

А.Л. Невзоров

**ФУНДАМЕНТЫ
НА СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ
ГРУНТАХ**

Невзоров А.Л.

||

ФУНДАМЕНТЫ НА СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ



Невзоров А.Л.

ФУНДАМЕНТЫ НА СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям.

Издательство Ассоциации
строительных вузов

Москва 2000

Рецензенты

Г.Г.Болдырев, проф, д.т.н. кафедра автомобильных дорог, оснований и фундаментов Тверского государственного технического университета,

Кафедра механики грунтов, оснований и фундаментов Московского государственного строительного университета (зав. каф. проф., д.т.н. **С.Б. Ухов**).

Невзоров А.Л.

Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах

Учебное пособие/ М; Изд. АСВ, 2000, 152 стр., с илл.,

ISBN 5-93093-031-7

В пособии рассмотрены физические и теплофизические свойства мерзлых грунтов, способы расчета глубины промерзания и методы оценки пучинистости грунтов; описаны современные конструкции фундаментов на сезоннопромерзающих грунтах. В каждой главе приведены примеры вычислений.

ISBN 5-93093-031-7

© Издательство АСВ, 2000 г.
© Архангельский ГТУ, 2000 г.
© Невзоров А.Л. 2000 .

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Обозначение основных физических величин.....	8
1. Состав и свойства мерзлых грунтов.....	12
1.1. Грунт и его основные компонен.....	12
1.2. Физические свойства.....	16
1.3. Теплофизические свойства	21
1.3.1. Теплопроводность	21
1.3.2. Теплоемкость	27
1.3.3. Теплота фазовых превращений	29
1.4. Механические свойства	30
1.5. Примеры решения задач	32
2. Сезонное промерзание грунтов	37
2.1. Температурный режим грунтов	38
2.2. Глубина сезонного промерзания	46
2.3. Примеры решения задач	56
3. Морозное пучение	59
3.1. Механизм пучения.....	63
3.2. Оценка пучинистости грунтов	67
3.2.1. Первый уровень оценки.....	67
3.2.2. Второй уровень оценки.....	71
3.2.3. Третий уровень оценки.....	74
3.3. Примеры решения задач.....	84
4. Устройство фундаментов.....	90
4.1. Нормальнозаглубленные фундаменты.....	91
4.2. Малозаглубленные фундаменты.....	96
4.2.1. Фундаменты с промерзанием грунта под подошвой	96
4.2.2. Фундаменты с обогревом грунта.....	100
4.2.3. Фундаменты с теплоизоляцией	104
4.3. Примеры решения задач	120
Заключение	128
Приложения	131
Библиографический список	147

TABLE OF CONTENTS

Introduction	5
List of symbols	8
1.Composition and properties of frozen soils	12
1.1 Soil and its main components	12
1.2 Physical properties	16
1.3 Thermal properties	21
1.3.1 Thermal conductivity	21
1.3.2 Heat capacity	27
1.3.3 Latent heat of fusion	29
1.4 Mechanical properties	30
1.5 Examples of problem solving	32
2. Seasonal frost penetration	37
2.1 Temperature condition of soils	38
2.2 Frost depth	46
2.3 Examples of problem solving	56
3. Frost heave	59
3.1 Frost heave mechanics	63
3.2 Estimate of frost-heave susceptibility	67
3.2.1 First-level estimate	67
3.2.2 Second-level estimate	71
3.2.3 Third-level estimate	74
3.3 Examples of problem solving	84
4. Foundations	90
4.1 Foundations placed at the frost-free depth	91
4.2 Foundations placed in the seasonal frost zone	96
4.2.1 Foundations with soil freezing under footing	96
4.2.2 Foundations with soil heating	100
4.2.3 Foundations with heat insulation	104
4.3 Examples of problem solving	120
Summary	128
Appendices.....	131
List of references	147

ВВЕДЕНИЕ

Все более типичными для нашей страны становятся одно- и двух-этажные жилые дома с небольшими нагрузками на основание. Устройство для них традиционных массивных фундаментов, прорезающих слой сезонного промерзания грунтов, технически и экономически нецелесообразно. Проектирование малозаглубленных фундаментов требует тщательного анализа природно-климатических, геологических и техногенных факторов: температуры воздуха, продолжительности зимы, толщины снежного покрова, теплофизических свойств грунтов, тепловых потоков от сооружений и т.п.

К сожалению, при изучении архитектуры, инженерной геологии, механики грунтов, оснований и фундаментов и других специальных дисциплин указанные проблемы рассматриваются очень кратко. В ряде зарубежных университетов в последние годы читается специальный курс лекций - геотехника для районов с холодным климатом или арктическая геотехника. В России близким по содержанию является курс геокриологии для будущих инженеров-геологов.

Настоящее учебное пособие предназначено для элективного курса "Основы инженерной геокриологии", который предполагается организовать для студентов специальности 290300 "Промышленное и гражданское строительство" в 8-9 семестрах.

Обзор литературы для пособия был сделан во время стажировок автора в Московском государственном университете (1990), университете г.Оулу (Финляндия, 1996) и институте г.Нарвик (Норвегия, 1998). Автор выражает глубокую признательность В.А.Королеву, Э.Д.Ершову, А.Туутти, К.Куяла, О.Раваска, Э.Эхрولا, Т.Вестерлунду, Х.С.Арнстену и

другим сотрудникам указанных учебных заведений за большую помощь в сборе и систематизации материала.

В помощь студентам и специалистам, изучающим иностранную литературу, в прил. 1 к настоящему пособию приведен краткий русско-английский словарь с основными терминами по геокриологии. Определения терминов взяты из рабочего отчета Технического комитета по мерзлым грунтам Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению [62].

Автор выражает признательность рецензентам: проф., д.т.н. Г.Г.Болдыреву, проф., д.т.н. В.А.Миронову, проф., д.т.н. С.Б.Ухову, проф., к.т.н. В.В.Семенову, вед. науч. сотр., к.т.н. В.П.Мерзлякову, за ценные замечания, которые были учтены при доработке рукописи.

Выходу в свет этой книги способствовало содействие И.Ф.Авдышоева, генерального директора АО «Кортес» (г.Архангельск), и Ю.Л.Сироты, директора ТОО «Экотехнология» (г.Санкт-Петербург).

INTRODUCTION

One- and two-storied dwelling houses with low foundation loads are becoming more common in our country. Building traditional massive foundations cutting the layer of seasonal soil freezing for them is not advisable both from technical and economic points of view. To design foundations placed in the seasonal frost zone a thorough analysis of natural-climatic, technological and by-factors is needed, such as air temperature, winter duration, thickness of the snow layer, thermal soil properties, heat flows coming from the buildings, etc.

Unfortunately, the problems pointed above are not paid much attention to when studying architecture, engineering geology, soil mechanics, foundation engineering and other special subjects. In recent years the special course of lectures was introduced at some foreign universities – geotechnics for the cold climate regions or arctic geotechnics. In Russia the geocryology course for future engineers-geologists is close to the above-mentioned courses.

The given study guide is intended for the optional course “Basics of Engineering Geocryology”, which is supposed to be organized for the students of specialty 2903 “Industrial and civil engineering” in 8-9th terms.

The review of literature used for the guide was done during the study tour of the author to Moscow State University (1990), University of Oulu (Finland, 1996) and Institute of Applied Sciences in Narvik (Norway, 1998) . The author expresses his deep acknowledgement to V.A.Korolev, E.D.Yershov, A.Tuutti, E.Ehrola, K.Kujala, O.Ravaska, T.Westerlund, H.S.Arntsen and other scientists of the educational institutions spoken above for the great assistance provided in collecting and classification of the material.

To assist students and specialists, studying the foreign literature of the subject, a concise Russian-English dictionary containing the main terms of geocryology is appended to the study guide. The term definitions are taken from the working report of the Technical Committee on Frost (TC-8) under the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering [62].

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- A – площадь (поперечного сечения элемента, подошвы фундамента и т.п.)
- A_f – боковой поверхности фундамента в пределах слоя сезонного промерзания
- b – ширина (подошвы фундамента)
- b_i – теплоизоляции
- c – удельная теплоемкость
- c_i – льда
- c_w – воды
- c_s – твердых частиц
- c_g – газа
- c_f – мерзлого грунта
- c_{th} – талого грунта
- c_v – отнесенная к единице объема
- D – показатель дисперсности грунта
- $\bar{d}$ – средний размер частиц
- d – глубина заложения подошвы фундамента
- d_f – глубина промерзания грунта
- d_{ff} – под подушкой из непучинистого грунта
- d_{fi} – под теплоизоляцией
- d_0 – коэффициент при расчете глубины промерзания
- e – коэффициент пористости
- F – индекс промерзания
- $\bar{F}$ – среднее значение по многолетним данным
- F_x – максимальное значение, имеющее место один раз за x лет
- f – сопротивление грунта на боковой поверхности сваи
- g_f – плотность теплового потока
- g_w – интенсивность миграции влаги к фронту промерзания
- H – глубина залегания кровли пучинистого грунта;
- h – высота образца
- h_n – толщина подушки из непучинистого грунта
- h_k – высота капиллярного поднятия
- h_f – подъем поверхности грунта при пучении (морозное пучение)
- h_{ff} – подъем фундамента при пучении

h_u – допустимый подъем фундамента

I_p – число пластичности

I_L – показатель текучести

i_{tot} – суммарная льдистость

k – коэффициент

k_a – условий работы фундамента

k_n – учитывающий тепловое влияние здания

k_0 – учитывающий вид материала фундамента и состояние его поверхности

k_w – используемый при расчете содержания незамерзшей влаги

l – длина (например, сваи или зонда)

m_0 – коэффициент условий работы сваи

m_f – относительная глубина промерзания

m – масса (грунта)

m_i – льда

m_w – воды

m_s – твердых частиц

m_g – газа

m_d – высушенной пробы

n – пористость грунта

n_f – коэффициент, используемый при расчете температуры поверхности грунта

p – внешнее давление на грунт

p_{th} – давление пучения

P_w – мощность нагревательного элемента

p_i – массовая доля (процентное содержание) частиц определенного размера

Q – количество тепловой энергии

q – удельная теплота фазовых превращений (грунта)

q_w – воды

q_v – отнесенная к единице объема

R – расчетное сопротивление грунта основания

R_i – термическое сопротивление теплоизоляции

R_v – вертикальной

R_h – горизонтальной

R_n – конструкции пола

- R_f, R'_f – факторы, используемые для оценки пучинистости грунтов
 S – удельная площадь поверхности грунта
 S_c – толщина эквивалентного слоя грунта
 SP – сегрегационный потенциал
 T – температура
 T_a – воздуха
 T_{in} – воздуха в помещении
 T_w – среднезимняя атмосферного воздуха
 T_{bf} – начала замерзания грунта
 T_m – среднегодовая
 $\bar{T}_m$ – среднее значение по многолетним данным
 T_s – сегрегации
 T_{sc} – переохлаждения
 t – время
 t_c – охлаждения грунта
 t_w – продолжительность периода с температурой ниже нуля
 U – индекс оттаивания
 $\bar{U}$ – среднее значение годичного индекса оттаивания
 V – объем
 V_s – твердых частиц
 V_w – незамерзшей влаги
 V_i – льда
 V_p – пор
 V_g – газа
 v – скорость
 v_f – промерзания
 v_h – пучения
 v_m – миграции воды
 W – влажность (грунта)
 W_{tot} – суммарная
 W_w – за счет незамерзшей воды
 W' – за счет незамерзшей воды в объемном выражении
 W_{cr} – критическая
 W_L – на границе текучести
 W_P – на границе пластичности

z – глубина

α_c – коэффициент теплоотдачи поверхности

γ – удельный вес

δ_i – толщина теплоизоляции

ε_m – относительное пучение

λ – коэффициент теплопроводности, или теплопроводность

λ_i – льда или теплоизоляционного материала

λ_w – воды

λ_s – твердых частиц

λ_f – мерзлого грунта

λ_{th} – талого грунта

λ_d – сухого грунта

λ_{sat} – насыщенного грунта

μ – расчетный параметр

σ_s – сопротивление смещению мерзлого грунта

τ_f – касательные напряжения, возникающие при пучении грунта

ρ – плотность

ρ_n – нейтральной жидкости

ρ_s – частиц грунта

ρ_i – льда

ρ_d – грунта в сухом состоянии

ρ_w – воды

1. СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

1.1. Грунт и его основные компоненты

Грунтом называют любую горную породу или почву, представляющую собой многокомпонентную систему, используемую в качестве основания, среды или материала при возведении сооружений [13]. Грунт включает в себя следующие компоненты:

- твердые частицы, состоящие из различных минералов, обломков горных пород или органических веществ;
- воду с растворенными в ней веществами;
- газы – кислород, азот, диоксид углерода, метан и другие.

Свойства грунта определяются в первую очередь размером слагающих его частиц. Пылевато-глинистым грунтам, в которых преобладают частицы размером менее 0,05 мм, присущи пластичность и малая водопроницаемость; пескам – с частицами размером 2...0,05 мм – сыпучесть и хорошая водопроницаемость. Отсутствие капиллярного поднятия влаги характерно для крупнообломочных грунтов, содержащих частицы размером более 2 мм.

Зерновой состав грунта обычно изображают графически – в виде кривой гранулометрического состава. По оси ординат откладывают процентное содержание (массовая доля L) частиц с размером менее определенного значения, а по оси абсцисс – размер частиц в логарифмическом масштабе. Характерные графики для некоторых грунтов Архангельска приведены на рис. 1.1.

Дисперсность грунта можно оценить по удельной площади поверхности S , которая представляет собой площадь поверхности частиц, содержащихся в 1 г сухого грунта. Обычно ее определяют адсорбционными методами, полагая, что масса вещества, адсорбированного образцом, прямо пропорциональна суммарной поверхности содержащихся в нем частиц. В качестве адсорбата применяют пары воды, азот, этиленгликоль, бензол,

метиленовый краситель и другие вещества [52]. Чем мельче частицы, тем больше их удельная площадь поверхности. Многочисленными исследованиями установлено, что пески, как правило, имеют удельную площадь поверхности менее $5 \text{ м}^2/\text{г}$, суглинки и глины – более $50 \text{ м}^2/\text{г}$. У высокодисперсных глин монтмориллонитового состава она может достигать даже $850 \text{ м}^2/\text{г}$ [52].

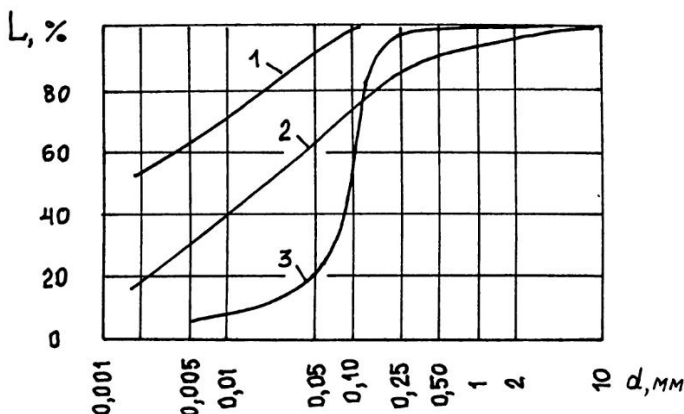


Рис. 1.1. Кривые гранулометрического состава характерных для Архангельска грунтов: 1 - глина озерно-ледниковая, 2 - суглинок моренный, 3 - песок пылеватый

Поверхность частиц за счет действия сил различной природы притягивает к себе молекулы воды, формируя пленку связанной влаги. Благодаря большей упорядоченности структуры свойства воды в пленке резко отличаются от свойств свободной или гравитационной воды. Плотность составляет $1,2...1,5 \text{ г}/\text{см}^3$, полное замерзание наступает при температуре -80°C и ниже, а вязкость в несколько раз превышает вязкость обычной воды. Сила притяжения пленки к поверхности частиц определяется давлением, которое достигает десятков и даже сотен мегапаскалей [52]. По мере удаления от поверхности частиц возрастает хаотичность в расположении молекул воды и связанная влага постепенно переходит в свободную.

Многие свойства грунтов определяются количеством содержащейся в них связанной воды.

В пылевато-глинистых грунтах с удельной площадью поверхности $S = 50...150 \text{ м}^2/\text{г}$ при толщине пленки $\delta = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и плотности $\rho_w = 1,2... 1,5 \text{ г/см}^3$ масса связанной влаги, приходящаяся на 1 г твердых частиц, составляет $0,12...0,36 \text{ г}$ ($m_w' = \delta S \rho_w$). Природная влажность, то есть отношение массы воды к массе твердых частиц, обычно изменяется от 0,15 до 0,40. Как видим, в таких грунтах практически вся вода является связанной. Частицы контактируют друг с другом через вязкий слой пленочной влаги, обеспечивающий подвижные, восстанавливающиеся связи. Благодаря этому пылевато-глинистые грунты обладают пластичностью. Их низкую водопроницаемость можно объяснить тем, что поры заняты связанной влагой и для вовлечения ее в движение требуется приложить значительное давление.

Пески, у которых удельная площадь поверхности, а значит и содержание связанной влаги, на два порядка ниже, не обладают пластичностью. Коэффициент фильтрации у них в сотни и тысячи раз больше, чем у пылевато-глинистых грунтов с равной пористостью.

Различие в содержании связанной влаги проявляется и при замораживании пылевато-глинистых грунтов и песков. Проведем следующий опыт. Контейнеры с образцами глины и песка поместим в морозильную камеру и с помощью датчиков будем регистрировать изменение во времени температуры внутри них. На полученных графиках $T = f(t)$ выделяются четыре характерных участка (рис.1.2):

АВ - охлаждение до температуры T_{sc} , при которой наблюдается неустойчивое переохлажденное состояние воды в порах; вывести ее из этого состояния может, например, легкое постукивание по стенкам контейнера;

ВС - небольшое повышение температуры, объясняющееся выделением тепла при кристаллизации воды;

СД - замерзание свободной воды при постоянной температуре T_{bf} , ко-

торию называют температурой начала замерзания;

ДЕ - падение температуры, свидетельствующее о полном замерзании свободной воды и начале замерзания связанной, или пленочной влаги.

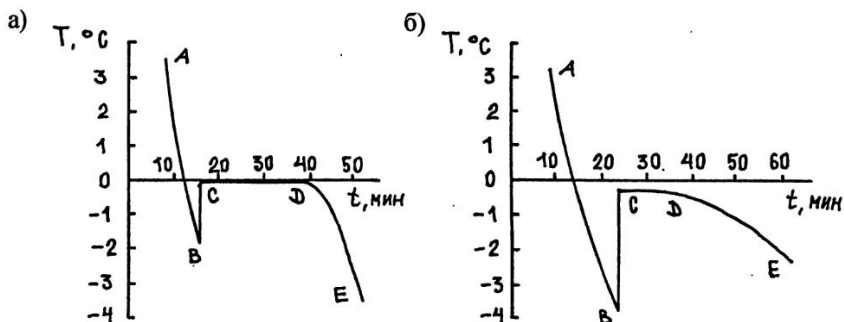


Рис. 1.2. Кривые охлаждения образцов грунта: а - песка ($W = 0,24$); б - глины ($I_p = 0,25$, $W = 0,31$)

Как видим, у кривой охлаждения образца глины, в которой преобладает связанная влага, участок СД значительно короче, а участок ДЕ более пологий, чем у кривой, построенной для песка. Температура начала замерзания составляет $-0,25^\circ\text{C}$ и 0°C для глины и песка соответственно.

Согласно нормативным документам значение температуры T_{bf} следует принимать: для суглинков и глин $-0,2^\circ\text{C}$, супесей $-0,1^\circ\text{C}$, песков 0°C [44, 51]. Существенное понижение температуры T_{bf} вызывают соли, растворенные в поровой воде (рис. 1.3).

Таким образом, мерзлый грунт в отличие от талого содержит

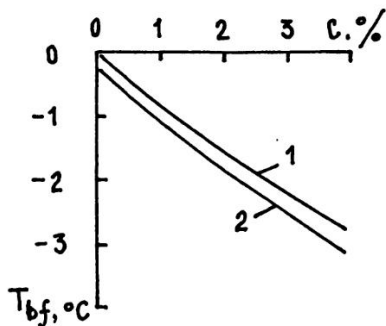


Рис. 1.3. Зависимость температуры начала замерзания грунта от концентрации солей в поровой влаге [51]: 1 – пески, 2 – пылевато-глинистые грунты

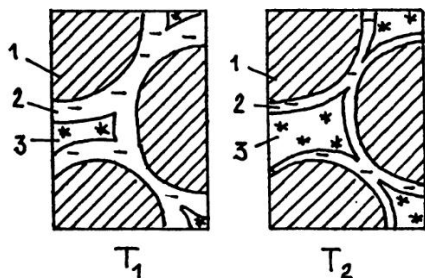


Рис. 1.4. Изменение состава мерзлого грунта при понижении температуры: 1 - твердые частицы, 2 - незамерзшая влага, 3 - лед ($T_1 > T_2$)

четыре компонента: твердые частицы, незамерзшую пленочную влагу, покрывающую поверхность частиц, лед и газы. Говорят, что между льдом и незамерзшей водой существует динамическое равновесие [21, 55]. При понижении температуры пленка становится тоньше и растет количество льда, при повышении температуры лед частично плавится (рис. 1.4).

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

На рис. 1.5 приведена схема, где основные компоненты мерзлого грунта – твердые частицы, незамерзшая влага, лед и газ – условно разделены, обозначены их масса m и объем V .

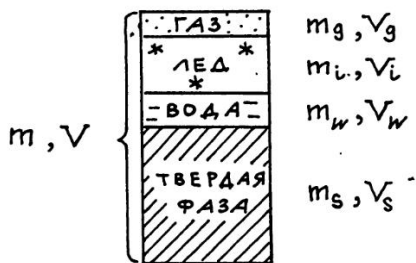


Рис. 1.5. Состав мерзлого грунта (условная схема)

Экспериментальным путем определяют четыре характеристики мерзлых грунтов: плотность, плотность частиц, суммарную влажность, влажность за счет незамерзшей воды.

Плотность грунта – отношение массы грунта к его объему, $\rho = m/V$. Ее выражают обычно в граммах на кубический сантиметр (г/см^3), определяют методом взвешивания в нейтральной жидкости при отрицательной температуре. Расчетная формула имеет вид

$$\rho = \frac{\rho_n m}{m - m_1}, \quad (1.1)$$

где ρ_n – плотность нейтральной жидкости (например, керосина) при температуре испытаний;

m – масса образца (100...150 г);

m_1 – масса образца, помещенного в нейтральную жидкость.

Плотность частиц грунта – отношение массы твердых частиц к их объему, $\rho_s = m_s / V_s$, выражается в тех же единицах, что и плотность грунта (г/см^3). Массу частиц определяют взвешиванием после оттаивания и высушивания образца, объем – по объему жидкости, вытесненной из стеклянной колбы после засыпки в нее пробы [11, 35].

Суммарная влажность – отношение массы воды и льда, содержащихся в грунте, к массе твердых частиц, $W_{\text{tot}} = (m_w + m_i) / m_s$. Выражают в долях единицы, определяют путем оттаивания и высушивания пробы грунта до постоянной массы при 105 °С. Вычисляют по формуле

$$W_{\text{tot}} = \frac{m - m_d}{m_d}, \quad (1.2)$$

где m – масса пробы мерзлого грунта;

m_d – масса высушенной пробы.

Влажность грунта за счет незамерзшей воды, или, как часто ее называют, содержание незамерзшей воды – это отношение массы воды в мерзлом грунте при заданной температуре к массе твердых частиц, $W_w = m_w / m_s$. Выражают в долях единицы. Определяют методами [30, 73]:

- ядерного магнитного резонанса – по степени поглощения электромагнитной энергии атомными ядрами в молекулах воды при импульсном электромагнитном воздействии;

- калориметрическим – по количеству теплоты, необходимому для плавления льда в образце мерзлого грунта;

- криоскопическим, в котором используется зависимость температуры замерзания поровой воды от влажности грунта;
- диэлектрической проницаемости, основанном на резком отличии диэлектрической проницаемости воды и льда;
- контактным - путем измерения миграционного потока незамерзшей пленочной влаги из мерзлого грунта и др.

Наиболее простым является последний метод. Для пояснения его сути сначала рассмотрим следующий опыт. Возьмем два идентичных образца талого грунта, высушим один из них, а затем образцы плотно прижмем друг к другу (рис. 1.6, а). Влага будет мигрировать из влажного образца в сухой до тех пор, пока в них не произойдет выравнивание толщины пленок связанной воды.

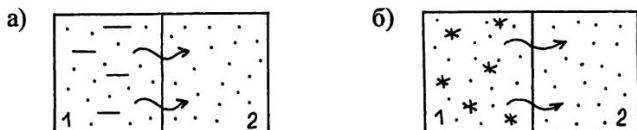


Рис. 1.6. Миграция влаги из образца с естественной влажностью (1) в предварительно высушенный образец (2) при температуре: а – выше нуля; б – ниже нуля

Аналогичный процесс имеет место и при отрицательной температуре. Незамерзшая пленочная влага перемещается из мерзлого грунта в находящийся в контакте с ним предварительно высушенный и охлажденный образец (рис. 1.6, б). Определив через сутки после начала опыта влажность второго образца, можно найти значение W_w для исследуемого грунта при заданной температуре.

В качестве примера на рис. 1.7 приведены экспериментальные зависимости $W_w = f(T)$ для различных грунтов. Как видим, содержание незамерзшей воды существенно зависит от состава грунта, а значит от его удельной площади поверхности, показателей пластичности и других характеристик, связанных с дисперсностью.

Нормативная литература [44, 51] допускает определение величины W_w как функции влажности на границе пластичности W_p :

$$W_w = K_w W_p, \quad (1.3)$$

где K_w – коэффициент, принимаемый в зависимости от числа пластичности I_p и температуры грунта T (рис. 1.8); для песков и супесей $K_w = 0$.

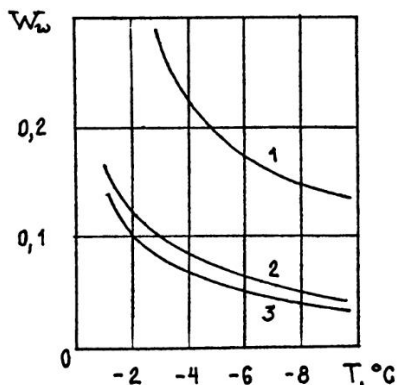


Рис. 1.7. Содержание незамерзшей воды в различных грунтах: 1 - монтмориллонитовая глина ($I_p=1,40$, $S=411 \text{ м}^2/\text{г}$); 2 - озерноледниковая глина ($I_p = 0,25$, $S = 91 \text{ м}^2/\text{г}$); 3 - моренный суглинок ($I_p = 0,10$, $S = 72 \text{ м}^2/\text{г}$)

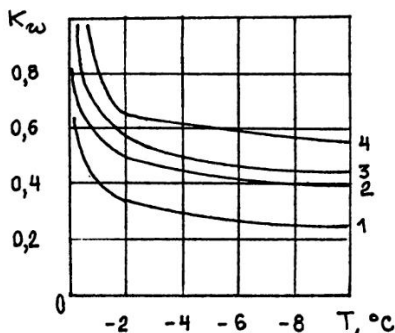


Рис. 1.8. Значение коэффициента K_w для пылеватоглинистых грунтов: 1 - супеси ($0,02 < I_p \leq 0,07$); 2 - суглинки ($0,07 < I_p \leq 0,13$); 3 - суглинки ($0,13 < I_p \leq 0,17$); 4 - глины ($I_p > 0,17$)

Подобную формулу для определения влажности за счет незамерзшей воды при температуре -1°C предлагает А.Тисе [57]:

$$W_w = 0,346 W_L - 0,0301, \quad (1.4)$$

где W_L – влажность на границе текучести.

Достаточно точные результаты, по мнению авторов, дает расчет W_w по гранулометрическому составу [30]:

$$W_w = \alpha + \beta p, \quad (1.5)$$

где α , β – коэффициенты (табл. 1.1);

p – процентное содержание частиц размером менее $0,01 \text{ мм}$.

Таблица 1.1

Температура грунта, °C	Коэффициент в формуле (1.5)	
	α	β
- 1	0,0062	0,0029
- 3	0,0028	0,0026
- 5	0,0023	0,0023

Более сложную зависимость приводят D.Anderson и A.Tice [58]:

$$W_w = 10^{-2} \exp (0,2618 + 0,5519 \ln S - 1,449 \ln |T| \cdot S^{-0,264}), \quad (1.6)$$

где S – удельная площадь поверхности грунта, $\text{м}^2/\text{г}$;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Подобную зависимость получил K.Kujala [71]:

$$W_w = W_{\text{tot}} \exp \left[- \left(\frac{T}{\beta} \right)^{\alpha} \right]. \quad (1.7)$$

Показатель степени α и коэффициент β в формуле (1.7) зависят от вида грунта и изменяются в следующих пределах: $\alpha = 1,5 \dots 3,3$; $\beta = -0,9 \dots -2,7$.

Зная четыре характеристики (ρ , ρ_s , W_{tot} , W_w), находят так называемые вычисляемые показатели, необходимые для расчета оснований сооружений (табл. 1.2) [35].

Таблица 1.2

Характеристика	Обозначение	Единица	Определение (см.рис.1.5)	Расчетная формула
1. Плотность в сухом состоянии	ρ_d	$\text{г}/\text{см}^3$	m_s/V	$\rho/(1+W_{\text{tot}})$
2. Коэффициент пористости	e	-	V_p/V_s	$\rho_s/\rho_d - 1$
3. Суммарная льдистость	i_{tot}	-	V_i/V	$(W_{\text{tot}} - W_w)\rho_d/\rho_i$
4. Удельный вес	γ	$\text{кН}/\text{м}^3$	mg/V	ρg

Примечание. В таблице V_p – объем пор, $V_p = V_g + V_i + V_w$; ρ_i – плотность льда, $\rho_i = 0,92 \text{ г}/\text{см}^3$; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2 \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$.

1.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Теплофизические свойства определяют особенности процесса теплообмена в грунтах. Их знание необходимо, например, для прогноза глубины промерзания и оттаивания оснований.

1.3.1. Теплопроводность

Количество тепловой энергии, передающейся через выделенный элемент какого-либо вещества (рис. 1.9), можно найти по формуле

$$Q = \frac{\lambda A t (T_2 - T_1)}{x} = \lambda A t |\text{grad } T|, \quad (1.8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, или теплопроводность (по своей сути он аналогичен, например, коэффициенту фильтрации в законе Дарси);

A – площадь поперечного сечения элемента;

t – время;

$(T_2 - T_1)$ – разность температуры на торцах элемента;

x – длина элемента.

В таблице 1.3 приведены значения коэффициентов теплопроводности основных компонентов, составляющих грунты.

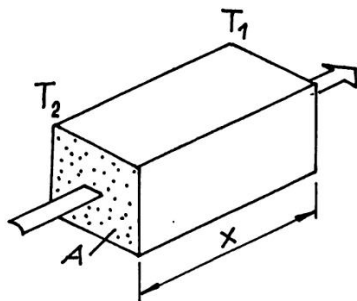


Рис. 1.9. Схема к расчету теплового потока

Таблица 1.3

Компоненты грунта	λ , Вт/(м·°C)	c , кДж/(кг·°C)
Твердые частицы: кварц полевошпат глинистые минералы	7,7...8,4 1,90 2,0...2,3	0,7...0,9
Вода	0,55...0,63	4,18...4,22
Лед	2,10...2,30	2,04...2,10
Воздух	0,02	1,00

Теплопроводность воды в 30 раз больше теплопроводности воздуха, а льда – в 4 раза больше по сравнению с таковым показателем для воды, поэтому увлажнение и промерзание приводят к повышению теплопроводности грунтов.

