НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 51–55

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.328/345

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ГРУНТОВОЙ МОДЕЛИ

В. В. Пазиняк, Н. Б. Кутвицкая, М. А. Минкин

ФГУП „Фундаментпроект", 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, стр. 1, Россия

Приведено описание случаев выталкивания подземных холодных трубопроводов и свайных опор трубопроводов при замерзании талых грунтов в зоне вечной мерзлоты. Выполнен крупномасштабный эксперимент (модель в натуральную величину) по определению давления и величины выталкивания свай из промерзающего замкнутого объема грунта.

Трубопроводы, вечная мерзлота, сваи, замерзание грунтов в замкнутом объеме

THE EXPERIMENTAL RESEARCHES ON PIPELINE STABILITY FOR LARGE-SCALE SOIL MODEL

V. V. Pazinyak, N. B. Kutvitskaya, M. A. Minkin

Institute „Fundamentproekt", 125993, Moscow, Volokolamskoje sh., 1, build. 1, Russia

The cases of cold buried pipeline and pile extrusion under the thawed soil freezing in the permafrost zone have been considered. The natural-scale experiment for the pore pressure and the value of pile extrusion under soil freezing in closed system has been carried out.

Pipelines, permafrost, piles, soil freezing in closed system

ВВЕДЕНИЕ

В трубопроводном транспорте углеводородов в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) весьма уязвимыми являются участки переходов трубопроводов через водотоки. Даже небольшие реки, часто встречающиеся в Западной Сибири, вызывают значительные проблемы, связанные с обеспечением прочности и герметичности трубопроводов.

На участках подземных переходов трубопроводов через реки происходит постепенное вытеснение „холодных" трубопроводов из подводной траншеи на поверхность, вследствие чего трубопровод приходит в аварийное состояние.

Опорные конструкции надземных переходов трубопроводов через реки очень часто теряют устойчивость, нередко имеют место случаи аномального сезонного выталкивания свайных опор в зимний период, и по этой причине они приходят в аварийное состояние.

Нормативные документы, в том числе СНиП, ВСН и другие нормы и рекомендации, не учитывают подобных воздействий на сооружения, которые реально существуют в природных условиях.

НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

На рис. 1 зафиксирован пример выталкивания „холодного" трубопровода диаметром 325 мм подводного перехода через р. Марелова-Яха. Следует отметить, что переход был построен в полном соответствии с проектом, уложен в траншею на глубину 1 м ниже дна реки и засыпан. Продуктопровод всегда обладал отрицательной плавучестью, кроме того, был забалластирован в русле реки железобетонными утяжелителями.

На рис. 2 приведен характерный пример разрушения надземной опоры газопровода (диаметр 1420 мм), зафиксированный на надземном переходе через старицу р. Ен-Яха. Четырехсвайная опора состоит из металлических прокатных элементов – труб диаметром 325 мм. Опора выдавлена из грунта при его промерзании.

Многолетний опыт эксплуатации трубопроводов в криолитозоне показал, что трубопроводы на ряде участков, таких как мелкие водотоки, обводненные низины, ложбины, имеют аномально большие вертикальные деформации, величина которых намного превышает величину нормативного морозного пучения грунтов при промерзании слоя сезонного оттаивания.

© В.В. Пазиняк, Н.Б. Кутвицкая, М.А. Минкин, 2006

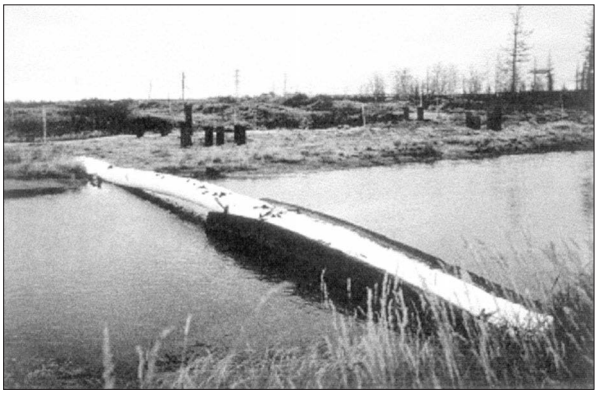

Рис. 1. „Холодный" конденсатопровод, вытолкнутый из подводной русловой части р. Марелова-Яха.

