

Мордовской Сергей Денисович

д-р техн. наук, заведующий кафедрой

Эверстов Владимир Васильевич

старший преподаватель

Акимов Мир Петрович

канд. техн. наук, заведующий кафедрой

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный

университет им. М.К. Аммосова»

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

DOI 10.21661/r-115191

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ В СЛОЕ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ГРУНТОВ

Аннотация: рассмотрены условия механического равновесия для вертикального цилиндрического недеформируемого включения при промерзании-протаивании в условиях многолетней мерзлоты. Описана разработанная математическая модель расчета накопления величины пучений при циклическом оттаивании-промерзании.

Ключевые слова: условия механического равновесия, промерзание-протаивание, многолетняя мерзлота, морозное пучение, математическое моделирование, задача Стефана, метод конечных разностей.



Рис. 1. Морозное пучение опоры электросети

Морозное пучение – один из самых распространенных мерзлотных процессов. Повсеместно во многих населенных пунктах можно наблюдать выпячивание из земли столбов и мелко погруженных свай, пучение опор уличного освещения, пример которого показан на фотографии (рис. 1). Эти опоры были установлены в г. Якутске лишь несколько лет назад, но за это время «вылезли» из земли на значительную величину. В обывательском представлении столбы выпучиваются льдом, образующимся под ними при промерзании почвы, но, в самом деле, процесс пучения результат сложного наложения различных процессов, рассмотрение которых представляет определенный научный интерес.

Исследование процесса морозного пучения как одного из ярких криогенных явлений имеет давнюю историю, накоплен большой объем экспериментальных данных [10; 13], определены основные условия возникновения и развития [14; 16], результаты представлены в виде общепринятых строительных норм и рекомендаций [1; 5; 9]. Вместе с тем, существующие подходы не обеспечивают надежное прогнозирование морозных пучений в массивах пород, так как не учитывают общего мерзлотного состояния и накопление результатов процессов.

Феноменологическое описание процесса пучения. Морозное пучение грунтов развивается в активном деятельном слое пород. В районах распространения многолетней мерзлоты он представлен слоем сезонного оттаивания грунтов. В пределах этого слоя и происходят основные тепломассообменные и механические процессы, определяющие основные криогенные явления. Нижележащие слои, представленные мерзлыми породами, сохраняют почти постоянную температуру немного ниже температуры замерзания воды и в основном только обеспечивают температурный фон для вышележащего деятельного слоя, практически невлагопроводны (влага, попадающая в них, замерзает и в дальнейшем находится в состоянии льда), процессы влагопереноса в газовой и пленочной фазах слабо выражены в виду малых градиентов температур. В талом состоянии грунты представляют собой пористую среду со слабой связностью скелета, поры которой заполнены влагой. Если поры практически полностью заполнены влагой, при промерзании в отсутствие оттока влаги происходит увеличение объема

грунта вследствие увеличения объема порового пространства при превращении воды в лед. В отсутствие возможности бокового расширения изменение объема происходит по высоте. При сезонном морозном пучении наблюдаются поднятия поверхности грунта зимой и опускания летом с амплитудой в несколько сантиметров.

Рассмотрим условия равновесия для вертикального цилиндрического включения (сваи, опоры) при протаивании-промерзании, в условиях наличия многолетней мерзлоты. Промерзание грунта начинается сверху и слой промерзшего грунта представляет собой плиту мерзлой породы, лежащую на талых породах (рис. 2). При развитии промерзания на нижней поверхности плиты происходит образования мерзлого грунта, объем которой больше исходного объема и плита перемещается вверх. Вес плиты уравнивается суммой напряжений скелета нижележащих слоев и давлением порового раствора. Происходит сдвиг опоры с мерзлой плитой по площади контакта и в процессе пучения плита мерзлого грунта стремится увлечь включение вверх. При этом нижний конец включения перемещается на величину пропорциональную линейному расширению грунта, а верхний конец включения остается относительно поверхности грунта неподвижным. Заметное для наблюдателя изменение положения верхней части включения происходит при следующем сезонном протаивании грунта. При этом нижняя часть включения является зажатой неподвижным мерзлым грунтом нижних слоев, а протаявшая часть грунта уменьшает свой объем и оседает, обнажая верхнюю часть включения. Даже при протаивании грунта ниже подошвы включения, сил трения действующих на боковую поверхность зачастую достаточно, для исключения обратного проваливания столба. Кроме того, в полость, образуемую под нижним концом включения, происходит выдавливание поровой влаги и пород стенки полости, что тоже препятствует обратному оседанию. Таким образом, при повторении циклов промерзания-протаивания, включение все больше выдавливается из грунта.

