



Умеркин Г.Х. , д.т.н., Дроздов С.А., к.ф-м.н., Копцов В.А. ОАО «ВНИПИэнергопром»

Прочностные и деформационные характеристики теплопроводов имеют определяющее значение при бесканальной прокладке тепловых сетей.

Пенополимерминеральная (ППМ) изоляция представляет собой трехслойную моноконструкцию с переменной по сечению плотностью: внутренний плотный, прилегающий к трубе слой, выполняющий функцию антикоррозионной защиты, срединный – теплоизоляционный, наружный плотный слой, выполняющий функции гидроизоляции и служащий для защиты от механических повреждений.

«ВНИПИэнергопром» совместно с КИСИ (1) был проведен комплекс исследований, в задачу которых входило определение адгезии ППМИ труб, при температурном перемещении под воздействием сезонных или суточных колебаний температуры теплоносителя, а также способности наружного коркового слоя выдерживать без разрушения нагрузки, передаваемые ему через грунт от наземного транспорта.

В программу исследований входили лабораторные испытания, в ходе которых определяли:

- деформационные характеристики наружного коркового и срединного слоев;
- характеристики теплоизоляционного слоя при сдвиге, в том числе разрыв срединного слоя, сдвиг трубы относительно внутреннего коркового слоя, отрыв срединного теплоизоляционного слоя от внутреннего коркового слоя;
- общую жесткость теплопровода;
- коэффициент постели теплогидроизоляционной конструкции.

Испытания на сдвиг имели целью оценить адгезионную прочность контакта стальной трубы с ППМ изоляцией при температурном перемещении трубы. Испытания конструкции на чистый изгиб были проведены для анализа ее поведения в условиях воздействия транспортных нагрузок, а также при возможной просадке грунтового основания.

Коэффициент постели, определение которого также входило в задачу исследований, необходим для расчета теплопроводов, прокладываемых бесканальным способом и в каналах.

Исследуемая ППМИ, хотя и является моноконструкцией, тем не менее, состоит из слоев, значительно различающихся по прочностным и деформационным характеристикам, поэтому для ее испытаний не могут быть применены стандартные методы, используемые при изучении свойств однородных теплоизоляционных материалов (2).

Модуль упругости наружного коркового слоя изоляции из ППМ определяли в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.601-80 (3) на плоских образцах, имеющих рабочую длину 220-260 мм, ширину 30-36 и толщину 3,5-4,5 мм. Разница в размерах объясняется тем, что при вырезании образцов – коркового слоя из теплоизоляционной оболочки, в них появлялись местные дефекты, для устранения которых образцы приходилось шлифовать.





На концы образцов наклеивали наклейки их шпона длиной около 80 мм с уклоном 1:25 (для удобства закрепления образца в захватах разрывной машины). Для измерения деформаций на каждый образец с наружной и внутренней стороны наклеивали тензодатчики. Регистрация деформаций производилась с помощью цифрового измерителя ИДЦ-1а, имеющего чувствительность 10⁻⁵ отн. ед. деформации.

Предварительно для образцов наружного коркового слоя были установлены предел прочности на сдвиг (3,5-4,0 МПа) и разрушающая нагрузка ($F_{max}=0,6-0,7$ кН). При определении модуля упругости образцы подвергали троекратному нагружению-разгрузке. На первой ступени нагрузка составляла 0,05 кН, на каждой последующей ее увеличивали на 0,1 кН. Изменение нагрузки в диапазоне 0,05-0,35 кН (15-50% F_{max}) сопровождалось перемещением образца со скоростью 1 мм/мин. После испытаний каждой серии образцов выполняли статистическую обработку полученных результатов в соответствии со стандартной методикой (3). В итоге было установлено, что модуль упругости наружного коркового слоя исследуемой ППМИ изменяется в пределах 1500-2000 МПа.

Предел прочности на сдвиг определяли на образцах ППМИ, нанесенной на трубы диаметром 57 мм. Общая толщина изоляционной конструкции составляла 45 мм, толщина внутреннего и наружного корковых слоев – по 4,5 мм. На трубах оставляли цилиндры из тепловой изоляции длиной 100-200 мм. К верхнему торцу изоляции пришлифовывали опорное кольцо внутренним диаметром 110 мм, через которое испытательная нагрузка передавалась на тепловую изоляцию. Для устранения перекосов металлическая труба располагалась на шарнирной опорной плите. При разрушающей нагрузке 1/2 средней части теплоизоляции происходило скалывание слоя изоляции по конической поверхности. Нагружение образца сопровождалось его перемещением со скоростью 1 мм/мин.

По мере увеличения испытательной нагрузки напряжения в образцах медленно возрастали до максимальных и затем начинали уменьшаться, однако видимых признаков разрушения на поверхности образцов не наблюдалось. После того, как нагрузка достигала 70-80% F_{max} происходило разрушение структуры изоляционного материала. Как показали эксперименты, исследованные образцы имели прочность на сдвиг в пределах 0,25-0,3 МПа.

