

УДК 624.139:539.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ

© 2010 А.В. Агафонов, В.А. Ворков

ОАО «Гипровостокнефть», г. Самара

Поступила в редакцию 18.11.2010

Проектирование трубопроводных систем в условиях крайнего Севера представляет собой сложную задачу – прокладку в многолетнемерзлых грунтах. В статье выполнен расчет ореола оттаивания и прочностной анализ трубопроводов методом конечных элементов. Рассмотрен подход к решению задач с учетом пластических деформаций.

Ключевые слова: *прочность, конечно-элементный анализ, теплотехнический расчет, многолетнемерзлые грунты*

Значительная часть территории России, начиная от берегов северных морей, сложена так называемыми мерзлыми грунтами. Эти грунты обладают специфическими свойствами, связанными с изменением их несущей способности в зависимости от температуры. При низких температурах (менее 0°C) они обладают большой прочностью и способны удерживать значительные нагрузки от сооружений, однако уже при нулевой и тем более положительной температуре мерзлые грунты оттаивают и практически полностью теряют прочностные свойства. При воздействии на любые водонасыщенные грунты отрицательной температуры происходит их промерзание. Вода, содержащаяся в порах, замерзает и цементирует частицы грунта, в результате чего его прочность резко возрастает. При оттаивании обычных грунтов их прочность уменьшается до значений, которые были характерны для грунта данного вида до замораживания. Кроме того, глубина промерзания обычных грунтов колеблется от нескольких сантиметров до 2-2,5 метров в зависимости от температуры воздуха. Ниже промерзшего слоя грунт находится в оттаявшем состоянии и способен воспринимать внешнюю нагрузку. На территории России и в ряде других стран имеются огромные площади, на которых грунты на глубине до 1000 м постоянно находятся в мерзлом состоянии. Лишь в летний период эти грунты оттаивают

на глубину 1-3 метра. Карта распространения мерзлых грунтов приведена на рис. 1. Видно, что примерно 11 миллионов квадратных километров территории занято вечномерзлыми, многолетнемерзлыми или мерзлыми грунтами.

Мерзлые грунты можно разделить на несколько видов:

- вечномерзлые – это грунты, находящиеся в мерзлом состоянии века и тысячелетия;
- многолетнемерзлые – от нескольких лет до нескольких десятков лет;
- сезонномерзлые – от одного до двух сезонов;
- кратковременномерзлые – несколько суток.

В дальнейшем грунты первых двух видов будем называть мерзлыми грунтами.

Цель работы: оценка прочности подземных трубопроводов при прокладке их в мерзлых грунтах.

Для определения напряженно-деформированного состояния трубопроводов сначала проводится теплотехнический расчет. По результатам теплотехнического расчета вычисляется стабилизированная осадка, с учетом которой проводится анализ напряжений в трубопроводе. Осадки сооружений на мерзлых грунтах зависят от состояния мерзлого грунта. Если грунт находится в мерзлом состоянии, то значение осадки будет зависеть только от сжатия грунта как однородного упругого тела с определенным модулем упругости. В этом случае, можно подсчитать просадку грунта по формулам теории упругости.

Следует отметить, что значение осадок мерзлого грунта не может быть определяющим. Они настолько малы по сравнению с осадками грунта в случае его оттаивания, что принимать

Агафонов Андрей Валерьевич, главный специалист отдела металлоконструкций и прочностных расчетов. E-mail: nikolay.borenkov@giprovostokneft.ru

Ворков Виталий Александрович, инженер отдела металлоконструкций и прочностных расчетов. E-mail: vvorkov@yandex.ru

их во внимание не имеет смысла. Дело в том, что практически все сооружения нефтяной и газовой промышленности выделяют в окружающую среду некоторое количество тепла. Это приводит к

так называемой деградации грунта при оттаивании. Деградация грунта сопровождается изменением его объема, а также осадками и просадками сооружений.

