УДК 621.644.073

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АНКЕРНЫХ ПРОТИВОПУЧИННЫХ СВАЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

[1]Тарасенко А.А., [2]Грученкова А.А., [1]Чепур П.В., [3]Юргевич А.В.

[1]Тюменский индустриальный университет, Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com;
[2]Сургутский институт нефти и газа, филиал ТИУ в г. Сургут, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru;
[3]ООО НПП «Симплекс», Тюмень, e-mail: simplex_rvs@mail.ru

В настоящей статье рассмотрены проблемы, связанные с возникающими перемещениями конструкций в результате морозного пучения грунтов основания и препятствующие надежной и безопасной транспортировке углеводородных ресурсов на территориях, представленных многолетнемерзлыми грунтами. Для оценки эффективности работы анкерной сваи авторами был произведен расчет предлагаемой конструкции сваи по методике ВНИИГАЗ и традиционной металлической сваи. Расчет производился для свай диаметром 325 мм длиной 5 и 10 м. Анализ результатов проверочных расчетов и их корреляция показали, что эффективность работы анкерной сваи отличается от традиционной металлической менее чем на 6%. Однако по результатам натурных испытаний в условиях ММГ на статические нагрузки установлено, что эффективность сваи с анкером составила до 180% по отношению к традиционной гладкой стальной свае. Такое расхождение теоретических и практических результатов можно оправдать несовершенством методики расчета анкерных свай. Поэтому с целью снижения вероятности ошибок при проектирования свайных опор в условиях многолетнемерзлых грунтов и предотвращения возникновения предельных состояний в конструкциях методику расчета анкерных свай в части определения удерживающих сил необходимо доработать.

Ключевые слова: трубопровод, многолетнемерзлые грунты, анкерная свая, металлическая свая, морозное пучение

ASSESSMENT OF ANCHOR UNHEAVING PILES EFFECTIVENESS IN THE CONDITIONS OF PERMAFROST SOILS

[1]Tarasenko A.A., [2]Gruchenkova A.A., [1]Chepur P.V., [3]Yurgevich A.V.

[1]Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com;
[2]Surgut Oil and Gas Institute, branch of TIU in Surgut, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru;
[3]OOO «Simplex», Tyumen, e-mail: simplex_rvs@mail.ru

In this article considered the problems associated with emerging displacements of structures, as a result, of base soils frost heaving and hindered reliable and safe transportation of hydrocarbon resources in the territories represented by permafrost soils. To assessment the effectiveness of the anchor pile the authors calculated the proposed structure by the method design VNIIGAS and the traditional metal pile. The calculation was made for piles with a diameter of 325 mm, 5 and 10 m in length. Analysis of calculation results and their correlation calculations showed that the efficiency of the anchor pile differs from traditional metal pile less than 6%. However, the results of field tests for static load on permafrost soils established that the efficiency of anchor pile was to 180% compared to the traditional smooth steel pile. This discrepancy between the theoretical and practical results can be justified by the imperfection of anchor piles calculation method. Therefore, in order to reduce probability of mistakes at the design of pile supports in the permafrost soils conditions and to prevent limit states in structures, the method of calculating the anchor piles in the part of determining the holding forces must be modified.

Keywords: pipeline, permafrost soils, anchor pile, metal pile, frost heave

Начавшееся в 1960–1970-х гг. освоение новых месторождений нефти и газа на территориях, представленных многолетнемерзлыми грунтами, на сегодняшний день привело к значительному расширению сети трубопроводов [7]. Уже на стадии проектирования сооружение объектов магистрального транспорта нефти и газа в условиях залегания многолетнемерзлых грунтов требует особого подхода, так как стальные трубопроводы, являясь главным звеном в цепочке трубопроводного транспорта углеводородных ресурсов, должны находиться в работоспособном состоянии на протяжении всего периода эксплуатации. На большей части территории РФ температура воздуха зимой опускается ниже 0 °С и грунт промерзает в течение 2–9 месяцев. Такие климатические показатели в сочетании с особенностями залегающих грунтов практически всегда создают подходящие условия для возникновения и развития процесса морозного пучения. Морозное пучение грунта, в свою очередь, является одним из наиболее опасных процессов, происходящих при промерзании грунтов основания, так как под действием сил морозного пучения грунта фундамент сооружения поднимается вверх, а при оттаивании неравномерно оседает [8, 14]. Неравномер-