Рис. 2. Подъем (на 1,5 м) свай надземного перехода газопровода через старицу р. Ен-Яха.

Рис. 3. Вытеснение дюкера с холодным газом и чугунными утяжелителями на р. Арка-Таб-Яха.

На третьей нитке подводного перехода газопровода (диаметр 1420 мм) через р. Арка-Таб-Яха при транспортировке охлажденного газа произошло выдавливание дюкера с чугунными утяжелителями вверх из подводной траншеи (рис. 3).

Следует отметить, что приведенные примеры – не единичные проявления нарушений устойчивости трубопроводов в криолитозоне. Такого рода деформации носят массовый характер [*Хренов, 2005*].

Можно предположить, что основная причина описанных деформаций – повышенное поровое давление, возникающее при промерзании замкнутых объемов грунта в условиях закрытой системы [*Гречищев, 2004; Grechishchev, 1994*].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Для оценки устойчивости свайных опор трубопроводов на промерзающих замкнутых объемах грунта был поставлен эксперимент на крупномасштабной модели практически в натуральную величину, что позволило получить результаты в реальных масштабах времени, температуры, давлений и деформаций.

Исследования проведены на крупномасштабном фрагменте, который в дальнейшем будем называть грунтовой моделью. Эксперимент на грунтовой модели проведен с целью проверки возможности развития давлений, способных вытолкнуть из грунта сваю или трубопровод, при промерзании талых зон в основаниях под малыми водотоками и в обводненных низинах.

В модели были созданы условия промерзания обводненных грунтов, максимально приближенные к условиям промерзания локальных областей талых грунтов, которые могут формироваться в основании водотоков. Для моделирования выбран фрагмент грунтового основания, представляющий собой цилиндр, для которого обеспечивается практически равномерное всестороннее промерзание грунта. Геометрические параметры исследуемого фрагмента сопоставимы с параметрами промерзающих областей талых грунтов, наблюдаемых в натурных условиях. Всестороннее промерзание талых грунтов в модели происходит под действием наружного воздуха при температурах, более низких, чем в грунте в натурных условиях, что, не влияя на качественную картину промерзания, несколько ускоряет сам процесс.

На фрагменте моделировался как процесс промерзания грунта в замкнутом объеме, так и действие этого процесса на сваи и горизонтальные трубопроводы. По имеющимся данным, модельных исследований процессов, подобных рассматриваемому, не проводилось.

Модель представляет собой вертикально стоящую цилиндрическую емкость диаметром

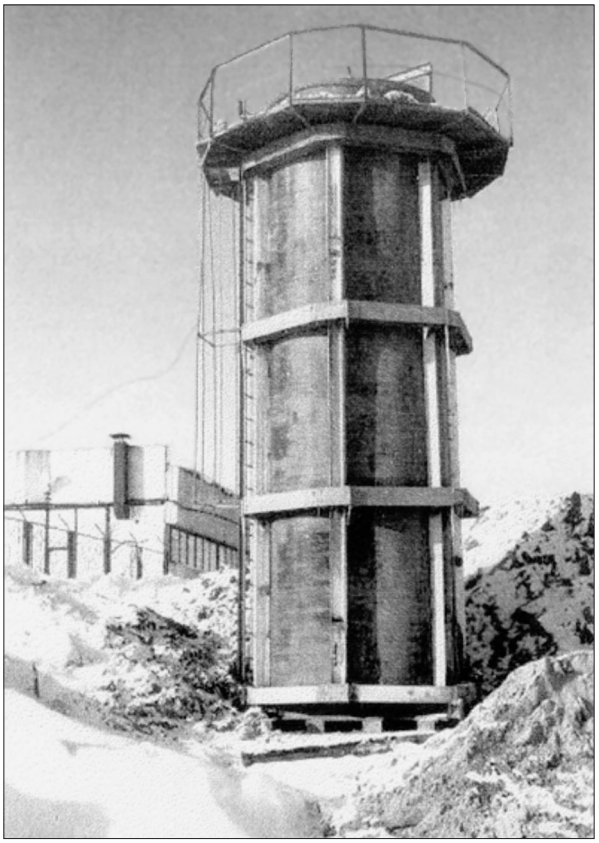

Рис. 4. Общий вид грунтовой модели.