Для определения интегральной жесткости теплопровода и фактического модуля упругости пористого слоя прямолинейные отрезки труб с изоляцией из ППМИ были испытаны на чистый изгиб. Испытания проводили на стационарной установке с базой $l=1$ м, нагрузка F прикладывалась на расстоянии $a=0,5$ м от опор (рис.1). Нагружение осуществлялось с помощью специального гидравлического устройства через нагрузочную балку; перемещения конструкции измерялись с помощью индикаторов часового типа и прогибомеров, напряжения в наружном корковом слое изоляции и в наружном поверхностном слое стальной трубы – с помощью тензодатчиков. При проведении экспериментов система сталь-изоляция подвергалась циклическому нагружению и разгрузке в режиме упругой деформации. Наружный диаметр стальной трубы $D_n=57$ мм, толщина стенки трубы $\delta_t=4$ мм.





Наружный диаметр трубы с нанесенной на нее изоляцией толщиной 140 мм, толщина наружного и внутреннего корковых слоев по 4,5 мм (рис.1).

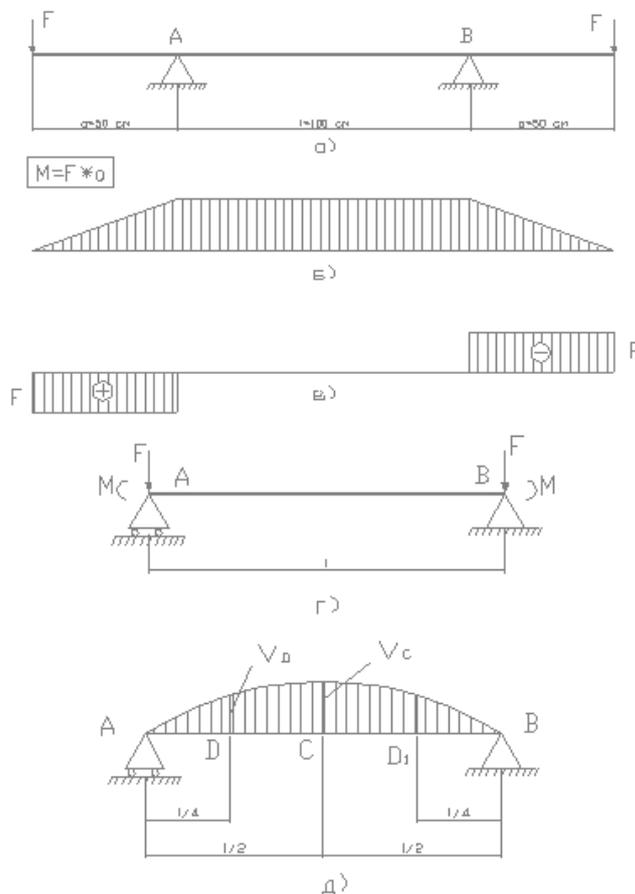


Рисунок 1. Расчетные схемы испытаний на чистый изгиб прямолинейных участков теплопровода: а – схема нагружения; б – эпюра изгибающих моментов; в – эпюра поперечных сил; г – эквивалентная схема нагружения; д – эпюра прогибов.

Интегральная жесткость сечения теплопровода на изгиб рассчитывалась на основе измеренных при проведении экспериментов прогибов с использованием зависимостей, принятых в сопротивлении материалов. Так, для схемы, показанной на рис.1, теоретический прогиб u_c в точке С определяли из выражения

расчет прогиба

$$u_c = \frac{F a l^2}{8 \Sigma (E_i I_{iy})} = \frac{M l^2}{8 \Sigma (E_i I_{iy})},$$

(1)





где $M=Fa$ – изгибающий момент; $\Sigma(E_i I_{iy})$ – суммарная жесткость сечения на изгиб (приведенная); E_i – модуль нормальной упругости i -го слоя; I_{iy} – момент инерции i -го слоя относительно горизонтальной оси y .

Из формулы (1) следует:

$$\Sigma(E_i I_{iy}) = \frac{M^2}{8\Delta v_c},$$

(2)

Для определения суммарной приведенной жесткости всего сечения теплопровода использовали выражение

$$\Sigma(E_i I_{iy}) = E_{тр} I_{тр} + E_{н.кор.} I_{н.кор.} + E_{в.кор.} I_{в.кор.} + E_{пор.} I_{пор.}, \quad (3)$$

где $E_{тр}$ – модуль нормальной упругости стальной трубы; $I_{тр}$ – осевой момент инерции стальной трубы; $E_{н.кор.}$, $E_{в.кор.}$ – модули нормальной упругости наружного и внутреннего корковых слоев изоляции; $I_{н.кор.}$, $I_{в.кор.}$ – осевые моменты инерции наружного и внутреннего корковых слоев; $I_{пор.}$ – осевой момент инерции срединного пористого слоя; $E_{пор.}$ – модуль нормальной упругости срединного пористого слоя.