Типичные зависимости $\lambda = f(T)$ приведены на рис. 1.10. Как видим, двукратный рост влажности глины W привел к увеличению коэффи-

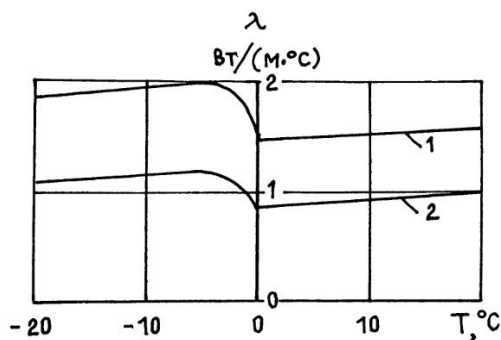


Рис. 1.10. Зависимость от температуры коэффициента теплопроводности для глины различной влажности: 1 - при $W = 0,25$, 2 - при $W = 0,12$

циента теплопроводности на 50...70 %, а при переходе из талого в мерзлое состояние величина λ увеличилась в 1,2–1,3 раза. Необходимо обратить внимание на плавное понижение характеристики λ при охлаждении мерзлого грунта. Благодаря замерзанию связанной влаги и росту льдистости здесь должен был бы иметь место обратный эф-

фект. Объясняют это явление развитием в мерзлом грунте системы микротрещин, препятствующих кондуктивному теплопереносу [53].

Следует заметить также, что интервал температур $0...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, для которого характерны интенсивные фазовые превращения влаги, очень сложен для экспериментальных исследований.

Методы измерения теплопроводности делятся на стационарные и нестационарные в зависимости от того, остается постоянным или изменяется во время эксперимента температурное поле внутри образца [30, 53, 61].

Схема установки со стационарным тепловым режимом, рекомендованная ГОСТ 26263-84 [14] для мерзлых грунтов, показана на рис. 1.11. Плоский образец диаметром 100...200 мм и высотой 30 мм размещается между двумя плитами, температура которых отличается на несколько гра-

дусов. С помощью специального датчика-тепломера в ходе опыта измеряют поток теплоты, проходящий через образец. Коэффициент теплопроводности находят по формуле

$$\lambda = \frac{q_f h}{\Delta T}, \quad (1.9)$$

где q_f – плотность теплового потока, Вт/м²;

h – высота образца, м;

ΔT – разность температур на торцах образца, °С.

Существуют также установки с двумя плоскими образцами и нагревательным элементом, установленным между ними [30, 53, 61].

Широкое применение в лабораторных и полевых исследованиях нашел нестационарный метод одиночного

игольчатого зонда, предложенный в Швеции в 1931 году [84]. Зонд представляет собой стальную или медную трубку, внутри которой расположены нагревательный элемент и датчик температуры (рис. 1.12, а).

Рис. 1.11. Измерение теплопроводности методом стационарного теплового режима [14]: 1 – образец грунта, 2 – верхняя термостатированная плита, 3 – датчики температуры, 4 – теплоизоляция, 5 – нижняя термостатированная плита, 6 – измеритель теплового потока – тепломер

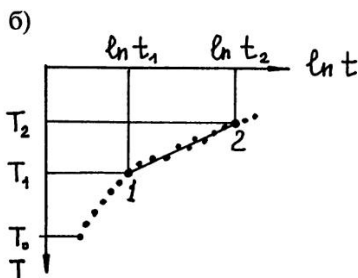
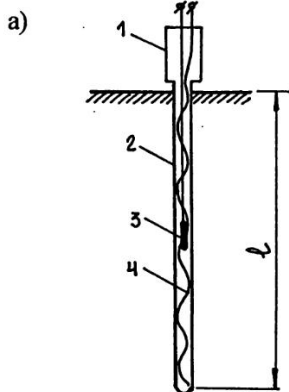


Рис. 1.12. Измерение теплопроводности методом нестационарного теплового режима [53, 84]: а – схема зонда (1 – рукоятка, 2 – трубка, 3 – датчик температуры, 4 – нагревательный элемент); б – график изменения температуры зонда во времени

Длина зонда – от 40 до 1000 мм, а диаметр обычно в 45 раз меньше длины. Зонд устанавливают в образце или массиве грунта без зазоров и оставляют на несколько часов для выравнивания температуры. Затем включают нагревательный элемент и регистрируют показания температурного датчика в течение 10...30 мин с интервалом 5...10 с. Чем медленнее нагревается зонд, тем больше теплопроводность окружающего его грунта. Мощность нагревательного элемента подбирают таким образом, чтобы за время измерений (10...30 мин) рост температуры зонда не превышал 1...5 °С. По результатам испытаний строят график $T = f(\ln t)$, на котором выбирают характерный прямолинейный участок (рис. 1.12, б) для расчета коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \frac{P_w (\ln t_2 - \ln t_1)}{4\pi l (T_2 - T_1)}, \quad (1.10)$$

где P_w – мощность нагревательного элемента, Вт;

t_2, t_1 – время, соответствующее точкам 2 и 1 прямолинейного участка, с;

l – длина зонда, м;

T_2, T_1 – температура, соответствующая точкам 2 и 1 прямолинейного участка, °С.

Коэффициент теплопроводности грунтов можно определить с помощью эмпирических зависимостей. В частности, М. Kersten [61, 67, 75, 77] предложил следующие уравнения:

– для пылевато-глинистых грунтов

$$\lambda_f = 0,00144 \cdot 10^{1,37\rho_d} + W_{tot} \cdot 1,23 \cdot 10^{0,5\rho_d}, \quad (1.11)$$

$$\lambda_{th} = [0,13 \lg(100W) - 0,029] 10^{0,62\rho_d}; \quad (1.12)$$

– для песков

$$\lambda_f = 0,011 \cdot 10^{0,81\rho_d} + 0,46 W_{tot} \cdot 10^{0,91\rho_d}, \quad (1.13)$$

$$\lambda_{th} = [0,1 \lg(100W) + 0,06] 10^{0,62\rho_d}. \quad (1.14)$$

В формулах (1.11)-(1.14) индексы f и th обозначают соответственно мерзлое и талое состояние грунтов, W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, W – влажность талого грунта.

Зависимости, построенные по данным М. Kersten, представлены на рис. 1.13, а в виде графиков $\lambda_f = f(W_{tot}, \rho_d)$ и $\lambda_{th} = f(W, \rho_d)$.

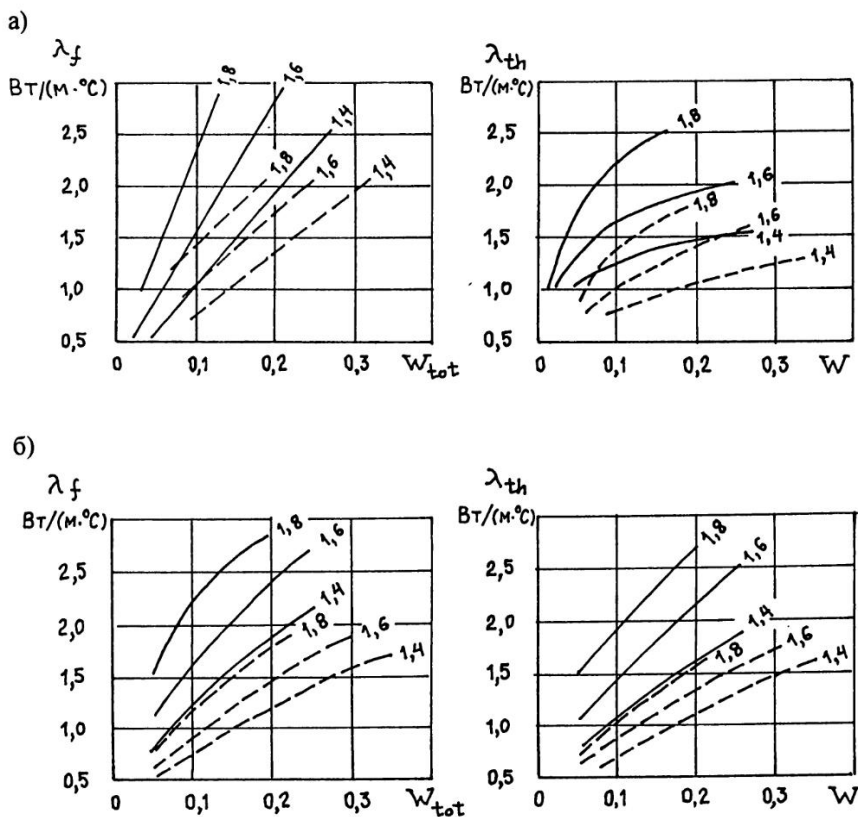


Рис. 1.13. Коэффициенты теплопроводности мерзлых (λ_f) и талых (λ_{th}) грунтов при различной плотности сухого грунта ρ_d (г/см³): а - по данным М. Kersten [75]; б - по данным СНиП 2.02.04-88 [51] (сплошные линии - пески, пунктир - пылевато-глинистые грунты)

Более сложные уравнения получил О. Johansen [57, 61]:

- для абсолютно сухих грунтов (с точностью до 20 %)

$$\lambda_d = \frac{0,137\rho_d + 0,065}{2,70 - 0,947\rho_d}; \quad (1.15)$$

- для грунтов полностью насыщенных водой

$$\lambda_{f\text{ sat}} = \lambda_s^{1-n} \lambda_i^{n-W'} \lambda_w^{W'}, \quad (1.16)$$

$$\lambda_{th\text{ sat}} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n, \quad (1.17)$$

где $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_w^{W'}$ – коэффициенты теплопроводности твердых частиц, льда и воды (см. табл. 1.3);

n – пористость грунта, $n = 1 - \rho_d/\rho_s$;

W' – объемная влажность за счет незамерзшей воды,
 $W' = W_w \rho_d / \rho_w$.

- для грунтов с неполным водонасыщением

$$\lambda_f = (\lambda_{f\text{ sat}} - \lambda_d) S_r + \lambda_d, \quad (1.18)$$

$$\lambda_{th} = (\lambda_{th\text{ sat}} - \lambda_d) (K \lg S_r + 1) + \lambda_d, \quad (1.19)$$

где S_r – степень влажности грунта, $S_r = W \rho_s / (e \rho_w)$;

e – коэффициент пористости;

K – коэффициент, принимаемый равным 0,7 для песков и 1 для пылеватых-глинистых грунтов.

СНиП 2.02.04-88 [51] допускает определение коэффициента теплопроводности по физическим свойствам грунтов с помощью специальной таблицы. Табличные данные представлены графически на рис. 1.13, б.

Из рис. 1.13 видно, что отличия в значениях λ_f и λ_{th} , приводимых в зарубежной и отечественной литературе, не очень существенны.

1.3.2. Теплоемкость

Количество тепловой энергии, требуемое для увеличения температуры тела от T_1 до T_2 , определяется по формуле

$$Q = c m (T_2 - T_1), \quad (1.20)$$

где c – удельная теплоемкость вещества;

m – масса тела.

Экспериментально удельную теплоемкость обычно определяют по изменению температуры в полости калориметра после внесения образца исследуемого грунта [53].

Удельную теплоемкость грунта в целом можно найти по формуле

$$c = \frac{c_s m_s + c_w m_w + c_i m_i + c_g m_g}{m}, \quad (1.21)$$

где c_s, c_w, c_i, c_g – удельная теплоемкость соответственно твердых частиц, воды, льда и газов (табл. 1.3);

m_s, m_w, m_i, m_g, m – масса тех же компонентов и выделенного объема грунта (см. рис. 1.5).

Заметим, что в отличие от теплоемкости коэффициент теплопроводности грунта нельзя найти по аналогичной формуле. Грунт представляет собой сложную систему твердых частиц и пор, занятых водой, льдом и газами, в которых, кроме кондуктивного переноса, имеют место конвекция и излучение.

Проведя несложные преобразования формулы (1.21) и считая $m_g=0$, можем записать

$$c_f = \frac{c_s + c_w W_w + c_i (W_{tot} - W_w)}{1 + W_{tot}}, \quad (1.22)$$

$$c_{th} = \frac{c_s + c_w W}{1 + W}, \quad (1.23)$$

В расчетах оснований иногда удобно использовать удельную теплоемкость, отнесенную не к единице массы, а к единице объема грунта; ее называют объемной удельной теплоемкостью:

$$c_{vf} = \rho c_f = \rho_d [c_s + c_w W_w + c_i (W_{tot} - W_w)], \quad (1.24)$$

$$c_{vth} = \rho c_{th} = \rho_d (c_s + c_w W). \quad (1.25)$$

Приняв $c_s = 0,7$ кДж/(кг·°C), $c_w = 4,2$ кДж/(кг·°C), $c_i = 2,1$ кДж/(кг·°C), М. Kersten построил графики зависимостей $c_{vf} = f(W_{tot}, \rho_d)$ и $c_{vth} = f(W, \rho_d)$, представленные на рис. 1.14, а.

Практически те же значения теплоемкости рекомендует СНиП 2.02.04-88 [51] – рис. 1.14, б.

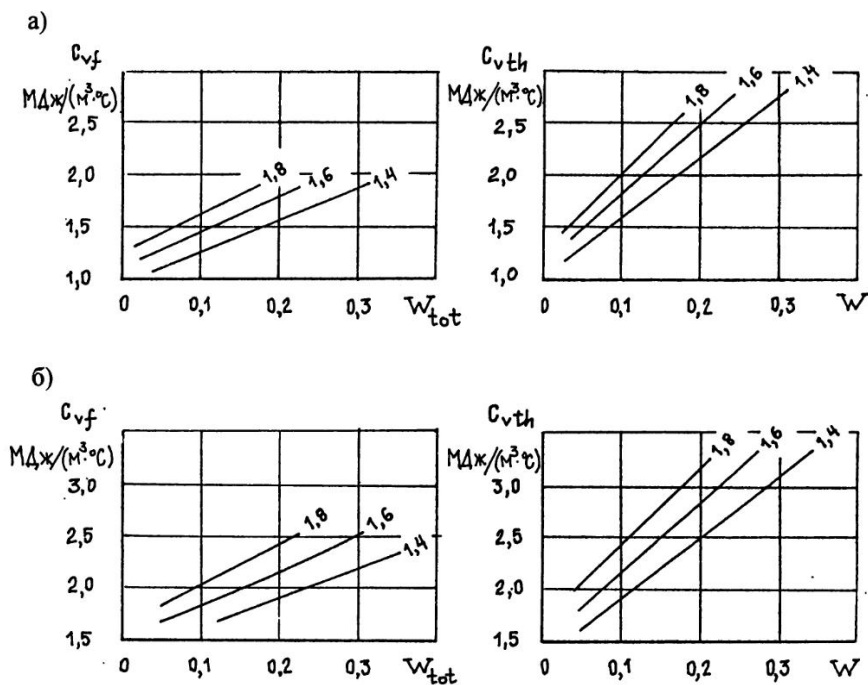


Рис. 1.14. Объемная удельная теплоемкость мерзлых (c_{vf}) и талых (c_{vth}) грунтов при различной плотности сухого грунта (ρ_d) (г/см³): а - по данным М. Kersten [75]; б - по данным СНиП 2.02.04-88 [51]

В табл. 1.4 приведены значения коэффициентов теплопроводности (λ) и удельной теплоемкости (c) некоторых конструкционных и теплоизоляционных строительных материалов.

Таблица 1.4

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°C)	C , кДж/(кг·°C)
Бетон	2400	1,74... 1,86	0,84
Железобетон	2500	1,92... 2,04	0,84
Сталь	7850	58,0	0,48
Кладка из глиняного кирпича	1800	0,70... 0,81	0,88
Кладка из силикатного кирпича	1800	0,76... 0,87	0,88
Древесина хвойных пород	500	0,14... 0,18	2,30
Опилки	250	0,07... 0,11	2,30
Шлак	1000	0,27... 0,32	0,75
Гравий керамзитовый	600	0,17... 0,20	0,84
Минераловатные плиты	125	0,06... 0,07	0,84
Пенополистирол	100... 150	0,05... 0,06	1,34
Снег	100... 450	0,07... 0,35	4,20

1.3.3. Теплота фазовых превращений

Для превращения льда массой m_i в воду или обратно при температуре 0°C требуется соответственно подать или отвести следующее количество тепловой энергии:

$$Q = q_w m_i \quad (1.26)$$

где q_w - удельная теплота фазовых превращений воды, $q_w = 335$ кДж/кг.

Аналогичный показатель можно найти и для грунта:

$$q = \frac{q_w m_i}{m} = \frac{q_w (W_{\text{tot}} - W_w)}{1 + W_{\text{tot}}} \quad (1.27)$$

В теплотехнических расчетах часто используют теплоту фазовых переходов, отнесенную к единице объема грунта:

$$q_v = q\rho = \frac{q_w \rho (W_{\text{tot}} - W_w)}{1 + W_{\text{tot}}} = q_w \rho_d (W_{\text{tot}} - W_w). \quad (1.28)$$

В этом случае $Q = q_v V$, где V - объем грунта.

Заметим, что фазовые переходы в грунте происходят при так называемой температуре начала замерзания T_b , а не при 0°C .

Для расчета коэффициента теплопроводности снега, Вт/(м·°C), в СНиП 2.02.04-88 [51] предложена следующая зависимость:

$$\lambda = \frac{20 + \rho}{1200}, \quad (1.29)$$

где ρ – плотность снега, кг/м³.

1.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства определяют особенности поведения грунтов под нагрузкой. Их знание необходимо, в частности, для расчета размеров фундаментов и прогноза осадки основания. Показателем прочности является предельное сопротивление сдвигу, его значение в соответствии с законом Кулона находят по двум параметрам – удельному сцеплению C и углу внутреннего трения φ . Показателем сжимаемости грунтов служит модуль деформации E [35].

За счет цементирующего действия льда, содержащегося в порах, деформационно-прочностные свойства мерзлых грунтов в десятки и сотни раз выше, чем свойства талых. В качестве примера на рис. 1.15 показана зависимость модуля деформации мерзлого торфа от температуры, полученная В.А. Мироновым [33]. О многократном росте удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ пылевато-глинистого грунта при охлаждении свидетельствуют экспериментальные данные Б.А. Савельева (рис. 1.16) [45].

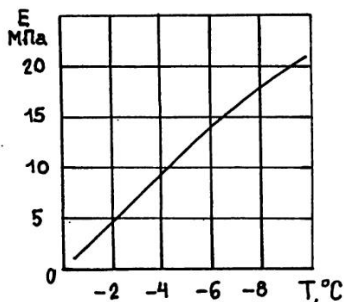


Рис. 1.15. Зависимость модуля деформации мерзлого торфа от температуры [33]

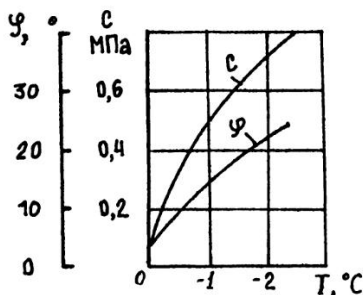


Рис. 1.16. Зависимость прочностных показателей пылевато-глинистого грунта от температуры [45]

Размер подошвы фундамента находят обычно из условия $p \leq R$, где p – давление под подошвой, R – расчетное сопротивление грунта основания. Зависимости $R = f(T)$, используемые при проектировании фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, приведены на рис. 1.17 [44].

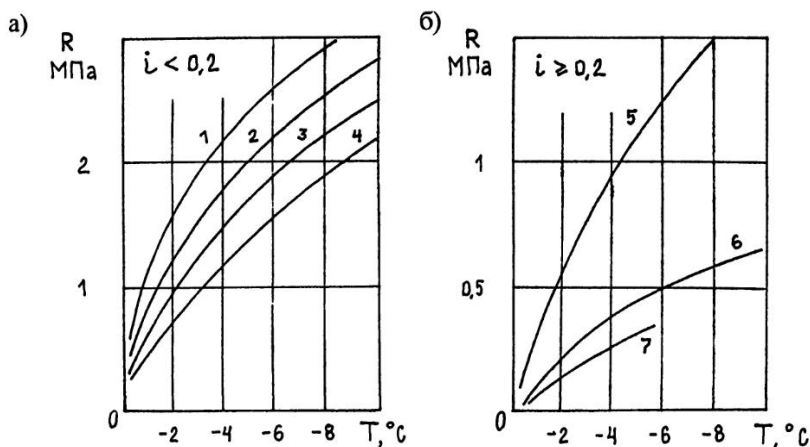


Рис. 1.17. Расчетное сопротивление мерзлых грунтов и льда под подошвой столбчатого фундамента [51]: а - грунты с льдистостью $i < 0,2$ (1 - пески крупные и средней крупности, 2 - пески мелкие и пылеватые, 3 - супеси, 4 - суглинки и глины); б - грунты с льдистостью $i \geq 0,2$ и лед (5 - пески и пылевато-глинистые грунты, 6 - торф, 7 - лед)

Характер изменения расчетного сопротивления грунта в слое сезонного промерзания в течение года показан на рис. 1.18 [63]. Максимальное значение R наблюдается зимой при промерзании грунта, а минимальное – весной при таянии линз и прослоек льда и образовании избытка поровой влаги.

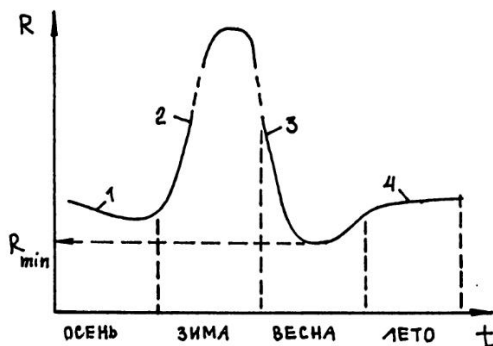


Рис. 1.18. Изменения расчетного сопротивления грунта в течение года [63]: 1 – снижение за счет инфильтрации атмосферных осадков, 2 – рост при замерзании, 3 – снижение при оттаивании и образовании избытка поровой влаги, 4 – повышение за счет испарения поровой влаги

Эксперименты, проведенные в дорожной лаборатории университета Оулу, показали, что с понижением температуры и ростом суммарной

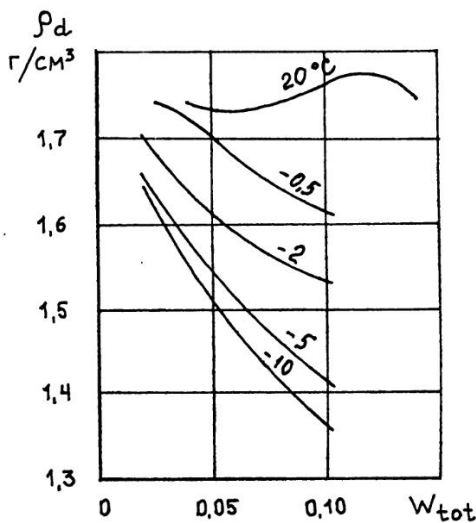


Рис. 1.19. Кривые уплотнения песка при различных значениях температуры [59]

влажности эффективность уплотнения песка динамической нагрузкой резко снижается (рис.1.19).

В заключение заметим, что при расчете фундаментов в районах сезонного промерзания используют деформационно-прочностные свойства грунтов в талом состоянии, так как под подошвой промерзание обычно не допускается. Механические свойства мерзлых грунтов необходимы лишь для решения задач, связанных с производством работ в зимнее время: разработкой котлованов и траншей, перемещением транспорта и строительных механизмов по слабым грунтам, залегающим на поверхности, и т.п. Вопросы возведения фундаментов на многолетнемерзлых грунтах в данном пособии не рассматриваются, поэтому ограничимся лишь констатацией факта о высокой их прочности в мерзлом состоянии. Вопросы строительства на многолетнемерзлых грунтах подробно рассматриваются, например, в учебных пособиях [22, 23, 33].

1.5. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.1. По результатам гранулометрического анализа пробы суглинка, приведенным в табл. 1.5, постройте кривую гранулометрического состава.

Таблица 1.5

Фракция	Размер частиц по фракциям, мм	Массовая доля частиц, %
Галька	> 10	1,4
Гравий	10...2	2,2
Песок	2...1	2,9
	1...0,5	1,4
	0,5...0,25	5,2
	0,25...0,1	12,3
	0,1...0,05	12,0
Пыль	0,05...0,01	21,1
	0,01...0,005	12,4
Глина	0,005...0,002	11,0
	< 0,002	18,1

Решение. Последовательно, от крупных фракций к мелким, находим процентное содержание частиц, размер которых меньше установленного. Например, массовая доля частиц размером $d < 10$ мм составляет $100 - 1,4 = 98,6$ %; частиц $d < 2$ мм $100 - 1,4 - 2,2 = 96,4$ % и т.д.

Результаты вычислений приведены в табл. 1.6, кривая гранулометрического состава на рис. 1.20.

Таблица 1.6

Размер частиц, мм, менее	Массовая доля частиц L, %
10	98,6
2	96,4
1	93,5
0,5	92,1
0,25	86,9
0,10	74,6
0,05	62,6
0,01	41,5
0,005	29,1
0,002	18,1

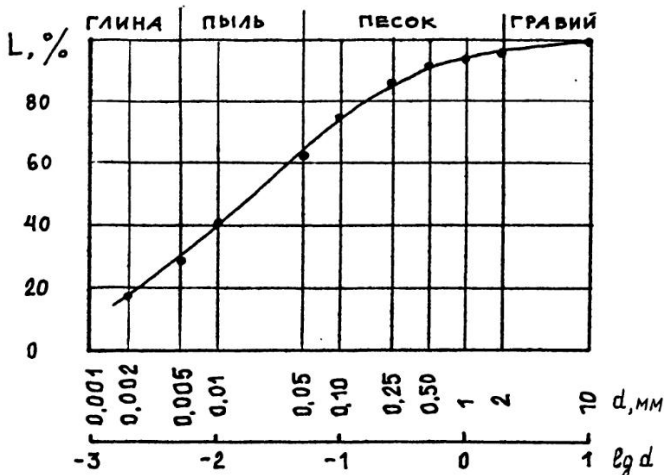


Рис.1.20. Кривая гранулометрического состава

Задача 1.2. Суглинок, гранулометрический состав которого приведен в задаче 1.1, имеет следующие свойства: плотность $2,07 \text{ г/см}^3$, природную влажность $0,22$, влажность на границе текучести $0,30$, влажность на границе пластичности $0,19$, удельную площадь поверхности $54 \text{ м}^2/\text{г}$.

Вычислите содержание незамерзшей воды в суглинке и его льдистость при температуре -4°C .

Решение. Число пластичности суглинка

$$I_p = W_L - W_p = 0,30 - 0,19 = 0,11.$$

По рис. 1.8 при температуре $T = -4^\circ\text{C}$ находим значение коэффициента $K_w = 0,45$, а затем вычисляем содержание незамерзшей воды по формуле (1.3):

$$W_w = K_w W_p = 0,45 \cdot 0,19 = 0,086.$$

Массовая доля частиц размером менее $0,01 \text{ мм}$ составляет $41,5\%$ (табл. 1.6), отсюда по формуле (1.5)

$$W_w = 0,0026 + 0,0025 \cdot 41,5 = 0,106.$$

Та же величина может быть найдена по формуле (1.6):

$$W_w = 10^{-2} \exp(0,2618 + 0,5519 \ln 54 - 1,449 \ln 4 \cdot 54^{-0,264}) = 0,058.$$

Задав значения $W_w = 0,086 \approx 0,09$ при $\rho_d = 2,07 / (1 + 0,22) = 1,70 \text{ г/см}^3$, вычислим льдистость (табл. 1.2):

$$i = (0,22 - 0,09) 1,70 / 0,92 = 0,24.$$

Задача 1.3. Приняв физические свойства суглинка из условия задачи 1.2, определите коэффициент его теплопроводности в талом и мерзлом состоянии.

Решение. При $\rho_d = 1,70 \text{ г/см}^3$ и $W = W_{\text{tot}} = 0,22$ по уравнениям Kersten найдем:

$$\lambda_t = 0,00144 \cdot 10^{1,37 \cdot 1,7} + 0,22 \cdot 1,23 \cdot 10^{0,5 \cdot 1,70} = 2,22 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$\lambda_{\text{th}} = [0,13 \cdot \lg(100 \cdot 0,22) - 0,029] 10^{0,62 \cdot 1,70} = 1,65 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Коэффициент пористости грунта (табл. 1.2)

$$e = \rho_s / \rho_d - 1 = 2,74 / 1,70 - 1 = 0,61.$$

Степень влажности

$$S_r = W \rho_s / (e \rho_w) = 0,22 \cdot 2,74 / (0,61 \cdot 1,0) = 0,99.$$

Воспользуемся формулами, предложенными O.Johansen.

Предварительно найдем пористость грунта и объемную влажность за счет незамерзшей воды:

$$n = 1 - \rho_d / \rho_s = 1 - 1,70 / 2,74 = 0,38,$$

$$W' = W_w \rho_d / \rho_w = 0,09 \cdot 1,70 / 1,0 = 0,15.$$

Пусть исследуемый грунт состоит на 20 % из кварца и на 80 % из глинистых минералов. Приняв в соответствии с табл. 1.3 значения коэффициента теплопроводности кварца $8,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ и глинистых минералов $2,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, определим

$$\lambda_s = 0,20 \cdot 8,0 + 0,80 \cdot 2,15 = 3,32 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Коэффициенты теплопроводности льда и воды составляют:

$$\lambda_i = 2,20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$\lambda_w = 0,57 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

С учетом приведенных характеристик по формулам (1.16) и (1.17) находим:

$$\lambda_{f \text{ sat}} = 3,32^{1-0,38} \cdot 2,20^{0,38-0,15} \cdot 0,57^{0,15} = 2,32 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)},$$

$$\lambda_{th \text{ sat}} = 3,32^{(1-0,38)} \cdot 0,57^{0,38} = 1,70 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

По СНиП 2.02.04-88 [51] коэффициенты теплопроводности суглинка составляют (рис. 1.13, б):

$$\lambda_f = 1,70 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)},$$

$$\lambda_{th} = 1,55 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

Задача 1.4. Найдите объемную удельную теплоемкость суглинка в мерзлом (при температуре -4°C) и талом состоянии. Физические свойства суглинка даны в условии задачи 1.2.

Решение. При $\rho_d = 1,70 \text{ г/см}^3 = 1700 \text{ кг/м}^3$, $W = W_{\text{tot}} = 0,22$ и $W_w = 0,09$ (см. задачу 1.2) по формулам (1.24) и (1.25) вычисляем:

$$\begin{aligned} c_{vf} &= 1700 [0,7 + 4,2 \cdot 0,09 + 2,1 (0,22 - 0,09)] = 2368 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)} = \\ &= 2,30 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}, \end{aligned}$$

$$c_{vth} = 1700 (0,7 + 4,2 \cdot 0,22) = 2761 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

По графикам, построенным на основании данных М. Kersten (рис. 1.14, а):

$$c_{vf} = 2,00 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)},$$

$$c_{vth} = 2,80 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

По СНиП 2.02.04-88 [31] теплоемкость составляет:

$$c_{vf} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)},$$

$$c_{vth} = 3,15 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Задача 1.5. Определите теплоту фазовых переходов для суглинка, свойства которого даны в задаче 1.2. Температуру суглинка примите равной -4°C .

Решение. Зная $\rho_d = 1,7 \text{ г/см}^3 = 1700 \text{ кг/м}^3$, $W_{\text{tot}} = 0,22$ и $W_w = 0,09$ (см. задачу 1.2), по формуле (1.28) находим:

$$q_v = 335 (0,22 - 0,09) 1700 = 74035 \text{ кДж/м}^3 = 74,0 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

2. СЕЗОННОЕ ПРОМЕРЗАНИЕ ГРУНТОВ

Сезонное промерзание грунтов наблюдается на территории занимающей 40 % всей площади России. На остальной (60 %) территории достигают толщи многолетнемерзлых грунтов. В мире указанные процессы имеют место на 25 и 20 % площади суши соответственно (рис. 2.1).