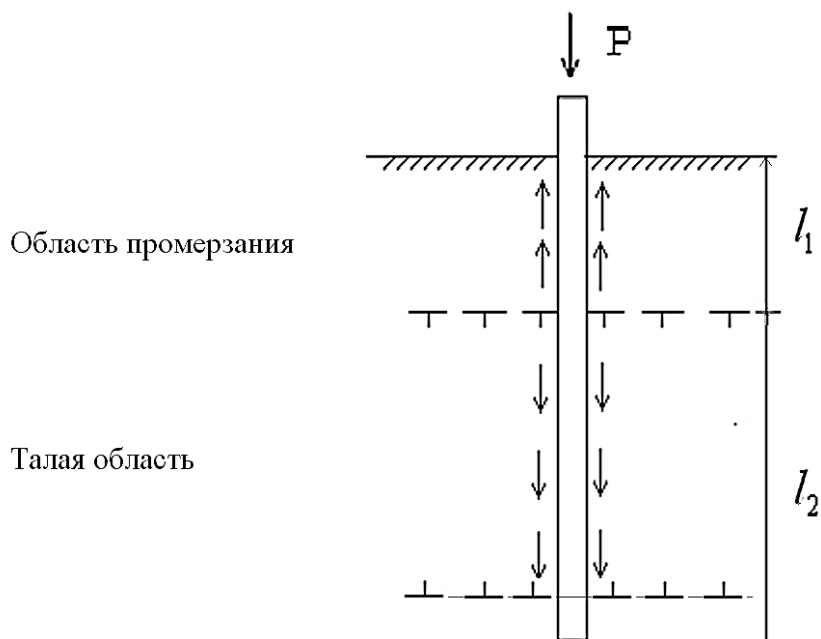


Рис. 2. Схема к расчету сил морозного пучения

Характерно, что движение включения относительно грунта начинается не сразу с началом промерзания грунта, а с некоторым временным лагом, определяемым силами смерзания грунта на боковой поверхности и трением в нижней части, весом самого включения и нагрузкой.

Минимальная глубина промерзания $l_{мин}$ необходимая для начала выпучивания столба определяется исходя из условия:

$$F_{пуч} \geq P + F_{тр}, \quad (1)$$

где, $F_{пуч} = \tau_{св} S_1$ – усилие пучения, действующее на верхнюю, часть со стороны мерзлой плиты, P – вес и нагрузка, $F_{тр} = \tau_{сд} S_2$ – сила трения нижней части, находящейся в слое талого грунта, $L = l_1 + l_2$ – длина включения в грунте, l_1 – длина промерзшей части, l_2 – длина нижней части, находящейся в талом грунте, $S_1 = \pi D l_1$ и $S_2 = \pi D l_2$ площади боковой поверхности участков, D – поперечный диаметр включения, соответственно. Аналогичные оценки приведены в работе [3], посвященной криогенным деформациям свайного основания трубопроводов.

Для включения, с длиной подземной части L , меньшей глубины сезонного протаивания, для однородного грунта без учета зависимости свойств породы от температуры, минимальная толщина промерзшего грунта составит:

$$l_{\text{мин}} = \frac{L\tau_{\text{сд}}}{\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{сд}}} + \frac{P}{\pi D(\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{сд}})} \quad (2)$$

Расчетные значения сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания $\sigma_{\text{см}}$ должны определяться экспериментально для каждого типа грунта. Для оценки можно использовать обобщенные данные, представленные в СНиП [9].

По данным многих авторов расчетные значения сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания меньше максимальных касательных напряжений в мерзлых грунтах, что возможно определяются степенью гидрофильности поверхности смерзания. Этот факт означает, что пока включение не подвижно, происходит проскальзывание мерзлых пород именно по поверхности контакта. Расчетные значения сил трения по боковой поверхности в талой области тоже должны определяться экспериментально и для модели расчетов можно также использовать обобщенные данные из СНиП.

Выдергивание включения может происходить и при вмораживании нижней его части в мерзлый грунт ниже подошвы слоя сезонного протаивания. Условия устойчивости нарушается при мощности промерзшего слоя с учетом действия сил смерзания в нижней части включения представляются в виде:

$$l_{\text{мин}} = \frac{(L - H_{\text{нр}})\tau_{\text{см}}}{\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{сд}}} + \frac{H_{\text{нр}}\tau_{\text{сд}}}{\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{сд}}} + \frac{P}{\pi D(\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{сд}})}, \quad (3)$$

где $H_{\text{нр}}$ – глубина подошвы слоя сезонно талого грунта.