2700 мм и высотой 8800 мм. Общий вид ее приведен на рис. 4.

Емкость заполнялась русловым аллювиальным мелким и пылеватым водонасыщенным грунтом, имеющим начальную температуру $T = +4$ °С. Физические характеристики грунта, осредненные по объему, следующие: плотность $p = 1{,}78$ г/см^3, плотность скелета $p_{ск} = 1{,}45$ г/см^3, коэффициент пористости $\varepsilon = 0{,}83$, суммарная влажность $W = 23$ %.

В верхней части модели на глубине 1,5 м горизонтально расположен отрезок трубы диаметром 159 мм, имитирующий подземную схему прокладки трубопровода. Вертикально установлены два отрезка труб диаметром 219 мм, заглубленные в грунт на 4000 и 7500 мм, имитирующие сваи. Разным заглублением моделей свай моделируется образование замкнутого объема талых грунтов в среднем по высоте сечении сваи и в зоне нижнего конца сваи (короткая свая).

Для измерения температуры грунта по высоте модели были установлены 9 групп термокарманов из труб, в которых проводились измерения с помощью технических термометров. Каждая груп-

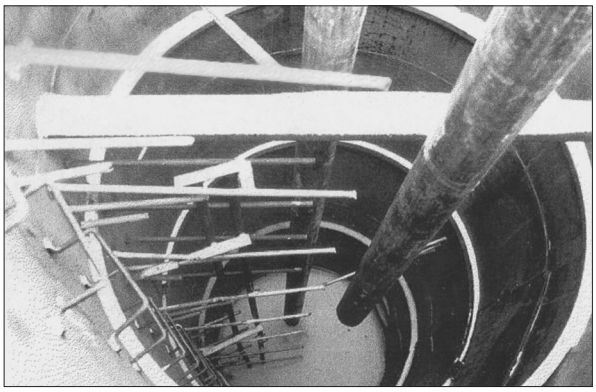

Рис. 5. Оснащение емкости для эксперимента (*вид сверху*).

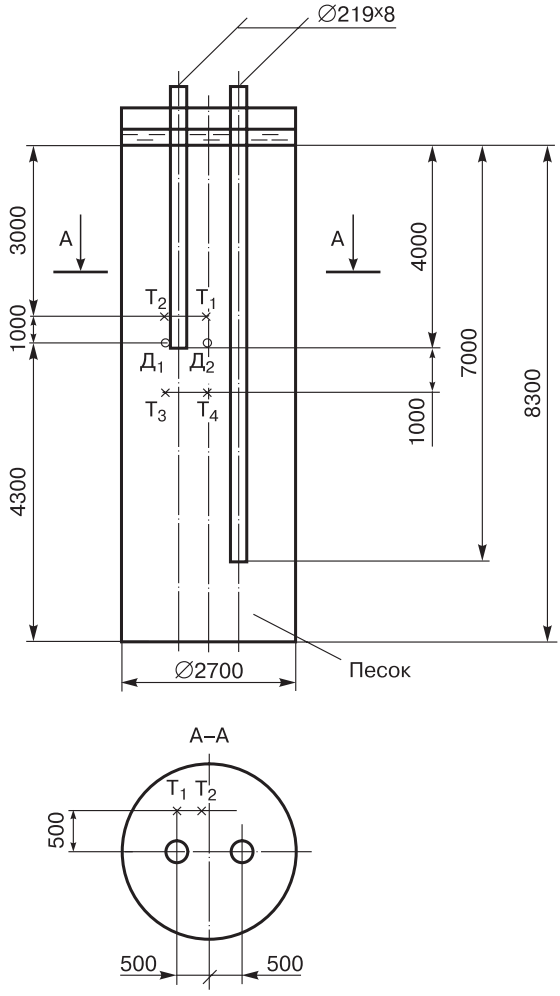

Рис. 6. Схема модели и расстановка датчиков давления и температуры.