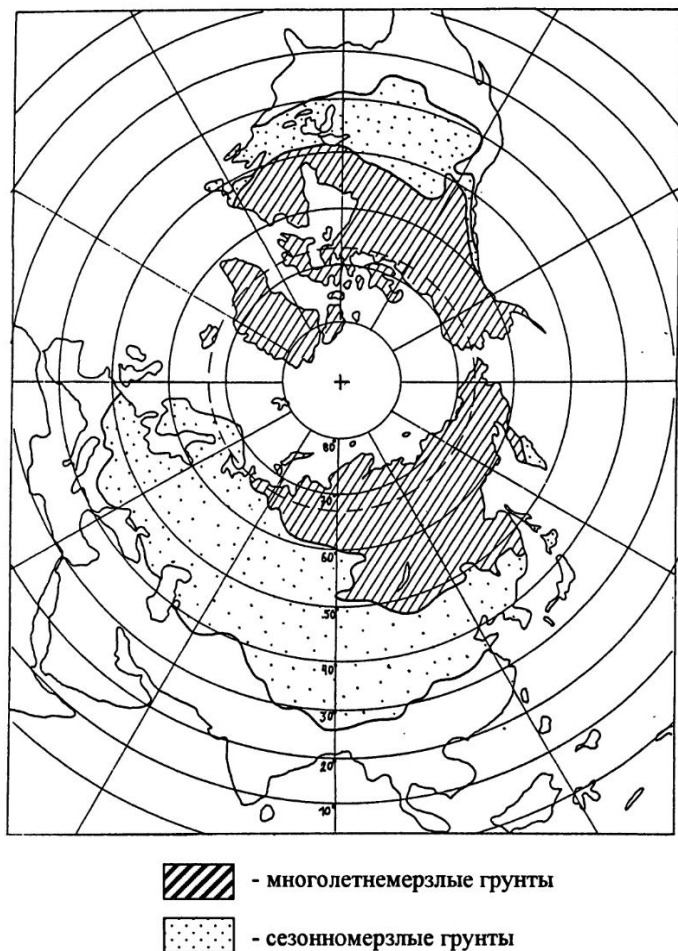


Рис. 2.1. Границы районов распространения мерзлых грунтов в северном полушарии [21, 86]

В странах с холодным климатом сезонное промерзание является одним из основных факторов, определяющих глубину заложения фундаментов и трубопроводов, конструкцию транспортных и грунтовых гидротехнических сооружений. Промерзание основания во время строительства или эксплуатации может привести к недопустимым деформациям сооружения.

2.1. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ

Температурный режим верхних горизонтов земной коры в первую очередь определяется состоянием атмосферы. В частности, глубина сезонного промерзания является функцией температуры воздуха и продолжительности зимы.

В инженерной практике существует понятие индекса промерзания. Он вычисляется как сумма произведений абсолютных значений отрицательной температуры на время:

$$F = \sum (|T_i| \Delta t_i). \quad (2.1)$$

Выражается F обычно в градусо-часах ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{ч}$) или градусо-сутках ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$).

Например, если в течение двух суток сохранялась температура -10°C , одних суток -15°C и четырех суток -11°C , то индекс промерзания за этот период составил:

$$F = 10 \cdot 2 + 15 \cdot 1 + 11 \cdot 4 = 94^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут} = 2\,256^{\circ}\text{C} \cdot \text{ч}.$$

Годичный индекс промерзания обычно находят, используя среднемесячные значения температуры воздуха. Для Архангельска средний годичный индекс промерзания $\bar{F}$ по многолетним данным составляет $1\,428^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$ или $34\,279^{\circ}\text{C} \cdot \text{ч}$ (табл. 2.1) [48]. Средняя продолжительность периода с отрицательной температурой, т.е. продолжительность зимы $t_w = 179$ сут, среднезимняя температура $T_w = -\bar{F}/t_w = 1\,428 / 179 = -8^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2.1

Месяц	Дней	Средняя температура, °С	$F_i, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$
Ноябрь	30	- 4,5	135,0
Декабрь	31	- 9,8	303,8
Январь	31	- 12,5	387,5
Февраль	28	- 12,0	336,0
Март	31	- 8,0	248,0
Апрель	30	- 0,6	18,0
<i>Итого</i>	-	-	1428,3

По аналогии с величиной F находят индекс оттаивания U . Он равен сумме произведений положительной температуры на время. В Архангельске его среднее значение $\bar{U}$ составляет $1737,3 ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$ или $41695 ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$ (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Месяц	Дней	Средняя температура, °С	$\bar{U}_i, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$
Май	31	5,6	173,6
Июнь	30	12,3	369,0
Июль	31	15,6	483,6
Август	31	13,7	424,7
Сентябрь	30	8,1	243,0
Октябрь	31	1,4	43,4
<i>Итого</i>	-	-	1737,3

Геометрически индексы промерзания и оттаивания представляют собой площади, ограниченные графиком изменения температуры во времени и осью абсцисс (рис. 2.2). Их можно найти интегрированием:

$$F = \int_{t_2}^{t_3} |T| dt, \quad (2.2)$$

$$U = \int_{t_1}^{t_2} T dt. \quad (2.3)$$

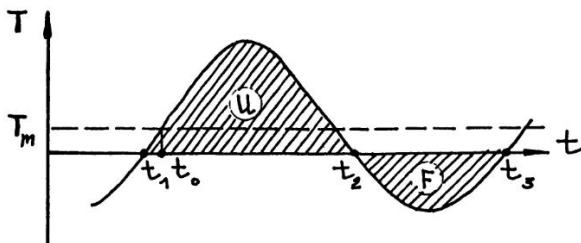


Рис. 2.2. Типичный график изменения температуры воздуха в течение полутора лет

Заметим, что среднегодовую температуру определяют по формуле $T_m = (U - F) / 365$. Например, среднее значение по многолетним данным составит для Архангельска: $\bar{T}_m = (\bar{U} - \bar{F}) / 365 = 0,8^\circ\text{C}$.

Средние значения годовых индексов промерзания и оттаивания для нескольких населенных пунктов, расположенных на линии Санкт-Петербург – Амдерма, представлены на рис. 2.3. Сопоставляя индексы F и U, можно оценить геокриологические условия местности. Если $F > U$, то год от года идет нарастание мерзлого слоя, в результате чего формируется толща многолетнемерзлого грунта. Например, в Амдерме наблюдается более чем пятикратное превышение индекса промерзания над индексом оттаивания, и мощность мерзлоты достигает 200...300 м. В Мезени, где превышение F над U всего лишь 45 %, многолетняя мерзлота встречается в виде островов мощностью до 25 м [44].

При $F < U$ наблюдается лишь сезонное промерзание верхних горизонтов земной коры, так как за теплое время года весь промерзший зимой грунт успевает оттаять. Причем с уменьшением F глубина промерзания снижается. Например, в Санкт-Петербурге средний индекс промерзания в 1,9 раза ниже, чем в Архангельске (рис. 2.3). Нормативная глубина сезонного промерзания суглинков и глин в этих городах составляет 1,20 и 1,65 м соответственно [40].

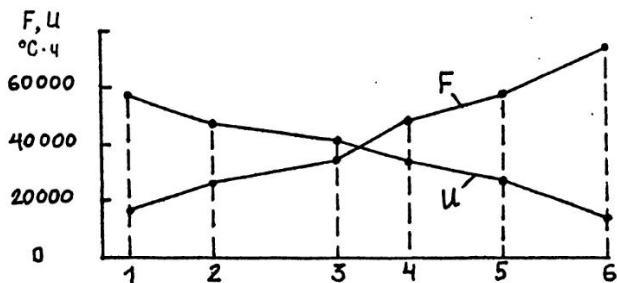
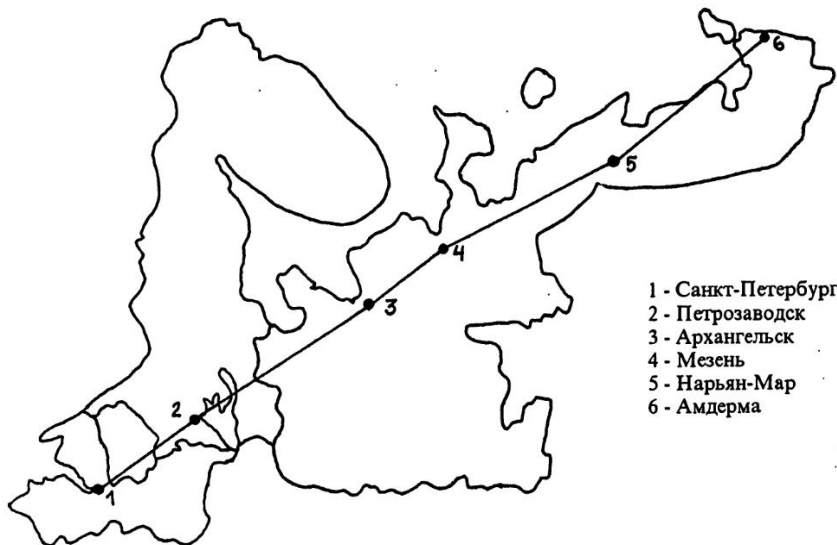


Рис. 2.3. Изменение F и U по линии Санкт-Петербург – Амдерма

Можно заметить, что по мнению некоторых зарубежных специалистов к холодным следует относить районы с индексом промерзания F более 1300 °C·ч [57].

В различные годы имеют место большие или меньшие отклонения от

среднего годового хода изменения температуры. На рис. 2.4 показаны максимальные и минимальные значения среднемесячной температуры воздуха в Архангельске за весь период наблюдений. Как видим, интервал колебаний составляет 8...10 °С.

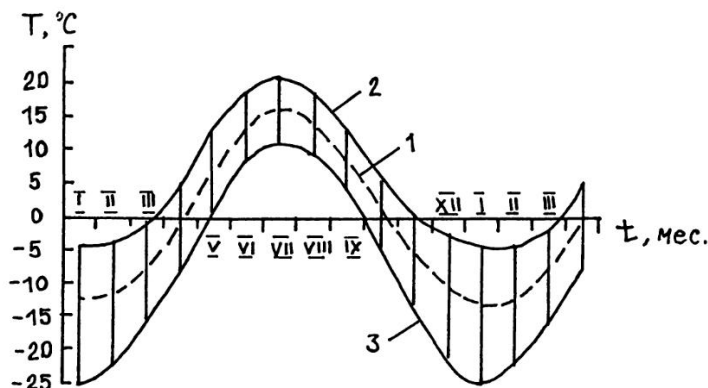


Рис.2.4. Годовой ход изменения температуры воздуха в Архангельске [25]: 1 - средние месячные значения, 2 и 3 – максимальные и минимальные значения среднемесячной температуры

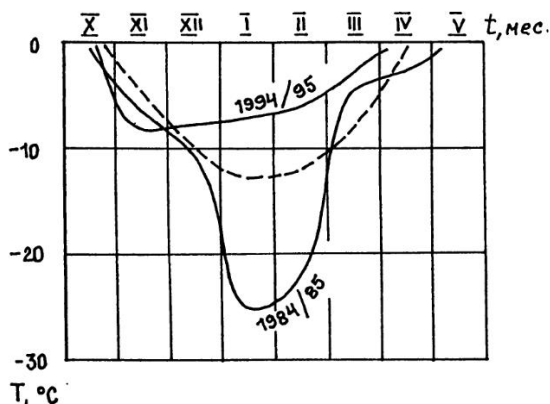


Рис. 2.5. Ход изменения температуры для экстремально теплой и холодной зимы в Архангельске за последние 20 лет (пунктиром показаны средние значения по многолетним данным)

На рис. 2.5 приведены графики температуры для экстремально теплой и холодной зим за последние 20 лет, а рис. 2.6 иллюстрирует колебания индексов промерзания и оттаивания за этот же период.

Абсолютный минимум температуры (-45 °С) был зарегистрирован

в Архангельске в феврале 1946 года, а максимум (34 °C) в июле 1972 года [34, 47].

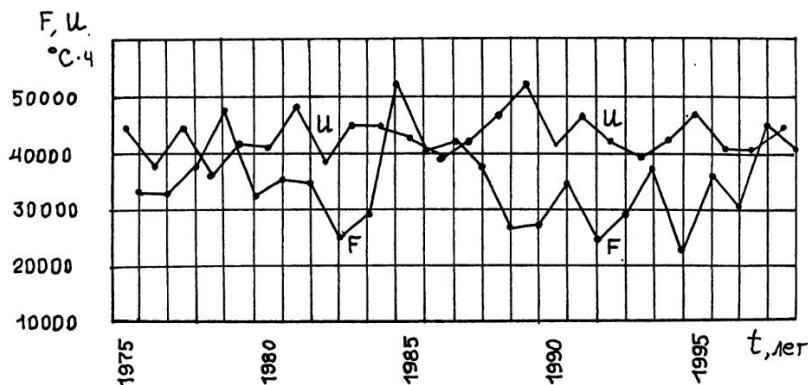


Рис. 2.6. Значения индексов промерзания (F) и оттаивания (U) с 1975 по 1998 г. в Архангельске

Зарубежные специалисты в зависимости от вида и степени ответственности проектируемого сооружения принимают во внимание индексы промерзания, которые могут иметь место один раз в 5; 10; 20; 50 или 100 лет. Их обозначают соответственно F_5 , F_{10} , F_{20} , F_{50} и F_{100} и находят путем статистической обработки данных многолетних наблюдений (рис. 2.7).

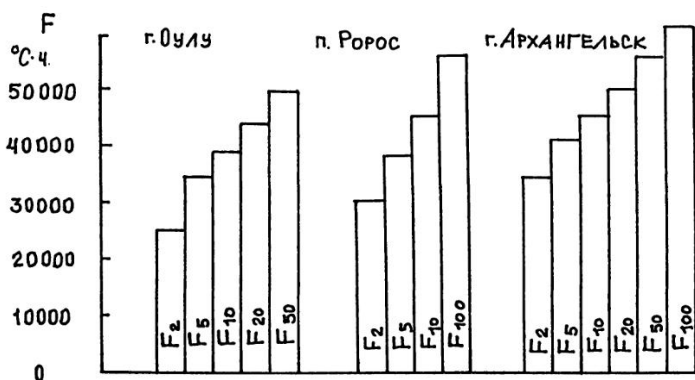


Рис. 2.7. Расчетные индексы промерзания: для г. Оулу (Финляндия) [80], п. Ророс (Норвегия) [62], г. Архангельск

В частности, в Финляндии при проектировании автодорог используют индекс F_{10} , фундаментов зданий – F_{50} [59, 80].

В соответствии с норвежскими строительными нормами [66] при $F_2 = 2\,000 \dots 40\,000 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$ можно использовать следующие зависимости: $F_5 = 6\,000 + F_2$; $F_{10} = 8\,500 + 1,25 F_2$; $F_{100} = 11\,000 + 1,40 F_2$. Например, для Архангельска ($F_2 = 34\,279 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$) при расчете по приведенным формулам получаем $F_5 = 40\,279 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$; $F_{10} = 51\,349 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$; $F_{100} = 58\,991 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$.

Кроме состояния атмосферы, на температурный режим грунта оказывают существенное влияние снежный покров и растительность на поверхности. Для иллюстрации сказанного приведем результаты замеров температуры грунта, выполненных на севере Канады (рис. 2.8) [87]. Три площадки находились в непосредственной близости друг от друга и отличались только видом растительности и толщиной снега. Максимальное охлаждение грунта наблюдалось на площадке 3, где зимой отсутствовал снежный покров, а летом поверхность была защищена от солнечной радиации кронами деревьев.

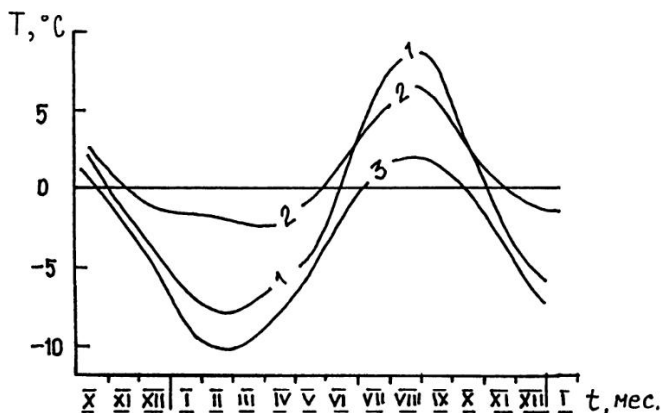


Рис. 2.8. Изменение температуры грунта во времени на глубине 0,5 м по данным M.Smith [87]: 1 - площадка без снега и растений, 2 - участок, покрываемый снегом, 3 - площадка без снега, затененная кронами деревьев

Автором были проведены наблюдения за температурой грунта на опытном участке под Архангельском. На участке залегает мягкопластичный суглинок, растительность отсутствует, а зимой поверхность очищается от снега. Измерения выполнялись с помощью датчиков (терморезисторов), установленных в забое трех буровых скважин на глубине 0,5; 1; 1,5 м. Самый верхний датчик был размещен на глубине 1 см от поверхности. Данные за 1995–1998 годы приведены на рис. 2.9. Отметим, что кривая изменения температуры грунта следует за кривой изменения температуры воздуха с задержкой 1–2 месяца. Максимально теплым грунт становится в августе-сентябре, а наибольшее охлаждение достигается в марте-апреле. Амплитуда колебаний температуры с увеличением глубины существенно уменьшается. Так, на глубине 1,5 м она в два раза меньше, чем на глубине 0,5 м. Глубина, на которой температура остается постоянной круглый год, составляет обычно несколько метров.

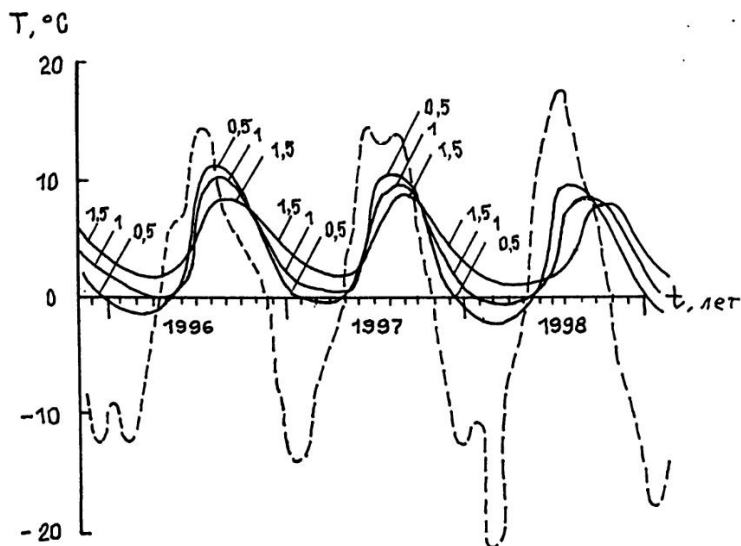


Рис. 2.9. Результаты измерений температуры грунта на опытном участке под Архангельском на глубине 0,5; 1; 1,5 м (пунктиром показана температура воздуха)

В практике метеонаблюдений температуру грунта измеряют на глубине 0,4; 0,8; 1,6 и 3,2 м с помощью вытяжных термометров [26]. Термометры предварительно «заленивливают» – защищают слоем теплоизоляции – для того, чтобы при подъеме на поверхность их показания не изменялись слишком быстро.

Заметим, что стенки наблюдательных скважин следует крепить пластмассовыми обсадными трубами, обладающими низкой теплопроводностью, а в их внутреннюю полость устанавливать пористые вкладыши для предотвращения конвекции.

Наиболее эффективна установка датчиков температуры на различной глубине в стенке одной скважины. В качестве датчиков используют термопары (медь – константан, нихром – никель) или терморезисторы. Замеры выполняют с поверхности с помощью специальных приборов. К преимуществам этого метода можно отнести возможность расстановки датчиков с мелким шагом и необходимость проходки всего одной скважины.

2.2. ГЛУБИНА СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ

Первое и самое простое решение по расчету глубины промерзания грунта было получено в конце XIX века Л.Заальшютцем и И.Стефаном на основе

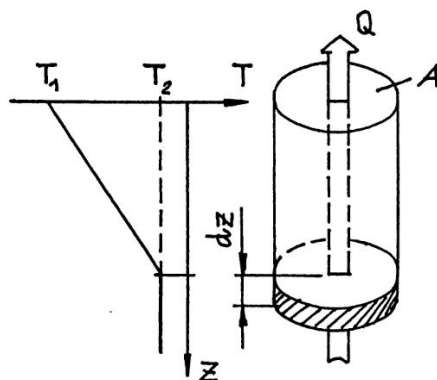


Рис. 2.10. Схема к расчету глубины сезонного промерзания

следующих предположений [37]:

- грунт представляет собой однородную среду с постоянным коэффициентом теплопроводности;
- исходная температура массива грунта на всю расчетную глубину равна T_{bg} ;
- в мерзлом слое зависимость температуры от глубины является линейной.

Рассмотрим вертикальную колонку грунта, отвечающую указанным выше условиям (рис.2.10). Для замораживания элементарно малого слоя грунта толщиной dz необходимо отвести следующее количество теплоты:

$$dQ = q_v A dz, \quad (2.4)$$

где A – площадь поперечного сечения колонки грунта.

Количество тепловой энергии, переносимой через слой расположенного выше мерзлого грунта толщиной z за время dt ,

$$dQ = \lambda_f A |\text{grad } T| dt = \frac{\lambda_f A (T_2 - T_1)}{z} dt, \quad (2.5)$$

где T_1 – температура поверхности грунта;

$T_2 = T_{bf}$ – температура на фронте промерзания.

Обычно принимают $T_1 = T_a$ и $T_2 = 0$, где T_a – температура атмосферного воздуха, хотя фактически в зимнее время T_1 несколько больше T_a .

Приравняв правые части выражений (2.4) и (2.5) и приняв $T_1 = T_a$ и $T_2 = 0$, получим

$$z dz = \frac{-\lambda_f T_a}{q_v} dt. \quad (2.6)$$

Интегрируя, найдем глубину промерзания грунта за время t_c :

$$z = \sqrt{\frac{-2 \lambda_f T_a t_c}{q_v}}, \quad (2.7)$$

где $T_a < 0$.

Обычно температура воздуха изменяется во времени, поэтому более приемлемой будет следующая зависимость:

$$z = \sqrt{\frac{2 \lambda_f}{q_v} \int_0^{t_c} (-T_a) dt} = \sqrt{\frac{2 \lambda_f F_c}{q_v}}, \quad (2.8)$$

где $\int_0^{t_c} (-T_a) dt = F_c$ – индекс промерзания за время t_c .

Отсюда глубина сезонного промерзания

$$d_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f F}{q_v}}, \quad (2.9)$$

где F – годичный индекс промерзания.

Последняя формула может быть записана в несколько упрощенном виде [49, 82, 83]:

$$d_f = d_0 \sqrt{\bar{F}}, \quad (2.10)$$

где d_0 – коэффициент, определяемый в зависимости от вида грунта;

$\bar{F}$ – среднее значение годичного индекса промерзания.

Заметим, что в российских строительных нормах и работах финских специалистов приводятся практически одни и те же значения коэффициента d_0 (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Грунт	Значение коэффициента d_0 , м/(°С·ч) ^{1/2} , по строительным нормам разных стран			K_α
	России [49]	Финляндии [82]	Норвегии [66]	
Суглинок и глина	0,0086	0,0082...0,0100	0,0070...0,0085	1
Супесь, песок мелкий и пылеватый	0,0104	0,0920...0,0100	-	1,22
Песок гравелистый, крупный и средней крупности	0,0112	0,0115	0,0100	1,30
Крупнообломочный	0,0127	0,0150	0,0140	1,48

Согласно СНиП 2.02.01-83 [49] нормативная глубина промерзания пылевато-глинистых грунтов в Архангельске составляет

$$d_f = 0,0086 \sqrt{34279} = 1,6 \text{ м.}$$

Пособие [40] к СНиП 2.02.01-83 допускает определение d_f по карте (рис. 2.11). Необходимо обратить внимание на то, что карта составлена для суглинков и глин, для других грунтов значение d_f , найденное с ее помощью, следует умножать на коэффициент K_α (табл. 2.3).

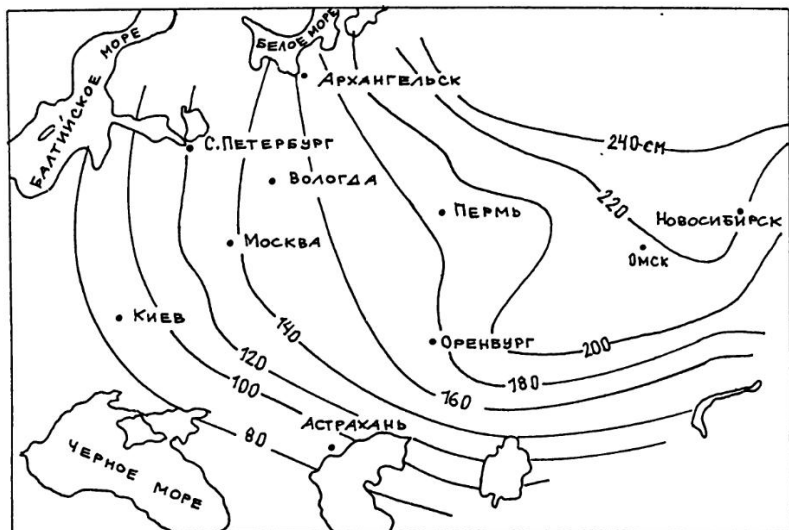


Рис. 2.11. Глубина сезонного промерзания суглинков и глин [40]

За рубежом широкое применение нашла формула Стефана, модифицированная К. Berggren [57, 60, 75, 77, 88]:

$$d_f = \beta \sqrt{\frac{2 \lambda_f F n_f}{q_v}}, \quad (2.11)$$

где β – коэффициент, учитывающий нелинейное изменение температуры грунта по глубине;

n_f – коэффициент, показывающий отношение температуры поверхности к температуре воздуха, $n_f = T_1/T_a$ (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Описание поверхности	Значение коэффициента n_f по данным разных авторов		
	[57]	[60]	[77]
Асфальтобетонное покрытие	0,3...1	0,4...1,0	0,8
Деревья и кусты со слоем снега	0,25...0,3	0,25...0,3	0,3
Слой снега	1,0	0,5	1,0
Песок и гравий	0,6...1	0,6...1,0	0,9

Значение коэффициента β можно найти по графикам, представленным на рис. 2.12, как функцию двух параметров:

$$\mu = \frac{c_{vf} Fn_f}{q_v t_w}, \quad \alpha = \frac{T_m t_w}{Fn_f} \quad (2.12)$$

или

$$\mu = \frac{c_{vf} |T_w| n_f}{q_v}, \quad \alpha = \frac{T_m}{|T_w| n_f}$$

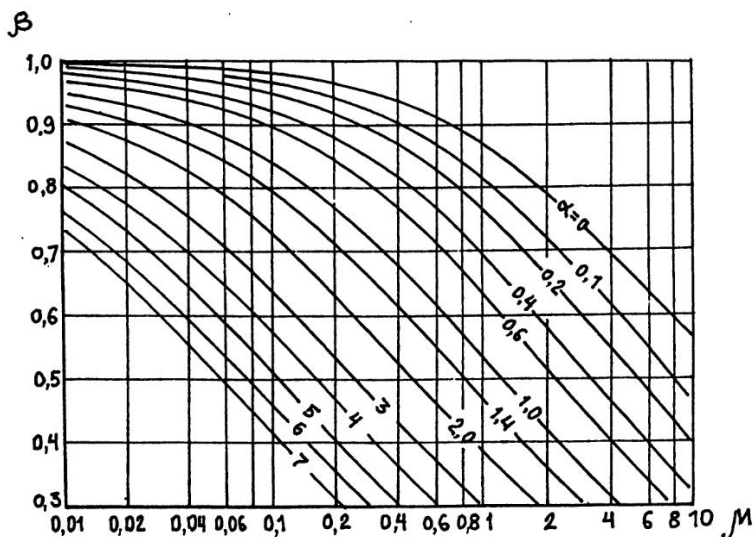


Рис. 2.12. Зависимость коэффициента β [75] от параметров μ и α

Предлагается [60, 77] в формулы (2.11) и (2.12) вместо λ_f и c_{vf} подставлять средние значения коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости:

$$\lambda = \frac{\lambda_f + \lambda_{th}}{2},$$

$$c_v = \frac{c_{vf} + c_{vth}}{2}.$$

Расчет глубины сезонного промерзания двухслойного массива грунта начинают с определения приведенной толщины верхнего слоя:

$$d'_1 = \frac{d_1 \lambda_2}{\lambda_1}, \quad (2.13)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности соответственно верхнего и подстилающего слоев грунта, рассчитываемые как средние значения между λ_f и λ_{th} ;

d_1 – толщина верхнего слоя.

Затем вычисляют время промерзания верхнего слоя (см. формулы (2.11) и (2.12)):

$$t_1 = \frac{d_1^2 q_{v1} t_w}{2 \lambda_1 \beta_1^2 F n_f}. \quad (2.14)$$

Определив долю индекса промерзания, приходящуюся на второй слой,

$$F' = \frac{F n_f (t_w - t_1)}{t_w}, \quad (2.15)$$

находят глубину промерзания [60, 85]

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \lambda_2 F'}{q_{v2}}} + (d'_1)^2 + d_1 - d'_1. \quad (2.16)$$

Более точный результат при прогнозе d_f можно получить, воспользовавшись вместо формулы (2.4) следующим выражением:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 + dQ_3, \quad (2.17)$$

где dQ_1 – количество теплоты, которое следует отвести для охлаждения грунта от исходной предзимней температуры T_0 до температуры $T_{bf} \approx 0$, $dQ_1 = C_{vth} (T_0 - T_{bf}) dV \approx C_{vth} T_0 A dz$;

dQ_2 – то же для замораживания части поровой воды (см. формулу (1.28)), $dQ_2 = q_v A dz$;

dQ_3 – то же для охлаждения мерзлого грунта от температуры T_{bf} до температуры T_z , $dQ_3 = C_{vf} (T_{bf} - T_z) dV$.

Пусть температура грунта на поверхности равна среднезимней температуре воздуха $T_a = T_m = -F/t_w$, а $T_{bf} \approx 0$. Тогда $T_z = 0,5 T_a$ (см. рис. 2.10) и $dQ_3 \approx 0,5 c_{vf} |T_a| A dz$.

Приравняв правые части выражений (2.5) и (2.17), получим [38, 85]:

$$d_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f F}{c_{vth} T_0 + q_v + 0,5c_{vf} |T_a|}} \quad (2.18)$$

При наличии данных натуральных наблюдений глубину сезонного промерзания грунта на месте строительства сооружения можно найти по формуле, приведенной в СНиП 2.02.04 - 88 [51]:

$$d_f = d'_f \frac{k_w}{k'_w} \sqrt{\frac{F}{F'}} \quad (2.19)$$

где d'_f – глубина промерзания, зафиксированная при проведении натуральных наблюдений;

k_w, k'_w – коэффициенты, зависящие от свойств грунта на строительной площадке и на месте проведения натуральных наблюдений соответственно (табл.2.5);

F, F' – индексы промерзания соответственно в расчетный год ($F_2, F_{10}, F_{50}, F_{100}$) и год проведения натуральных наблюдений.

Следует заметить, что приведенная формула не учитывает толщину снежного покрова, оказывающего существенное влияние на глубину промерзания.

Таблица 2.5

Грунт	Значения коэффициентов k_w при влажности грунта					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Песок	1,00	0,92	0,83	0,75	0,70	-
Пылевато-глинистый	-	1,03	0,94	0,88	0,85	0,83

Наблюдения за промерзанием грунтов в полевых условиях выполняют с помощью специальных приспособлений, термометров или датчиков температуры, размещаемых в одной или нескольких буровых скважинах (см. подразд. 2.1).

Простейшим приспособлением является мерзлотомер Данилина (рис. 2.13), который представляет собой резиновую трубку, заполненную дистиллированной водой [12]. Периодически поднимая трубку на поверх-

ность и сжимая её пальцами, определяют глубину замерзания воды, а значит и глубину промерзания окружающего грунта.

К приспособлениям подобного рода относится и так называемая «голубая труба» [57]. В отличие от мерзлотомера Данилина её изготавливают из прозрачной пластмассы, а внутрь заливают не воду, а раствор (0,03...0,05 %) метиленового голубого красителя. При замерзании цвет раствора меняется на белый, что позволяет легко определять положение фронта промерзания.

Измерив температуру грунта на различной глубине с помощью вытяжных термометров или датчиков, строят график $T = f(z)$ (рис. 2.14). Положение фронта промерзания определяют по точке, температура в которой равна T_{bf} , или, допуская небольшую погрешность, по точке, соответствующей нулевой температуре.