Более полный анализ процессов влагопереноса, действующих сил и изменения напряженно деформированного состояния грунтовой системы приведен, например, в работах [2; 11–12; 15; 17]. Оценочные величины минимально необходимых глубин промерзания при мощности слоя сезонного протаивания грунта $H_{\text{нр}} = 1,7$ м, для различных типов видов грунтов приведены на рисунке 3. Здесь

значения прочностных параметров приняты при температуре мерзлого грунта равной -3°C , а τ_{cd} не зависят от глубины слоев.

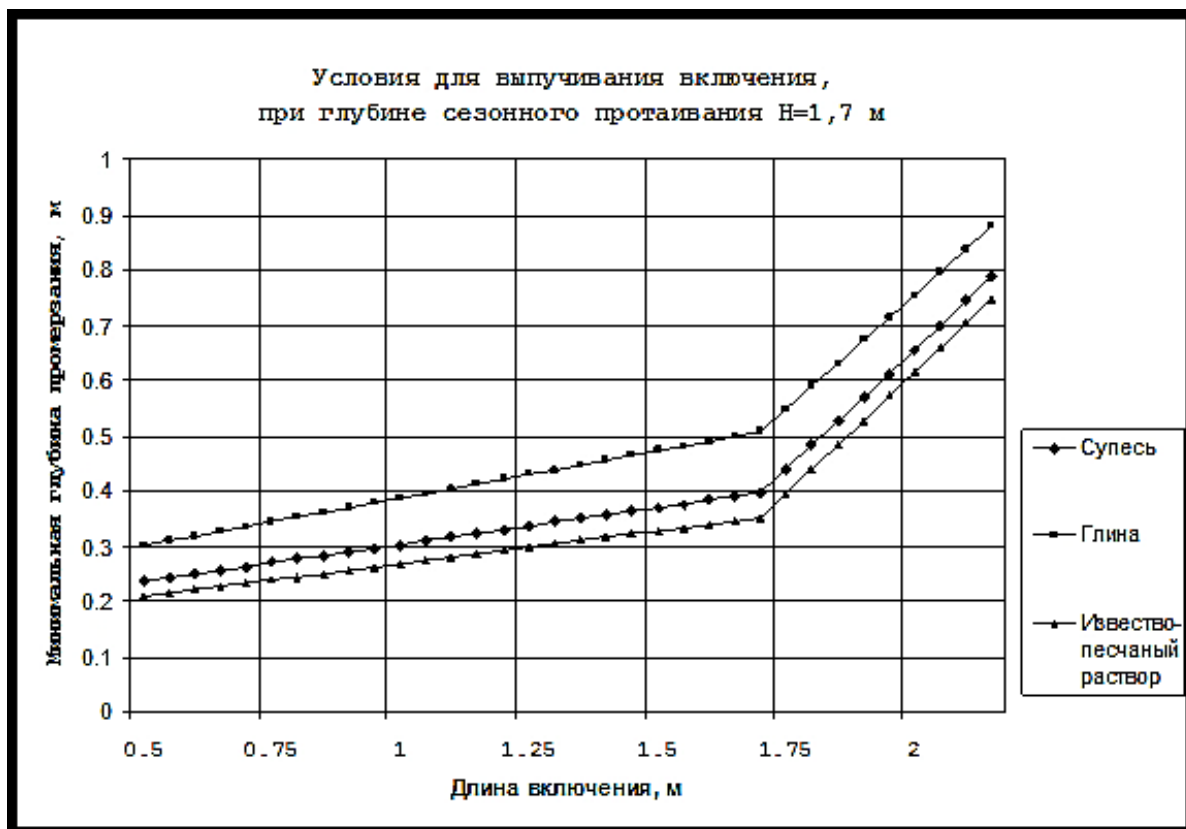


Рис. 3. Минимально необходимые для начала движения включения глубины промерзания ($\tau_{cd} = 0.3$ МПа, $\sigma = 0.031$ МПа, $P=5000$ кН)

Учет зависимости сил смерзания $\tau_{см}$ от температуры (рис. 4) показывает, что при понижении температуры на поверхности смерзания, минимально необходимые мощности промерзшего слоя значительно уменьшаются. Даже для включения с длиной 1,5 м при температуре -10°C достаточно 20 см толщины промерзшего грунта, чтобы включение начало движение.

Для грунтов с неполным промерзанием пор влагой, величина пучений определяется превышением объема льда, образующегося при фазовом переходе, над объемом пор. Максимальная величина сезонного поднятия сваи-столба Δl будет определяться длиной нижней части, находящейся в талой области грунта, в момент начала движения

$$\Delta l = m(L - l_1) \frac{\rho_e}{\rho_l}, \quad (5)$$

где m – пористость грунта, ρ_e , ρ_n плотности воды и льда соответственно.