ность осадок сооружений, возведенных на территориях, сложенных пучинистыми грунтами, обусловлена различиями в условиях промерзания и оттаивания грунта, составе многолетнемерзлых пород, их плотности, влажности, пористости и других физических характеристиках. Согласно [3] в районах распространения многолетнемерзлых грунтов трубопроводы рекомендуется прокладывать надземно, устанавливая их на свайные опоры. Под действием сил морозного пучения опора трубопровода перемещается, при этом происходит перемещение непосредственно трубопровода, что впоследствии вызывает изменение его напряженно-деформированного состояния и в дальнейшем приводит к повреждению конструкции или вовсе к её разрушению [4, 5, 10, 12]. Поэтому при строительстве на пучинистых грунтах необходимо предусматривать меры, предотвращающие или уменьшающие влияние сил морозного пучения грунта на свайный ростверк.

Так, для уменьшения влияния сил морозного пучения грунтов на опоры надземных трубопроводов ВНИИГАЗ совместно с японской компанией NKK разработали анкерную противопучинную сваю [2], основными функциональными характеристиками которой являются увеличение удерживающих сил при малой анкеровке в многолетнемерзлый грунт и значительное снижение воздействия сил морозного пучения на конструкцию опоры трубопровода, рассчитанное на весь срок эксплуатации.

Разработанная конструкция (рис. 1) представляет собой металлическую сваю из трубы необходимого диаметра и толщины, состоящую из трех составных частей: оголовка, средней части (с полиэтиленовым покрытием) и анкерной части.

Функциональная часть сваи – оголовок – представляет собой металлическую трубу, длина которой выбирается в зависимости от конструкции опор и их крепления. Среднюю часть сваи покрывают специальным полиэтиленовым покрытием на длину, соответствующую расчетной глубине оттаивания. Благодаря внесению в конструкцию сваи полиэтиленовой рубашки из несмерзающегося материала, происходит существенное снижение касательных сил морозного пучения грунтов основания на боковую поверхность сваи. Нанесение полиэтиленового покрытия производится в заводских условиях, технология покрытия и состав полиэтиленового слоя, устойчивого к условиям Крайнего Севера, были разработаны японской стороной (компания NKK).

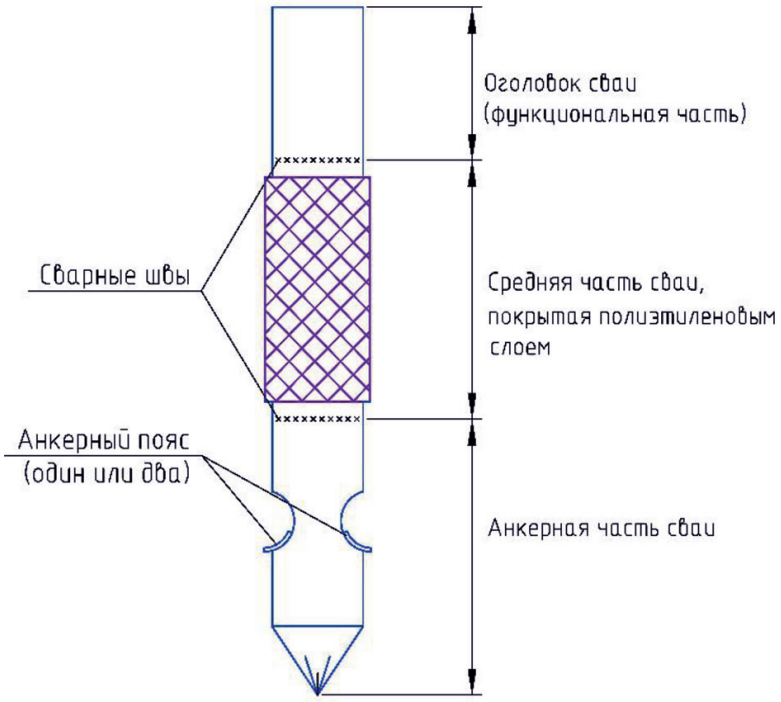

Рис. 1. Конструкция противопучинной анкерной сваи ВНИИГАЗ–NKK

Анкерная часть представляет собой последовательно вырезанные из тела сваи лепестки, которые по всей плоскости привариваются к нижней части вырезанных окон в теле сваи (рис. 2). Второй анкерный пояс (при необходимости его наличия) приваривается под углом 90° к первому и, как правило, монтируется в случае действия высоких выдергивающих сил на сваю. Применение такого анкерного устройства в конструкции сваи ведет к увеличению удерживающих сил в слое вечномерзлого грунта.