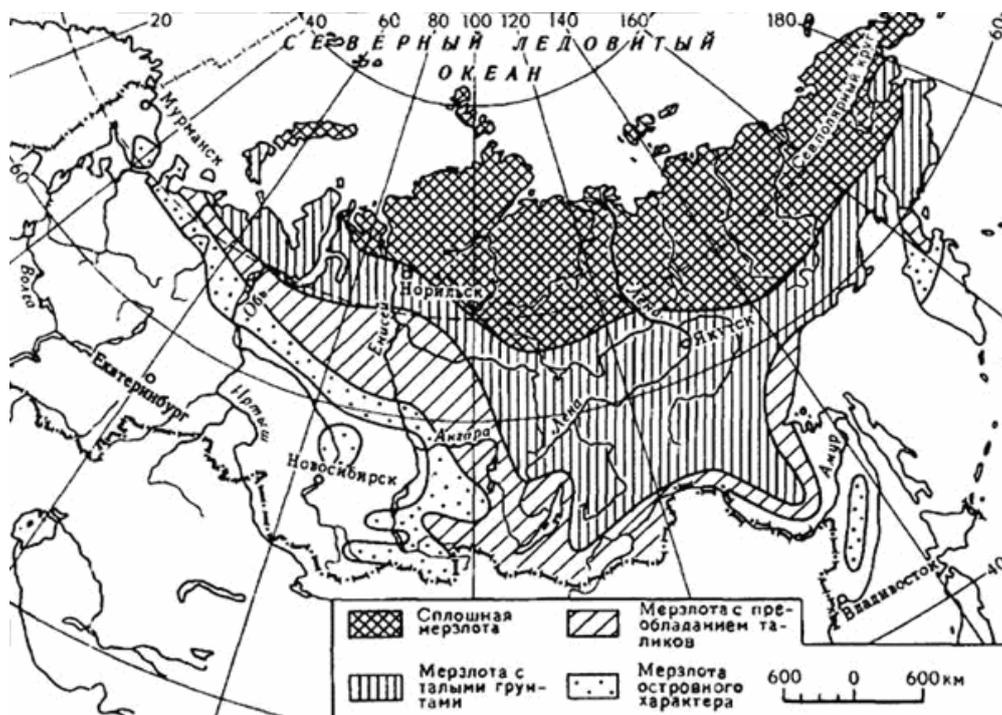


Рис. 1. Распространение многолетней мерзлоты по территории России

Охарактеризуем процесс деформации мерзлого грунта под воздействием уплотняющей нагрузки в различные моменты времени ее действия и при разных температурах. Различают два основных температурных режима, возможных в период действия нагрузки: первый – температура ниже 0°C ; второй – выше 0°C . При температурах ниже 0°C сжимаемость грунта определяется упругими и пластическими деформациями мерзлого монолита. При этом понижение температуры обуславливает повышение сопротивляемости грунта нагрузкам. Соответственно уменьшается деформация. При повышении температуры сопротивление нагрузкам уменьшается, а деформация увеличивается. Объясняется это тем, что изменяется фазовый состав воды в мерзлом грунте. Установлено, что при переходе температуры через 0°C происходит скачкообразное изменение плотности грунта, так как вода либо замерзает, либо оттаивает.

Деформацию грунта при сжатии можно описать компрессионной кривой. На рис. 2 показана компрессионная кривая для мерзлого грунта. На участке $a-b$ грунт находится в мерзлом состоянии, поэтому деформация незначительна даже при больших уплотняющих нагрузках (до 200 Н/см^2). Затем нагрузка уменьшается до $5-10 \text{ Н/см}^2$ и грунт оттаивает. При этом независимо от значения нагрузки (она остается постоянной)

происходит резкое уменьшение пористости. На участке $b-z$ грунт находится в талом состоянии.

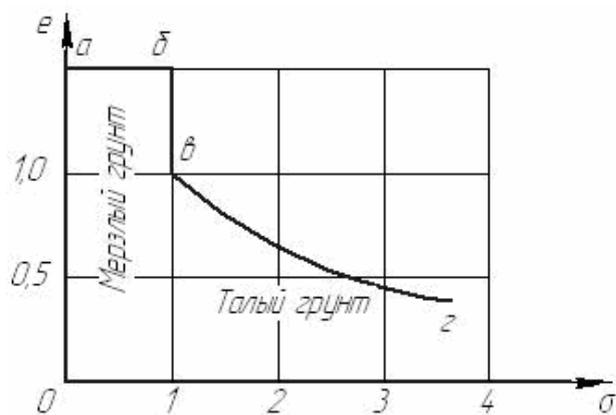


Рис. 2. Компрессионная кривая для мерзлого грунта

Общая деформация мерзлого грунта включает 3 основные составляющие: упругая и упруго-пластическая деформация мерзлого грунта, деформация оттаявшего грунта, не зависящая от нагрузки, и деформация талого грунта. При расчете осадок оттаивающих мерзлых грунтов необходимо иметь данные о тепловом режиме сооружения и его тепловом воздействии на грунт. По мере роста температуры грунта за счет теплового потока постепенно увеличивается зона таяния