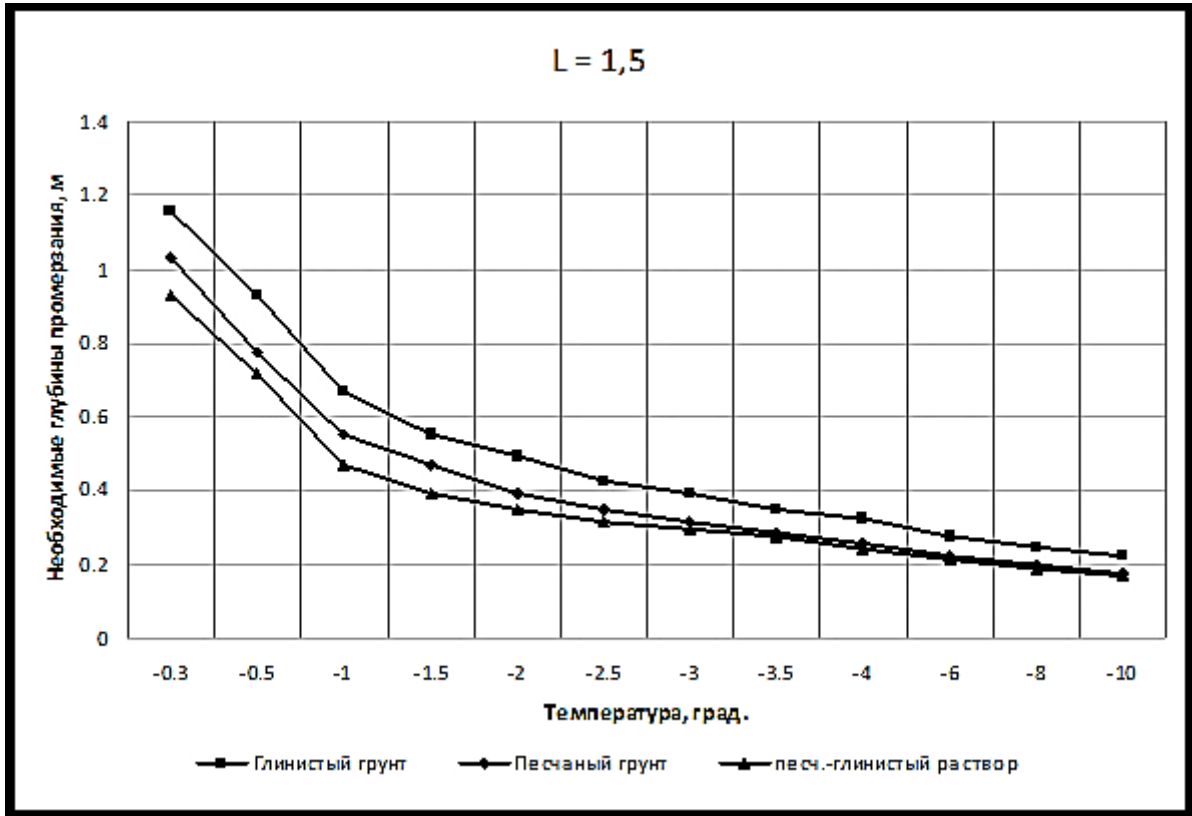


Рис. 4. Зависимость минимальной толщины мерзлого слоя от температуры

Здесь мы предполагаем, что поры грунта полностью заполнены водой (увлажненный грунт) и оттока влаги из зоны промерзания не происходит. Такое допущение правомерно, в виду того, что снизу талую зону подпирает мерзлый грунт, через который вода практически не фильтруется, а боковым оттоком пренебрегаем в виду однородности промерзания.

В общем случае с учетом неоднородности распределения температуры по глубине силы, действующие по боковой поверхности, выражаются в интегралах (для круглого сечения радиусом r):

$$F_{\text{нуч}} = 2\pi r \int_0^{l_1} \tau_{cm}(T(x), x) dx \quad (3)$$

$$F_{\text{мп}} = 2\pi r \int_{l_1}^L \tau_{cd}(T(x), x) dx \quad (4)$$

При численной реализации модели, с учетом неоднородности температурного поля и литологии грунтов, вместо условий (2) или (3) необходимо использовать само условие (1), заменяя интегралы суммами, в процессе счета.

