

Особенности строительства свайных фундаментов в зонах вечной мерзлоты на объектах нефтегазовой отрасли: обзор

И.А. Дмитриенко, В.А. Перфилов

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Огромная часть территории России находится в зоне вечной мерзлоты. Освоение этого пространства – важный шаг для России, так как там стремительными темпами развивается добыча полезных ископаемых, а в основном нефти и газа. В строительстве зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах есть своя специфика. Особенности строительства фундамента в зоне вечной мерзлоты рассматриваются в данной статье.

Ключевые слова: фундамент, вечная мерзлота, термосифон, нефтехранилище, нефтегазовая отрасль, бурение, термосвая, аммиак.

Сваи - распространенный тип фундамента в зонах вечной мерзлоты (рис 1), должны выдерживать мгновенные нагрузки от конструкции и длительные нагрузки от морозов, вызванные ежегодным замерзанием активного слоя. Если мёрзлый грунт тает сезонно, он оседает и создает понижающую нагрузку, которой должна противостоять свая. Несмотря на то, что предварительно пробуренные сваи обладают большей несущей способностью, чем забивные сваи, температура грунта является основным фактором, влияющим на эту несущую способность. Температурный профиль конца лета для самого теплого времени года рассматривается для получения значений адфреза для различных почвенных условий. Полиэтиленовые пленки используются в пробуренных (шламовых) сваях для разрушения адфрезных связей.

На сегодняшний день наиболее широко используются забивные, вибродавливаемые и буровые сваи. Известным недостатком первых является их ограниченная применимость в плотной городской застройке. К недостаткам вторых так же можно отнести вибрационное воздействие и сложность монтажа. В случае же устройства третьих не происходит уплотнения грунта в околосвайной зоне. Близкими по технологии к буровым сваям являются усиления основания в виде армирующих элементов повышенной жесткости [1].

Сваи в вечной мерзлоте должны быть спроектированы таким образом, чтобы они сдерживали осадку в приемлемом диапазоне. Между тем, прилагаемая нагрузка не должна превышать кратковременную прочность контакта грунта с грунтом ворса [2].



Рис 1. Буровая установка Вауег 18 подготавливает свайный фундамент для сетей обвязки трубопроводов резервуаров нефти

Существуют различные термины, которые используются для обозначения системы охлаждения свай с целью предотвращения оттаивания в более теплые времена. Термосваи, термосифон, термозонд, тепловая труба или термотруба используются как взаимозаменяемые элементы этой фундаментальной системы. При проектировании обычно учитывается тангенциальная прочность при замерзании на границе раздела грунт-свая, т.е. максимальное напряжение, вызывающее разрушение связи между ворсом и

мерзлой почвой, при этом не учитывается припуск на осадку в течение срока службы, однако осадка может быть ограничена за счет применения более высокого коэффициента безопасности. Существует метод рационального рассмотрения вопроса о поселении. В этом методе ползучесть богатой льдом мерзлой почвы аппроксимируется с использованием постоянной скорости ползучести в течение срока службы [2]. Затем закон ползучести, или закон течения, применяется в математической модели для сваи и грунта и смежного континуума. Наконец, скорость осаждения путем применения известной нагрузки на сваю рассчитывается с помощью испытания свай.

Определение несущей способности свай по результатам полевых испытаний осуществляется с применением таких видов, как статические испытания свай и свай-штампов, динамические испытания свай, испытания грунтов эталонной сваей, испытание сваей-зондом, испытание статическим зондированием [3].

Исследование прочности при замерзании различных свай в условиях вечной мерзлоты проводится с использованием песка в качестве грунтового материала. Определено, что максимальная прочность адфриза достигается в необработанных деревянных сваях (пихта и ель). Однако прочность адфриза в бетонных сваях была ниже, чем в деревянных; она была выше, чем в стальных сваях и сваях с покрытием. Применение таких материалов покрытия, как креозот, краска и т.д., значительно снизило прочность адфероскопического сцепления. От низких до высоких значений прочности адфриза сортированы следующие сваи по порядку: от окрашенных стальных труб (рис 2) до креозированных пихтовых свай, неокрашенных стальных H-образных профилей, цилиндрической секции, бетона, ели без покрытия и пихты более высокого качества.