льда в порах грунта. В поровой воде возникает избыточное давление и она начинает отфильтровываться из областей повышенного давления в области низких давлений. Иначе говоря, начинается отфильтровывание воды из-под сооружения. При этом осадка сооружения происходит даже при отсутствии внешней уплотняющей нагрузки. Эта осадка называется тепловой и зависит, прежде всего, от глубины оттаявшего грунта под сооружением и структуры мерзлоты (средневременной льдистости). Чем больше в грунте льда, тем больше будут его осадки. В качестве параметра, характеризующего изменение объема грунта, может быть использовано общее изменение коэффициента пористости оттаивающего грунта:

$$\Delta e = A + \alpha_{уп} q,$$

где A – величина изменения коэффициента пористости, не зависящая от внешнего давления; $\alpha_{уп}$ – коэффициент уплотнения оттаивающего грунта; q – внешняя нагрузка.

Если принять глубину оттаивания мерзлого грунта под воздействием теплового потока h , то формула стабилизированной осадки будет иметь вид:

$$s_{om} = \frac{h}{1 + e_0} \cdot (A + \alpha_{уп} q),$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости мерзлого грунта, т.е. до его оттаивания.

Значение h определяется теплотехническим расчетом, а e_0 может быть установлено на основании натуральных изменений на площадке, где будет осуществляться строительство. Значение A и $\alpha_{уп}$ также можно определить в лабораторных условиях.

При строительстве магистральных трубопроводов применяют в основном три конструктивные схемы: подземную, наземную и надземную. При подземной схеме трубопровод укладывают в траншею и засыпают грунтом. Обычно строительство трубопровода на мерзлых грунтах осуществляется в период, когда грунт находится в мерзлом состоянии, так как при сезонном оттаивании проезд строительной техники вдоль трассы становится практически невозможным. Таким образом, начальное состояние подземного трубопровода определяется положением уложенной в траншею и засыпанной грунтом трубы. Поскольку трубы засыпаются мерзлым разрыхленным грунтом, то цементационных связей между трубой и мерзлым грунтом нет. Трубопровод может относительно свободно перемещаться в грунте, если в нем появляются продольные усилия. В таком состоянии объективно наилучшие условия для эксплуатации подземного трубопровода.

Ввод трубопровода в эксплуатацию может осуществляться с пропуском по нему продукта, имеющего температуру ниже и выше 0°C . В первом случае условия эксплуатации не ухудшаются, поскольку оттаивания мерзлого грунта не происходит. Во втором случае между трубопроводом и грунтом устанавливается тепловой поток, который постепенно оттаивает грунт вокруг трубы в какой-то области. Если бы грунт вокруг трубы был бы однородным на всем протяжении, то такое оттаивание, может быть, было бы и не особенно опасным, так как трубопровод равномерно по всей длине оседал бы в оттаивающем слое. Однако вследствие изменения физических свойств грунта вдоль трубопровода за один и тот же промежуток времени в различных сечениях труб оттаивание будет различным. Следовательно и поперечные перемещения сечений также будут разными. Особенно характерно такое положение для грунтов, имеющих слоистую и ячеистую текстуры, а также для грунтов с жильными и повторно-жильными льдами. В таких грунтах возникают провалы грунта, в результате чего в местах провалов трубопровод провисает, изгибается и при определенных условиях может разрушиться. В качестве расчетных моделей могут быть использованы любые типоразмеры трубопроводов.

Для определения тепловых деформаций грунта выполняется теплотехнический анализ методом конечных элементов. Расчет проводится в модуле Multiphysics программного комплекса Ansys, который является ведущим продуктом на рынке конечно-элементных расчетов. Решалась стационарная задача теплообмена. В силу симметрии задачи в рассмотрение бралась только половина модели. Для решения выбраны следующие конечные элементы:

- двухмерный элемент теплового анализа PLANE55;
- двухмерный ответный элемент TARGE169;
- двухмерный или трехмерный контактный элемент типа узел с поверхностью CONTA175.

