозного пучения грунта показал, что трубопровод из ПЭ 80 не подвергается предельным механическим нагрузкам при воздействии мерзлотных процессов. Для уменьшения затрат на строительство газопроводов рекомендуется снизить глубину заложения полиэтиленовых труб с 1,5 м

Обучение и аттестация

специалистов и сварщиков, работающих с ПЭ трубопроводами

(495) 748-71-20



УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР
www.ctf-m.ru

ООО «ЦентрТехФорм»
Россия, 127273, г. Москва,
Нововладыкинский проезд, д. 12А
e-mail: ctf@pochta.ru