Рис 2. Свайное основание для лафетного ствола на объекте «Приемо – сдаточный пункт (ПСП) Новопортовского месторождения»

Гравий и валуны являются пористой средой с очень эффективной естественной конвекцией зимой и в теплое время года. Этот материал в сочетании со специально разработанными сваями позволяет избежать оттаивания в мерзлых грунтах [4].

В зимнее время в рифлёной бетонной массе, окружённой гравийным и валунным зерном, холодный воздух движется вниз и охлаждает соседние почвы. В летнее время нижняя часть с холодным воздухом имеет более высокую плотность, чем верхняя часть с более теплым воздухом, что предотвращает конвекцию. Теплообмен в режиме проводки происходит в незначительном количестве, было замечено, что при использовании специальной рифленой сваи время замораживания для прилегающей почвы уменьшается примерно на 40% по сравнению с обычными сваями [4]. Уровень вечной мерзлоты будет увеличиваться за счет увеличения проникновения холодного воздуха и уменьшения осадка оттаивания. В свою очередь, прочность сцепления увеличится, что приведет к увеличению

несущей способности на 16% в свае длиной 10 м при диаметре 1 м. При стабильном периоде заморозки сила размораживания снижается на 80%. При боковом нагружении свай учитывается фиксация свай вблизи дна активного слоя для условий вечной мерзлоты. Эксперименты в условиях вечной мерзлоты показали, что сваи, нагруженные сбоку, обычно изгибаются вблизи верхней части замерзшей поверхности. Они демонстрируют более высокую устойчивость к боковым нагрузкам при кратковременных нагрузках [5].

Также можно получить расчет скорости оседания ползучести для свай в соленой вечной мерзлоте, используя следующее уравнение, полученное по нелинейному закону ползучести [2].

$$\ddot{u}_a = \frac{3^{(n+1)/2} a B \tau_a^n}{n-1} \quad (1)$$

где \ddot{u}_a = Скорость смещения,

a = радиус сваи,

τ_a = приложенное напряжение на свайный вал,

n = экспонента ползучести,

B = коэффициент ползучести.

При сейсмической нагрузке сваи могут вести себя по-разному в районах вечной мерзлоты. Проведена серия испытаний встряхивающего стола для масштабной модели свайного фундамента в мерзлых грунтах. Установлено, что динамическое нагружение основы мерзлого грунта в масштабной модели, приводит к повышению температуры. Реакция сдвиговой деформации при динамической нагрузке на фундамент показала четкие резонансные характеристики с доминирующими частотами, которые были выше 15 Гц. Армированная почва не имела резонанса, и доминирующая частота для этого была в высокочастотной области. Кроме того, слои льда в вечной мерзлоте оказывали значительное влияние на ускорение, динамическое давление грунта и реакцию смещения. Повышение температуры изменило сейсмическую реакцию слоя вечной мерзлоты и

основания свай, а увеличение входного ускорения привело к увеличению значений отклика [6].

Термосифон

Термическую сваю можно определить, как сваю с естественной конвекцией или принудительным циркуляционным охлаждением, которая передает тепло от грунта к воздуху. Эти системы могут использовать охлаждающую жидкость, циркулирующую в трубах, холодный воздух, нагнетаемый в сваю жидкостями или конвекцию воздуха. Термосифон обычно изготавливается из двухфазной системы, наполненной однофазной смесью под давлением. Это соединение может быть пропан, углекислый газ, жидкая и паровая фазы существования аммиака, которые циклически трансформируются друг в друга путем поглощения и высвобождения тепла [7]. Пример системы пассивного охлаждения и ее структуры с использованием термосифона в фундаменте нефтяных резервуаров на объекте «Приемо – сдаточный пункт (ПСП) Новопортовского месторождения» можно увидеть на (Рис.3). Вертикальный термосифон эволюционировал в обычный наклонный термосифон испарителя в 1978, а затем в плоский петлеобразный термосифон (Применение может быть различным):

I) Термозонд по своему назначению и описанию также может использоваться для замораживания грунта вокруг свай или для замораживания грунта вокруг сооружений.