В результате расчета формируется температурное поле пример, которого представлен на рис. 3. Результатом теплотехнического расчета является определение величины растепления и вычисление стабилизированной осадки трубопровода.

Оценка прочности также проводилась в программном комплексе Ansys. При решении использовался тонкостенный элемент прямой трубы с опцией учета пластических деформаций PIPE20, для моделирования контактного взаимодействия использовались такие же элементы, как и в теплотехническом анализе.

На рассматриваемые трубопроводы действуют следующие виды нагрузок: гравитационная сила; температурные воздействия; внутреннее

давление; перемещения, вызванные тепловой деформацией мерзлых грунтов. Гравитационная нагрузка учитывается путем задания ускорения силы тяжести $g=9,81 \text{ м/с}^2$ и соответствующей массовой плотности материала трубы, кроме того, здесь учитывается вес продукта и изоляции.

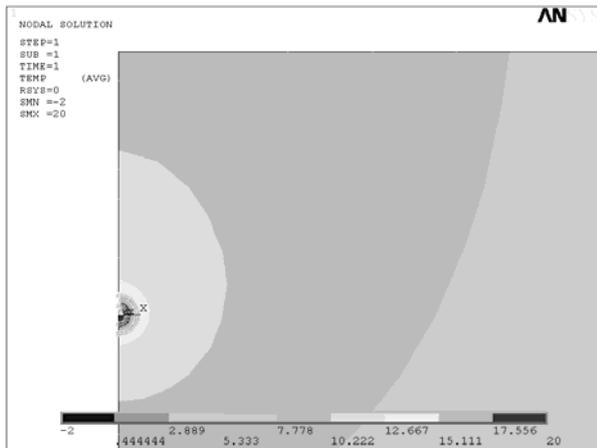


Рис. 3. Распределение температурного поля

При учете теплового расширения трубопровода принимается во внимание: минимальная температура замыкания трубопровода; максимальная проектная температура продукта; в каждом

поперечном сечении трубы температура одинакова; расчет нагрузки от температурного перепада выполняется компьютерной программой, использующей коэффициент температурного расширения $\alpha=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Под температурой замыкания понимается температура окружающей среды, при которой фиксируется статически неопределимая система (свариваются захлесты либо фиксируется неподвижная опора).

Основными нагрузками для рассматриваемой системы являются перемещения, вызванные тепловой деформацией мерзлых грунтов. Эти нагрузки должны прикладываться к оттаявшей (подвижной) зоне трубопровода. Следует отметить, что область деформированного грунта между подвижным и неподвижным участками трубопровода здесь можно моделировать путем задания переходного участка, на котором смещения изменяются по линейному закону от принятого значения на подвижной стороне до нуля на неподвижной (см. рис. 4). В данной работе переходный участок моделироваться не будет. Рассмотрим более опасный случай, который будет иметь место при вертикальном смещении пластов грунта относительно друг друга (см. рис. 5).