Численный алгоритм. Из феноменологического описания процессов понятно, что основным для расчета величин пучения является температурное поле. Промерзание-промерзание пористой среды обычно ставится в фронтальной постановке, предполагающей малые объемы занятой зоной фазовых превращений. Наиболее применимой математической моделью процесса промерзания-протаивания можно считать классическую задачу Стефана. Для численной реализации часто используется модификация задачи в постановке путем введения эффективной теплоемкости [7]:

$$(c\rho(T)) + D\delta(T - T_\phi) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (5)$$

где $\delta(T - T_\phi)$ – δ -функция Дирака, удовлетворяющая условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\eta) d\eta = 1,$$

$$D = L_\phi \rho_0 (W_0 - W_{нз}(T_\phi));$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_T, & T > T_\phi, \\ \lambda_M, & T < T_\phi; \end{cases}$$

$$c\rho(T) = \begin{cases} c\rho_T, & T > T_\phi, \\ c\rho_M, & T < T_\phi. \end{cases}$$

где W_0 – начальная влажность горных пород; $W_{нз}$ – функция содержания незамерзшей воды; ρ_0 – плотность скелета; λ_M, λ_T – коэффициенты теплопроводности; а $c\rho_M, c\rho_T$ – объемные теплоемкости мерзлых и талых пород соответственно, D – добавка к эффективной теплоемкости, учитывающая вклад фазовых превращений, L_ϕ – удельная теплота фазового перехода воды, T_ϕ – температура изменения агрегатного состояния свободной воды.

В качестве граничных условий на дневной поверхности грунта имеем тепловой поток в массив, задающий тепловой баланс:

$$q_T = Q_C(1-A) + \alpha(T_B - T), \quad (6)$$

где Q_C – суммарная солнечная радиация; A – альбедо поверхности, α_T – коэффициент теплообмена пород с воздухом, T_B , T – температуры воздуха и пород на поверхности, q_T – тепловой поток в породу.

Считая, что тепловое влияние поверхности ограничено, на нижней границе расчетной области задаем отсутствие теплового потока. Начальное распределение температур в массиве грунта принималось приближенным к среднегодовым естественным многолетним температурам.

Разностные уравнения построены интегро-интерполяционным методом по неявной разностной схеме сквозного счета для одномерной задачи с размазыванием теплофизических параметров в пределах одного пространственного шага [8].

Для описания теплофизических свойств использовался аддитивный подход. Значения объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности породы определяются в виде:

$$c\rho_i(T) = c\rho_c(1-m) + m\beta_e c\rho_B + m\beta_l c\rho_n, \quad (13)$$

$$\lambda(T) = \lambda_c(1-m) + m\beta_e \lambda_B + m\beta_l \lambda_n. \quad (14)$$

где $c\rho_c$, λ_c – объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала скелета, m – пористость, $c\rho_B$, $c\rho_n$ – объемные теплоемкости, λ_B , λ_n – коэффициенты теплопроводности воды и льда, β_e , β_l – насыщенности пор водой и льдом, соответственно.

Для полностью грунтов с полным насыщением пор, в талом состоянии $\beta_e = 1$, а $\beta_l = 0$. В мерзлом грунте $\beta_e = 0$, а $\beta_l = 1$, но из-за увеличения объема, занимаемого льдом, пористость увеличивается, что учитывается в корректировке шага расчетной сетки, аналогично методике, приведенной в работе [4].

Температура воздуха задается в виде периодической функции от расчетного времени t исходя из климатических параметров местности,

$$T_B = A + B \cos\left(\frac{t}{365,24} + C\right), \quad (15)$$

A – среднегодовая температура, B – амплитуда годовых колебаний температуры, C – смещение учитывающее начало счета, t – время счета в сутках.

Параметры задачи нелинейно зависят от температуры, и для решения задачи используется итерационный алгоритм: на каждом временном шаге проводятся итерации до достижения сходимости по заданной точности. На каждом временном шаге, после сходимости температурной задачи, определяются координаты границ протаивания и обратного промерзания, суммированием по «талым» и «мерзлым» шагам расчетной сетки определяются силы, действующие на боковой поверхности включения, проверяется выполнение условия (1), если условия начала движения включения обеспечены, вычисляется добавка к величине пучения твердого включения. При схлопывании зоны сезонного протаивания, накопленное пучение будет представлять длину выпячивания при следующем сезонном протаивании грунта.

Результаты численного моделирования. Проведены расчеты по описанному алгоритму, где рассматривается массив грунта мощностью до 20 м в течение нескольких лет. Теплофизические параметры грунта задаются удельными теплоемкостью и коэффициентом теплопроводности материала скелета и были приняты удовлетворяющие рассмотренным типам грунтов. Влажность грунта задавалась через пористость. Сопротивления сдвигу и сила трения по бокам свай аппроксимировались кусочно-линейными зависимостями, по данным таблиц 1 и 3. Моделирование проводилось на 5 лет, включающих 4 сезона промерзания-протаивания, для различных длин включения.