II) Термосваи по своему назначению и описанию могут поддерживать конструкции на сваях, установленных в мерзлом грунте.

III) Наклонно-термосифонное основание в обозначении, которое описывается как наклонная испарительная труба под перекрытием на фундаменте, может использоваться для удержания грунта под перекрытием в промерзшем состоянии на ровном основании.

IV) Плоско-пружинный термосифон по обозначению описывается как труба с плоской петлей испарителя под фундамент с перекрытием, может использоваться для удержания грунта под перекрытием в промерзшем состоянии на ровном основании.



Рис.3. Типичная термосифонная структура, установленная на объекте Приемо – сдаточный пункт (ПСП) Новопортовского месторождения

Фундамент трубопровода в зонах вечной мерзлоты

Трубопроводные проекты в вечной мерзлоте требуют большего геотехнического рассмотрения, чем проекты в зонах умеренного климата. Геотехнические соображения различны для газопроводов и нефтепроводов и включают геотермальное воздействие на грунт, технический анализ маршрутов и поездов, контроль условий вечной мерзлоты, проектирование склонов труб, воздействие морозов и осадков, оттаивания [8]. Газопроводы могут испытать эффект Джоуля-Томпсона, охлаждение газа от декомпрессии между компрессорными станциями. Такое охлаждение может быть полезным в прерывистой вечной мерзлоте. Как правило, газ охлаждается ниже точки замерзания, чтобы содержать больше газа с более высокой плотностью для транспортировки в вечной мерзлоте. Нефть иногда транспортируется без

нагрева в трубопроводе, поскольку точка замерзания составляет -14°C . Но бывают случаи, когда нефть нагревают до 50°C до 60°C для транспортировки больших объемов в погребенном состоянии.

Трубопровод, расположенный ниже точки замерзания, сохраняет стабильность склонов вечной мерзлоты, усиливает контроль плавучести и удерживает трубу вокруг трубопровода с помощью морозной колбы. Положение под землей, в котором трубопровод находится, называется "последняя точка холодного потока", обычно расположена в зоне перехода от уровня оттаивания к вечной мерзлоте, переходную зону можно определить с помощью геофизических и геотехнических исследований. При указанном переходе следует одновременно учитывать проблемы, связанные с морозостойкостью и таянием осадков. Методы смягчения последствий таяния осадков и морозов могут быть различными в зависимости от проекта и времени идентификации. На этапе проектирования изменение маршрута является одним из лучших методов предотвращения этих опасностей. Выемка грунта и заполнение его оттаивающими стабильными материалами, изоляция, контроль температуры труб, контроль грунтовых вод и поддержка над поверхностью грунта являются одними из методов профилактики образования оттепелей и сильных морозов. Для изучения теплового воздействия в условиях вечной мерзлоты в китайско-российском нефтепроводе было проведено численное моделирование. Были смоделированы два типа переноса, обычный режим захоронения трубопровода и трубопровод на надземной насыпи. Были рассмотрены два метода теплового контроля, например, голый и изолированный трубопровод, а также три климатических условия. В климатических условиях при моделировании применялись средние температуры поверхности грунта $-0,5$, $-1,0$, $-1,5^{\circ}\text{C}$, вдоль трубопровода в течение следующих 50 лет [9]. Сделан вывод, что при всех климатических условиях и методах термического

контроля в заглубленном трубопроводе после начала эксплуатации трубопровода таблица вечной мерзлоты постоянно снижается. Хотя в трубопроводе надземной плотины вечная мерзлота под насыпью увеличивается в первые десятилетия, затем уменьшается, когда время эксплуатации идет дальше.