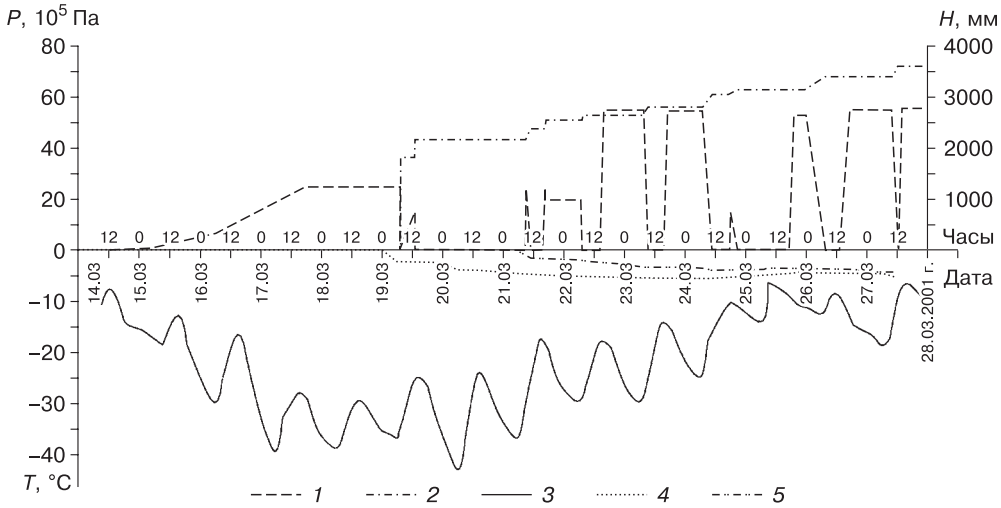

Рис. 7. График изменения давления в грунте и подъем сваи в зависимости от температуры:

1 – давление (*P*) по показаниям датчика $Д_1$; *2* – подъем головы сваи (*H*); *3* – температура наружного воздуха; *4*, *5* – температура грунта, измеренная датчиками T_1 и T_2 соответственно.

Рис. 8. Общий вид грунтовой модели после завершения эксперимента.

па состояла из трех термокарманов, расположенных в центре, на расстояниях половины и четверти радиуса поперечного сечения емкости. В верхней части модели установлены реперы для измерения перемещений горизонтальной трубы и моделей свай. В центральной части внутренней полости модели расположены четыре датчика типа „сапфир 22 ДИ-вн" для регистрации давления, развивающегося в процессе промерзания грунта. На рис. 5 показан вид сверху модели перед загрузкой грунта. Промораживание грунта модели осуществлялось за счет всестороннего охлаждения внешней поверхности модели холодным наружным воздухом.

На рис. 6 показана схема размещения измерительной аппаратуры.

Кривая изменения температуры наружного воздуха во время проведения эксперимента по данным метеостанции аэропорта г. Новый Уренгой представлена на рис. 7. Эксперимент проводился с 14 по 28 марта 2001 г. В процессе эксперимента из-за технических неполадок количество точек, в которых измерялись температура и давление, сократилось. Измерения давления проведены в двух точках ($Д_1$, $Д_2$), температуры – в четырех (T_1–T_4) (см. рис. 6). Перемещения измерялись регулярно и в полном объеме.