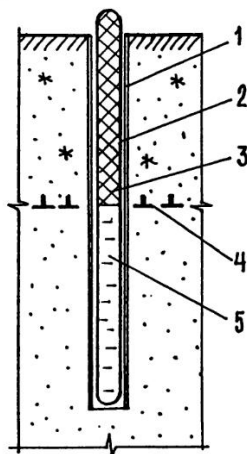


Рис. 2.13. Мерзлотомер Данилина: 1 - обсадная труба скважины, 2 - резиновая трубка, 3 - лед, 4 - фронт промерзания грунта, 5 - вода

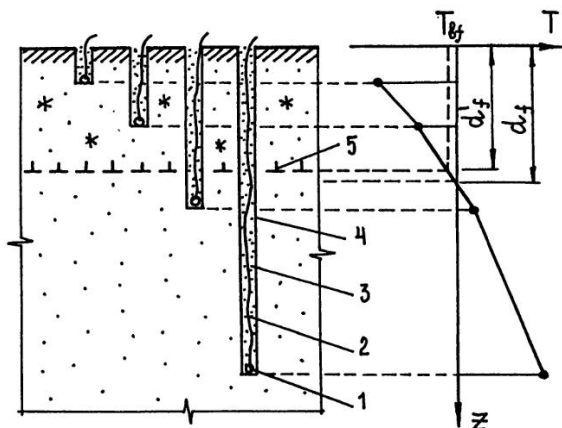


Рис. 2.14. К определению d_f по результатам измерения температуры грунта на различной глубине

На рис. 2.15 приведены графики промерзания суглинка в наиболее теплую и холодную зимы за последние 20 лет на опытной площадке

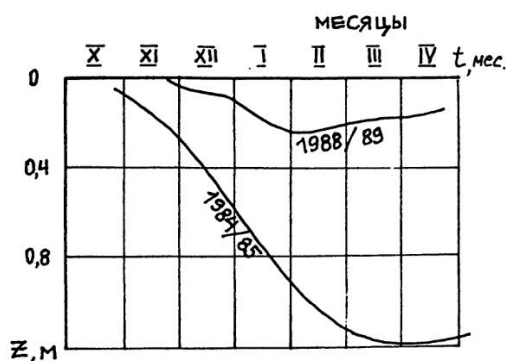


Рис. 2.15. Ход промерзания грунта на опытной площадке гидрометеослужбы под Архангельском

гидрометеослужбы под Архангельском. При индексе промерзания $F = 27\ 120\ ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$ зимой 1988/89 года фронт промерзания достиг глубины 0,24 м, а при $F = 52\ 034\ ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$ зимой 1984/85 года – 1,18 м.

Как видим, даже в одну из самых суровых зим за весь период наблюдений глубина промерзания достигла лишь 74 % от нормативного значения [34, 46].

Это вполне естественно, так как нормативные документы ориентируются на экстремальные условия и такие факторы, как наличие снежного покрова и теплоемкость грунта, имеющего температуру выше нуля, не учитывают.

С другой стороны, на автодороге Архангельск-Вологда В.А. Лукиной и Т.А. Гурьевым [31] было зарегистрировано значение глубины промерзания грунта значительно больше нормативного – до 2,6...3,0 м.

На рис. 2.9 приведены графики изменения температуры грунта во времени на опытной площадке АГТУ. Зимой 1995/96 года при индексе $F = 35\ 887\ ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$ и отсутствии снега на поверхности фронт промерзания достиг глубины 1,0 м. Расчетная глубина промерзания по формуле (2.9) составила 1,80...2,00 м, по формуле (2.11) 1,45...1,55 м.

Таким образом, простейшие методы расчета не обеспечивают точного прогноза глубины промерзания. Их применение может быть оправдано при проектировании традиционных конструкций, например фундаментов, подошва которых закладывается ниже глубины промерзания грунта d_f с не-

которым запасом. Для современных экономичных малозаглубленных фундаментов, трубопроводов и других сооружений с утепляющими элементами требуется решение нелинейной двухмерной (плоской) или трехмерной (пространственной) задачи. Здесь с успехом применяются численные методы, в частности метод конечных элементов.

В качестве примера приведем результаты расчетов финских специалистов по программе ADINAT (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis of Temperature), разработанной в США [79]. Вычисления выполнялись для опытной площадки, на которой залегают шесть слоев пылевато-глинистых грунтов толщиной по 0,25...1,00 м. Теплофизические свойства грунтов определялись в лаборатории. Температура воздуха была принята по данным метеонаблюдений

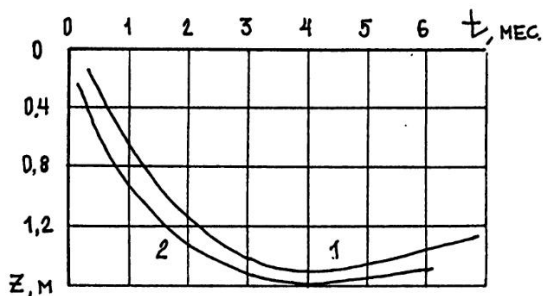


Рис. 2.16. Ход промерзания грунта на опытной площадке под г.Оулу (Финляндия) [79]: 1 - измеренные значения, 2 - расчетные значения

для зимы 1986/87 года, когда индекс промерзания достиг 43 000 °С·ч. Из рис. 2.16 видим, что расчетный график достаточно точно совпадает с реальным ходом промерзания грунта.

Представляет интерес численный анализ влияния точности измерения теплофизических свойств грунтов на получаемые результаты, выполненный в статье О.Раваска и К.Куяала [79]. Например, изменение на 30 % коэффициента теплопроводности привело к изменению d_f на 16 %. Уменьшение на 30 % удельной теплоемкости и теплоты фазовых переходов привело к росту глубины промерзания всего лишь на 5 и 7 % соответственно. Самым влиятельным фактором оказалась температура фазовых переходов T_{bf} .

Наиболее удобной для пользователей является программа TEMP/W (версия 3), разработанная в Канаде в 1995 году. В программе учитывается зависимость коэффициента теплопроводности материалов и содержания в них незамерзшей влаги от температуры, а также изменение во времени граничных температурных условий. Использование среды Windows существенно облегчает ввод исходных данных и анализ результатов вычислений. Результаты представляются графически – в виде изотерм на любой заданный момент времени. Примеры вычислений по программе TEMP/W приводятся в разделе 4 настоящего пособия.

2.3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 2.1. Значения среднемесячной температуры воздуха в Архангельске зимой 1984/85 года следующие:

Месяц	X	XI	XII	I	II	III	IV
Температура, °C	-0,3	-6,4	-10,9	-25,3	-22,4	-4,4	-2,7

Найдите индекс промерзания и среднезимнюю температуру воздуха за этот период.

Решение. Расчет индекса промерзания приведем в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Месяц	Дней	T, °C	F _и , °C·сут
X	31	-0,3	9,3
XI	30	-6,4	192,0
XII	31	-10,9	337,9
I	31	-25,3	784,3
II	28	-22,4	627,2
III	31	-4,4	136,4
IV	30	-2,7	81,0
<i>Итого</i>	212	-	2168,1

Индекс промерзания и среднезимняя температура воздуха:

$$F = 2168,1 \text{ °C} \cdot \text{сут} = 52034 \text{ °C} \cdot \text{ч} = 1,87 \cdot 10^8 \text{ °C} \cdot \text{с},$$

$$T_w = -2168,1 / 212 = -10,2 \text{ °C}.$$

Задача 2.2. Суглинок, физические свойства которого даны в задаче 1.2, имеет следующие теплофизические характеристики: $\lambda_f = 1,70 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; $\lambda_{th} = 1,55 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; $c_{vf} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}$; $c_{vth} = 3,15 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}$; $q_{vV} = 74,0 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$.

Найдите глубину его промерзания зимой 1984/85 года в Архангельске. Данные метеонаблюдений приведены в задаче 2.1.

Решение. По формуле (2.9) глубина промерзания составляет:

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,70 \cdot 1,87 \cdot 10^8}{74 \cdot 10^6}} = 2,93 \text{ м.}$$

Для расчета по формуле (2.11), предложенной К.Берггрен, предварительно найдем вспомогательные параметры:

$n_f = 0,5$ – при покрытой снегом поверхности (табл.2.4);

$\mu = (2,35 \cdot 10^6 \mid -10,2 \mid 0,5) / (74,0 \cdot 10^6) = 0,16$;

$\alpha = 0,8 / (\mid -10,2 \mid 0,5) = 0,16$.

Определив по рис.2.12 значение коэффициента $\beta = 0,94$, находим:

$$d_f = 0,94 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,70 \cdot 1,87 \cdot 10^8 \cdot 0,5}{74 \cdot 10^6}} = 1,95 \text{ м.}$$

При использовании средних значений $\lambda = (1,70 + 1,55)/2 = 1,625 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ и $c = (3,15 + 2,35) \cdot 10^6 / 2 = 2,75 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}$ получим $\mu = 0,19$; $\beta = 0,93$; $d_f = 1,88 \text{ м}$.

По формуле (2.18) с учетом предзимней температуры грунта 4 °C

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,70 \cdot 1,87 \cdot 10^8}{3,15 \cdot 10^6 \cdot 4 + 74 \cdot 10^6 + 0,5 \cdot 2,35 \cdot 10^6 \cdot 10,2}} = 2,54 \text{ м.}$$

Заметим, что нормативное, то есть максимально возможное значение глубины промерзания суглинка в Архангельске, составляет 1,6 м.

На площадке гидрометеоцентра зимой 1984/85 года была зафиксирована глубина промерзания грунта 1,18 м.

Задача 2.3. Найдите глубину промерзания двухслойного массива грунта зимой 1984/85 года в Архангельске. Верхний слой мощностью 1 м – суглинок, его теплофизические свойства даны в задаче 2.2. Нижний слой – песок со следующими характеристиками: $\lambda_f = 1,90 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\lambda_{\text{дн}} = 1,75 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $q_v = 57,0 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$. Данные метеонаблюдений приведены в задаче 2.1.

Решение. Находим средние значения коэффициентов теплопроводности первого и второго слоев:

$$\lambda_1 = (1,70 + 1,55)/2 = 1,625 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$\lambda_2 = (1,90 + 1,75)/2 = 1,825 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

$$\text{Приведенная толщина первого слоя } d_1 = 1,00 \cdot 1,825 / 1,625 = 1,12 \text{ м.}$$

Приняв значения коэффициентов $\beta = 0,94$ и $p_f = 0,5$ из предыдущей задачи, по формуле (2.14) определим время промерзания верхнего слоя:

$$t_1 = (1,0^2 \cdot 74,0 \cdot 10^6 \cdot t_w) / (2 \cdot 1,625 \cdot 0,94^2 \cdot 1,87 \cdot 10^8 \cdot 0,5) = 0,28 \text{ } t_w = 58,4 \text{ сут.}$$

Доля индекса промерзания, приходящаяся на второй слой,

$$F' = 1,87 \cdot 10^8 \cdot 0,5 \cdot (212 - 58,4) / 212 = 0,68 \cdot 10^8 \text{ °C} \cdot \text{с.}$$

Глубина промерзания массива

$$d_f = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,825 \cdot 0,68 \cdot 10^8}{57,0 \cdot 10^6} + 1,12^2} + 1,00 - 1,12 = 2,25 \text{ м.}$$

3. МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ

Морозным пучением называют увеличение объёма грунта при промерзании. Оно может достигать 10...15 %, а в исключительных случаях даже 40 %, и часто служит причиной деформации сооружений.

Рассмотрим несколько характерных примеров.

Промерзание пучинистого грунта в основании способно вызвать вертикальные перемещения фундаментов одно-, двухэтажных зданий (рис. 3.1). Причём из-за неоднородности грунтов, различий в глубине промерзания и давлении под подошвой подъём фундаментов носит обычно неравномерный характер. В стенах раскрываются трещины, перекашиваются оконные и дверные проёмы, повреждаются вводы коммуникаций.

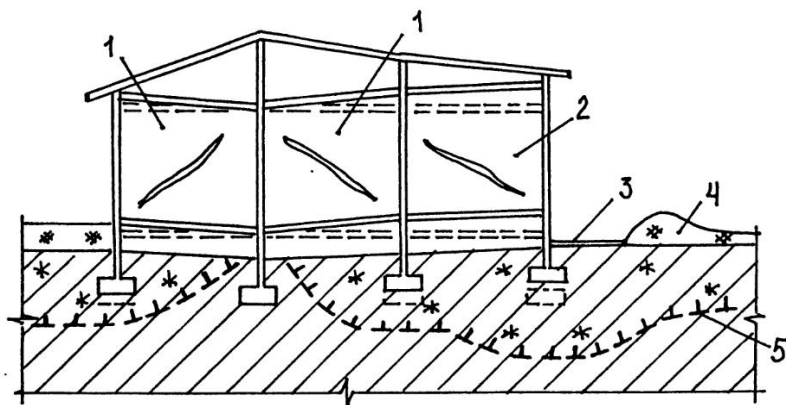


Рис. 3.1. Неравномерные деформации здания при промерзании пучинистого грунта основания: 1 - отапливаемые помещения, 2 - неотапливаемое помещение, 3 - тротуар, 4 - слой снега, 5 - фронт промерзания

Заложение подошвы заведомо ниже глубины сезонного промерзания полностью не гарантирует надёжную эксплуатацию сооружения. Грунт способен смерзаться с боковой поверхностью фундамента и приподнимать

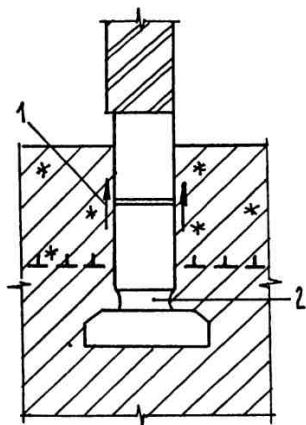


Рис. 3.2. Подъем фундамента за счет касательных сил морозного пучения: 1 - направление действия сил, 2 - зазор между фундаментными блоками

его за счёт касательных сил морозного пучения (рис.3.2). В этом случае под подошвой или между блоками фундамента образуется полость. В результате попадания в неё грунта при весеннем оттаивании конструкции не возвращаются в исходное положение, что вызывает ежегодное накопление деформаций пучения. По этой же причине оставленные в грунте старые деревянные сваи с годами «вылезают» наверх, разрушая покрытия улиц и тротуаров (рис. 3.3 и 3.4).



Рис. 3.3. Подъем бортовых камней при подъеме старых деревянных свай

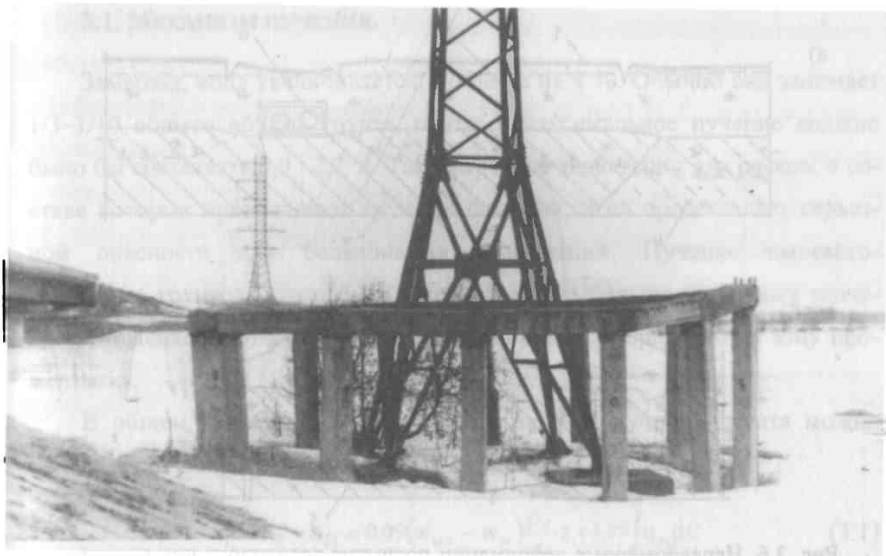


Рис. 3.4. Деформация свайного ограждения опоры ЛЭП за счет сил морозного пучения

Касательные силы пучения могут вызвать даже разрыв хорошо заанкеренных малонагруженных железобетонных свай с проволоочной арматурой (рис.3.5).

На автомобильных дорогах сезонное промерзание грунтов также весьма неравномерно. Вдоль трассы это обусловлено неоднородностью грунтов основания по составу и влажности, влиянием коммуникаций, водопрпускных труб, подземных переходов (рис.3.6, а). В поперечном направлении главной причиной служит снег, скапливающийся на обочинах (рис.3.6, б). Неравномерное пучение приводит к образованию трещин в покрытии.

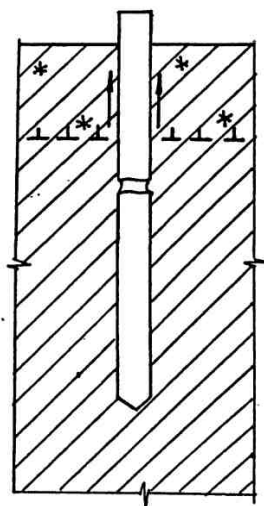


Рис. 3.5. Разрыв железобетонной свай касательными силами морозного пучения

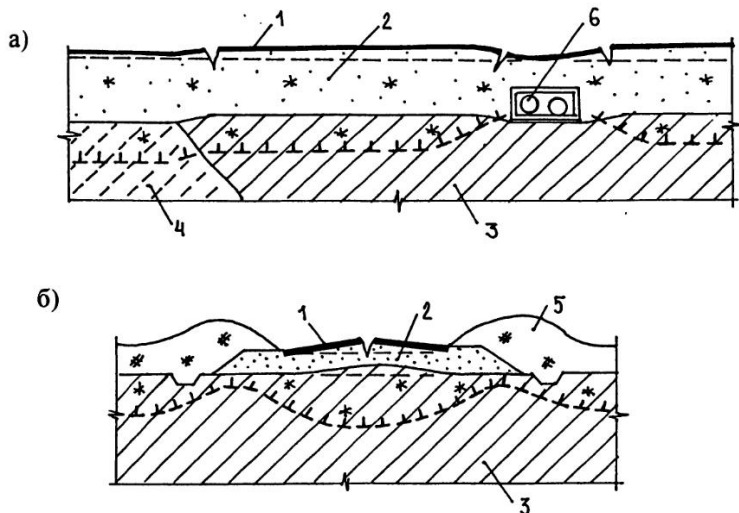


Рис. 3.6. Неравномерные деформации покрытия автодороги при промерзании пучинистого грунта основания: а - продольный разрез; б - поперечный разрез (1 - покрытие, 2 - насыпной непучинистый грунт, 3, 4 - пучинистые грунты основания, 5 - снег, 6 - теплотрасса)

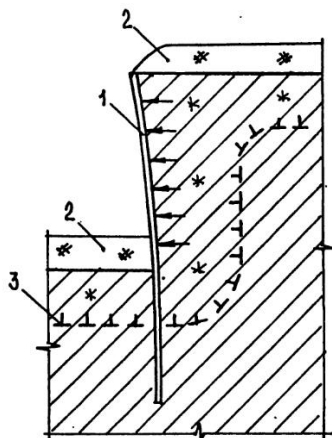


Рис.3.7. Воздействие сил морозного пучения на шпунтовую подпорную стену: 1 - стена, 2 - снег, 3 - фронт промерзания

Большую опасность представляет морозное пучение для вертикальных конструкций, взаимодействующих с грунтом, – подпорных стен, стен неотапливаемых подвалов, подземных переходов, колодцев и т.п. (рис.3.7).

Заметим, что склонность к морозному пучению называют пучинистостью, а пучинистые грунты иногда называют морозоопасными.

3.1. МЕХАНИЗМ ПУЧЕНИЯ

Замерзая, вода увеличивается в объёме на 9 %. Обычно она занимает 1/3–1/10 общего объёма грунта, поэтому максимальное пучение должно было бы составлять 0,9...2,7 %. Такое пучение характерно для песков, в составе которых преобладают крупные фракции, и не представляет серьезной опасности для большинства сооружений. Пучение пылевато-глинистых грунтов может быть в несколько раз больше указанных значений. Объясняется это миграцией влаги из нижних горизонтов в зону промерзания.

В общем виде подъём поверхности за счёт пучения грунта можно описать следующей зависимостью [17, 19, 20, 43, 54]:

$$h_f = h_I + h_{II} = 0,09(w_{tot} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1,09 \int_0^z q_{wf} dt, \quad (3.1)$$

где h_I – пучение за счёт воды, первоначально содержащейся в порах;

h_{II} – пучение за счёт миграционного льдовыделения;

ρ_d/ρ_w – коэффициент пересчета массовой влажности в объёмную;

z – глубина промерзания грунта;

q_{wf} – интенсивность подтока влаги к фронту промерзания.

Интенсивность подтока влаги к фронту промерзания q_{wf} зависит от многих факторов: состава грунта, формы и размера пор, близости грунтовых вод и наличия солей в них. Найти её расчётным путём практически невозможно. До сих пор нет единого мнения даже о причинах или механизме миграции влаги к фронту промерзания. Для объяснения этого явления различными учеными были выдвинуты капиллярная, осмотическая, гидродинамическая, адсорбционная теории [19, 54, 69, 71, 72].

Наиболее полно объясняет экспериментальные данные адсорбционная теория, в основе которой лежат понятия связанной, или адсорбированной влаги и расклинивающего давления. Суть теории состоит в следующем.

По Б.В. Дерягину [18] тонкая плёнка связанной воды, заключённая между двумя пластинками, оказывает на них расклинивающее давление P_R (рис. 3.8). Если внешнее давление на пластинки p меньше P_R и к плёнке есть приток воды, пластинки начинают раздвигаться. По мере увеличения зазора δ расклинивающее давление падает в соответствии со степенной зависимостью $P_R = A/\delta^n$, где показатель степени $n=2...3$. Процесс прекращается при достижении состояния равновесия ($p = P_R$).

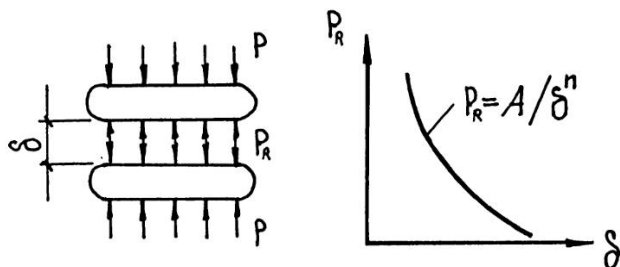


Рис. 3.8. Расклинивающее давление тонкой пленки связанной воды между частицами грунта

Учение о расклинивающем давлении нашло применение в грунтоведении для объяснения ряда процессов, связанных с изменением влажности дисперсных грунтов, и в частности процесса набухания.

При увлажнении глин плёнки связанной воды, заключённые между частицами, оказывают на них расклинивающее давление, здесь его называют давлением набухания. В том случае, когда внешнее давление, обусловленное весом вышележащего грунта и нагрузкой от сооружения, меньше P_R , грунт увеличивается в объёме и опирающиеся на него конструкции поднимаются на несколько сантиметров. Замачивание грунтов основания носит обычно локальный характер, так как источником увлажнения служат повреждённые коммуникации, водосточные трубы и т.п. В связи с этим подъём отдельных частей сооружения происходит неравномерно,

с раскрытием трещин (рис. 3.9). Аналогичный механизм имеет и процесс пучения.

При охлаждении грунта в первую очередь превращается в лёд свободная вода в крупных порах, затем постепенно замерзают плёнки связанной воды. Чем ниже опускается температура, тем тоньше становится слой незамёрзшей влаги на поверхности частиц. Если расклинивающее давление оказывается больше внешнего давления, плёнки, а следовательно и весь массив грунта, увеличиваются в объёме. Влага в растущие плёнки подсасывается снизу из талой зоны через фронт промерзания (рис. 3.10). Причём преимущественно развиваются горизонтально ориентированные плёнки. Росту плёнок вертикальной ориентации препятствует давление окружающего грунта. Исключением является грунт в откосах траншей, котлованов, насыпей.

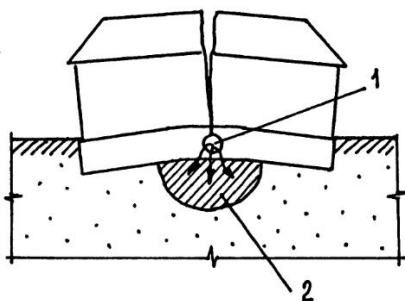


Рис. 3.9. Деформация здания при набухании глины в основании: 1 - источник увлажнения, 2 - зона увлажнения

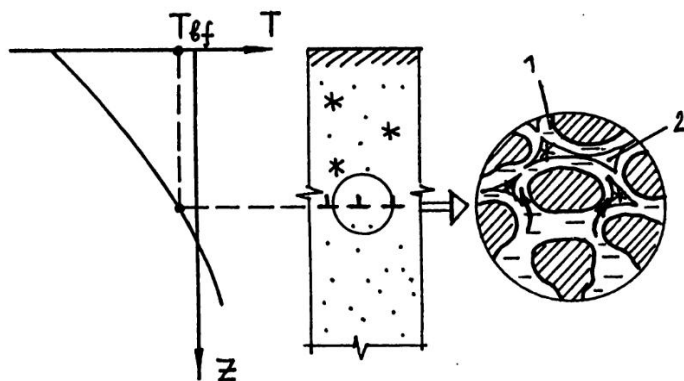


Рис. 3.10. Состояние воды около фронта промерзания: 1 - незамёрзшая влага, 2 - лёд (стрелками показано направление миграции)

Вода на периферии растущих плёнок продолжает замерзать, образуя сплошные прослойки льда, блокирующие миграцию влаги внутрь мёрзлого слоя (рис. 3.11). Начинается подсос воды в плёнки, расположенные на контакте ледяной прослойки и твёрдых частиц. При перемещении фронта промерзания ледяные прослойки образуются в мёрзлом грунте всё ниже и ниже, формируя слоистую криогенную текстуру (рис. 3.12). Остановки фронта промерзания способствуют росту прослоек и превращению их в линзы толщиной до нескольких сантиметров.

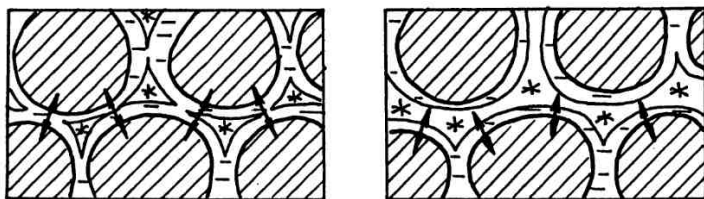


Рис. 3.11. Схема образования ледяных прослоек (стрелками показано направление роста пленок незамерзшей влаги)

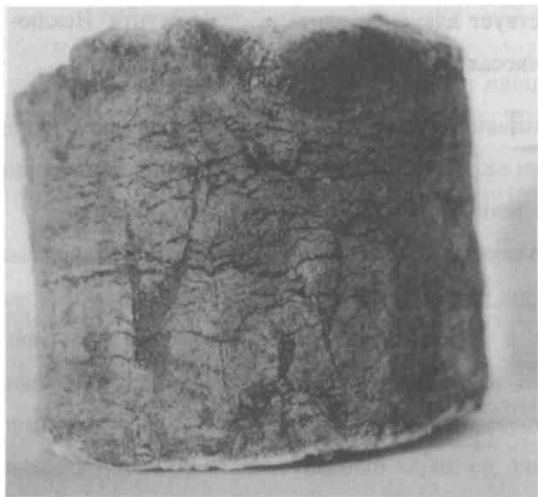


Рис.3.12. Слоистая криогенная текстура мерзлого грунта

Интенсивность миграции влаги, а следовательно и деформаций пучения, определяется в первую очередь типом грунта. Наибольшие значения наблюдаются в суглинках. В глинах, несмотря на максимальное содержание незамерзшей влаги, миграции препятствует плохая водопроницаемость. В песках крупных и средней круп-

ности плёночной влаги практически нет, и для них так называемое вторичное пучение не характерно.

3.2. Оценка пучинистости грунтов

В соответствии с решением Технического комитета по мёрзлым грунтам Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению (ISSMFE) существуют три уровня оценки степени пучинистости грунтов [62].

I уровень – грубая оценка по гранулометрическому составу, позволяющая выделить лишь заведомо непучинистые грунты. Потенциально пучинистые грунты требуют проведения более детального анализа.

II уровень – оценка средней точности по нескольким показателям: гранулометрическому составу, показателям пластичности, высоте капиллярного подъёма и т.п. Грунты классифицируются по степени пучинистости. Используемые здесь эмпирические зависимости должны уточняться для местных грунтов.

III уровень – точная оценка по результатам промораживания образцов в специальных приборах или по данным стационарных наблюдений в полевых условиях.

Применительно к каждому уровню рассмотрим существующие методики оценки пучинистости грунтов.

3.2.1. Первый уровень оценки

СНиП 2.02.01-83 [49] к непучинистым относит крупнообломочные грунты с песчаным заполнителем, пески гравелистые крупные и средней крупности, не содержащие пылевато-глинистых фракций, т.е. грунты, у которых кривая гранулометрического состава целиком лежит в заштрихованной зоне на рис. 3.13, а. Пучинистые свойства

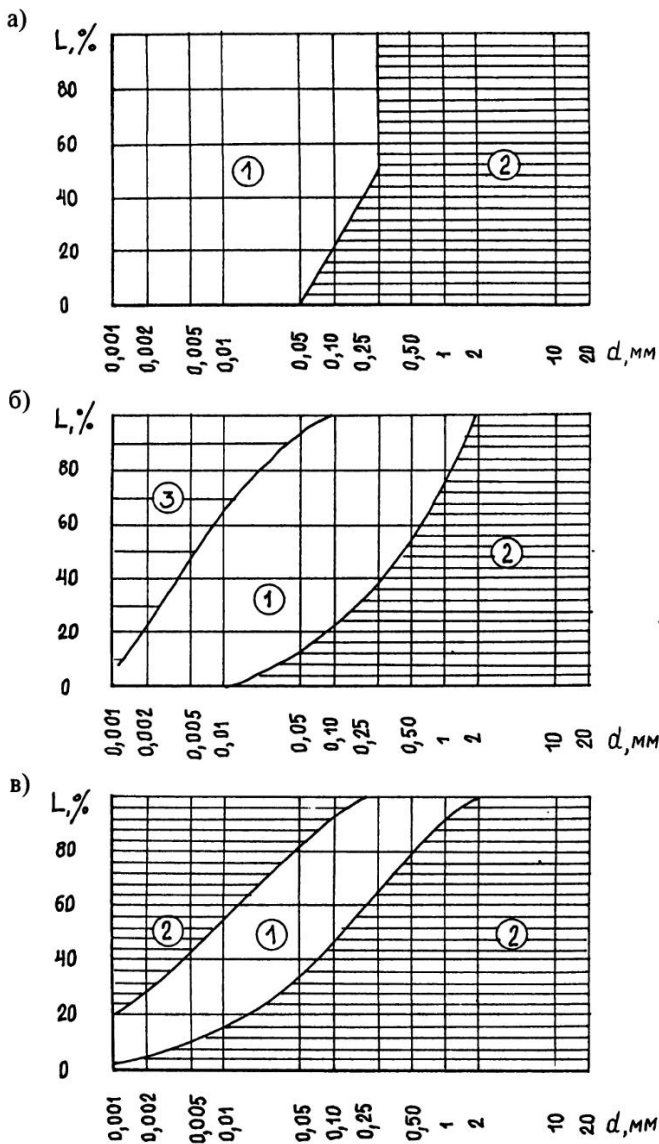


Рис. 3.13. Оценка степени пучинистости грунтов по гранулометрическому составу в соответствии с нормативными документами различных стран: а - России [49]; б - Канады [60]; в - Великобритании [29] (выделены зоны грунтов: 1 - непучинистых, 2 - пучинистых, 3 - слабопучинистых)

крупнообломочных грунтов и песков, содержащих пылевато-глинистые фракции, оцениваются по показателю дисперсности [40]

$$D = \frac{k}{\bar{d}^2 e}, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент, $k = 1,85 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$;

$\bar{d}$ – средний размер частиц, мм;

e – коэффициент пористости.

Средний размер частиц

$$\bar{d} = \left(0,01 \frac{p_1}{d_1} + 0,01 \frac{p_2}{d_2} + 0,01 \frac{p_3}{d_3} \right)^{-1}, \quad (3.3)$$

где p_1, p_2, p_3 – массовые доли отдельных фракций грунта, %;

d_1, d_2, d_3 – средние размеры частиц тех же фракций.

В расчётах, как правило, принимают:

p_1 – массовая доля частиц размером более 0,1 мм,

$d_1 = 0,1 \cdot 1,4 = 0,14 \text{ мм}$;

p_2 – массовая доля частиц размером 0,05...0,1 мм,

$d_2 = 0,05 \cdot 1,4 = 0,07 \text{ мм}$;

p_3 – массовая доля частиц размером менее 0,05 мм,

$d_3 = 0,05/1,4 = 0,035 \text{ мм}$.