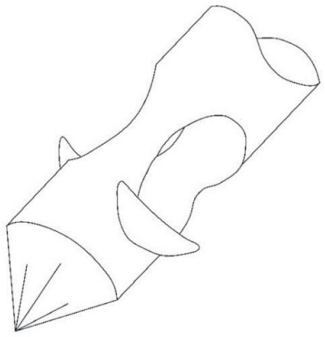

Рис. 2. Конструкция анкерного пояса противопучинной сваи ВНИИГАЗ–NKK

Противопучинные сваи погружаются в грунты основания буроопускным методом, с предварительным пробуриванием лидерной скважины. Диаметр скважины выбирается исходя из реальной величины наварных деталей (лепестков) анкерных поясов. Бурение скважин под свайные конструкции производится с учетом совмещения ее функциональных частей и расположения пластов грунта. Глубина заложения сваи определяется по результатам расчета, однако в любом случае покрытая полиэтиленом часть не должна быть опущена ниже верхней границы вечномерзлого грунта более чем на 50 мм [2].

В статье предлагается оценить эффективность работы анкерной противопучинной сваи, для этого авторами был произведен расчет предлагаемой анкерной сваи по методике ВНИИГАЗ [2] и традиционной металлической сваи в соответствии с требованиями [3]. Проверочный расчет проводился для опор газопровода, проложенного на территории Усть-Енисейского района Долгано-Ненецкого автономного округа Красноярского края. По результатам инженерно-геологических изысканий в геокриологическом отношении трасса трубопровода расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, а в геоморфологическом отношении представляет собой нижне-среднечетвертичную морскую и ледниково-морскую равнину, значительно переработанную трансгрессиями и оледенениями.

В образовании микрорельефа территории большую роль играют мерзлотные процессы и заболоченность. По характеру рельефа и генезису отложений трасса газопровода проходит по нескольким геоморфологическим уровням, геологический разрез которых до глубины 10–50 м сложен преимущественно суглинистыми разностями с включением крупнообломочного материала.

Температура многолетнемерзлых грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд (10 м) по трассе газопровода изменяется в пределах от минус 5 до минус 6 °С. На надпойменных и прирусловых участках температура грунтов может повышаться на 1,0–2,0 °С. Нормативная глубина слоя сезонного оттаивания для пород различного генезиса по району составляет:

– для торфов – 0,3–0,5 м;

– для суглинков и супесей – 0,4–0,8 м, в ложбинах стока и малых водотоков – до 1,0 м, реже – до 1,5–2,5 м и более метров;

– для песков различной крупности до 2,0–2,5 м.

По результатам выполненных исследований для многолетнемерзлых грунтов различного возраста и генезиса величина предельно-длительного сцепления изменяется в интервале от 0,4 до 1,0 МПа, сопротивление срезу при смерзании со сталью изменяется от 0,25 до 0,325 МПа, сопротивление срезу при смерзании с грунтом изменяется в пределах от 0,15 до 0,25 МПа.

На основании значений параметров физико-механических свойств грунтов, определенных результатами исследования материалов буровых работ, а также лабораторными и полевыми методами, с учетом данных о геологическом строении и геокриологических условиях площадки, в области фундаментной части опоры газопровода выделены следующие инженерно-геологические элементы (слои): суглинок твердомерзлый льдистый слоисто-сетчатой криотекстуры, суглинок твердомерзлый слабольдистый слоистой криотекстуры.

Для расчета была выбрана свая диаметром 325 мм, расчет производился для двух

случаев: длина свай 5 м, длина свай 10 м. Глубина оттаивания грунтов, принятая в расчете, составляет 1,4 м, температура на границе промерзания – минус 0,6 °С, на глубине 5 м от дневной поверхности – минус 5 °С, на глубине 10 м от дневной поверхности – минус 5,3 °С. Расчетные удельные касательные силы пучинистых грунтов основания определены для противопучинной анкерной сваи согласно п. 5 [2], для обычной металлической сваи согласно табл. 7.8 [3] и составили 45 кПа и 120,5 кПа соответственно.