1. Глинистый грунт. Глинистые почвы характеризуются плохой влагопроводностью и в талом состоянии хорошо удерживают воду и сохраняют почти полную водонасыщенность пор до дневной поверхности. Пористость глинистого грунта принята равной 0,25.

Представленные на рисунке 5, результаты расчетов показывают, что за 4 сезона промерзания-протаивания суммарное выпучивание может составить более 12 см для включения длиной 2,0 м. Вмораживание нижней части включения в

слой постоянных отрицательных температур уменьшает его выпучивание в среднем до 1 см и менее в год, но оно присутствует даже для включения длиной 3,5 м, когда как слой сезонного протаивания достигает глубины 2,5 м, т.е. значительная часть сваи изначально находится в мерзлом грунте. Большие значения величины пучения в первый сезон возможно определяется тем, что начальная температура грунта была принята равной $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к большой глубине сезонного протаивания за первый сезон, до 2,6 м, и снижает удерживающую способность боковых сил в нижней части включения. При установлении циклических изменений температурного поля глубина сезонного протаивания уменьшается до 1,8 м, что приводит к уменьшению значений сезонных пучений.

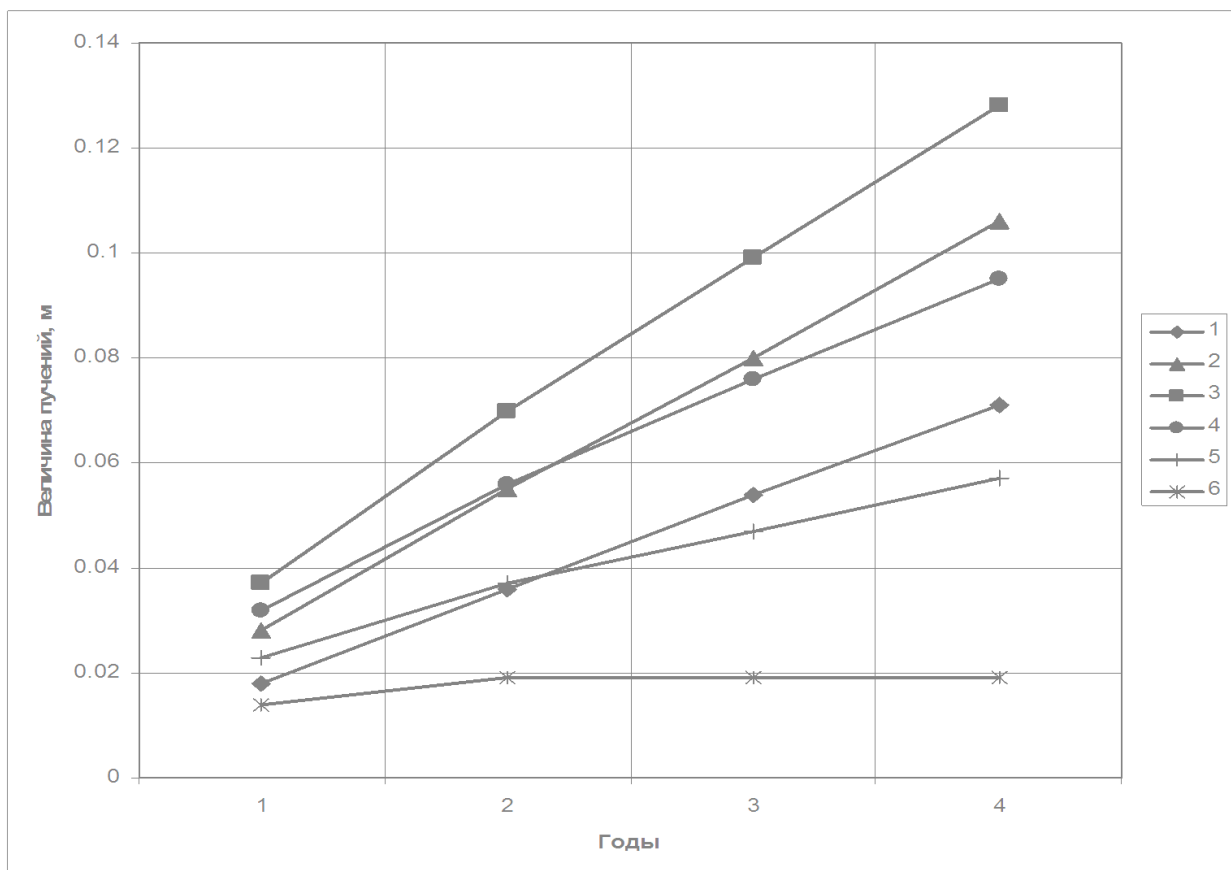


Рис. 5. Накопление пучений по годам, (глинистый грунт) при длине включения:

1 – 1,0 м, 2 – 1,5 м, 3 – 2,0 м, 4 – 2,5 м, 5 – 3,0 м, 6 – 3,5 м

2. *Песчаный грунт.* Песчаный грунт характеризуется большей пористостью и значением коэффициента теплопроводности скелета. В работе рассматривается случай полного водонасыщения пор влагой. В естественном состоянии песчаные

почвы характеризуются хорошей влагопроводностью и верхние слои таких грунтов имеют малую степень увлажненности. Полная водонасыщенность пор в таких грунтах в талом состоянии возможна, если рядом находится водоем с высоким уровнем водной поверхности, или грунт засыпан на болотистой местности. Также этому будет способствовать дождливая осень перед началом заморозков. Пористость грунта принята равной $m=0,35$, как у чистого песка средней крупности.

При принятых теплофизических параметрах грунтов глубина сезонного протаивания сравнима с глинистыми грунтами и в первый сезон составляет 2,7 м. Результаты расчетов для различных длин включения представлены на рисунке 6.

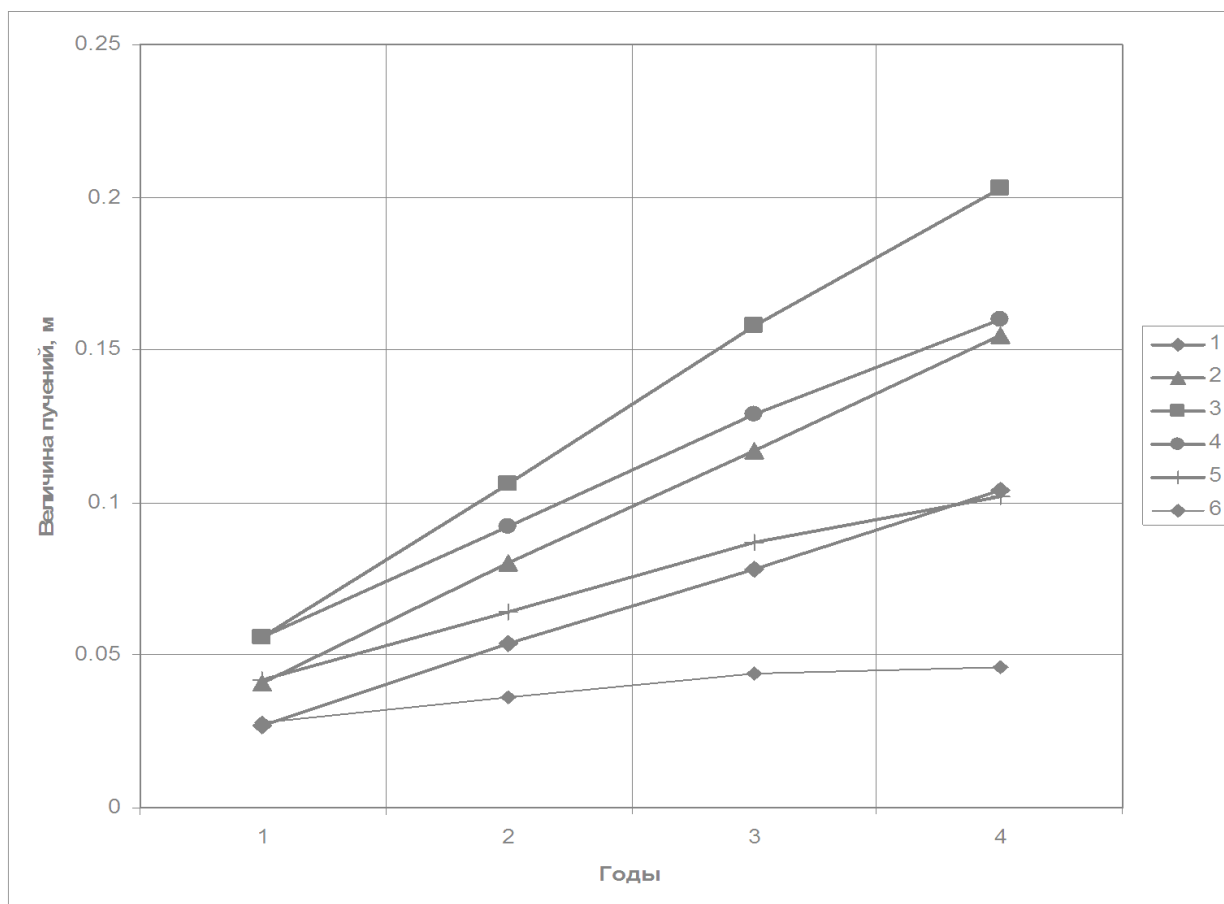


Рис. 6. Накопление пучений по годам, (песчаный грунт) при длине включения:
1 – 1,0 м, 2 – 1,5 м, 3 – 2,0 м, 4 – 2,5 м, 5 – 3,0 м, 6 – 3,5 м