Крупнообломочные грунты и пески относят к непучинистым при $D < 1$, к пучинистым при $D \geq 1$.

Согласно нормативным документам корпуса инженеров армии США крупнообломочные грунты и пески являются непучинистыми, если содержат соответственно менее 1,5 и 3 % частиц размером до 0,02 мм [62].

По мнению В.И.Пускова [41], непучинистыми следует считать крупнообломочные грунты, содержащие не более 20 % частиц размером d менее 0,1 мм и пески, содержащие не более 5 % частиц размером d менее 0,05 мм.

Канадские и английские специалисты к непучинистым относят грунты, у которых кривая гранулометрического состава попадает в заштрихованную зону на рис. 3.13, б, в [29, 60].

Более сложная методика предложена финскими и норвежскими специалистами [62, 64]. Грунты, кривая зернового состава которых полностью лежит в зонах 2, 3 или 4, показанных на рис. 3.14, а, считаются непучинистыми. График, расположенный в зоне 1 или пересекающий левые границы зон 2, 3 или 4, свидетельствует о возможности морозного пучения.

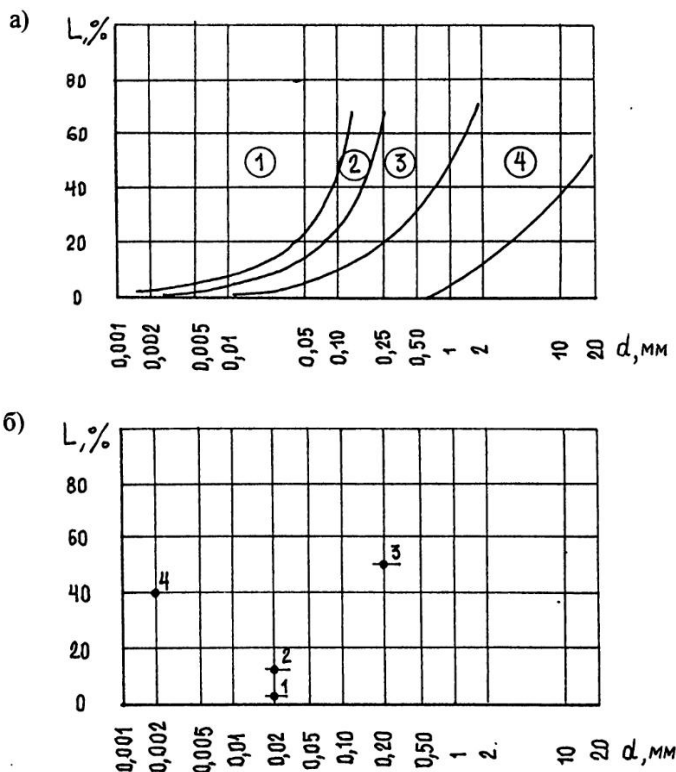


Рис. 3.14. Оценка степени пучинистости грунтов по гранулометрическому составу в соответствии с нормативными документами, действующими: а – в Финляндии [62, 64] (1 – зона пучинистых грунтов, 2, 3, 4 – зоны непучинистых грунтов); б – в Норвегии [66] (пояснения в тексте)

Классификация грунтов по степени пучинистости в зависимости от содержания различных фракций (табл.3.1) используется в норвежских нормативных документах на проектирование автомобильных дорог [66].

Таблица 3.1

Грунт по степени пучинистости	Массовая доля, %, частиц размером d, мм, менее		
	0,002	0,02	0,2
Непучинистый	-	<3	-
Слабопучинистый	-	3-12	-
Среднепучинистый	-	>12	< 50
	> 40	-	-
Сильнопучинистый	< 40	>12	> 50

Данные, содержащиеся в табл.3.1, можно представить графически (рис.3.14, б). Грунты, кривая гранулометрического состава которых лежит ниже или правее точки 1, считаются непучинистыми, между точками 1 и 2 – слабопучинистыми, между точками 2 и 3 или выше точки 4 – среднепучинистыми. График, построенный для сильнопучинистых грунтов, проходит между точками 2 и 4 и точками 3 и 4.

3.2.2. Второй уровень оценки

Согласно ГОСТ 28622-90 [15] грунты по степени пучинистости делятся на пять групп (табл. 3.2). Принадлежность к той или иной группе устанавливают по значению относительной деформации морозного пучения

$$\varepsilon_{fh} = \frac{h_f}{d_f}, \quad (3.4)$$

где h_f – морозное пучение;

d_f – глубина промерзания.

Грунт по степени пучинистости	Относительная деформация морозного пучения
Непучинистый	$\varepsilon_{fh} < 0,01$
Слабопучинистый	$0,01 \leq \varepsilon_{fh} < 0,04$
Среднепучинистый	$0,04 \leq \varepsilon_{fh} < 0,07$
Сильнопучинистый	$0,07 \leq \varepsilon_{fh} < 0,10$
Чрезмернопучинистый	$\varepsilon_{fh} \geq 0,10$

Российские нормативные документы [40, 42, 43] допускают определение величины ε_{fh} пылевато-глинистых грунтов по расчётному параметру R_f , предложенному В.О.Орловым [38, 42]:

$$R_f = \frac{\rho_d}{1,5} \left[0,012 (W - 0,1) + \frac{W(W - W_{cr})^2}{W_L W_P \sqrt{|T_w|}} \right] 10^2, \quad (3.5)$$

где W – природная влажность грунта;

W_{cr} – критическая влажность;

W_L, W_P – влажность соответственно на границе текучести и на границе пластичности;

T_w – среднезимняя температура воздуха, $T_w = -F/t_w$.

Критическая влажность W_{cr} , ниже которой в промерзающем грунте прекращается перераспределение влаги, определяется по графику как функция W_L и числа пластичности $I_P = W_L - W_P$ (рис. 3.15).

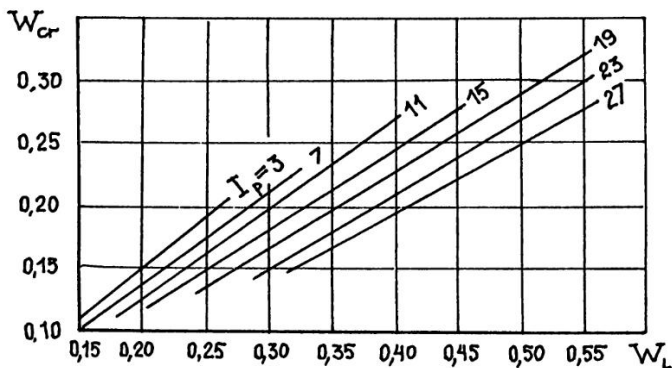
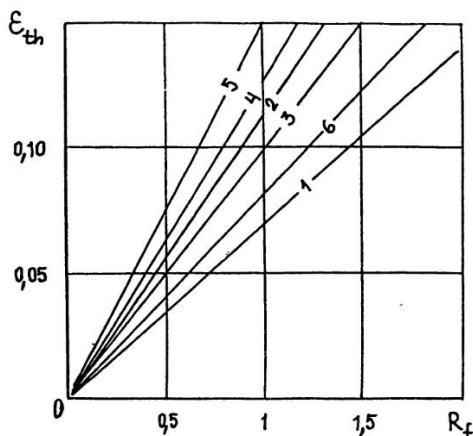


Рис. 3.15. Определение значения критической влажности

Зависимости $\varepsilon_{th} = f(R_f)$ для различных типов грунтов представлены на рис. 3.16.

Рис.3.16. Зависимость относительного пучения от параметра R_f .
 1 - супесь ($0,02 < I_p \leq 0,07$; массовая доля пылеватых частиц, $d = 0,05 \dots 0,005$ мм, $p \leq 50$ %);
 2 - супесь пылеватая ($0,02 < I_p \leq 0,07$; $p > 50$ %); 3 - суглинок ($0,07 < I_p \leq 0,17$; $p \leq 50$ %); 4 - суглинок пылеватый ($0,07 < I_p \leq 0,13$; $p > 50$ %); 5 - суглинок пылеватый ($0,13 < I_p \leq 0,17$; $p > 50$ %); 6 - глина ($I_p > 0,17$)



За рубежом для оценки пучинистости используют показатель, имеющий аналогичное обозначение, но вычисляемый по иной зависимости [62]:

$$R'_f = \frac{0,01 \cdot p_1 p_2}{W_L}, \quad (3.6)$$

где p_1 — массовая доля частиц размером менее 0,074 мм, %;

p_2 — массовая доля частиц размером менее 0,002 мм во фракции, прошедшей через сито с отверстиями диаметром 0,074 мм, %;

W_L — влажность на границе текучести для той же фракции грунта.

Следует отметить, что использование формулы (3.6) возможно только при условии $p_1 \leq 20$ %.

Классификация пучинистых грунтов по показателю R'_f дана в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Грунт по степени пучинистости	R'_f	h_k , м
Непучинистый	$< 2,5$	< 1
Слабопучинистый	$2,5 \dots 5,0$	$1,0 \dots 1,5$
Среднепучинистый	$5 \dots 10$	$1,5 \dots 2,0$
Сильнопучинистый	> 10	> 2

В сороковых годах G.Beskow [62] предложил классифицировать пучинистые грунты по высоте капиллярного подъема влаги h_k (см. табл. 3.3).

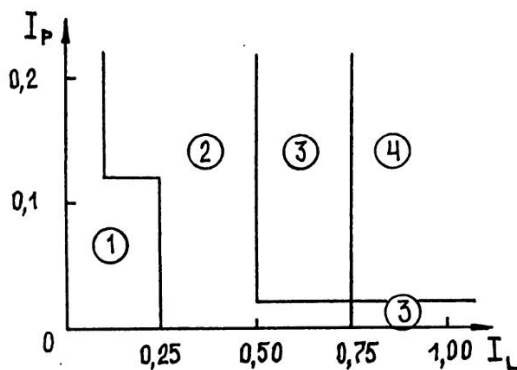


Рис. 3.17. Диаграмма для определения степени пучинистости грунтов (составлена по данным В.И. Пускова [41]): 1 - непучинистые, 2 - слабопучинистые, 3 - среднепучинистые, 4 - сильнопучинистые грунты

Обобщив многочисленные экспериментальные данные, В.И.Пусков установил зависимость степени пучения пылевато-глинистых грунтов от числа пластичности I_p и показателя текучести I_L [41]. Диаграмма, показанная на рис. 3.17, составлена

для грунтов, содержащих до 50 % частиц размером d менее 0,05 мм. При большем содержании указанных час-

тиц степень пучинистости следует повышать на одну ступень.

3.2.3. Третий уровень оценки

В решении Технического комитета по мерзлым грунтам Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению и в ГОСТ 28622-90 сформулированы примерно одинаковые требования к конструкции прибора и методике испытаний грунтов на пучинистость [15, 62]. Кратко они состоят в следующем:

- диаметр образца принимают не менее 100 мм, высоту – не менее 150 мм, при этом размеры образца должны в шесть раз и более превышать максимальный размер частиц грунта;
- образец помещают в обойму из материала с малой теплопроводностью; обойму покрывают смазкой или разрезают на отдельные кольца для снижения сил трения при контакте с образцом;

- до начала эксперимента создают давление на образец, равное расчетному давлению на заданной глубине, но не более 50 кПа;
- в ходе опыта на одном торце образца поддерживают температуру ниже нуля, а на другом – выше нуля (обычно -3...-5 °С и 1...5 °С соответственно);
- со стороны теплого торца образец подпитывают водой через слой капиллярно-пористого материала;
- при испытаниях измеряют: температуру образца на различной высоте, объем поглощаемой грунтом воды и увеличение высоты образца, то есть его морозное пучение.

Принципиальные схемы приборов, применяемых в различных странах, показаны на рис. 3.18.

Чаще всего используется конструкция, показанная на рис. 3.18, а [15, 39]. Промораживание образца ведется сверху вниз. Нагрузка на образец передается через поршень, за подъемом которого следят с помощью специальных датчиков. Подпитка водой выполняется снизу.

В приборах конструкции Т.Иshizaki и J.Konrad [68, 69] промораживание образца осуществляется снизу вверх (рис.3.18, б). Благодаря смещению образца при пучении в сторону талой части значительно снижается трение грунта по стенкам гильзы. Подача воды выполняется сверху – со стороны теплого торца.

Тот же способ снижения сил трения использован в приборе, конструкция которого предложена К.Kujala [71], – рис.3.18, в. Промораживание грунта здесь происходит как в природных условиях – сверху вниз, но днище прибора сделано подвижным относительно гильзы.

При проведении опытов, а самое главное при обработке и интерпретации результатов, следует учитывать важную особенность: относительная деформация пучения ($\epsilon_n = h_p/d_f$) зависит от скорости промораживания грунта. Это связано с тем, что морозное пучение обусловлено главным образом миграцией влаги из талой зоны к фронту промерзания. Чем медленнее

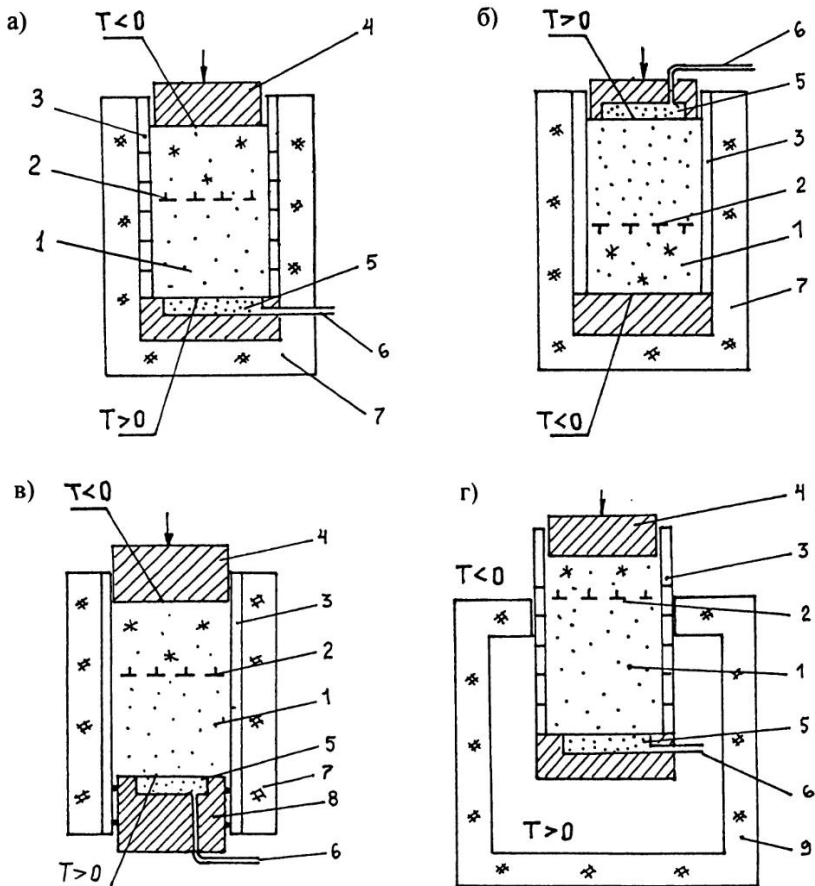


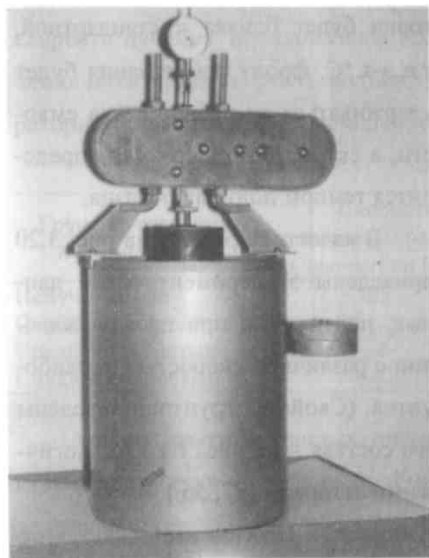
Рис. 3.18. Схемы приборов для определения морозного пучения грунтов: а - промораживание сверху [15,39]; б - промораживание снизу [68,69]; в - прибор с подвижным дном [71]; г - прибор конструкции АГТУ [36] (1 - образец, 2 - фронт промерзания, 3 - гильза, 4 - поршень, 5 - пористое вещество, 6 - трубка для подачи воды, 7 - теплоизоляция, 8 - подвижное дно, 9 - емкость с подогревом)

перемещается фронт промерзания, тем больше влаги переносится в зону промерзания, в результате чего пучение увеличивается.

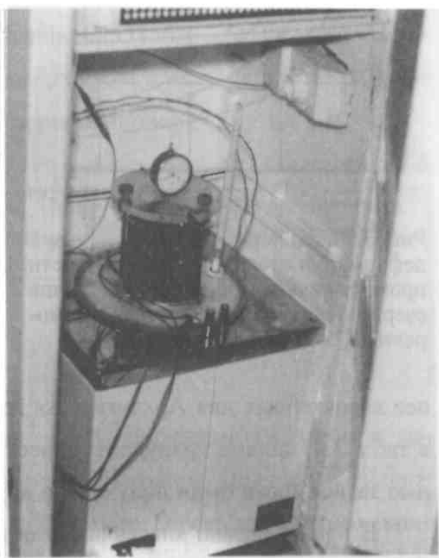
Скорость перемещения фронта промерзания можно регулировать, изменяя температуру на торцах образца. Этот метод, применяемый

в лабораторной практике, отличается сложностью. В частности, слежение за ходом промерзания и управление всей экспериментальной установкой должно осуществляться с помощью компьютера.

В России прибор для измерения морозного пучения (рис. 3.19, а) выпускался серийно в ПНИИИС (Москва). Как показали проведенные автором исследования, он обеспечивает промораживание грунта со скоростью 30...40 мм/сут и более. Скорость же перемещения фронта промерзания грунта в природных условиях зачастую значительно меньше. В Архангельске, например, она составляет 5...20 мм/сут [31]. Наши попытки уменьшить скорость для приближения ее к природным значениям за счет снижения градиента температуры не имели успеха. Образец промерзал на небольшую глубину или не промерзал вообще.



а)



б)

Рис. 3.19. Приборы для измерения деформаций морозного пучения:
а - конструкции ПНИИИС, б - конструкции АГТУ

Заметим, что по нормам [39] температура верхнего торца должна быть -20°C , что обеспечивает скорость промерзания 500...700 мм/сут.

На кафедре инженерной геологии, оснований и фундаментов Архангельского государственного технического университета используется установка (рис.3.19, б), позволяющая промораживать образцы с любой скоростью, а также останавливать фронт промерзания для наблюдения за ростом прослоек льда [36, 76]. Ее принципиальная схема показана на рис.3.18, а. Прибор размещается в холодильной камере. Во время опыта образец, заключенный в обойму, поднимается с заданной скоростью из утепленной

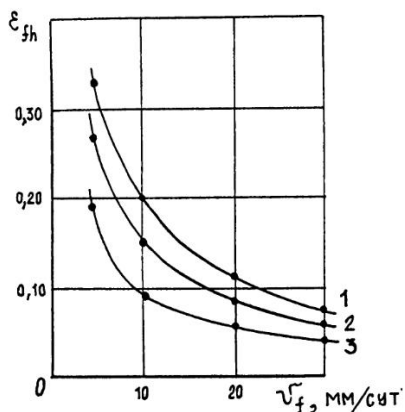


Рис. 3.20. Зависимость относительной деформации пучения от скорости промораживания образцов: 1 - глина озерно-ледниковая, 2 - суглинок моренный, 3 - песок пылеватый

емкости и постепенно промораживается. Если температуру в холодильной камере поддерживать в интервале $-5...-7$ °С, а в утепленной емкости $3...5$ °С, то температура верхнего торца будет близка к стандартной, т.е. -4 °С; фронт промерзания будет удерживаться на уровне верха емкости, а скорость промерзания определится темпом подъема образца.

В качестве примера на рис. 3.20 приведены экспериментальные данные, полученные при промораживании с различной скоростью v_f , наиболее характерных для Архангельска грунтов. (Свойства грунтов приведены в табл. 3.4, кривые гранулометрического состава – на рис. 1.1.) Аналогичные зависимости были получены и другими авторами [27, 56].

В нашей стране классификация пучинистых грунтов выполняется по величине ϵ_p (см. табл. 3.2). Такой подход может привести к ошибочным выводам, если значения v_f в основании реального сооружения и лабораторной установке существенно отличаются друг от друга. Например, песок пылеватый (кривая 3 на рис. 3.20) при $v_f = 5$ мм/сут относится к чрезмернопучинистым, а при $v_f = 30$ мм/сут – среднепучинистым.

Физические свойства грунтов	Грунт (см. рис.1.1 и 3.20)		
	Глина озерно-ледниковая	Суглинок моренный	Песок пылеватый
Плотность, г/см ³ :			
частиц	2,78	2,74	2,66
грунта	1,82	2,10...2,28	1,93
Влажность, доли ед.:			
природная	0,31	0,09...0,22	0,24
на границе текучести	0,44	0,24	-
на границе пластичности	0,19	0,15	-
Число пластичности	0,25	0,09	-
Показатель текучести	0,48	-0,26...0,25	-
Содержание незамёрзшей влаги при температуре -3 °С, доли ед.	0,07	0,053	0,016

По мнению автора вполне приемлемой может быть классификация по скорости пучения, предложенная E.Chamberlain (табл. 3.5). Скоростью пучения называется скорость подъёма поверхности или, в частности, в лабораторных опытах, скорость смещения поршня прибора - $v_h = dh_r / dt$.

Таблица 3.5

Грунт по степени пучинистости	Скорость v_h , мм/сут, по данным различных авторов		Сегрегационный потенциал SP, мм ² /(ч·°С)
	E.Chamberlain [65]	K.Kujala [71]	
Непучинистый	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Слабопучинистый	0,5...2	0,5...2,4	0,5...1,5
Среднепучинистый	2...4	-	1,5...3
Сильнопучинистый	> 4	> 2,4	> 3

Анализ опытных данных показал, что v_h определяется типом и состоянием грунта и не зависит от темпа его промерзания. Для глины озерно-ледниковой (кривая 1 на рис.3.20) $v_h = 2,5$ мм/сут, песка пылеватого (кривая 3) - 1,2 мм/сут, то есть глину озерно-ледниковую следует отнести к среднепучинистым, песок пылеватый - к слабопучинистым грунтам (см.табл.3.5).

Образцы моренного суглинка (кривая 2 на рис.3.20) были отобраны на площадке строительства промышленного объекта. У них наблюдается раз-

брос значений природной влажности и соответственно показателя текучести I_L . Зависимость скорости пучения v_h от величины I_L (рис. 3.21) можно принять линейной, $v_h = 1,84 + 2,46 I_L$ с коэффициентом корреляции 0,77. Следует отметить, что для таких неоднородных грунтов, как морена, требуются испытания большего числа образцов, иначе полученные результаты нельзя считать достоверными.

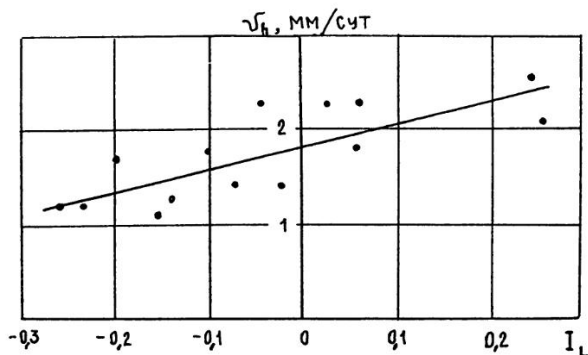


Рис. 3.21. Влияние показателя текучести суглинка моренного на скорость морозного пучения

Для расчёта оснований и классификации грунтов в соответствии с ГОСТ 28622-90 [15] относительное пучение можно найти по формуле

$$\varepsilon_{fh} = \frac{v_h}{v_f + v_h} \quad (3.7)$$

Здесь скорость v_h следует определять по результатам лабораторных испытаний, а величину v_f принимать по климатическим справочникам.

Принципиально иной подход к обработке экспериментальных данных и последующему расчёту пучения основания предложил J.M.Konrad [69]. В настоящее время предложенная им методика нашла широкое применение во всём мире.

Слой грунта высотой несколько миллиметров между фронтом промерзания и формирующейся линзой льда называют каймой промерзания

(рис. 3.11). Как установил J.M.Konrad, скорость миграции воды v_m через кайму прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$v_m = SP \cdot |\text{grad } T|, \quad (3.8)$$

где SP – сегрегационный потенциал.

Сегрегационный потенциал SP – величина постоянная для данного грунта, выражается она в квадратных миллиметрах на час-градус Цельсия ($\text{мм}^2/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$).

Градиент температуры (рис. 3.22) можно найти по формуле

$$\text{grad } T = \frac{T_{bf} - T_s}{d} \approx -\frac{T_s}{d}, \quad (3.9)$$

где T_{bf} – температура начала замерзания, $T_{bf} \rightarrow 0$;

T_s – температура на верхней границе каймы (её называют температурой сегрегации);

d – высота каймы.

Классификация грунтов по значению SP приведена в табл. 3.5.

К.Кужала установил, что между сегрегационным потенциалом SP ($\text{мм}^2/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$) и скоростью пучения v_h

(мм/сут) существует тесная корреляционная зависимость [71]:

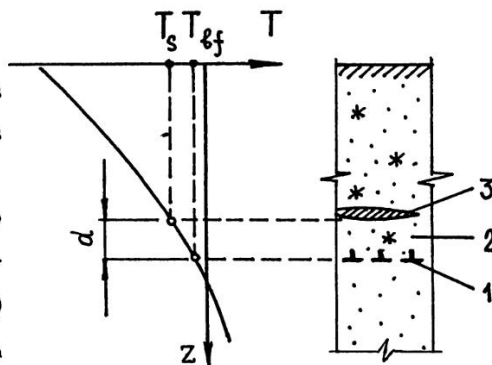


Рис. 3.22. К расчету градиента температуры: 1 – фронт промерзания, 2 – кайма промерзания, 3 – линза льда

$$SP = 1,1 v_h. \quad (3.10)$$

Сегрегационный потенциал зависит от внешнего давления p на грунт:

$$SP = SP_0 \exp(-a p), \quad (3.11)$$

где SP_0 – сегрегационный потенциал при нулевой нагрузке;

a – константа, определяемая экспериментально.

Н.Л. Jessberger и R. Jagow [62] нашли зависимость коэффициента α от содержания в грунте частиц размером d менее 0,002 мм (рис. 3.23).

При проектировании сооружений расчёт пучения ведут по следующей зависимости [69, 70]:

$$h = 0,09(w_{\text{tot}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} z + 1,09 SP \cdot t \cdot \text{grad } T, \quad (3.12)$$

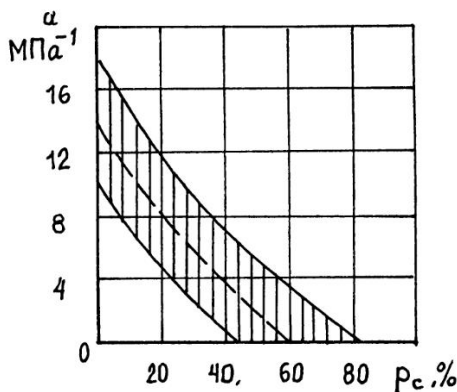


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента α от содержания частиц размером $d < 0,002$ мм [60]

где $\text{grad } T$ для упрощения расчётов часто находят не для каймы промерзания, а для всего слоя мёрзлого грунта.

При проведении научных исследований или выполнении инженерно-геологических изысканий перед началом строительства ответственных сооружений организуются стационарные наблюдения за морозным пучением грунтов. Обычно они сопровождаются замерами температуры (см. подразд. 2.1).

До начала сезонного промерзания на опытной площадке устанавливают марки-пучиномеры. Чаще всего применяют марки с винтовыми лопастями и обсадными трубами, предотвращающими смерзание вертикальных стержней с грунтом (рис. 3.24). Пучение на заданной глубине определяют нивелировкой верхних концов марок.

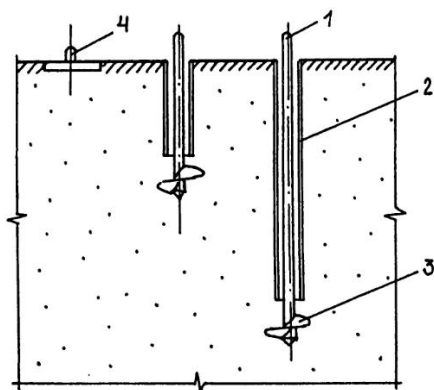


Рис. 3.24. Система марок для измерения пучения грунта на различной глубине: 1 — стержень, 2 — обсадная труба, 3 — лопасть, 4 — поверхностная марка

Более эффективны марки, устанавливаемые в одной скважине. На рис.3.25 показана телескопическая марка, собранная из нескольких вложенных друг в друга труб с винтовыми лопастями на нижних торцах.

Применяется также устройство, состоящее из пластин или колец, внедрённых в грунт на различной глубине, и пластмассовой обсадной трубы, удерживающей стенки скважины от обрушения (рис.3.26). Положение пластин или колец определяют, опуская в скважину зонд, работающий по принципу металлоискателя [16, 81].

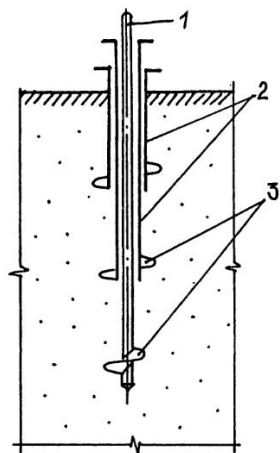


Рис. 3.25. Телескопическая марка-пучиномер: 1 - стержень, 2 - трубы, 3 - лопасти

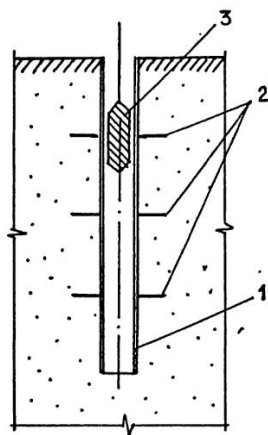


Рис. 3.26. Устройство для измерения пучения грунта [16, 81]: 1 - обсадная труба, 2 - пластины или кольца, 3 - зонд

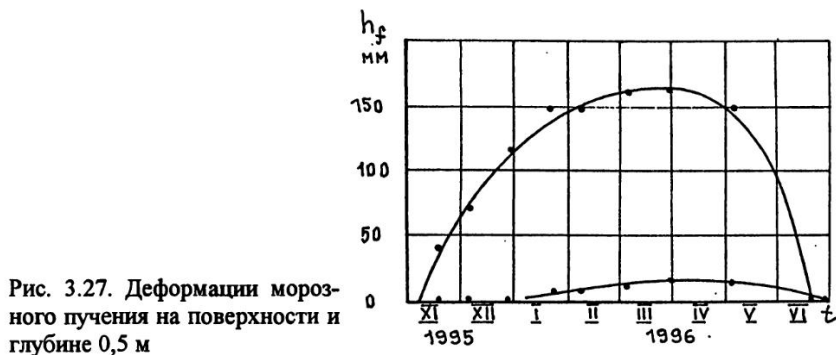


Рис. 3.27. Деформации морозного пучения на поверхности и глубине 0,5 м

На рис. 3.27 приведены графики пучения грунта на опытной площадке АГТУ зимой 1995/96 года. При сезонном промерзании на 1,0 м подъём поверхности достиг 16,5 см, а подъём установленной на глубине 0,5 м марки – 1,3 см. Относительное пучение верхнего слоя грунта толщиной 50 см составило $\varepsilon_{\text{п}} = (16,5 - 1,3) / 50 = 0,30$, а подстилающего слоя той же толщины $\varepsilon_{\text{п}} = (1,3 - 0) / 50 = 0,03$.

3.3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 3.1. Суглинок, кривая гранулометрического состава которого приведена на рис.1.20, имеет следующие свойства: $\rho = 2,07 \text{ г/см}^3$; $\rho_s = 2,74 \text{ г/см}^3$; $W = 0,22$; $W_L = 0,30$; $W_p = 0,19$ (см. задачу 1.2). Оцените степень его пучинистости различными методами.

