

УДК 624.046.5

А.М. Петров, Е.Н. Сычкина

A.M. Petrov, E.N. Sychkina

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТАХ

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE CALCULATION OF UNDERGROUND PIPELINES ON HEAVING SOILS

Рассмотрены особенности расчета подземных трубопроводов на пучинистых грунтах, проведено исследование нормативной литературы, а также параметров грунтов, необходимых для расчета.

Ключевые слова: пучинистый грунт, трубопровод, автоматизация, параметры, морозное пучение.

The article discusses the features of the calculation of underground pipelines on heaving soils, studies the regulatory literature, as well as the parameters of the soils necessary for the calculation.

Keywords: heaving soil, pipeline, automation, parameters, frost heaving.

Морозное пучение грунтов являет собой совокупность процессов, при которых дисперсные грунты деформируются из-за увеличения своего объема во время промерзания. Объем грунта увеличивается за счет фазового перехода в лёд содержащейся в нем влаги, что ведет к расширению вещества.

Морозное пучение всегда являлось серьезным препятствием для освоения территорий, ему подверженных, так как возведенные на данных территориях сооружения при сезонных колебаниях температуры подвергались неравномерным, а также недопустимым деформациям. Это приводит к снижению срока эксплуатации сооружения, в особых случаях – к невозможности эксплуатации.

Промысловые трубопроводы нефте-, газодобывающей промышленности в большинстве своем располагаются под землей, а значит, также могут быть подвержены влиянию сил морозного пучения. Напряженно-деформированное состояние трубопровода определяют несколько факторов, среди которых фактор взаимодействия трубопровода с промерзающим пучинистым грунтом играет важную роль. Данный фактор является наиболее сложным в расчете, так

как явление морозного пучения является процессом, в результате которого напряженно-деформированное состояние возникает в самом грунте.

Цель данной работы – выявление особенностей, которые необходимо учитывать при расчете подземных трубопроводов на пучинистых грунтах. Для достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

- 1) выполнен обзор изученности вопроса;
- 2) выполнен обзор нормативной литературы в области расчета влияния морозного пучения на подземные трубопроводы;
- 3) сформулированы выводы.

Анализ изученности вопроса

Первые работы по определению сущности процесса морозной пучинистости грунтов принадлежат В.И. Штукенбергу. Затем исследование данного процесса осуществляли ученые Н.С. Богданов, П.Н. Любимов, С.Г. Войслав и др. Научные обоснования проведенных исследований привели к возникновению первых предпосылок относительно физической природы возникновения пучения в грунтах, подверженных промерзанию. Монография И.А. Иванова, С.Я. Кушнира «Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов» [1] содержит сведения об особенностях расчета и эксплуатации магистральных трубопроводов на пучинистых грунтах. Особое внимание уделено влиянию грунтового фактора, который является определяющим положение трубопровода в пространстве, напряжения в стенке трубопровода, его ресурс. Изучение влияния напряжений морозного пучения грунтов на эксплуатируемый трубопровод связано с сезонным промерзанием грунтов, зависящим от процесса теплообмена, химических изменений структуры, а также изменений структуры при изменении напряженно-деформированного состояния грунта. Исследование влияния тепла от подземного трубопровода на процесс промерзания показало, что оно изменяет геометрию процесса промерзания. При морозном пучении возникают как касательные, так и нормальные напряжения. В этом заключается принципиальное отличие трубопровода от фундаментов зданий. Касательные напряжения затрагивают лишь малую площадь в боковой зоне трубопровода, а нормальные силы давят полностью на всю нижнюю поверхность, стремясь переместить его вверх. Этому напряжению противодействуют силы отпора, возникающие в грунте обратной засыпки. Из этого следует, что для предотвращения вертикальных перемещений трубопровода необходимо приложить такую внешнюю силу, которая была бы равна равнодействующей нормальных сил морозного пучения. На рис. 1 представлена схема работы трубопровода в пучинистом грунте.