В виду большей пористости при промерзании песчаных грунтов динамика пучения более выражена. Для включения длиной 2 м, накопленное за 4 сезона

пучение превышает 20 сантиметров. Вмораживание нижнего конца в многолетнемерзлый грунт снижает величину накопленных пучений. Также заметно влияние начальных условий, которое увеличивает величину сезонного пучения за первый год.

Обсуждение результатов. Как показывают результаты моделирования пучений для сезонно протаивающих мерзлых грунтов, накопление пучений не зависит от типа грунтов и в основном определяется влагонасыщенностью пор. Основной влагоперенос в промерзающем массиве грунта представляется результатом поршневого вытеснения влаги промерзающим слоем, что предполагает, повышенную влажность нижних слоев грунта. Например, опоры уличного освещения установлены в слое насыпного песчаного грунта, которые по рекомендациям являются не пучиноопасные, но при их насыщении стоками от дорожного полотна становятся переувлажненными, что и является причиной их большого пучения. Также, по-видимому, причиной неравномерных пучений тротуаров, обложенных плиткой и покрытых асфальтом, является снижение испарения влаги, которое ведет к сохранению повышенной влажности грунтов, что служит основной предпосылкой пучений.

Анализ особенностей протекания процесса морозного пучения показывает, что широко используемые методы борьбы с пучениями свай и опор, такие как теплоизоляция поверхности, повышение гидрофобности боковой поверхности могут снизить наблюдаемые величины деформаций и для сезонно оттаивающих грунтов. Также можно рекомендовать использование пирамидальной формы с расширением книзу, скользящих оболочек с незамерзающей смазкой зазора, в верхней части опор [5; 6].

Список литературы

1. Горелик Я.Б. Методы расчета деформаций инженерных конструкций, вызванных пучением пород промерзающего слоя [Текст] // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV. – №1. – С. 50–62.
2. Изаксон В.Ю. Вопросы механики многолетнемерзлых горных пород. [Текст]. – Якутск: ЯНЦ СО РАН СССР, 1991. – 211 с.

3. Марахтанов В.П. Криогенные деформации свайного основания трубопроводов [Текст] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – №5 (39). – С. 18–22.

4. Павлов А.Р. Численное моделирование динамики морозного пучения грунта [Текст] / А.Р. Павлов, М.В. Матвеева // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2008. – №4. – С. 79–84.

5. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов [Текст]. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с.

6. Репецкий Д.С. Устройство опор городских линий электропередач на сезоннопромерзающих грунтах [Текст] / Д.С. Репецкий, Б.С. Юшков // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4. – №3. – С. 133–140.

7. Самарский А.А. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана [Текст] / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // Журн. вычисл. математики и мат. физики. – 1965. – Т. 5. – №5. – С. 816–827.

8. Слепцов В.И. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах / В.И. Слепцов, С.Д. Мордовской, В.Ю. Изаксон. – Новосибирск: Недра, 1996. – 99 с.

9. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [Текст] / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 68 с.

10. Тютюнов И.А. Фазовые превращения воды в грунтах, природа ее миграции и пучения [Текст] // Доклады на межд. конф. по мерзлотоведению. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 71–80.

11. Фельдман Г.М. К расчету миграции влаги в грунтах при промерзании // Вопросы инженерной геокриологии. – 1969. – Вып. 22. – С. 89–107.

12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов [Текст]. – М.: Высш. шк., 1973. – 446 с.

13. Швецов Г.И. Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Высшая школа, 1988. – 295 с.

14. Peppin, Stephen S.L.; Style, Robert W. The Physics of Frost Heave and Ice-Lens Growth Vadose Zone Journal. – 2013. – Vol. 12. – №1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/12/1/vzj2012.0049>

15. Yang Z.J. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate [Текст] / Z.J. Yang, B. Still, X. Ge // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 113. – P. 12–19.

16. Bryant J.T. Time-dependent geothermal analysis – A forensic evaluation [Текст] / J.T. Bryant, M.A. Haque, B.L. Douglas // Proceedings of the 6th Congress on Forensic Engineering. – 2013. – P. 682–691.

17. Kurylyk B.L. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils [Текст] / B.L. Kurylyk, K. Watanabe // Advances in Water Resources. – 2013. – Vol. 60. – P. 160–177.