Решение. I уровень. Кривая гранулометрического состава (рис.3.28, а-г) оказалась в зонах 1. Это говорит о том, что в соответствии с российскими, канадскими, английскими, финскими нормативными документами исследуемый суглинок является пучинистым. Расположение графика на рис.3.28, д между точками 2 и 4 и точками 3 и 4 свидетельствует о сильной пучинистости грунта по норвежским нормативным документам.

II уровень. Для оценки степени пучинистости по российским строительным нормам последовательно найдём:

- число пластичности

$$I_p = 0,30 - 0,19 = 0,11;$$

- критическую влажность

$$W_{\text{кр}} = 0,20 \text{ (рис. 3.15);}$$

- плотность грунта в сухом состоянии

$$\rho_d = 2,07 / (1 + 0,22) = 1,70 \text{ г/см}^3;$$

- расчётный параметр R_f по формуле (3.5) для климатических условий

Архангельска, где $T_w = -8 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$R_f = \frac{1,70}{1,50} \left[0,012 (0,22 - 0,1) + \frac{0,22 (0,22 - 0,20)^2}{0,30 \cdot 0,19 \sqrt{8}} \right] 10^2 = 0,225;$$

- содержание пылеватых частиц размером $0,005 \dots 0,05$ мм: $p=33,5\%$
(по табл. 1.5).

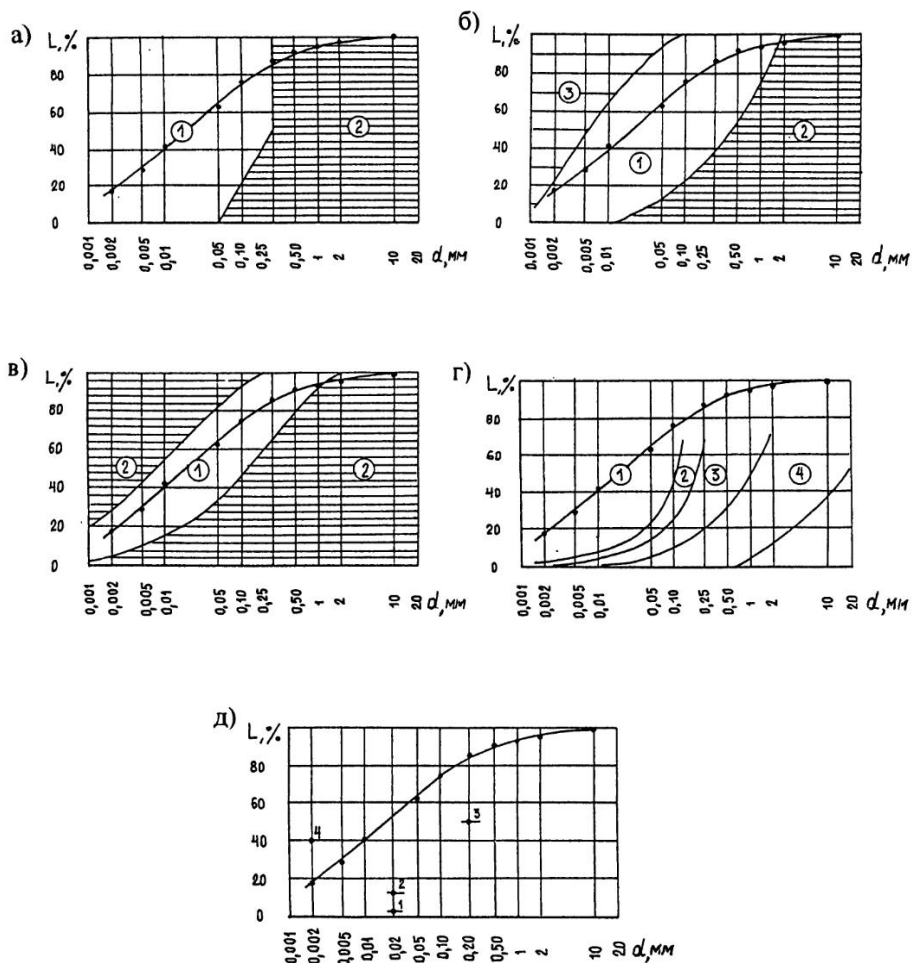


Рис. 3.28. Оценка степени пучинистости суглинка по гранулометрическому составу в соответствии с нормативными документами различных стран: а - России; б - Канады; в - Великобритании; г - Финляндии; д - Норвегии

При $0,07 < I_p \leq 0,17$ и $p \leq 50$ % относительную деформацию пучения следует определять по графику 3 на рис.3.16. С помощью указанного графика для $R_f = 0,225$ находим $\epsilon_{п} = 0,023$. В соответствии с классификацией, приведенной в табл. 3.2, суглинок можно отнести к слабопучинистым грунтам.

На диаграмме, показанной на рис. 3.17, точка с координатами $I_L = (0,22 - 0,19)/(0,30 - 0,19) = 0,27$ и $I_p = 0,11$ попадает в зону 2, соответствующую слабопучинистым грунтам. С учетом того, что содержание частиц размером d менее $0,05$ мм составляет $62,6$ % (табл. 1.6), повышаем степень пучинистости на одну ступень и определяем суглинок как средnepучинистый грунт.

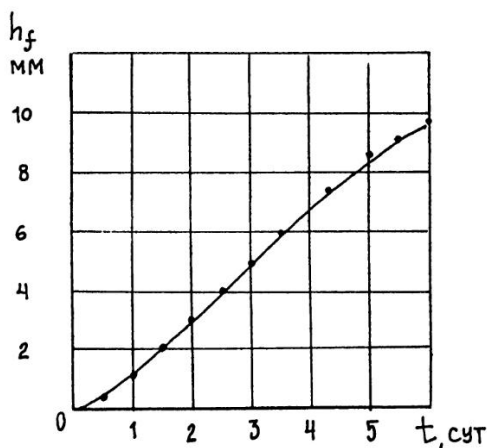


Рис. 3.29. Развитие деформаций пучения суглинка во времени

Задача 3.2. Образец суглинка промораживался в лабораторной установке, показанной на рис. 3.18, z , со скоростью 20 мм/сут. Опытные данные представлены на рис.3.29. Определите степень пучинистости суглинка и сравните ее с прогнозом по показателям пластичности, выполненным при решении задачи 3.1.

Решение. Скорость пучения определяем по участку графика в интервале времени от 1 до 5 суток:

$$v_h = \frac{\Delta h_f}{\Delta t} = (8,6 - 1,1) / (5 - 1) = 1,88 \text{ мм/сут.}$$

По этому показателю суглинок следует отнести к слабопучинистым грунтам (табл. 3.5).

Глубина промерзания образца за 6 суток составит $d_f = v_f t = 20 \cdot 6 = 120$ мм, его пучение за это же время достигнет 9,7 мм (рис. 3.29). Отсюда относительное пучение составит:

$$\epsilon_{fh} = 9,7/120 = 0,081.$$

Тот же показатель рассчитываем по формуле (3.7):

$$\epsilon_{fh} = 1,88/(20 + 1,88) = 0,086.$$

Согласно российским нормативным документам (табл.3.2) исследуемый суглинок является сильнопучинистым грунтом, и, следовательно, оценка его морозоопасности по показателям пластичности, выполненная в задаче 3.1, оказалась не совсем точной.

Задача 3.3. Образец суглинка, свойства которого приведены в условии задачи 3.1, промораживался в лабораторной установке со скоростью 20 мм/сут. График пучения образца показан на рис. 3.29.

В образец были установлены с шагом 5 см четыре датчика температуры (рис. 3.30). В табл.3.6 приведены результаты замеров температуры по истечении 2,5 и 5 суток от времени начала эксперимента.

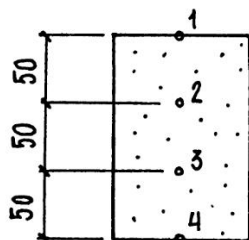


Рис. 3.30. Схема размещения датчиков в образце

Таблица 3.6

Время, сут	Температура, °С, по датчикам			
	1	2	3	4
2,5	- 1,9	0	1,6	3,0
5	- 4,8	- 2,0	- 0,1	1,4

Найдите значение сегрегационного потенциала исследуемого грунта и классифицируйте его по степени пучинистости.

Решение. Графики изменения температуры грунта по высоте образца показаны на рис.3.31. При построении графиков было учтено, что за 2,5 суток высота образца увеличилась на 4,0 мм, за 5 суток – на 8,3 мм (рис.3.29).

В первом случае фронт промерзания практически совпадал с точкой размещения датчика 2, во втором – датчика 3.

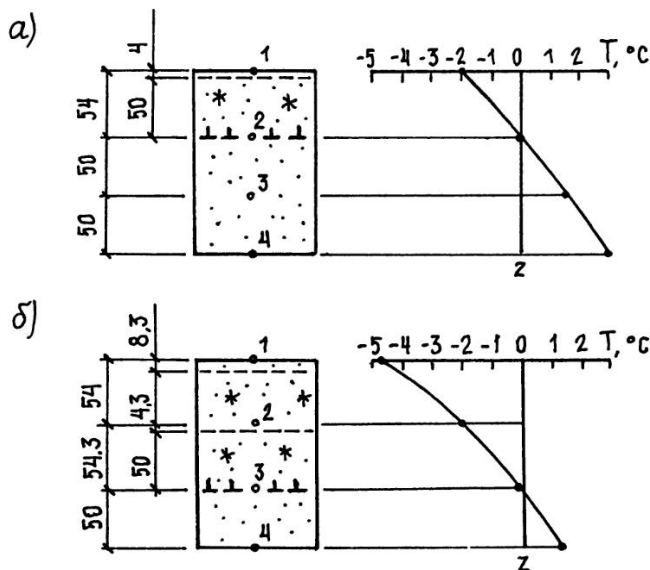


Рис. 3.31. Изменение температуры грунта по высоте образца по истечении от начала опыта: а - 2,5 суток; б - 5 суток

Для точки с абсциссой $t_1 = 2,5$ сут последовательно найдём:

- градиент температуры позади фронта промерзания

$$\text{grad } T = [0 - (-1,9)] / 54 = 0,035 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мм};$$

- среднюю температуру мёрзлого слоя

$$T_1 = (0 - 1,9) / 2 = -0,95 \approx -1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- влажность за счёт незамёрзшей влаги (по формуле (1.3))

$$W_w = 0,60 \cdot 0,19 = 0,11;$$

- пучение образца за счёт замерзания воды, первоначально содержащейся в порах (формулы (3.1) и (3.12)),

$$h_1 = 0,09(0,22 - 0,11) (1,70/1,00) 50 = 0,84 \text{ мм};$$

- среднюю скорость пучения за счёт воды, первоначально содержащейся в порах,

$$v_{h1} = h_1 / t_1 = 0,84 / 2,5 = 0,34 \text{ мм/сут};$$

- скорость пучения образца в интервале времени от $(t_1 - 0,5)$ сут до $(t_1 + 0,5)$ сут

$$v_h = (4,90 - 3,10) / 1 = 1,80 \text{ мм/сут};$$

- скорость пучения за счёт миграционного льдовыделения

$$v_{hII} = v_h - v_{h1} = 1,80 - 0,34 = 1,46 \text{ мм/сут} = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ мм/ч};$$

- сегрегационный потенциал при отсутствии нагрузки на образец (по формуле (3.12))

$$SP_0 = v_{hII} / (1,09 \text{ град } T) = 6,1 \cdot 10^{-2} / (1,09 - 0,035) = 1,59 \text{ мм}^2 / (\text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Аналогичные вычисления проведем для точки с абсциссой $t_2 = 5$ сут:

$$\text{град } T = (-0,1 - (-2,0)) / 54,3 = 0,035 \text{ } ^\circ\text{C/мм};$$

$$T_2 = (0 - 4,8) / 2 = -2,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$W_w = 0,49 - 0,19 = 0,09;$$

$$h_1 = 0,09 (0,22 - 0,09) \cdot (1,70 / 1,00) \cdot 100 = 1,99 \text{ мм};$$

$$v_{h1} = 1,99 / 5 = 0,40 \text{ мм/сут};$$

$$v_h = (9,1 - 7,6) / 1 = 1,50 \text{ мм/сут};$$

$$v_{hII} = 1,50 - 0,40 = 1,10 \text{ мм/сут} = 4,6 \cdot 10^{-2} \text{ мм/ч};$$

$$SP_0 = 4,6 \cdot 10^{-2} / (1,09 - 0,035) = 1,20 \text{ мм}^2 / (\text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Среднее значение сегрегационного потенциала $SP_0 = (1,59 + 1,20) / 2 = 1,40 \text{ мм}^2 / (\text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$

По табл. 3.5 определяем, что исследуемый грунт является слабопучинистым.

Заметим, что расчет по формуле (3.10) дает несколько большее значение сегрегационного потенциала:

$$SP = 1,1 \cdot 1,80 = 1,98 \text{ мм}^2 / (\text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

4. УСТРОЙСТВО ФУНДАМЕНТОВ

Наряду с нагрузками от сооружения, деформационно-прочностными свойствами грунтов основания и гидрогеологическими условиями местности сезонное промерзание является одним из основных факторов, принимаемых во внимание при проектировании фундаментов.

Для исключения недопустимых деформаций зданий на пучинистых грунтах чаще всего используют заложение подошвы фундаментов ниже

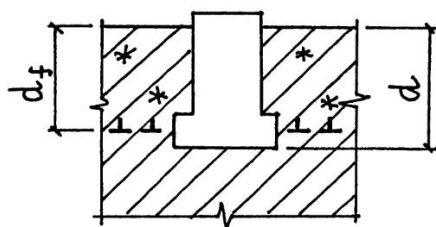


Рис. 4.1. Заложение подошвы фундамента ниже глубины сезонного промерзания

глубины сезонного промерзания (рис.4.1). Фундаменты при соотношении глубины заложения подошвы фундамента и глубины промерзания грунта $d > d_f$ иногда называют нормально заглубленными. В тех случаях, когда в слое сезонного промерзания имеются грунты, способные воспринимать нагрузку от

сооружения, такое решение будет явно нерациональным. В первую очередь это относится к легким одно-, двухэтажным зданиям, где затраты на устройство фундаментов с глубиной заложения 1,5...2,5 м могут достигать 25 и даже 50 % от стоимости зданий [42].

За последние 15–20 лет в России и особенно в Северной Европе накоплен большой опыт по возведению экономичных малозаглубленных фундаментов при соотношении $d < d_f$. Для защиты их основания от промерзания и пучения применяют конструктивные, мелиоративные, теплоизоляционные и другие специальные мероприятия. Проектирование таких фундаментов требует тщательного анализа климатических условий и точной оценки степени пучинистости грунтов.

4.1. НОРМАЛЬНО ЗАГЛУБЛЕННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ

Нормально заглубленный фундамент является простой и надежной конструкцией. Однако при его использовании следует помнить о сохраняющейся опасности пучения грунтов основания во время строительства.

Так, промерзание основания после отрывки котлована или во время монтажа фундаментных блоков служит причиной неравномерной осадки конструкций, возведенных за зиму, при весеннем оттаивании грунта (рис. 4.2). В грунте, испытывавшем пучение, линзы льда превращаются в воду, легко отжимаемую из пор. Осадка протекает быстро и неравномерно, причем сопровождается снижением несущей способности грунта за счет избытка влаги (см. подраздел 1.4).

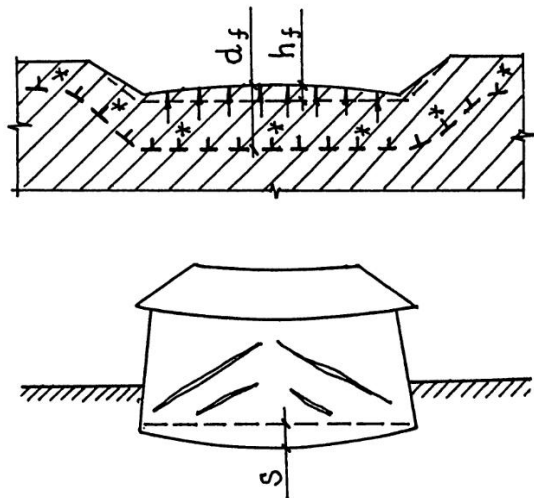


Рис. 4.2. Промерзание пучинистого грунта основания при производстве земляных работ и монтаже фундамента с последующей деформацией здания при оттаивании

Строительство, продолжающееся более года, приводит к тому, что в течение одного или нескольких зимних сезонов подвальные помещения остаются без отопления. Следствием этого является глубокое промерзание

основания и неравномерный подъем конструкций с раскрытием в них трещин (рис. 4.3, а).

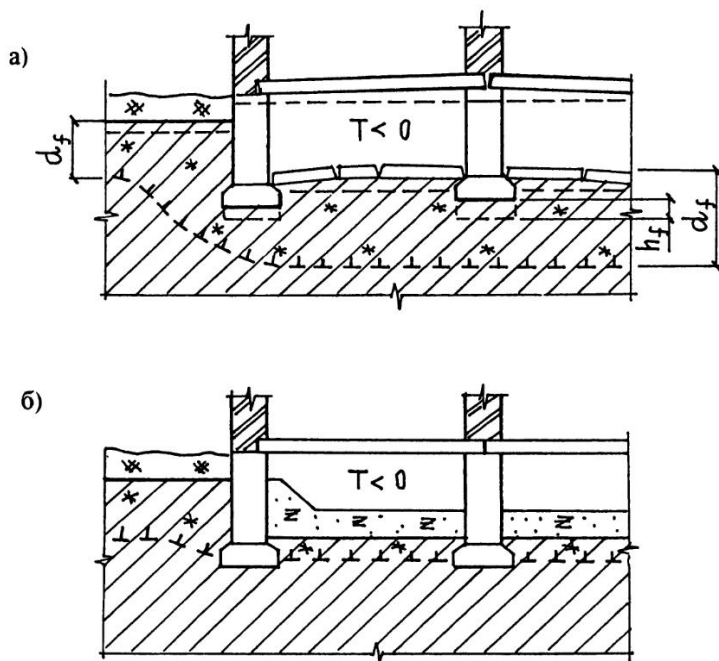


Рис. 4.3. Промерзание грунта под неотапливаемым подвалом: а - при отсутствии теплоизоляции; б - со слоем теплоизоляции

Для борьбы с промерзанием применяют временную теплоизоляцию: слой опилок, шлака, керамзитового гравия и т.п. Требуемое термическое сопротивление слоя ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$) находят по формуле [42, 43]

$$R = \frac{d_f^2 - d_{\text{н}}^2}{2d_{\text{н}}\lambda_f} - \frac{1}{\alpha_c}, \quad (4.1)$$

где $d_{\text{н}}$ – допустимая глубина промерзания грунта под теплоизоляцией, может приниматься как расстояние от пола подвала до подошвы фундамента, причем $d_{\text{н}} \neq 0$ (рис. 4.3, б), м;

λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

α_c – коэффициент теплоотдачи поверхности, $\alpha_c = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Зная величину R , находят толщину слоя

$$\delta_i = R\lambda_i, \quad (4.2)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности изоляционного материала (табл. 1.4).

Можно найти также толщину утеплителя, воспользовавшись формулами (2.13)–(2.16).

Для легких одно-, двухэтажных зданий представляют опасность касательные силы морозного пучения, возникающие при смерзании пучинистого грунта с боковой поверхностью фундамента (см. рис.3.2 и 4.4). Сила, направленная вверх и стремящаяся приподнять фундамент, вычисляется по формуле [40, 42, 43]

$$F_k = k_0 \tau_f A_f, \quad (4.3)$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий вид материала фундамента и состояние его поверхности (табл. 4.1);

τ_f – касательные напряжения, возникающие при пучении грунта (табл. 4.2);

A_f – площадь боковой поверхности фундамента в пределах слоя сезонного промерзания.

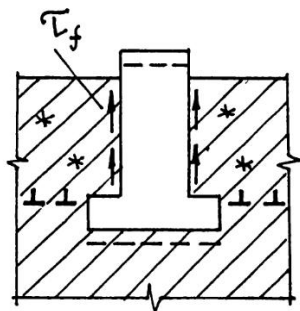


Рис. 4.4. Действие на фундамент касательных сил морозного пучения грунта

Таблица 4.1

Материал фундамента и состояние его поверхности	Коэффициент k_0
Бетон с гладкой поверхностью	1,0
Бетон с шероховатой поверхностью:	
выступы до 5 мм	1,1...1,2
выступы до 20 мм	1,25...1,5
Дерево с гладкой поверхностью	0,9
Металл	0,7

Грунт по степени пучинистости	Касательные напряжения τ_f , кПа, при d_f , м		
	$\leq 1,5$	2,5	$\geq 3,0$
Слабопучинистый	70	55	40
Среднепучинистый	90	70	55
Сильно- и чрезмернопучинистый	110	90	70

Касательные силы морозного пучения можно уменьшить следующими способами [1, 3, 4, 24, 43]:

- обмазкой боковой поверхности фундамента битумной мастикой, дегтем, полимерными смолами и другими пластичными несмерзающимися веществами;
- покрытием боковой поверхности фундамента полимерными пленками, рубероидом и другими рулонными материалами (рис. 4.5, а);

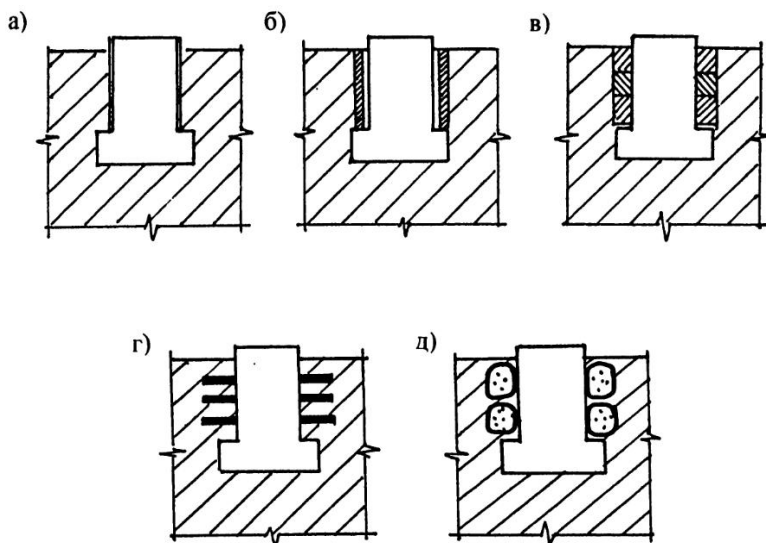


Рис. 4.5. Снижение касательных сил морозного пучения с помощью:
 а - полимерной пленки; б - жесткой подвижной оболочки; в - оболочки из колец; г - резиновых колец; д - сыпучего материала в водонепроницаемой оболочке

- устройством жестких подвижных оболочек вокруг фундамента (рис. 4.5, б); в частности, А.М. Пчелинцев и В.О. Орлов [5] предлагают использовать противопучинную оболочку из нескольких колец (рис. 4.5, в);
- снижением площади поперечного сечения фундаментов.

В.Ю.Петухов предложил использовать резиновые кольца, охватывающие опорный блок фундамента (рис. 4.5, з). Кольца препятствуют миграции влаги к фронту промерзания и частично компенсируют пучение за счет собственного сжатия [8].

Известно применение в качестве наружной противопучинной оболочки сухого песка, гравия или щебня [24]. Г.И. Соболев и Ю.Г. Чернышев для защиты от увлажнения и заиливания предложили заключать сыпучий материал в водонепроницаемую оболочку, например полиэтиленовую пленку (рис. 4.5, д) [2].

Касательные силы морозного пучения могут вызвать неравномерный подъем свайных фундаментов легких сооружений – небольших мостов, эстакад, навесов, крылец.

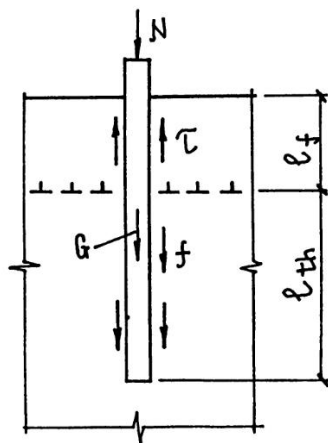


Рис. 4.6. К расчету подъема сваи под действием касательных сил морозного пучения

Условие подъема свай можно записать следующим образом [32, 43]:

$$F_k > N + G + T, \quad (4.4)$$

где N – внешняя нагрузка на сваю;

G – вес сваи;

T – сила трения грунта, действующая на боковой поверхности части сваи, расположенной в талом грунте.

Формулу (4.4) можно записать более подробно (рис. 4.6):

$$k_0 \tau_f u l_f > N + G + m_0 f u l_{th}, \quad (4.5)$$

где u – периметр поперечного сечения ствола сваи;

l_f, l_{th} – длина частей сваи, расположенных в мерзлом и талом грунте соответственно;

m_0 – коэффициент условий работы сваи, $m_0 = 0,6$ при $l < 4$ м, $m_0 = 0,8$ при $l \geq 4$ м;

f – сопротивление грунта на боковой поверхности сваи [50].

4.2. МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ

4.2.1. Фундаменты с промерзанием грунта под подошвой

Заложение подошвы фундамента в сезоннопромерзающем слое согласно рекомендациям, изложенным в пособии [40] к СНиП 2.02.01-83 [49], возможно в двух случаях:

- под подошвой залегают непучинистые грунты,
- специальными исследованиями и расчетами установлено, что деформации грунтов основания не нарушают эксплуатационную пригодность сооружения.

Второе направление детально рассмотрено в рекомендациях НИИОСП [42] и ПНИИИС [43].

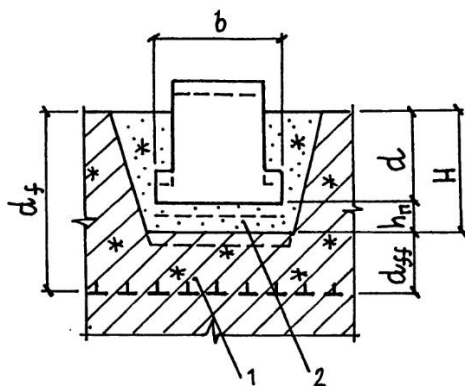


Рис. 4.7. Схема малозаглубленного фундамента: 1 – пучинистый грунт, 2 – подушка из непучинистого грунта

При проектировании таких фундаментов по результатам лабораторных или полевых исследований определяют подъем поверхности незагруженно-го массива грунта h_f , промерзающего на глубину d_f . Затем задавшись глубиной заложения подошвы фундамента d и толщиной подушки из непучинистого грунта h_n (рис.4.7),

последовательно находят:

- глубину залегания кровли пучинистого грунта $H = d + h_n$,
- глубину промерзания пучинистого грунта под подушкой $d_{\text{г}} = d_f - H$,
- относительную глубину промерзания пучинистого грунта $m_f = d_{\text{г}} / d_f$.

Если давление пучения p_n , создаваемое промерзающим грунтом, превышает давление под подошвой p , наблюдается подъем фундамента. Его вычисляют по формуле

$$h_{\text{г}} = h_f m_f^n \left(1 - \frac{\beta p}{p_n} \right), \quad (4.6)$$

где n - показатель степени, принимаемый равным 1,5 при строительстве на равнинных влажных участках, 1 - на избыточно увлажненных низинных участках,

β - коэффициент, учитывающий влияние подушки, для ленточных фундаментов с невысокими подушками ($h_n < 0,8 b$) можно принять $\beta = 1$

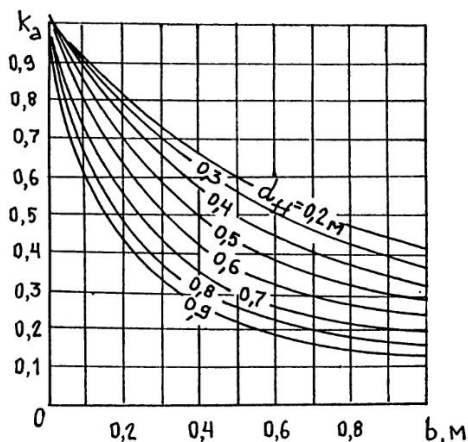
Для ленточных фундаментов

$$p_n = \frac{2k_a d_{\text{г}} \sigma_s}{b} \quad (4.7)$$

где k_a - коэффициент условий работы фундамента (рис.4.8);

σ_s - сопротивление смещению мерзлого грунта относительно фундамента.

Рис. 4.8. Значение коэффициента k_a для ленточного фундамента шириной b [42] (цифрами на графиках обозначена толщина слоя мерзлого грунта ниже подушки $d_f - H$)



Значение σ_s находят по графику как функцию температуры мерзлого грунта под подошвой T_f и скорости пучения v_h (рис. 4.9).

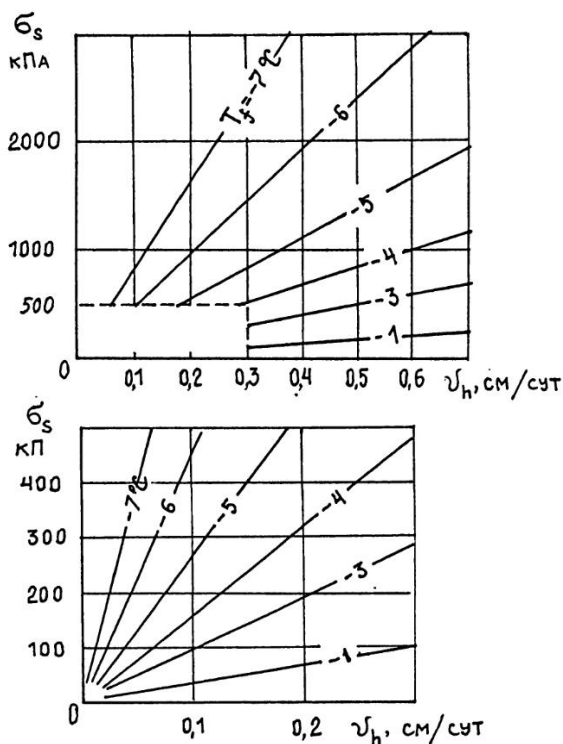


Рис. 4.9. Зависимость $\sigma_s = f(v_h, T_f)$

Нормы рекомендуют принимать $T_f = 0,5 T_{\min} m_f$, где $T_{\min}$ – средняя температура наиболее холодного месяца, m_f – относительная глубина промерзания.

Среднюю скорость пучения определяют из условия $v_h = h_f m_f^n / t_i$. Здесь t_i – продолжительность промерзания грунта под подушкой, которая зависит от продолжительности периода с температурой ниже нуля (t_w):

$$t_i = t_w \left[1 - \left(\frac{H}{d_f} \right)^2 \right]. \quad (4.8)$$

Проведя вычисления при различных значениях d , получают зависимость $h_{ff} = f(d)$ (рис.4.10).

Допустимую глубину заложения подошвы фундамента d_u находят из условия $h_{ff} = h_u$, где h_u – допустимый подъем фундамента. Значение h_u зависит от конструктивных особенностей проектируемого здания. Наиболее чувствительными считаются здания с панельными и кирпичными стенами, у которых $h_u = 25$ мм; при усилении кирпичной кладки железобетонными поясами и использовании монолитных ленточных фундаментов $h_u = 35$ мм.

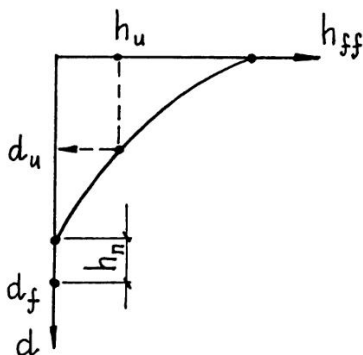


Рис. 4.10. Зависимость $h_{ff} = f(d)$

Наименьшая чувствительность свойственна деревянным зданиям, для которых $h_u = 50$ мм [42].

Необходимым условием рассмотренного прогноза деформаций являются тщательные лабораторные или полевые исследования грунтов основания. Причем, кроме деформаций пучения, следует оценить сжимаемость и прочность грунтов после оттаивания. Для обычных сооружений проведение таких испытаний чрезмерно дорого. Определенные трудности представляет собой и дренирование материала подушки. Трубы, расположенные на пучинистом грунте в слое сезонного промерзания, разрушаются достаточно быстро. Именно поэтому рассмотренный способ устройства фундаментов не находит широкого применения в практике строительства.