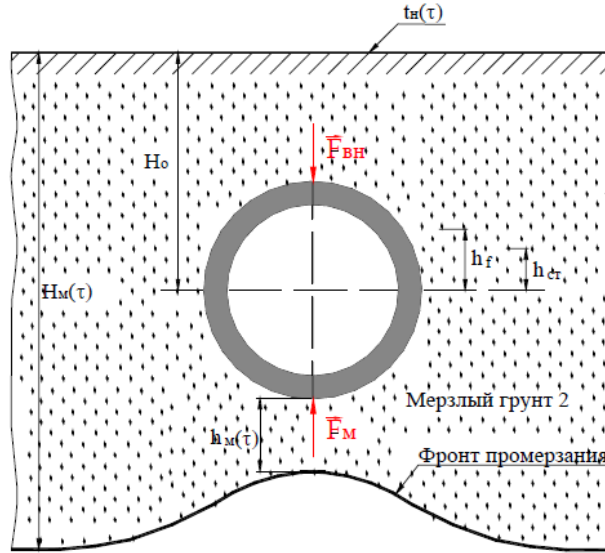


Рис. 1. Схема работы трубопровода в пучинистом грунте: H_0 – глубина заложения трубопровода; $h_m(t)$ – толщина промерзшего грунта на значительном удалении от трубопровода; $H_m(t)$ – толщина мерзлого грунта под трубопроводом; h_f – величина свободного пучения грунта, равная $f \cdot h_m(t)$; $h_{ст}$ – величина стесненного пучения; \bar{F}_m – равнодействующая нормальных сил морозного пучения; $\bar{F}_{вн}$ – внешняя сила, приложенная к трубопроводу; f – относительное пучение

Однако задача становится сложнее, если учесть, что трубопровод не обладает бесконечной жесткостью, и при наличии отпора грунта в нем возникают напряжения, влияние которых выражается в деформации стенки трубопровода. Возникает необходимость в оценке безаварийной работы участков трубопровода. Авторами монографии был предложен вероятностный метод оценки надежности трубопровода, так как факторы, влияющие на напряжения, имеют значительный разброс. Вводится случайная величина Q :

$$Q = \sigma_T - \sigma_{экр}, \quad (1)$$

Тогда условие надежной эксплуатации выражается следующим образом:

$$Q > 0, \quad (2)$$

Вероятность того, что Q является величиной положительной, определяется следующей формулой и имеет название – вероятность безотказной эксплуатации трубопровода:

$$P(Q > 0) = \int_0^{\infty} \rho(Q) dQ, \quad (3)$$

где $\rho(Q)$ – плотность распределения вероятностей величины Q .

Из этого равенства затем находится математическое ожидание $M(Q)$ и дисперсия $D(Q)$ случайной величины Q . В итоге многочисленных сложных расчетов находится коэффициент безотказной работы трубопровода, по величине которой можно определить вероятность возникновения аварии. Справочное пособие А.Б. Айнбиндера «Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость» [2] также содержит расчеты, учитывающие влияние морозного пучения на подземные трубопроводы. Автор рассматривает несколько случаев влияния пучинистых грунтов в зависимости от части поперечного сечения трубопровода, которая находится ниже глубины промерзания. Схема возможных случаев работы трубопровода представлена на рис. 2.

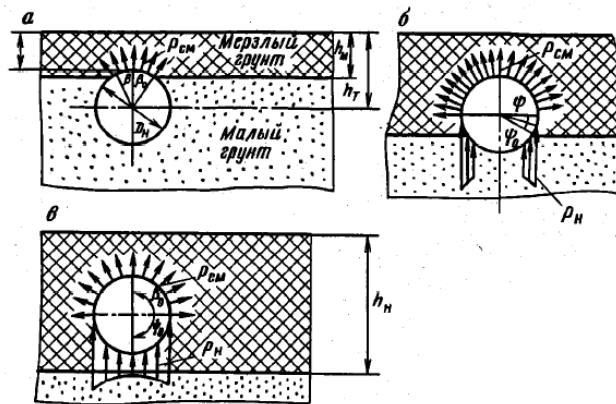


Рис. 2. Схема работы трубопровода в зависимости от глубины промерзания пучинистого грунта

В итоге всех расчетов можно получить сопротивление грунта, которое зависит от характеристик грунта, уровня обводнения, глубины промерзания и других менее влияющих факторов. Сопротивление грунта является нелинейной функцией перемещения. Расчеты сложны и трудоемки для проектировщика, не обладающего высоким уровнем знания высшей математики.

Обзор нормативной литературы

Основным обязательным нормативным документом при проектировании трубопроводов на пучинистых грунтах является «СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*

(с Изменениями N 1, 2)» [3]. Данный СП дает характеристики пучинистых грунтов, классифицирует грунты по степени пучинистости на пять групп. Пучинистые свойства грунтов вычисляют по следующей формуле:

$$D = \frac{k}{d^2 e}, \quad (4)$$

где $d = 1,85 \times 10^{-4}$ см³; e – коэффициент пористости; d – усредненный диаметр частиц грунта, см.

Любое сооружение, согласно [3], при наличии касательных напряжений рассчитывается по формуле

$$\tau_{fn} A_{fn} - F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} F_{rf}, \quad (5)$$

где τ_{fn} – значение касательной силы пучения, кПа, принимаемое по п. 6.8.7 [3]; A_{fn} – площадь боковой поверхности, находящейся в толще промерзания, м²; F – расчетная нагрузка, кН, при $\gamma_c = 0,9$; F_{rf} – расчетная сила, кН, удерживающая фундамент от выпучивания за счет трения его боковой поверхности о талый грунт, находящийся ниже глубины промерзания; $\gamma_c = 1,0$; $\gamma_n = 1,1$.