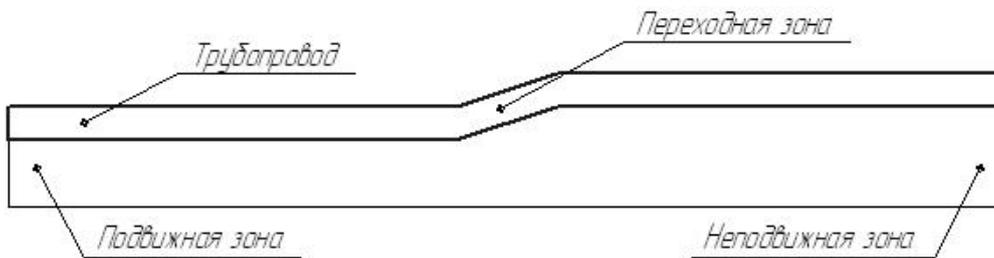


Рис. 4. Деформирование грунта с переходным участком

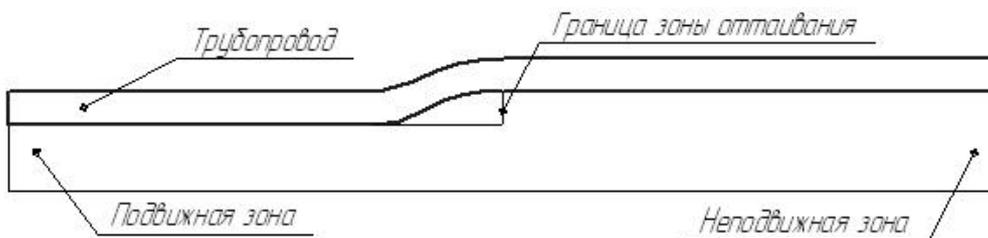


Рис. 5. Деформирование грунта вертикальным смещением

Моделируемая часть трубопровода должна быть достаточно большой для того, чтобы граничные условия не имели значительного влияния на критическую область переходной зоны. В качестве модели грунта принято абсолютно жесткое тело, так как упругие деформации учитывались при расчете просадки трубопровода. Грунт представлен в виде балки квадратного сечения. В качестве условий опирания трубопровода на грунт моделировался контакт между двумя балками. В

качестве граничных условий приняты следующие наложенные на модель закрепления. На правом конце модели, расположенном на неподвижной стороне устанавливается заделка (т.е. в данной точке все линейные и угловые перемещения полагаются равными нулю). На левом конце, который находится на подвижной стороне угловые перемещения, также считаются нулевыми. Линейные перемещения приняты таким образом,

что модель может изменять свое положение только в вертикальном направлении.

Для описания пластического поведения материала трубы используется полилинейная модель с изотропным упрочнением, которая рекомендуется для проведения анализа при больших деформациях. В качестве исходных данных здесь требуется диаграмма деформирования материала, которая вводится табличным методом.

Отметим, что пластичность представляет собой неконсервативный процесс, при котором последовательность приложения нагрузки влияет на конечный результат, поэтому нагрузку в нашем случае следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения. Принятый в соответствии с этапами прокладки и эксплуатации трубопровода порядок приложения нагрузки представлен на рис. 6. Таким образом, рассматриваемый анализ включает в себя четыре шага нагружения. При этом последний шаг нагружения, где имеют место большие пластические деформации, для повышения точности решения и улучшения его сходимости необходимо разбить на достаточно большое число подшагов (около 1000), в которых будут вычисляться промежуточные решения. Отметим также, что в программе ANSYS при выполнении нелинейного статического анализа время не имеет физического смысла, а является просто удобной переменной для обозначения различных уровней нагружения, и играет

роль счетчика для идентификации подшагов по нагрузке.

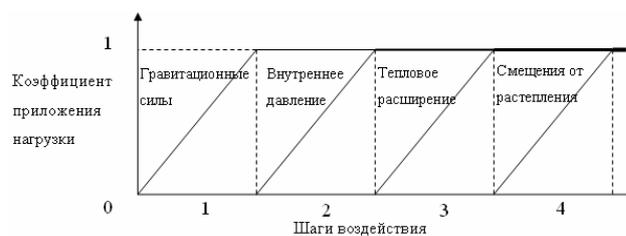


Рис. 6. Порядок приложения нагрузки

В результате прочностного анализа были получены значения напряжений для каждого элемента рассматриваемой модели. Эти данные можно использовать для оценки прочности в соответствии с необходимыми требованиями.

Вывод: практика строительства и эксплуатации магистрального транспорта нефти и газа в условиях многолетнемерзлых грунтов показывает значительную величину тепловой осадки трубопроводов, поэтому её учёт является важнейшим фактором при оценке напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бородавкин, П.П. Механика грунтов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 349 с.
2. Скворцов, Ю.В. Моделирование трубопроводных систем с помощью МКЭ-пакета «Ansys». – Самара: Гипровостокнефть, 2000. 84 с.

USE OF FINITE-ELEMENT ANALYSIS FOR CALCULATION THE DURABILITY OF UNDERGROUND PIPELINES IN VIEW OF GROUNDS THERMAL DEFORMATIONS

© 2010 A.V. Agafonov, V.A. Vorkov

JSC "Giprovostokneft", Samara

Projection of pipeline systems in conditions of the Far North represents a challenge – laying in many years frozen grounds. In a paper calculation of defrosting blooming and strength analysis of pipelines is executed by a finite element method. The approach to problem solving in view of plastic deformations is considered.

Key words: *durability, finite-element analysis, heat engineering calculation, many years frozen grounds*

Andrey Agafonov, Main Specialist at the Department of Metal Constructions and Strength Calculations. E-mail: nikolay.borenkov@giprovostokneft.ru
Vitaliy Vorkov, Engineer at the Department of Metal Constructions and Strength Calculations. E-mail: vvorkov@yandex.ru