Указанных недостатков лишен фундамент с подушкой из непучинистого грунта, заглубленной ниже слоя сезонного промерзания (рис. 4.11). Определять деформации морозного пучения грунта основания, как и в нормальнозаглубленных фундаментах, здесь не требуется. Для защиты подушки от увлажнения можно использовать дренажные трубы, расположен-

ные ниже фронта промерзания, или изолирующую полиэтиленовую пленку, выстилающую дно выемки [7]. К сожалению, существующие пленки часто не обладают достаточной долговечностью.

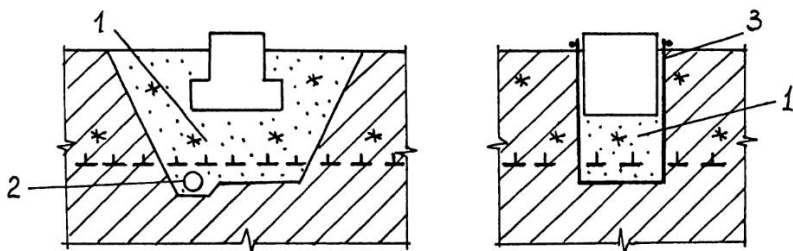


Рис. 4.11. Замена пучинистого грунта непучинистым на всю глубину сезонного промерзания: 1 - подушка из непучинистого грунта, 2 - дренажная труба, 3 - полиэтиленовая пленка

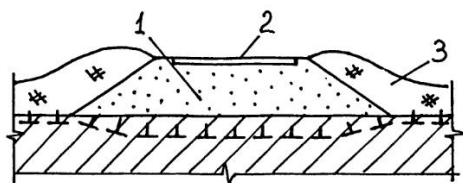


Рис. 4.12. Промерзание пучинистого грунта под насыпью автомобильной дороги: 1 - насыпь, 2 - покрытие дороги, 3 - снег

В транспортном строительстве промерзание пучинистого грунта под насыпями считается допустимым (рис.4.12). Максимальные деформации пучения составляют 30...120 мм в зависимости от вида покрытия или категории дороги [10, 80].

Особое внимание при проектировании дсрог должно уделяться обеспечению равномерности пучения вдоль и поперек трассы (см. раздел 3).

4.2.2. Фундаменты с обогревом грунта

Рассмотрим наиболее типичные для нашей страны конструкции фундаментов на естественном основании.

Кирпичные и панельные стены жилых и общественных зданий опираются обычно на ленточные фундаменты, собираемые из бетонных блоков заводского изготовления (рис. 4.13, а). Ширина подошвы определяется

расчетом и составляет 0,6...3,2 м, толщина стен – 0,3...0,6 м. В примыкающих подвалах и технических подпольях круглый год поддерживается температура выше нуля.

Колонны каркаса промышленных зданий устанавливаются в монолитные отдельные железобетонные фундаменты (рис. 4.13, б). Пол выполняется по бетонной подготовке толщиной 100...200 мм. Ниже поверхности грунта под панельной стеной располагается фундаментная балка.

Из-за отсутствия теплоизоляции мощный тепловой поток проникает в грунт через бетонные элементы фундаментов и полы, снижая глубину сезонного промерзания вокруг здания. СНиП 2.02.01-83[49] допускает заложение подошвы фундамента на глубину $d = k_h d_f$. Понижающий коэффициент k_h изменяется от 0,4 до 0,9, он зависит от температуры воздуха в примыкающих помещениях T_{in} и ширины фундамента (рис. 4.13).

Заметим, что способ уменьшения глубины заложения фундаментов на 0,5...1 м с последующим обогревом прилегающего грунта в течение всего срока эксплуатации здания нельзя признать рациональным. Особенно очевидным это стало в последние годы из-за резкого роста цен на топливо. В 1995 году было опубликовано специальное постановление Минстроя России, направленное на сокращение потерь тепла в зданиях. Вместо однородных массивных стен из кирпича или легкого бетона должны возводиться многослойные конструкции с эффективными утеплителями и воздушными прослойками. Повышение термического сопротивления полов и стен подвалов приведет к сокращению потоков тепла в грунт и, следовательно, к увеличению глубины заложения фундаментов.

Уменьшать глубину сезонного промерзания следует не за счет искусственного обогрева грунта, а путем сохранения тепловой энергии, накопленной основанием в теплое время года. Напомним, что речь идет о районах, где индекс оттаивания больше индекса промерзания: $U > F$. Это направление в фундаментаостроении будет рассмотрено в следующем

подразделе. Здесь же в качестве дополнения дадим описание нескольких устройств для искусственного обогрева грунта. Все они существуют только в качестве оригинальных конструктивных разработок или опытных образцов. Широкому внедрению препятствует высокая стоимость их изготовления или эксплуатации.

По мнению А.А. Коновалова [9], с помощью вертикальной «тепловой трубы» можно транспортировать тепловую энергию к поверхности из глубоко расположенных горизонтов. Теплоперенос происходит за счет циркуляции внутри трубы парожидкостного хладагента или незамерзающей жидкости (рис. 4.14).

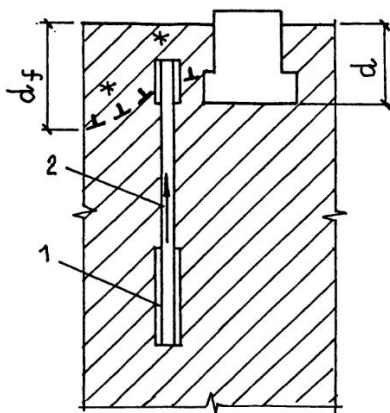


Рис. 4.14. Использование «тепловой трубы» для обогрева грунта: 1 - «тепловая труба», 2 - направление транспортировки тепловой энергии [9]

Для обогрева грунта теплый воздух от калорифера или из системы вытяжной вентиляции может продуваться через горизонтальные полости внутри ленточного фундамента (рис. 4.15). Кроме того, воздух внутри полостей играет роль теплоизоляции, мешая передаче тепла через тело фундамента [6].

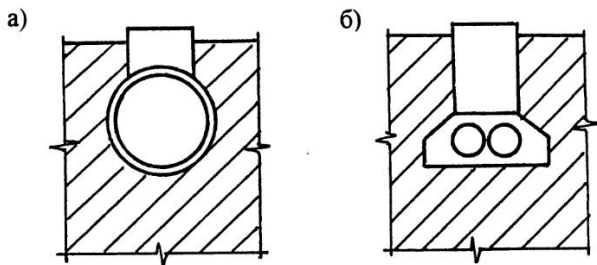


Рис.4.15. Обогрев грунта через горизонтальные полости в теле фундамента: а - блок в виде трубы [6], б - стандартный блок с отверстиями

Идея периодического обогрева грунта реализована и в устройстве (рис. 4.16) с греющим электрическим кабелем, размещенным на уровне подошвы [78].

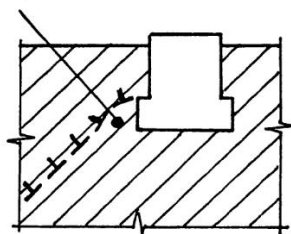


Рис.4.16. Периодический обогрев грунта греющим кабелем

Ток через кабель пропускается только при охлаждении окружающего грунта до значения температуры 0°C . Рациональной считается такая глубина заложения подошвы, при которой греющий кабель включается только в самые суровые зимы – один раз в 5–10 лет.

4.2.3. Фундаменты с теплоизоляцией

Как отмечалось в предыдущем параграфе, самым простым способом защиты пучинистого грунта от промерзания является сохранение тепловой энергии, накопленной основанием. Этой цели служит горизонтальная теплоизоляция, укладываемая рядом с фундаментом в отапливаемых зданиях – по наружному периметру стен, в неотапливаемых – с двух сторон фундамента.

В российских нормативных документах рекомендуется размещать слой теплоизоляции на поверхности грунта (рис. 4.17) [43]. Сверху его закрывают рулонным гидроизоляционным материалом или пропитывают органическими вяжущими веществами – битумом, дегтем и т.п.

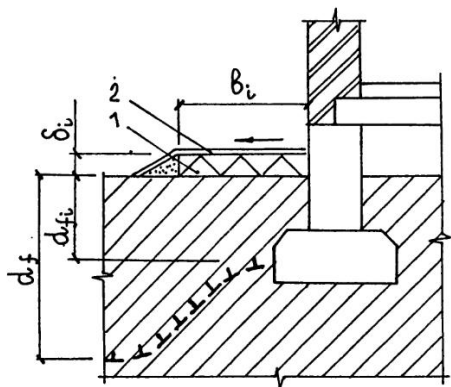


Рис. 4.17. Размещение горизонтальной теплоизоляции на поверхности грунта [43]: 1 - теплоизоляция, 2 - гидроизоляционный материал

В подразделах 2.2 и 4.1 дано решение одномерной задачи промерзания грунта под слоем теплоизоляции, имеющей неограниченные размеры в плане. Решение двухмерной задачи для слоя шириной b_i выглядит следующим образом [43]:

$$d_{fi} = d_f - \left(\frac{b_i}{d_f} \right) \left(d_f - \sqrt{d_f^2 + S_c^2} + S_c \right), \quad (4.9)$$

где S_c – толщина эквивалентного слоя грунта.

Значение S_c находят по формуле

$$S_c = \lambda_r \left(\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (4.10)$$

где λ_r, λ_i – коэффициенты теплопроводности мерзлого грунта и теплоизоляционного материала;

δ_i – толщина теплоизоляции;

α_c – коэффициент теплоотдачи поверхности (см. формулу (4.1)).

Ширину изоляционного слоя рекомендуется принимать не более величины d_f .

Теплоизоляция на поверхности грунта находится в очень неблагоприятных условиях. За счет резких перепадов температуры, механических воздействий и морозного пучения подстилающего грунта гидроизоляционное покрытие на ней быстро разрушается. После чего потоки воды со стен и кровли увлажняют теплоизоляционный материал, а рост влажности, как известно (см. подраздел 1.3.1), приводит к повышению теплопроводности. Следствием этого является промерзание грунта под подошвой фундамента.

Огромный опыт по устройству малозаглубленных фундаментов с теплоизоляцией накоплен в Северной Европе, имеющей схожие с северо-западными районами нашей страны климатические и инженерно-геологические условия. Первые рекомендации по проектированию таких фундаментов были изданы в Норвегии в 1976 году [64]. Они явились результатом

дорогостоящих исследований, проведенных группой молодых ученых в рамках специальной государственной программы. Несколько лет спустя подобные публикации появились в Швеции и Финляндии [74, 80, 85].

Рассмотрим конструкцию нескольких типичных фундаментов.

Монолитный ленточный фундамент финского двухэтажного жилого дома показан на рис. 4.18. Здание имеет деревянный каркас, наружные стены с внешней стороны облицованы кирпичом, с внутренней – гипсовыми плитами. Для теплоизоляции стен использована минеральная вата, пола первого этажа и фундамента – плиты пенополистирола толщиной 50 мм. Пол, в частности, утеплен тремя слоями пенополистирола, внутренняя вертикальная грань фундамента – одним слоем. Глубина заложения подошвы фундамента принята 0,50 м. Грунт основания защищен от промерзания двумя слоями пенополистирола, уложенными на глубине 0,2 м по наружному периметру здания. Ширина изоляции 1 м. Для защиты от инфилирующей сверху воды теплоизоляция покрыта полиэтиленовой пленкой.

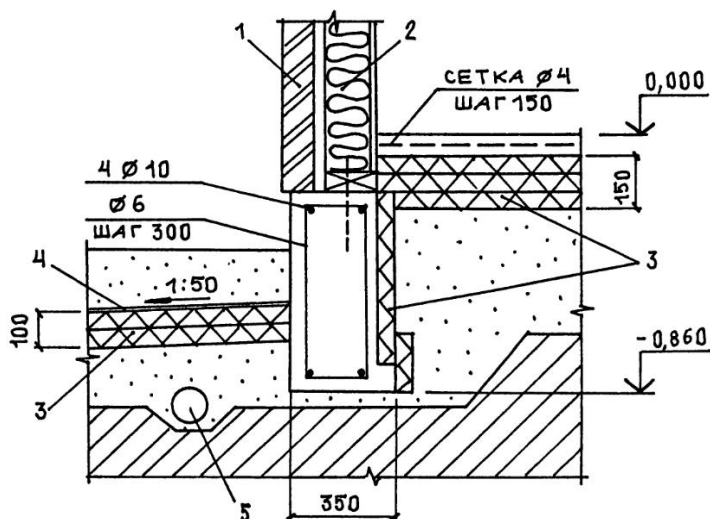


Рис. 4.18. Монолитный фундамент двухэтажного жилого дома (Финляндия): 1 - кирпичная облицовка, 2 - минеральная вата, 3 - пенополистирол, 4 - полиэтиленовая пленка, 5 - дренажная труба

Слой гравия или крупного песка предотвращает увлажнение пенополистирола снизу. Отвод воды из этого слоя осуществляется по пластмассовой дренажной трубе.

Рядом с тем же жилым домом имеется несколько колонн, служащих опорой эркеров и навесов. Они установлены на отдельные фундаменты с размерами подошвы $0,6 \times 0,6$ м и глубиной заложения $0,75$ м (рис. 4.19). Горизонтальная теплоизоляция выполнена из трех слоев пенополистирола, покрытых полиэтиленовой пленкой. Под подошвой размещен слой прочного прессованного пенополистирола, прерывающий потоки тепла из основания через бетонное тело фундамента.

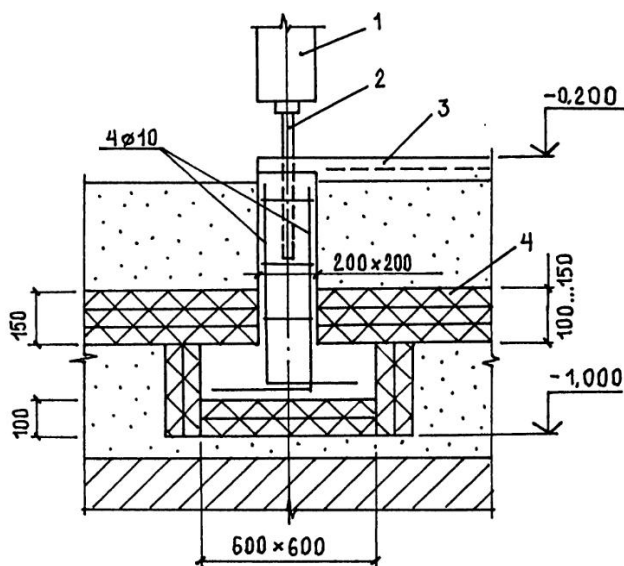


Рис. 4.19. Фундамент отдельно стоящей колонны (Финляндия):
1 - колонна, 2 - анкерный болт, 3 - бетонное покрытие, 4 - пенополистирол

Фундамент норвежского жилого дома с деревянным каркасом собран из бетонных блоков шириной $0,25$ м и заложен на глубину всего лишь

0,3 м (рис. 4.20) [64]. Он опирается на бетонную подготовку и гравийную подушку, их общая толщина 0,10 м. Один слой пенополистирола защищает грунт основания от промерзания. Ниша в верхнем блоке предназначена для закладки продольной арматуры после монтажа фундамента.

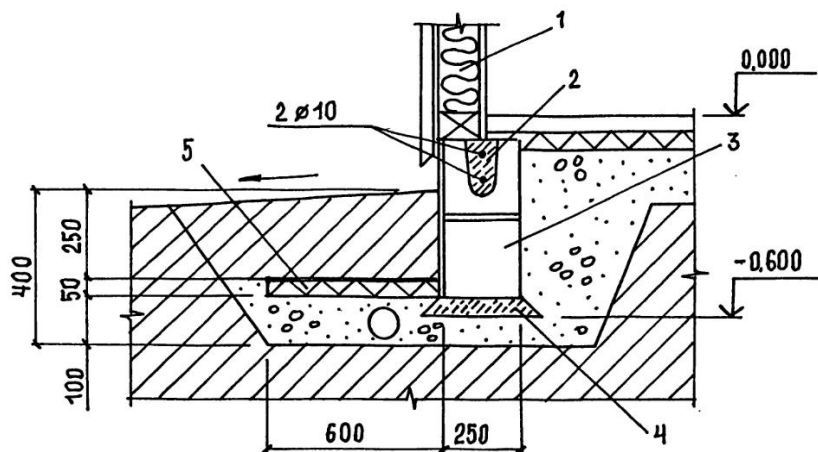


Рис. 4.20. Фундамент каркасного жилого дома (Норвегия) [64]: 1 - стена, 2 - ниша для закладки арматуры, 3 - бетонный блок, 4 - бетонная подготовка, 5 - пенополистирол

Возможные варианты устройства теплоизоляции фундаментов показаны на рис. 4.21 [78, 85].

Вертикальная изоляция, расположенная на задней грани ленточного фундамента, снижает теплопотери здания, но не оказывает влияния на поток тепла из основания к поверхности через тело фундамента (рис. 4.21, а).

Изоляция, размещенная внутри фундамента (рис. 4.21, б), существенно сокращает размеры бетонного «мостика холода». Для ее устройства плиты пенополистирола нанизывают на арматурные стержни и закрепляют в проектном положении внутри опалубки перед подачей бетонной смеси. Небольшие наклонные отверстия, выходящие на переднюю грань фундамента, служат для отвода конденсата.

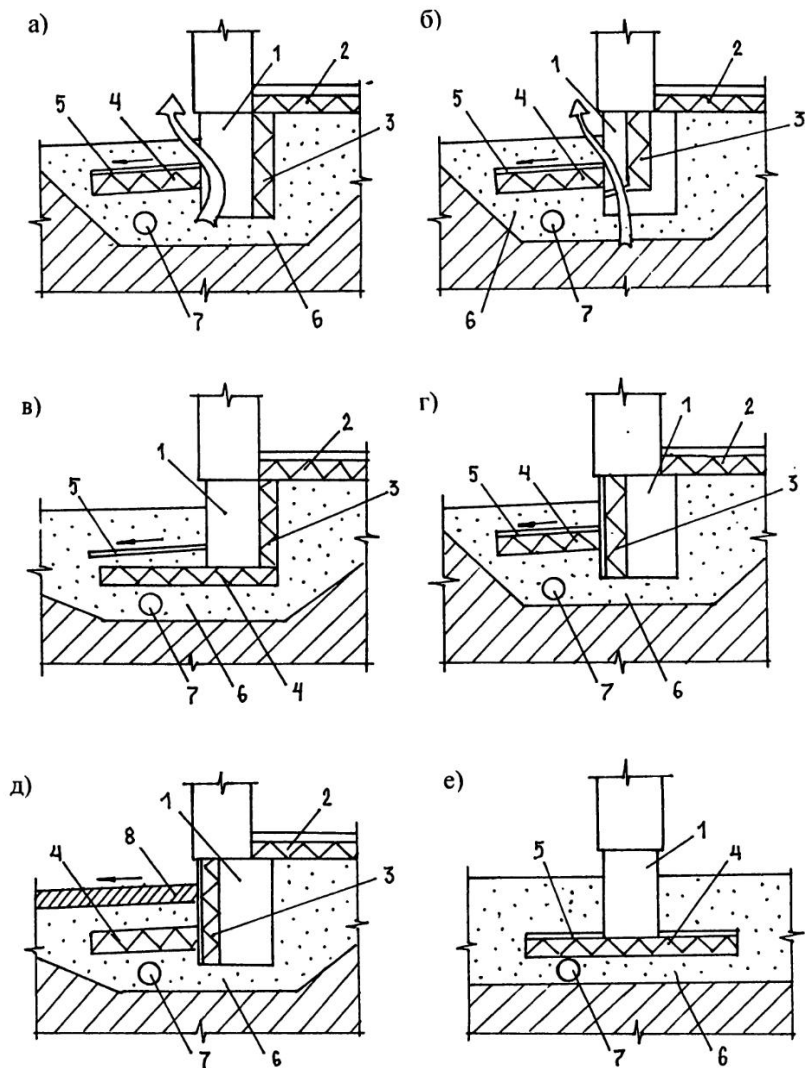


Рис. 4.21. Варианты устройства фундаментов с теплоизоляцией [78,85]: а-д - для отапливаемых сооружений, е - для неотапливаемых сооружений (1 - бетонный фундамент, 2 - теплоизоляция пола, 3 - вертикальная теплоизоляция, 4 - горизонтальная теплоизоляция, 5 - гидроизоляция, 6 - дренирующий грунт, 7 - дренажная труба, 8 - асфальтобетонное покрытие; стрелкой показано направление теплового потока из основания)

При наличии прочного пенополистирола и небольших нагрузках на основание горизонтальную теплоизоляцию заводят под подошву фундамента (рис. 4.21, в). Это решение является предпочтительным для отдельно стоящих фундаментов или фундаментов неотапливаемых зданий (рис. 4.21, е). Хорошее уплотнение дренирующего материала под слоем теплоизоляции является одним из условий надежной эксплуатации таких конструкций.

Наиболее правильным с точки зрения строительной теплофизики является размещение вертикальной теплоизоляции на внешней стороне ленточного фундамента (рис. 4.21, г, д). Утеплитель в этом случае защищается от механических и атмосферных воздействий, грунтовой влаги и касательных сил морозного пучения прочным листовым материалом или слоем штукатурки на сетке.

В качестве горизонтальной теплоизоляции чаще всего применяют пенополистирол или керамзитовый гравий. Возможно использование различных отходов промышленности, например шлака или гидролизного лигнина [28]. В Японии предложено обратную засыпку фундаментов выполнять грунтом, смешанным с гранулами пенополистирола.

Для защиты от инфильтрующейся сверху воды теплоизоляцию покрывают полиэтиленовой пленкой или асбестоцементными листами, изолирующие слои укладывают с небольшим уклоном от здания. Асфальтобетонное покрытие тротуаров и проездов, примыкающих к зданию, позволяет обойтись без гидроизоляции (рис. 4.21, д).

Следует заметить, что проектирование рассматриваемых фундаментов значительно проще, чем проектирование фундаментов с промерзанием грунта под подошвой (см. подраздел 4.2.1). Здесь можно ограничиться лишь оценкой степени пучинистости на I или II уровне – по гранулометрическому составу и показателям пластичности. Трудоемких детальных исследований деформаций морозного пучения при различной внешней на-

грузке не требуется, так как промерзание пучинистых грунтов в основании вообще не допускается. Дополнительно к стандартным деформационно-прочностным характеристикам грунтов следует определить теплофизические свойства: λ , c , q (см. подраздел 1.3).

Расчет теплоизоляции выполняют обычно на ЭВМ с помощью специальных программ (раздел 2.2). Изоляция считается достаточной, если при самых неблагоприятных климатических условиях фронт промерзания, практически совпадающий с нулевой изотермой, располагается выше подошвы фундамента.

В качестве примера приведем результаты вычислений по программе TEMP/W для ленточного фундамента, показанного на рис. 4.22. Термическое сопротивление горизонтальной изоляции (R_h) и изоляции, расположенной под бетонной плитой пола первого этажа, (R_{ff}) было принято равным δ_i / λ_i ($2,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$). Это соответствует слою пенополистирола толщиной 10 см. Вертикальная изо-

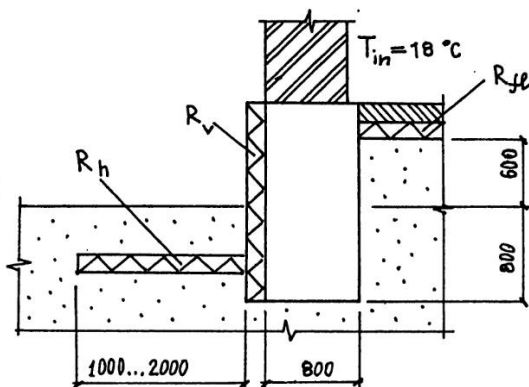


Рис. 4.22. Расчетная схема фундамента

на внешней стороне фундамента была в два раза тоньше, ее термическое сопротивление R_v составило $1,25 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Коэффициенты теплопроводности грунта: $\lambda_{ch} = 1,51 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ при $T = 10^\circ\text{C}$; $\lambda_f = 1,68 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ при $T = -10^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость: $\lambda_{ch} = 2,8 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $\lambda_f = 2,0 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. Суммарная влажность грунта 0,25; содержание незамерзшей влаги: $W_w = 0,07$ при $T = -1^\circ\text{C}$, $W_w = 0,05$ при $T = -10^\circ\text{C}$. Мощность слоя годовых колебаний температуры 7 м. Снежный покров отсутствует. Температура поверхности

грунта принималась равной температуре воздуха в Архангельске в обычную и экстремально холодную зимы (см. рис.2.7). Индексы промерзания составили соответственно $F_2 = \bar{F} = 34\,000\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$ и $F_{100} = 63\,000\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$.

Из рис. 4.23 видно, что нулевая изотерма не достигла подошвы фундамента как в обычную, так и экстремально холодную зимы.

При отсутствии в грунте горизонтальной изоляции фронт промерзания опустился ниже подошвы фундамента (рис. 4.24).

В наиболее типичных случаях требуемое термическое сопротивление горизонтальной теплоизоляции R_h можно найти с помощью графиков, приводимых в финской нормативной и справочной литературе [80, 85]. Графики построены по результатам расчетов, выполненных на ЭВМ на основании следующих исходных данных:

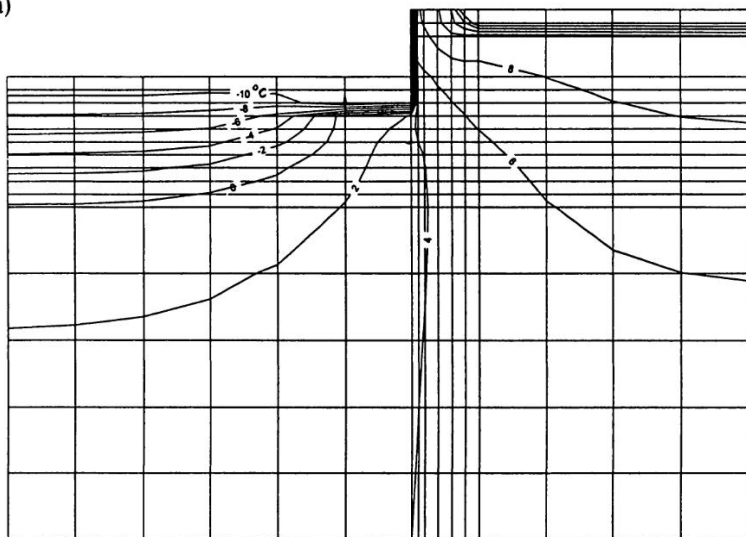
- температура воздуха внутри здания не менее $17\text{ }^\circ\text{C}$,
- ширина здания не менее 4 м,
- поверхность грунта свободна от снега,
- термическое сопротивление вертикальной изоляции R_v не менее $1\text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт}$,
- ширина горизонтальной изоляции 0,8 ... 1 м.

Значение R_h определяют как функцию индекса промерзания (обычно F_{50}) и глубины заложения подошвы фундамента d .

На рис. 4.25 приведены кривые термического сопротивления горизонтальной теплоизоляции для фундаментов зданий с проветриваемым подпольем. Графики можно использовать, если термическое сопротивление перекрытия равно $4,5\text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$, а температура в подполье не опускается ниже нуля.

Графики на рис. 4.26 предназначены для расчетов при проектировании зданий с полами по грунту, у которых термическое сопротивление конструкции пола равно $2,6\text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$.

a)



б)

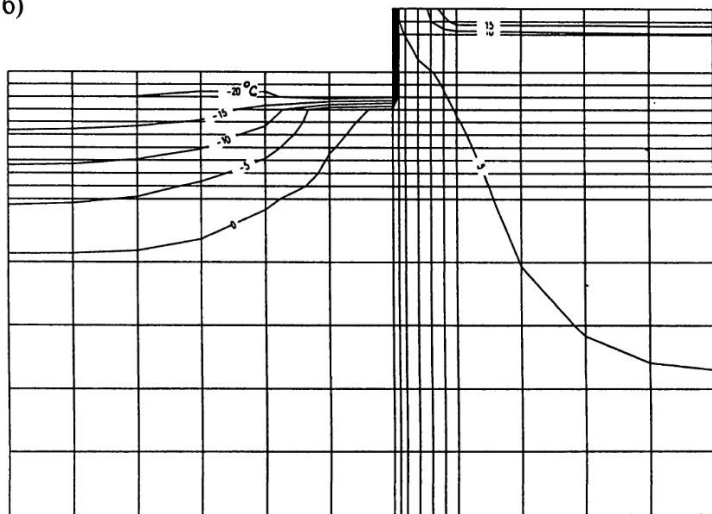
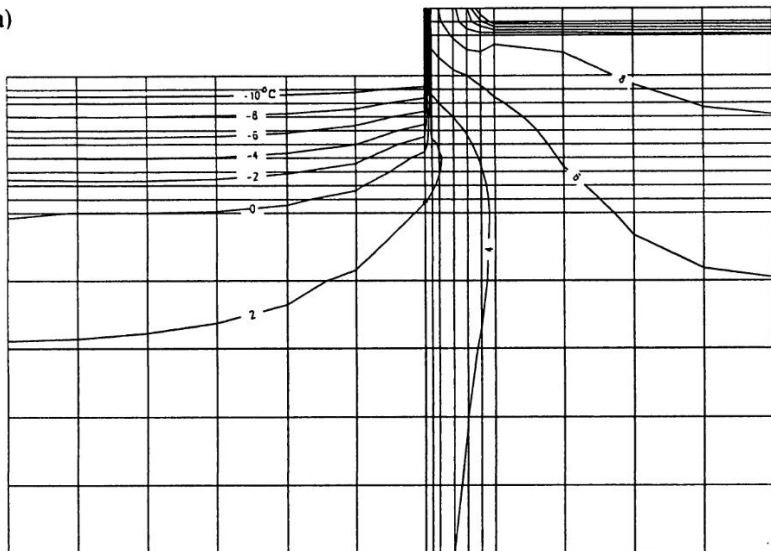


Рис. 4.23. Результаты расчета температуры грунта по программе TEMP/W для фундамента с горизонтальной и вертикальной теплоизоляцией: *а* - в конце обычной зимы; *б* - в конце экстремально холодной зимы в Архангельске

а)



б)

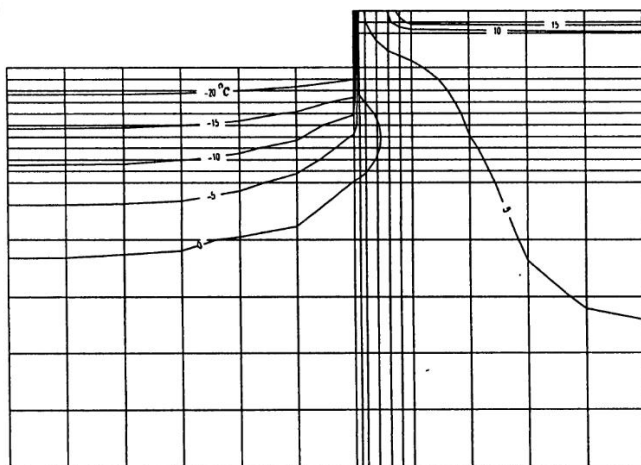


Рис. 4.24. Результаты расчета температуры грунта по программе TEMP/W для фундамента без горизонтальной теплоизоляции: а - в конце обычной зимы; б - в конце экстремально холодной зимы в Архангельске

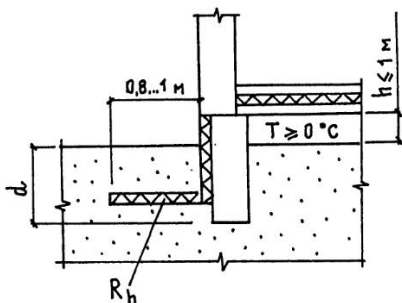
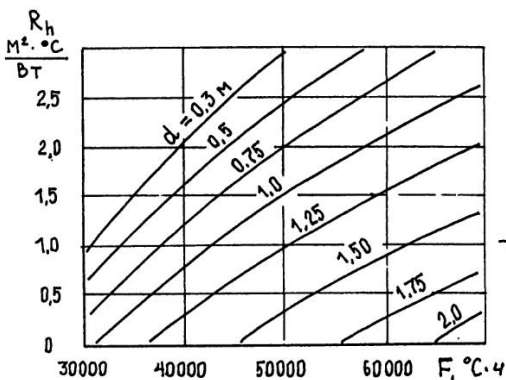


Рис. 4.25. К определению термического сопротивления горизонтальной теплоизоляции у зданий с подпольем [80, 85]

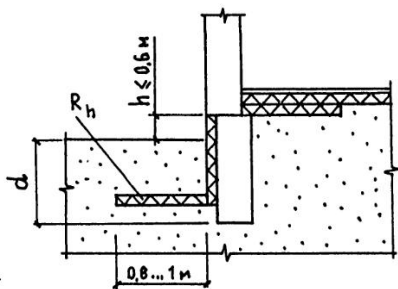
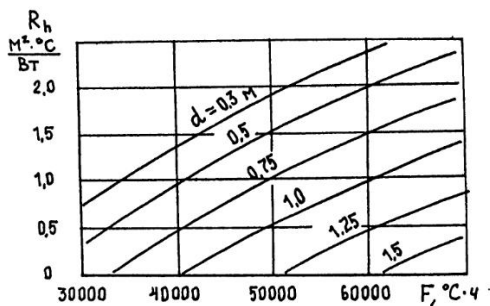


Рис. 4.26. К определению термического сопротивления горизонтальной теплоизоляции у зданий с полами по грунту [80, 85]

Толщину слоя изоляции находят по формуле $\delta_i = R_h \lambda_i$.