На рис. 7 приведены графики температур, давления и перемещений для модели сваи, заглубленной на 4000 мм. Аналогичные графики, полученные по второму датчику измерения давлений ($Д_2$) и в двух других температурных створах (T_3, T_4), в пределах точности измерений совпали с представленными на рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. При охлаждении наружной поверхности модели наблюдалось всестороннее промерзание талых грунтов в направлении от стенок емкости к ее центру. При промерзании талые грунты сохранялись в виде замкнутого объема грушевидной формы в верхней части модели.

2. По мере продвижения фронта промерзания к центру талой зоны возникло и стало постепенно возрастать давление в грунте, что зафиксировал датчик, расположенный в этой зоне. Когда давление достигло $25 \cdot 10^5$ Па, датчик перемещений показал перемещение короткой сваи, острие которой оказалось внутри сформировавшейся талой зоны, на 1820 мм. После скачкообразного подъема сваи произошла „разгрузка", и давление в талой зоне резко упало. В дальнейшем цикл повышение давления–скачкообразный подъем сваи–падение давления повторялся до конца эксперимента.

Продолжительность эксперимента составила 14 дней. Характерно, что первый выпор сваи произошел до полного промерзания талой зоны, а последний – после практически ее полного промерзания, т. е. при отрицательных температурах грунта в месте заделки сваи. Суммарное перемещение вверх короткой сваи составило 3520 мм, что и зафиксировано на рис. 8.

Характер перемещения короткой сваи напоминал движение плунжера, где в качестве источника давления выступало замкнутое пространство талой зоны при постоянном смерзании и уменьшении в объеме, а в качестве плунжера – короткая свая из трубы диаметром 219 мм.

3. Вторая (длинная) свая за весь период эксперимента переместилась вверх лишь на 2 мм. Это, по-видимому, объясняется тем, что до формирования замкнутой талой зоны и возникновения в ней повышенного давления в нижней части сваи произошло ее смерзание с грунтом, и силы смерзания в сумме с силами трения по боковой поверхности сваи превосходили выдавливающее усилие. Кроме того, возможно, что талая зона располагалась несколько асимметрично по отношению к вертикальной оси модели и действие выталкивающего давления на длинную сваю было меньше, чем на короткую.

4. Горизонтальная труба диаметром 159 мм, до начала действия сил давления смерзшаяся с грунтом, который в свою очередь смерзся с металлическими стенками емкости, под действием давления, возникшего при промерзании талой зоны, прогнулась вверх в середине на 2 мм (стенка трубы из стали 09Г2С толщиной 4 мм).

Эксперимент показал, что аномальное выдавливание свайных опор трубопроводов, а также заглубленных „холодных" трубопроводов на переходах через малые водотоки и обводненные ложбины может происходить из-за возникновения давления при промерзании талых замкнутых областей грунта, сформировавшихся при неравномерном сезонном оттаивании–промерзании.

Необходимо отметить, что аномальное выдавливание свай в криолитозоне не является непосредственным следствием обычного „нормативного" пучения грунтов, а происходит в результате образования замкнутого талого пространства, в котором продолжается процесс фазового превращения воды в лед при аномально высоком давлении поровой влаги.

Давление в замкнутом пространстве может достигать критических значений, при которых происходит разрушение свода замкнутого пространства в наименее прочной верхней части с выталкиванием грунтов свода совместно с построенными в этой зоне подземными трубопроводами, а также возможно выдавливание вверх свайных оснований надземных трубопроводов.

Литература

Гречищев С.Е. Оценка сил криогенного выпучивания холодных подземных трубопроводов //Тезисы докл. Междунар. конф. „Криосфера в нефтегазоносных провинциях" (23–25 мая 2004 г.). Тюмень, 2004, с. 133–134.

Хренов Н.Н. Проблемы обеспечения надежности газопроводов в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 1, с. 81–88.

Grechishchev S.E. Evaluation of Interaction of buried chilled pipeline with soils in taliks using thermodynamic model // Cold Regions Engineering: Proc. of 7th Intern. Cold Regions Eng. Spec. Conf. (March 7–9, 1994). Edmonton, Canada, Can. Soc. for Civil Eng., 1994, p. 805–814.

Поступила в редакцию
13 сентября 2005 г.