Устойчивость свайной опоры газопровода на действие касательных сил морозного пучения проверяется по условию (1), целью данного расчета является определение глубины заложения сваи в многолетнемерзлый грунт.

$$\tau_{fh} \cdot A_{fh} - F < F_r \cdot \gamma_c / \gamma_n , \qquad (1)$$

где τ_{fh} – расчетная удельная касательная сила пучения, кПа;
A_{fh} – боковая площадь смерзания в пределах сезонно-талого слоя, м^2;
F – расчетная нагрузка на сваю, кН;
F_γ – расчетное значение удерживающей силы от пучения, кН;
γ_c – коэффициент условий работы;
γ_n – коэффициент надежности по назначению погружения.

Для противопучинной анкерной сваи расчет удерживающих сил выполняется в соответствии с требованиями [2] по формуле:

$$F_r = 2/3 \cdot U_{\text{скв}} \cdot \sum_{i=1}^{n} R_{sh,i} \cdot h_{a,i} +$$

$$+ 1/3 \cdot U \cdot {}_i\sum_{i=1}^{n} R_{nf,i} \cdot h, \qquad (2)$$

где $U_{\text{скв}}$ – периметр поперечного сечения лидерной скважины, м;
U – периметр поперечного сечения противопучинной сваи, м;
$R_{sh,i}$ – расчетное сопротивление i-го слоя грунта сдвигу по поверхности смерзания с грунтовым раствором, кПа;
$h_{a,i}$ – толщина i-го слоя грунта от дневной поверхности до анкерного пояса, м;
$R_{nf,i}$ – расчетное сопротивление i-го слоя вечномерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с телом сваи, кПа;
h_i – толщина i-го слоя грунта, расположенного ниже верхней границы вечной мерзлоты, м.

В первой части формулы (2) расчет удерживающих сил ведется на границе «грунтовый раствор – грунт» и по всей длине свай, а во второй части на границе «свая – грунтовый раствор» до верхней границы слоя вечномерзлого грунта.

Расчетное значение силы, удерживающей опору газопровода от выпучивания, для традиционной металлической сваи определяется согласно требованиям [3] по формуле:

$$F_r = U \cdot \sum_{i=1}^{n} R_{af,i} \cdot h_i , \qquad (3)$$

где $R_{af,i}$ – расчетное сопротивление i-го слоя многолетнемерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания, кПа.

Так, подставив исходные данные в выражения (1), (2), (3), получили результаты, представленные в таблице.

Анализ результатов проверочных расчетов и их корреляция показали, что эффективность работы противопучинной анкерной сваи отличается от традиционной металлической менее чем на 6 %. При этом стоимость сваи ВНИИГАЗ–NKK значительно превышает стоимость обычной стальной сваи. Исходя из этого возникает вопрос, насколько целесообразно и экономически выгодно применение противопучинных анкерных свай, разработанных ВНИИГАЗ совместно с японской комаией NKK, в условиях залеганиия многолетнемерзлых грунтов?

Результаты проверочного расчета, выполненного для противопучинной анкерной и традиционной стальной сваи различной длины

Длина сваи	Свая ВНИИГАЗ–NKK (Ø 325 мм)		Свая гладкая металлическая (Ø 325 мм)	
	Проверка условия устойчивости	Коэффициент использования	Проверка условия устойчивости	Коэффициент использования
5 м	48,7 кПа < 266,2 кПа	5,46	154,4 кПа < 1975 кПа	5,17
10 м	48,7 кПа < 700,9 кПа	9,48	154,4 кПа < 799 кПа	8,9