Также был сделан вывод, что в режиме плотины с помощью тепловых методов контроля оттаивание вечной мерзлоты может быть предотвращено в течение срока службы трубопровода. Однако при обычном методе заглубленного трубопровода оттаивание вечной мерзлоты невозможно предотвратить во всех предполагаемых климатических и изоляционных условиях [10]. Для обеспечения стабильности трубопровода рекомендуется обратная засыпка немерзлыми грунтами и/или использование термосифонов в заглубленном трубопроводе в теплых и ледянистых условиях. В результате численного моделирования по уравнению Такаши [10] с достаточной точностью был сделан вывод, что интенсивность нагрузки от морозной волны может быть принята с постоянным распределением вдоль трубопровода в зоне, отличной от зоны вечной мерзлоты. В не вечной мерзлоте уравнение Такаши с двухмерным анализом теплопередачи может предсказать сильные морозы в период промерзания. Распределенная нагрузка (рис. 4), рассчитанная с помощью двухмерного анализа теплопередачи, но без учета эффекта ползучести, показала хорошее совпадение с реальными результатами.

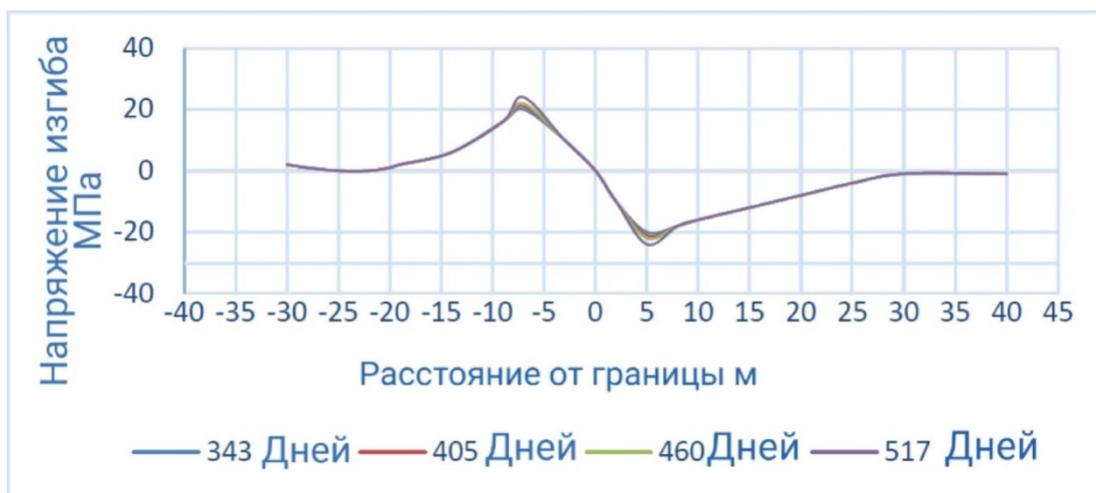


Рис. 4 Анализируемое напряжение изгиба

Вывод

Территории вечной мерзлоты занимают почти четверть земной поверхности, и в вечной мерзлоте уже построено или будет построено много объектов. Из всестороннего обзора геотехнических проблем и решений в различных гражданских проектах в районах вечной мерзлоты (например, фундамент здания, автомобильные дороги, железные дороги и трубопроводы) можно сделать следующие выводы. Специальная геотехническая инженерия для проектов по вечной мерзлоте необходима, чтобы избежать основных геотехнических проблем. Исторические и новые проекты являются подтверждением существования этих геотехнических проблем и необходимости методов их решения для будущих проектов. В зависимости от типа проекта, активные или пассивные системы охлаждения и оттаивающие технологии или их комбинация должны применяться для создания устойчивой конструкции в районах вечной мерзлоты, которые будут работать по следующим направлениям: снижение солнечной радиации различными покрытиями, снижение температуры находящихся в поровом пространстве людей или температуры почвы путем охлаждения, усиление конвекции воздуха, использование вентиляционных каналов, теплоотводов, термосифонов, снижение теплопроводности и использование материалов,

устойчивых к оттепелям. Каждое из вышеперечисленных соображений или их сочетание может быть применено в проектах по вечной мерзлоте в зависимости от типа проекта, требований и бюджета.