Расчет зданий и сооружений на действие нормальных сил морозного пучения приводится в «СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1, 2, 3)» [4]:

$$\rho_{fn} A_f \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} F, \quad (5)$$

где ρ_{fn} – удельное нормальное давление, возникающее за счет пучения грунта, на подошву сооружения, кПа, устанавливаемое опытным путем; A_f – площадь подошвы сооружения, м²;

Деформации грунтов от сил морозного пучения, которые определяют, принимая во внимание нагрузку от сооружения, не могут быть более предельных, которые в свою очередь допустимо принять из прил. Г [3]. Также, согласно [3], если расчетные деформации морозного пучения более чем предельные или недостаточна устойчивость к влиянию сил пучения, то кроме увеличения глубины заложения необходимо обосновать необходимость и возможность мероприятий, которые призваны уменьшить деформации и силы, возникающие от морозного пучения, уменьшить глубину промерзания, а именно: замена грунта, теплозащитные и водозащитные мероприятия, устрой-

ство подушки, физико-химические мероприятия. Если же выполнение вышеперечисленных мероприятий все равно не исключает деформации, возникающие от морозного пучения, тогда необходимо рассмотреть конструктивные мероприятия, которые проектируются в зависимости от расчета конструкции, учитывая предполагаемые деформации влияния морозного пучения. При проектировании конструкций необходимо учесть требования, исключающие промерзание грунта и попадание влаги в массив грунтов основания, подверженных морозному пучению, в период строительства. На [3] ссылаются и другие своды правил, регламентирующие проектирование именно трубопроводов. Так, например, «СП 284.1325800.2016. Трубопроводы промышленные для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ» [5], «СП 86.13330.2014 Магистральные трубопроводы (пересмотр актуализированного СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы» (СП 86.13330.2012)) (с Изменениями N 1, 2)» [6], «СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями N 1, 2)» [7], «СП 34-116-97. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов» [8]. Представленные своды правил дают некоторые рекомендации для проектирования трубопроводов в условиях пучинистых грунтов, однако расчетов, учитывающих влияние сил морозного пучения, в них не представлено.

Выводы

При расчете трубопровода на пучинистых грунтах возможно учесть морозное пучение по формулам, представленным в [3, 4]. Однако эти расчеты более применимы для фундаментов. При расчете же линейных сооружений, которыми являются трубопроводы, предложенные расчеты не дают точных величин деформаций. Сложно составить точный прогноз перемещений трубопровода. Расчеты, предложенные авторами работ [1, 2], акцентированы именно на интересующих нас трубопроводах. Данные расчеты более точны, они учитывают все особенности напряженно-деформированного состояния трубопровода при воздействии на него сил морозного пучения. Все факторы, связанные с морозным пучением, вычисляются по сложным и объемным формулам [9, 10]. Вычисление по этим формулам вручную занимает достаточно много времени. Поэтому методики расчета нуждаются в автоматизации, что позволит в разы снизить трудоемкость вычислительного процесса. В ходе подготовки магистерской диссертации планируется разработать программу на основе одной из вышеперечисленных методик расчета. В качестве базы для разработки программы был выбран MS Excel VBA. При помощи данной программы процесс расчета трубопровода будет сведен к заданию исходных данных и характеристик грунтов. В итоге расчета будут получены величины

напряжения, создаваемого силами морозного пучения, и вывод о необходимости принятия мер к предотвращению этих напряжений.

Список литературы

1. Иванов И.А., Кушнир С.Я. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов: монография. – СПб: Недра, 2010. – 174 с.
2. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справ. пособие. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
3. Свод правил: СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями № 1, 2): нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 2019.
4. Свод правил: СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1, 2, 3): нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 2019.
5. Свод правил: СП 284.1325800.2016. Трубопроводы промысловые для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ: нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 2017.
6. Свод правил: СП 86.13330.2014. Магистральные трубопроводы (пересмотр актуализированного СНиП III-42-80* «Магистральные трубопроводы» (СП 86.13330.2012)) (с Изменениями № 1, 2): нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 2018.
7. Свод правил: СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями № 1, 2): нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 2013.
8. Свод правил: СП 34-116-97. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промысловых нефтегазопроводов): нормативно-технический материал. – М.: Стандартинформ, 1997.
9. Юрченко А.А. Методика оценки пространственного положения трубопроводов в условиях пучинистых грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 144 с.
10. Цапурин К.А., Скворцов Ю.В., Глушков С.В. Оценка надежности трубопроводов, прокладываемых в пучинистых грунтах // Технические науки: теория и практика: материалы междунар. заоч. науч. конф. – Чита, 2012. – С. 98–105.

Получено 12.02.2020

Петров Алексей Михайлович – магистрант, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: alexxpetrow@gmail.com.

Научный руководитель **Сычкина Евгения Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: aspirant123@mail.ru.