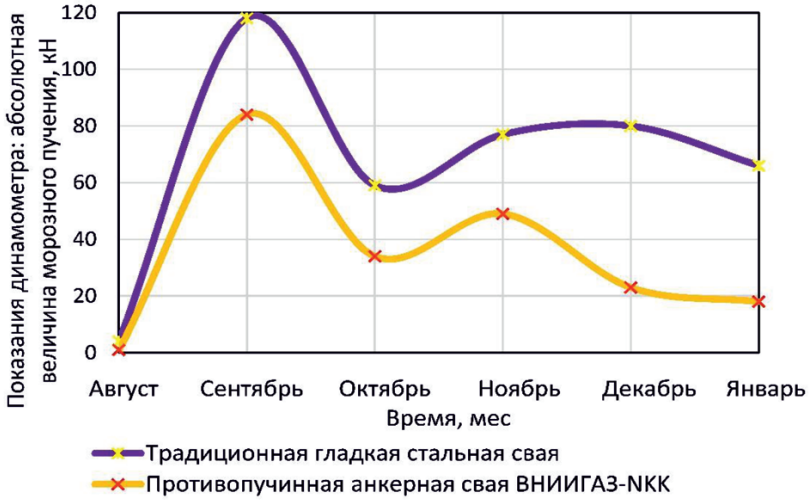

Рис. 3. Результаты натурных испытаний свай

Для того чтобы ответить на данный вопрос, необходимо отметить, что с целью определения несущей способности анкерных и гладких металлических свай были проведены полевые испытания в многолетнемерзлых грунтах осевыми ступенчато-возрастающими вдавливающими и выдергивающими нагрузками в период максимального воздействия сил морозного пучения. С целью достоверности результатов было испытано по две сваи каждого типа. Сваи испытывались с применением гидравлических домкратов на установках из анкерных свай и системы балок [2]. По результатам натурных испытаний в условиях ММГ на статические нагрузки установлено, что эффективность сваи с анкером составила до 180 % по отношению к традиционной гладкой стальной свае.

Также в течение 5 лет проводились длительные испытания по измерению сил морозного пучения на гладкие и противопучинные сваи, результаты которых представлены на рис. 3. Длительные испытания, как и в случае испытаний на статические нагрузки, проводились на опорах, состоящих из свай и соединяющей их системы балок, величина абсолютной силы морозного пучения на сваи измерялась динамометрами. Длительные испытания по измерению сил морозного пучения показали эффективность полиэтиленовой рубашки по сравнению с гладкой стальной поверхностью: уменьшение сил морозного пучения составило 30–50 %.

Анализ результатов натурных испытаний свай с полиэтиленовым покрытием и анкерной конструкцией в толще многолетнемерзлого грунта показал, что использование свай данного типа в конструкциях опор трубопроводов, прокладываемых на территориях ММГ, представляет большой практический интерес. Установленное в результате выполненных проверочных расчетов расхождение теоретических и практических результатов можно оправдать несовершенством методики расчета анкерных противопучинных свай. Поэтому с целью снижения вероятности ошибок на стадии проектирования свайных опор под трубопроводы, предназначенные для транспорта углеводородных ресурсов в условиях многолетнемерзлых грунтов, и предотвращения возникновения предельных состояний в конструкциях, методику расчета анкерных свай, предложенную в [2], в части определения удерживающих сил необходимо доработать.

Список литературы

1. Васильев Г.Г., Тарасенко А.А., Чепур П.В., Гуань Ю. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 120–123.

2. РД 51-00158623-10-95. Инструкция по возведению и расчету анкерных противопучинных свай конструкции ВНИИГАЗ-NKK для опор надземных трубопроводов в районах распространения вечной мерзлоты. – РАО «Газпром», 1995.

3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: министерство регионального развития Российской Федерации, 2011. – 86 с.

4. Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Чепур П.В. Закономерности деформирования металлоконструкций крупногабаритного вертикального сварного резервуара при наличии зон проседания основания // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. – № 1 (53). – С. 32–37.

5. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А. Определение действующих напряжений в полотнищах днищ резервуаров отечественных типоразмеров при локальных просадках оснований // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–8. – С. 1665–1670.

6. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы подслойного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–8. – С. 1698–1702.

7. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А. Использование критериев стандарта API-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–7. – С. 1418–1422.

8. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Гуань Ю. Оценка работоспособности крупногабаритного резервуара РВСПК-100000 при образовании зоны неоднородности грунтового основания // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 134–136.

9. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование метода полного подъема РВС-20000 для ремонта основания и фундамента // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 123–125.

10. Чепур П.В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадок его основания: дис. канд. техн. наук. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – 181 с.

11. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–8. – С. 1671–1675.

12. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 540–544.

13. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Создание и верификация численной модели резервуара РВСПК-50000 // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7–1. – С. 95–100.

14. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоуравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1292–1296.

15. Guan Y., Tarasenko A.A., Huang S., Chepur P.V., Zhang R. Influence of laminated rubber bearings parameters on the seismic response of large LNG storage tanks // World Information on Earthquake Engineering. – 2016. – Т. 32, № 1. – P. 319–327.