Литература

1. Панасюк Л.Н., Акопян В.Ф., Акопян А.Ф., Хо Чантха Новые виды свай // Инженерный вестник Дона. 2011. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/437
2. Nixon J., Neukirchner R.(1984). Design of vertical and laterally loaded piles in saline permafrost, Proceedings of the 3rd International Specialty Conference on Cold Regions Engineering; 1984. pp. 1-6.
3. Жур В.Н. Определение несущей способности в грунтовых условиях II типа по просадочности свай по фоновым материалам полевых испытаний свай статической нагрузкой // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2144
4. Xu J., Goering D.J.(2008), Experimental validation of passive permafrost cooling systems, Cold Regions Science and Technology, 53(3): 283-297.
5. Nottingham D., Christopherson A.B.(1978), Design Criteria for Driven Piles in Permafrost, Peratrovich, Nottingham&Drage Inc. pp. 109-131.
6. Miller D.L., Johnson L. (1990), Pile settlement in saline permafrost: a case history, Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec City, Quebec; pp. 371-378.
7. Heuer C., Long E., Zarling J.(1985), Passive techniques for ground temperature control, Thermal Design Considerations in Frozen Ground Engineering, T. G. Krzewinski and R. G. Tart, Jr. (eds.), American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., U.S.A., 1985. pp. 72-154.
8. Oswell J.M. (2002), Geotechnical aspects of northern pipeline design and construction, 4th International Pipeline Conference; American Society of Mechanical Engineers; pp. 555-562.



9. Xu J., Goering D.J.(2008), Experimental validation of passive permafrost cooling systems, *Cold Regions Science and Technology*, **53**(3): pp. 283-297.
10. Zhang J., Qu G., Jin H.(2010), Estimates on thermal effects of the China-Russia crude oil pipeline in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*64(3): pp. 243-247.

References

1. Panasjuk L.N., Akopjan V.F., Akopjan A.F., Ho Chantha. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2011. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/437
 2. Nixon J., Neukirchner R. (1984). *Proceedings of the 3rd International Specialty Conference on Cold Regions Engineering*; 1984. pp. 1-6.
 3. Zhur V.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2144
 4. Xu J., Goering D.J. (2008). *Cold Regions Science and Technology*, 53(3): pp. 283-297.
 5. Nottingham D., Christopherson AB.(1978), *Design Criteria for Driven Piles in Permafrost*, Peratrovich, Nottingham&Drage Inc. pp. 109-131.
 6. Miller D.L., Johnson L. (1990), *Pile settlement in saline permafrost: a case history*, *Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference*. Quebec City, Quebec; pp. 371-378.
 7. Heuer C., Long E., Zarling J. (1985), *Passive techniques for ground temperature control*, *Thermal Design Considerations in Frozen Ground Engineering*, T. G. Krzewinski and R. G. Tart, Jr. (eds.), American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., U.S.A., 1985, pp. 72-154.
 8. Oswell J.M. (2002), *Geotechnical aspects of northern pipeline design and construction*, *4th International Pipeline Conference*; American Society of Mechanical Engineers; pp. 555-562.
 9. Xu J., Goering D.J. (2008). *Cold Regions Science and Technology*, **53**(3): pp. 283-297.
-



10. Zhang J., Qu G., Jin H.(2010), Estimates on thermal effects of the China-Russia crude oil pipeline in permafrost regions. Cold Regions Science and Technology64(3): pp. 243-247.