Моменты инерции слоев комплексного сечения находили по формуле

$$I_{iy} = \frac{\pi(D_{in}^4 - D_{is}^4)}{64},$$

(4)

где D_{in} и D_{is} – соответственно наружный и внутренний диаметры i -го слоя комплексного сечения.

Модуль упругости материала трубы определяли по стандартной методике, модули упругости внутреннего и наружного корковых слоев изоляции – по приведенной выше методике (для образцов исследуемой серии, $E_{в.кор.} = E_{н.кор.} = 1715$ МПа).

Для расчета интегральной жесткости всего сечения на изгиб использовали зависимость вида

$$\Sigma(E_i I_{iy}) = \frac{\Delta F_i a l^2}{8\Delta v_c},$$

(5)

где Δv_c – усредненный прирост прогиба в точке C , вызванный приростом нагрузки ΔF_i на следующей ступени нагружения.

После определения интегральной жесткости всего сечения теплопровода с использованием (3) рассчитывали модуль нормальной упругости срединного пористого слоя:





Прочностные характеристики теплоизоляционной конструкции в ППМИ

$$E_{пор} = \frac{\Sigma(E_i I_{iy}) - (E_{ст} I_{ст} + E_{н.пор} I_{н.пор} + E_{е.пор} I_{е.пор})}{I_{пор}}$$

При проведении экспериментов прогибы теплопровода на участке чистого изгиба АВ (рис. 1) измеряли в трех точках (D, C, D1). На основе этих данных рассчитывали среднюю интегральную жесткость сечения теплопровода и модуль нормальной упругости срединного пористого слоя. После статической обработки результатов испытаний серии из пяти образцов были определены исследуемые характеристики сечений и интегральная приведенная жесткость теплопровода с ППМИ при условном диаметре стальной трубы 50 мм (табл.1.). Усредненный модуль упругости срединного слоя изоляции был равен 389 МПа (полученные при испытании пяти образцов значения Eпор колебались в диапазоне 300-500 МПа).

Как видно из таблицы, ППМИ увеличивает общую жесткость сечения на изгиб трубопровода Dy=50 мм в среднем на 20%, что следует учитывать при расчетах теплопроводов на прочность.

Таблица 1.

Элементы комплексного сечения теплопровода	Наружный диаметр Dн, см	Внутренний диаметр Dв, см	Осевой момент инерции Iij, см ⁴	Модуль упругости Eijx10 ³ , Мпа	Жесткость на изгиб Eijx10 ³ , Н·м ²
Стальной трубопровод	5,7	4,9	23,5	20,58	48,336
Внутренний корковый	6,5	5,7	35,8	1,715	0,614
Наружный корковый	14,0	13,2	395,4	1,715	6,781
Срединный пористый	13,2	6,5	1402,6	0,389	5,456
Σ(EijIij)	-	-	-	-	61,187

Критерием работоспособности системы металл-изоляция является ее деформативность. Для оценки адгезионной прочности системы были проведены испытания прямолинейных образцов труб с ППМИ Dy=50 мм. Эксперименты показали, что изоляция деформировалась без разрушения до момента, пока прогиб посередине пролета, равного 1 м, не достигал 8-9 см. При дальнейшем увеличении нагрузки и прогибов в изоляции в средней четверти пролета образовывались две поперечные трещины, но происходило это после потери стальной трубой несущей способности и образования в изоляции пластического шарнира. Это позволяет сделать вывод, что при работе трубопровода в период эксплуатации в упругой стадии адгезионный контакт между ППМИ и стальной трубой не будет нарушен.

Коэффициент постели определялся на прямолинейных отрезках труб с ППМИ длиной 0,5 м, забетонированных в жесткую форму. Интенсивность нагружения соответствовала изменению температурного режима теплопровода на 30°С/ч (для данных образцов она соответствовала перемещению 0,833-0,120 мм/мин). Испытания, проведенные для теплопроводов условными диаметрами 50 и 100 мм, показали, что коэффициент постели теплогидроизоляционной конструкции даже при небольшой интенсивности деформирования, соответствующий изменению температуры на 30°С, оказывается не ниже 45-50 МН/м³. Прочность на сжатие образцов ППМИ,





ПолимерТехИнвест

Прочностные характеристики теплоизоляционной конструкции в ППМИ

определенная при испытаниях, оказалась достаточно высокой и составила 1,5-2 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов А.М. , Ковылянский Я.А. Исследование прочностных и деформационных характеристик теплоизоляционной конструкции из полимербетона. М., Энергетическое строительство, 1992, № 10, с.30-34.
2. Ковылянский и др. Снижение тепловых потерь при использовании полимербетона в качестве изоляции подземных теплопроводов. Энергетическое строительство, 1982, № 9, с. 32-34.
3. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний материалов с полимерной матрицей (композитов); метод испытаний плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М., Издательство стандартов, 1980.