Используя в расчетах при проектировании фундаментов приведенные графики, следует выполнять ряд условий:

- из-за больших теплопотерь в углах здания толщину δ_i увеличивать на 40 % (рис. 4.27, а),
- у фундамента с выступающими частями горизонтальную изоляцию укладывать на ширину 0,8...1 м от их внешнего контура (рис. 4.27, б),
- при размещении вертикальной изоляции внутри фундамента или на его задней грани ширину горизонтальной изоляции увеличивать до 1,2...1,5 м (рис. 4.27, в).

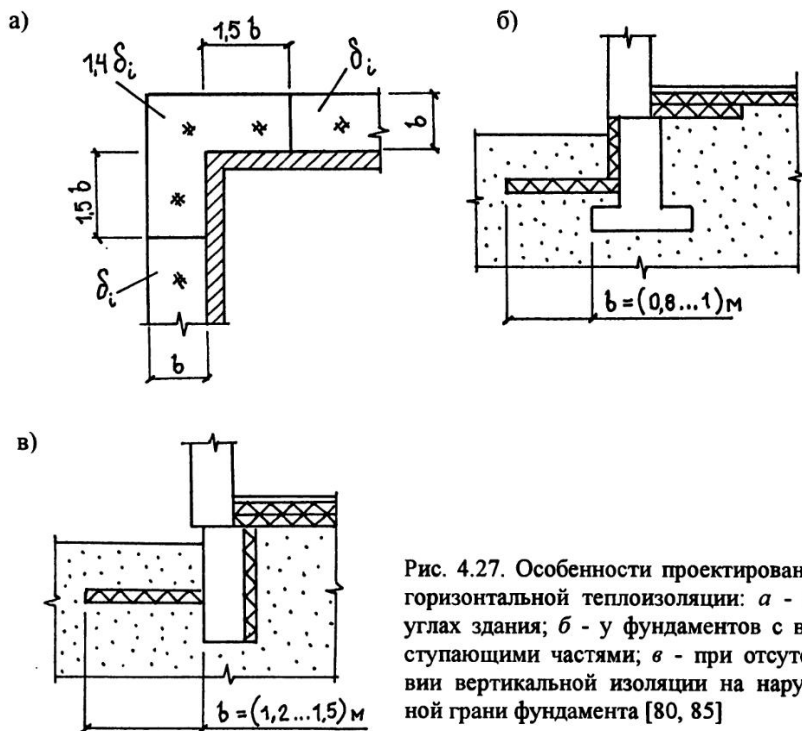


Рис. 4.27. Особенности проектирования горизонтальной теплоизоляции: а - на углах здания; б - у фундаментов с выступающими частями; в - при отсутствии вертикальной изоляции на наружной грани фундамента [80, 85]

На рис. 4.28 в качестве примера показано возведение фундамента жилого дома по технологии финской фирмы "Isora". Плиты из пенополистирола, кроме основной функции, исполняют роль опалубки при бетонировании фундамента.



Рис. 4.28. Использование плит пенополистирола в качестве опалубки фундамента (технология компании "Isora")

Схемы фундаментов неотапливаемых сооружений показаны на рис. 4.29. Термическое сопротивление изоляции определяется как функция индекса промерзания F , среднегодовой температуры T_m и толщины подушки из непучинистого грунта (рис. 4.30). Ширина изоляции находится по графикам, представленным на рис. 4.31.

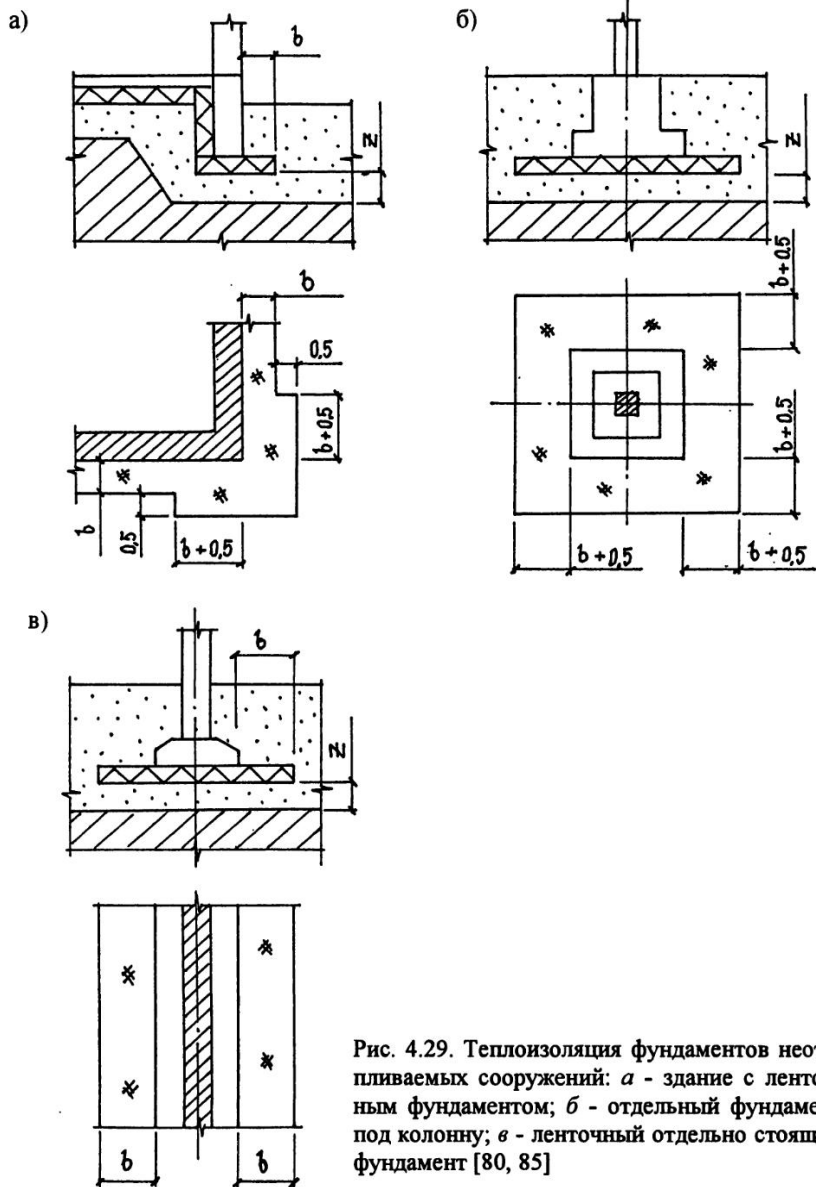


Рис. 4.29. Теплоизоляция фундаментов неотапливаемых сооружений: а - здание с ленточным фундаментом; б - отдельный фундамент под колонну; в - ленточный отдельно стоящий фундамент [80, 85]

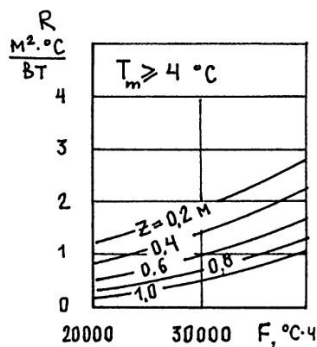
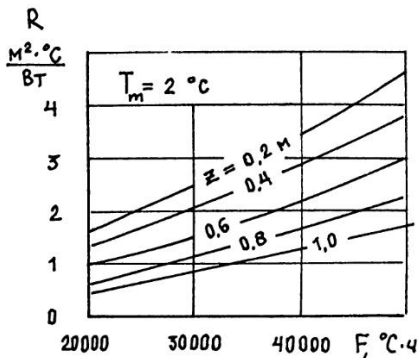
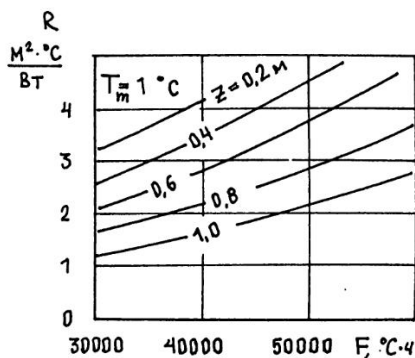


Рис. 4.30. Термическое сопротивление изоляции у неотапливаемых сооружений [80, 85]

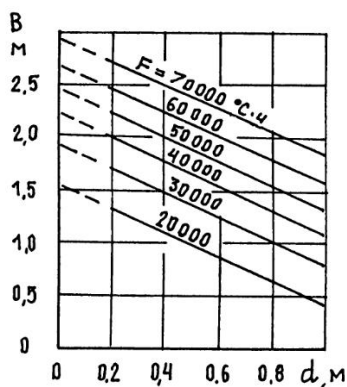


Рис. 4.31. Ширина изоляции у неотапливаемых сооружений [80, 85]

В прил. 2 даны примеры характерных ошибок, допускаемых при устройстве фундаментов с теплоизоляцией, и методы их устранения, рекомендуемые финскими строительными нормами [80].

При проектировании фундаментов следует иметь в виду, что давление под их подошвой не должно превышать расчетного сопротивления грунта основания. Методика соответствующей проверки изложена в прил. 3.

4.3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 4.1. Для защиты основания строящегося здания от промерзания решено использовать временную теплоизоляцию из керамзитового гравия. Коэффициент теплопроводности гравия $0,20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, грунта в мерзлом состоянии $1,70 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$. Нормативная глубина сезонного промерзания $1,6 \text{ м}$, глубина заложения подошвы фундамента от пола подвала $0,5 \text{ м}$.

Найдите требуемую толщину слоя керамзитового гравия.

Решение. Допустимую глубину промерзания грунта под теплоизоляцией примем равной глубине заложения подошвы фундамента, т.е. $d_{\text{п}} = 0,5 \text{ м}$. По формулам (4.1) и (4.2) найдем требуемое термическое сопротивление и толщину слоя керамзитового гравия:

$$R = (1,6^2 - 0,5^2) / (2 \cdot 0,5 \cdot 1,70) - 1 / 23 = 1,32 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт};$$

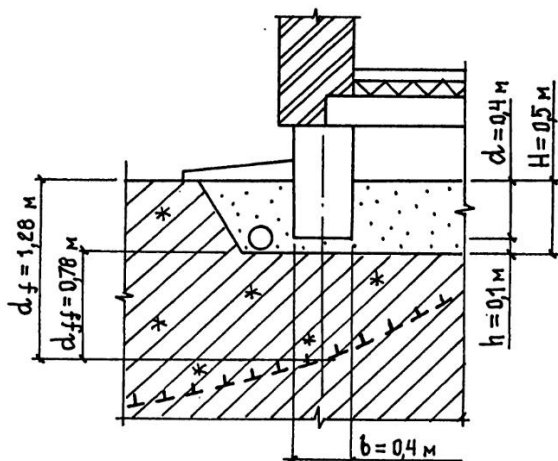
$$\delta_i = 1,32 \cdot 0,20 = 0,26 \text{ м}.$$

Задача 4.2. В Архангельске на избыточно увлажненном низинном участке проектируется малоэтажное здание с утепленным цокольным перекрытием. Температура внутри здания 15 °C . Фундамент ленточный шириной $0,4 \text{ м}$. Глубина заложения $0,4 \text{ м}$, давление под подошвой 40 кПа (рис. 4.32, а). Под фундаментом устроена подушка из непучинистого грунта толщиной $0,1 \text{ м}$, ниже залегает сильнопучинистый суглинок с относительной деформацией морозного пучения $0,081$.

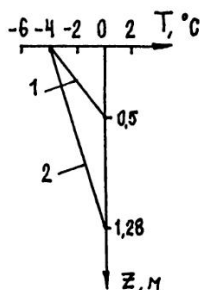
Определите возможный подъем фундамента при промерзании грунта основания.

Решение. Продолжительность зимы t_w в Архангельске составляет 179 суток, самым холодным месяцем является январь, его средняя температура $T_{\min}$ равна $-12,5^\circ\text{C}$ (см. подраздел 2.1).

а)



б)



в)

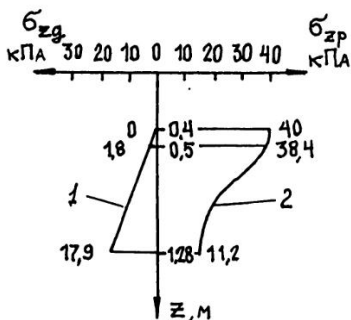


Рис. 4.32. К задачам 4.2 и 4.3: а - схема к расчету промерзания грунта основания; б - температура грунта на различной глубине; в - распределение напряжений в основании

С учетом теплового влияния здания глубина промерзания грунта (см. подразделы 2.2 и 4.2.2)

$$d_f = 0,8 \cdot 1,6 = 1,28 \text{ м.}$$

Суглинок залегает от поверхности на глубине

$$H = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ м.}$$

Глубина его промерзания

$$d_{ff} = 1,28 - 0,5 = 0,78 \text{ м.}$$

Относительная глубина

$$m_f = 0,78 / 1,28 = 0,61.$$

Подъем свободной поверхности суглинка при промерзании

$$h_f = \epsilon_{fh} d_f = 0,081 \cdot 1,28 = 0,104 \text{ м.}$$

Температура грунта под подушкой

$$T_f = 0,5 \cdot (-12,5) \cdot 0,61 = -3,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Продолжительность промерзания суглинка

$$t_c = 179 \cdot [1 - (0,5 / 1,28)^2] = 152 \text{ сут.}$$

Средняя скорость пучения

$$v_h = 0,104 \cdot 0,61^1 / 152 = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/сут} = 0,042 \text{ см/сут.}$$

При $T_f = -3,8 \text{ }^\circ\text{C}$ и $v_h = 0,042 \text{ см/сут}$ по рис.4.9 находим $\sigma_s = 60 \text{ кПа.}$

Коэффициент условий работы $k_a = 0,3$ (рис. 4.10).

Давление пучения $p_{fh} = 2 \cdot 0,3 \cdot 0,78 \cdot 60 / 0,4 = 70 \text{ кПа.}$

Подъем фундамента

$$h_{ff} = 0,104 \cdot 0,61^1 (1 - 1 \cdot 40 / 70) = 0,027 \text{ м} = 27 \text{ мм.}$$

Задача 4.3. Здание имеет ленточный фундамент с глубиной заложения 0,4 м и давлением под подошвой 40 кПа (рис. 4.32, а). Под фундаментом устроена подушка из непучинистого грунта толщиной 0,1 м. Ниже залегает суглинок со следующими свойствами: $\rho = 2,07 \text{ г/см}^3$; $W = 0,22$; $W_L = 0,30$; $W_p = 0,19$; $SP_0 = 1,40 \text{ мм}^2/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$. Гранулометрический состав суглинка дан в табл.1.5.

Место строительства – Архангельск. Температура внутри здания 15°C , пол первого этажа устроен по утепленному цокольному перекрытию.

Определите возможный подъем фундамента при промерзании грунта основания.

Решение. Из решения предыдущей задачи воспользуемся следующими результатами: $d_f = 1,28$ м, $H = 0,5$ м, $d_{\text{гр}} = 0,78$ м, $t_w = 179$ сут, $t_c = 152$ сут.

Среднезимняя температура воздуха в Архангельске $T_w = -8^{\circ}\text{C}$ (см. подраздел 2.1), с учетом коэффициента $n_f = 0,5$ (табл.2.4) средняя температура поверхности грунта за зиму $\bar{T}_1 = -4^{\circ}\text{C}$.

Обратимся к графикам изменения температуры грунта по глубине (рис. 4.32, б). Первый график соответствует расположению фронта промерзания на кровле суглинка (глубина 0,5 м), второй – максимальной глубине промерзания (1,28 м). Градиенты температуры в рассматриваемых двух случаях составляют:

$$\text{grad } T' = [0 - (-4)] / 500 = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/мм};$$

$$\text{grad } T'' = [0 - (-4)] / 1280 = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/мм}.$$

$$\text{Среднее значение grad } T = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/мм}.$$

Средняя температура суглинка в конце зимы (по графику 2):

$$T_{\text{мс}} = (0 - 2,4) / 2 = -1,2^{\circ}\text{C}.$$

Содержание незамерзшей влаги при этой температуре по формуле (1.3):

$$W_w = 0,58 \cdot 0,19 = 0,11.$$

Вертикальные сжимающие напряжения на глубине 0,5 и 1,28 м:

а) от собственного веса грунта (кривая 1 на рис. 4.32, в):

$$\sigma_{zg}' = \gamma_1 h_1 = 18 \cdot 0,1 = 1,8 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{zg}'' = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 = 18 \cdot 0,1 + 20,7 \cdot 0,78 = 17,9 \text{ кПа},$$

где $\gamma_1 = 18 \text{ кН/м}^3$, $\gamma_2 = 20,7 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес грунта подушки и суглинка соответственно;

б) от нагрузки на фундамент (кривая 2 на рис. 4.32, в):

$$\sigma_{zp}' = \alpha p = 0,96 \cdot 40 = 38,4 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{zp}'' = \alpha p = 0,28 \cdot 40 = 11,2 \text{ кПа},$$

где α – коэффициент, учитывающий распределение напряжений в основании [49];

в) суммарные

$$\sigma_z' = 1,8 + 38,4 = 40,2 \text{ кПа},$$

$$\sigma_z'' = 17,9 + 11,2 = 29,1 \text{ кПа}.$$

Среднее значение напряжений в промерзающем слое суглинка

$$\sigma_z = (40,2 + 29,1) / 2 = 34,7 \text{ кПа} = 0,035 \text{ МПа}.$$

Массовая доля частиц размером d менее 0,002 мм в суглинке составляет 18,1 % (табл.1.6). С учетом этого по графику, представленному на рис. 3.23, находим значение константы a , равное $8,5 \text{ МПа}^{-1}$, и сегрегационный потенциал по формуле (3.11):

$$SP = 1,40 \cdot \exp(-8,5 \cdot 0,035) = 1,04 \text{ мм}^2/(\text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Плотность грунта в сухом состоянии

$$\rho_d = 2,07 / (1 + 0,22) = 1,70 \text{ г/см}^3.$$

По формуле (3.12) находим деформацию пучения суглинка (подъем фундамента):

$$\begin{aligned} h_{\text{п}} &= 0,09 \cdot (0,22 - 0,11) \cdot 1,70 \cdot 780 / 1,00 + 1,09 \cdot 1,04 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} (152 \cdot 24) = \\ &= 13,1 + 23,2 = 36,3 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Заметим, что расчет пучения выполнен для нормативной глубины промерзания.

За рубежом чаще всего используют формулу Berggren и индексы промерзания F_{50} или F_{100} . Из решения задачи 2.2 видно, что значение d_f в этом случае получается значительно больше.

Задача 4.4. Для защиты от промерзания пучинистого грунта, залегающего в основании проектируемого малоэтажного жилого дома в Архан-

гельске, решено применить горизонтальную теплоизоляцию из пенополистирола. Ширина изоляции 1 м, толщина слоя 10 см. Для обратной засыпки фундамента использован песок с коэффициентом теплопроводности в мерзлом состоянии $2,10 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$.

Определите, на какую глубину можно заложить подошву фундамента в соответствии с российскими нормативными документами.

Решение. Определив по табл. 1.4 коэффициент теплопроводности пенополистирола $\lambda_i = 0,05 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, найдем по формуле (4.10) толщину эквивалентного слоя грунта:

$$S_c = 2,10 (1 / 23 + 0,1 / 0,05) = 4,29 \text{ м.}$$

Глубина промерзания грунта для климатических условий Архангельска с учетом теплового влияния здания $d_f = 1,28 \text{ м}$ (см. решение задачи 4.2).

Промерзание под слоем изоляции (по формуле (4.9)):

$$d_{fi} = 1,28 - (1,0/1,28)(1,28 - \sqrt{1,28^2 + 4,29^2} + 4,29) = 0,43 \text{ м.}$$

Глубину заложения подошвы следует принять из условия $d \geq d_{fi}$ (рис.4.33).

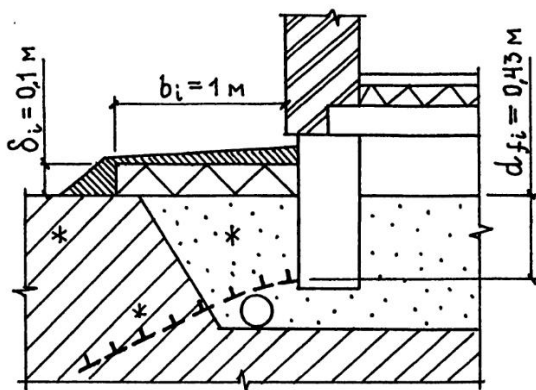


Рис. 4.33. Схема фундамента к задаче 4.4

Задача 4.5. Для защиты от промерзания пучинистого грунта, залегающего в основании проектируемого малоэтажного жилого дома в Архангельске, решено применить горизонтальную теплоизоляцию из пенополи-

стирола (рис. 4.34). Ширина изоляции 1 м, толщина слоя 10 см. Здание имеет проветриваемое подполье. Передняя грань фундамента утеплена

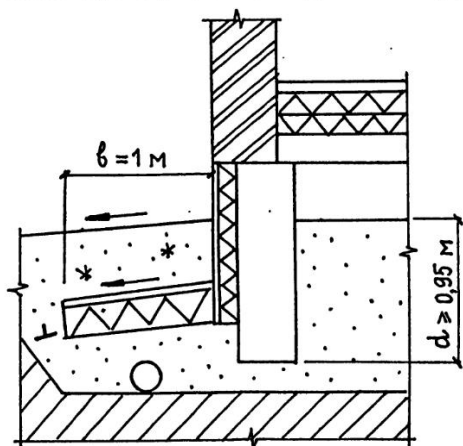


Рис. 4.34. Схема фундамента к задаче 4.5

слоем пенополистирола толщиной 5 см.

Определите, на какую глубину можно заложить подошву фундамента в соответствии с рекомендациями, приведенными в финских нормативных документах.

Решение. Определив по табл. 1.4 коэффициент теплопроводности пенополистирола $\lambda_i = 0,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, найдем тер-

мическое сопротивление вертикальной и горизонтальной теплоизоляции:

$$R_v = 0,05 / 0,05 = 1,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт},$$

$$R_h = 0,10 / 0,05 = 2,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}.$$

Так как условие $R_v \geq 1 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ выполняется, d можно определить по графикам, приведенным на рис.4.25.

Для $R_h = 2,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ и $F_{50} = 56 \cdot 10^3 \text{ °C} \cdot \text{ч}$ (рис. 2.7) находим $d = 0,95 \text{ м}$ (рис. 4.34).

Более чем двукратное превышение значения d по сравнению с результатами вычислений в предыдущей задаче можно объяснить тем, что в финских зданиях тепловой поток в грунт существенно ниже. В частности, термическое сопротивление теплоизоляции в цокольном перекрытии должно быть не менее $4,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$, что соответствует толщине слоя пенополистирола 20...25 см.

Задача 4.6. В Архангельске проектируется жилой дом с полами по грунту и фундаментом, имеющим глубину заложения 0,4 м (рис.4.35). Для теплоизоляции фундамента применяются плиты пенополистирола.

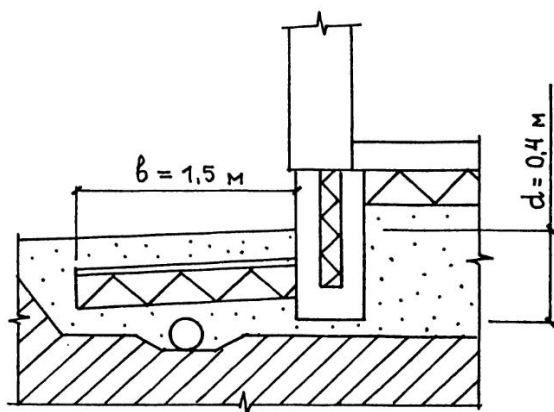


Рис.4.35. Схема фундамента к задаче 4.6

Вертикальная изоляция толщиной 5 см размещена в теле фундамента. Определите необходимые размеры горизонтальной теплоизоляции.

Решение. При коэффициенте теплопроводности пенополистирола $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ термическое сопротивление R_v вертикальной изоляции составит: $0,05/0,05 = 1,0 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Так как условие $R_v \geq 1,0 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$ выполняется, для индекса промерзания $F_{50} = 56 \cdot 10^3 \text{ ч}\cdot^\circ\text{C}$ по графикам, приведенным на рис.4.26, определяем требуемое сопротивление горизонтальной изоляции $R_h = 2,0 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Толщина слоя $\delta_i = 2,0 \cdot 0,05 = 0,10 \text{ м}$, ширина 1,5 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы в связи с повышением цен на строительные материалы и отсутствием государственных инвестиций объемы строительства жилых и общественных зданий на северо-западе России резко сократились. Традиционные массивные кирпичные и панельные стены обладают, кроме высокой стоимости, еще и низким термическим сопротивлением, не соответствующим современным теплотехническим нормам. При разработке принципиально новых проектных решений следует обратиться к опыту других стран, начавших борьбу за экономию тепловой энергии более 20 лет назад.

Например, в Северной Европе, имеющей сходные с нашими климатические условия, накоплен опыт массового строительства относительно недорогих зданий с деревянным каркасом. Их стены утеплены минеральной ватой, покрыты внутри листами гипсокартона, снаружи – синтетическими материалами, деревянной обшивкой или тонким слоем кирпичной кладки. Здания отличаются высоким уровнем комфортности, зачастую имеют автономные системы водоснабжения и отопления. (На одной фотографии изображено строительство экспериментального деревянного жилого дома



в Финляндии, а на других – каркасные жилые дома (индивидуальный – сверху и многоквартирный – снизу.)



Нагрузки на основания подобных зданий невелики. Это с одной стороны позволяет проектировать фундаменты с небольшими размерами подошвы, а с другой – способствует развитию деформаций пучения при промерзании грунтов. Весьма эффективными для них следует признать малозаглубленные фундаменты с теплоизоляцией.

Необходимо отметить, что широкому внедрению малозаглубленных фундаментов могут препятствовать следующие факторы:

- сложность проведения лабораторных исследований пучинистости и теплофизических свойств грунтов основания;
- необходимость выполнения теплотехнических расчетов, требующих высокой квалификации пользователей и дорогостоящих программных средств;
- дороговизна теплоизоляционных материалов – пенополистирола, пенополиуретана и др.

Автор видит следующие пути решения указанных проблем:

- по мере накопления опытных данных перейти к определению пучинистости и теплофизических свойств по результатам простых тестовых опытов или классификационным показателям и физическим свойствам грунтов;
- подготовить территориальные строительные нормы на проектирование фундаментов, где, в частности, привести графики или таблицы для определения размеров грунтовой теплоизоляции;
- использовать в качестве теплоизоляции местные материалы и отходы производства – торф, золошлаковые материалы, гидролизный лигнин и т.п.

На строительном факультете Архангельского государственного технического университета, в частности, проводятся исследования по использованию в качестве грунтового теплоизоляционного материала гидролизного лигнина [28]. Коэффициент теплопроводности этого отхода производства изменяется от 0,04 до 0,30 Вт/(м·°C). Разработаны рекомендации по его применению для защиты малозаглубленных фундаментов и трубопроводов от промерзания. Проводятся полевые эксперименты.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

КРАТКИЙ РУССКО-АНГЛИЙСКИЙ ТОЛКОВЫЙ СЛОВАРЬ ПО ГЕОКРИОЛОГИИ [62]

Влажность грунта

water content, moisture content [W]

The ratio of the mass of water to the mass of solids in the soil. It is determined by weighing a sample of the soil and then drying the sample in an oven at the temperature of 105-110°C and reweighing.

Влажность мерзлого грунта суммарная

water content, total [W_{tot}]

In frozen soil the total water content is the sum of the ice content and the unfrozen water content.

Влажность за счет незамерзшей влаги

unfrozen water content [W_w]

The amount of unfrozen (liquid) water contained in frozen soil.

Вода связанная

adsorbed water

Water retained in the soil mass by physicochemical forces. Its physical properties may differ from chemically combined water or mechanically held water at the same pressure and temperature.

Глубина промерзания грунта

frost depth [d_f]

The distance from the ground surface downward to unfrozen ground during the freezing period. The total thickness of the frozen layer.

Грунт мерзлый

frozen ground

Soil or rock where the pore water is turned into ice (partially or completely).

Грунт непучинистый**frost-stable ground**

Ground (soil or rock) in which little or no segregated ice forms during seasonal freezing.

Грунт пучинистый**frost-susceptible soil**

The soil in which sufficient ice segregation will result in frost heave or heave pressure under suitable moisture and freezing conditions.

Давление пучения**frost-heave pressure (heave pressure) [p_h]**

The force acting on a structure resulting from frost heave and transmitted by adfreeze bond or contact pressure.

Индекс промерзания**freezing index [F]**

The number of degree-hours or degree-days between the highest point in autumn and the lowest point next spring on the cumulative degree-a day time curve for one freezing season.

Индекс оттаивания**thawing index [U]**

The number of degree-hours or degree-days between the lowest point in spring and the highest point next autumn on the cumulative degree-a day time curve for one thawing season.

Кайма промерзания**frozen fringe**

The zone in a freezing, frost-susceptible soil between the warmest isotherm at which ice forms in pores and the isotherm at which the warmest ice lens is growing.

Коэффициент пористости**void ratio [e]**

The ratio of the volume of voids to the volume of solids.

Кривая гранулометрического состава**particle size distribution curve**

It is presented as a curve on a semilogarithmic plot, the ordinates being the percentage by mass of particles smaller than the size given by abscissa.

Линза льда**ice lens**

Ice formations in soil occurring essentially parallel to one another, generally normal to the direction of heat loss and commonly in repeated layers. Commonly layers of segregated ice that are parallel to the ground surface. The lenses may range in thickness from a hairline to as much as about 10 m.

Льдистость суммарная**ice content [i]**

The amount of ice contained in frozen or partially frozen soil or rock. The ratio of the volume of the ice phase to the volume of soil or rock.

Многолетняя мерзлота**permafrost**

The thermal condition in soil or rock of having temperatures below 0°C persist over at least two consecutive winters and the intervening summer. A subsurface zone that is permanently frozen. Permafrost is found in the regions of the Northern hemisphere.

Осадка при оттаивании**thaw settlement**

The generally uneven downward movement of the ground surface due to thaw consolidation.

Плотность грунта**Density [ρ]**

The ratio of the total mass to the total volume of soil.

Переохлаждение**supercooling**

Temporary cooling of water below the freezing temperature without ice nucleation.

Пучение морозное**frost heave [h_f]**

The upward or outward movement of the ground surface due to the expansion of water frozen in situ and ice segregation. For frost heave to occur three conditions must be present: sub-zero temperatures, a frost-susceptible material and a supply of water from outside.

Район с холодным климатом**cold region**

The region where the mean temperature for the coldest month is lower than -3°C and not more than 4 months have a mean temperature higher than 10°C .

Сегрегационный потенциал**segregation potential [SP_0]**

The ratio of the water intake flux and the temperature gradient in the frozen fringe in the frozen soil near the 0°C isotherm.

Сегрегация льда**ice segregation**

The process of segregated ice formation by freezing of soil water. The migration of pore water to the freezing front causes ice segregation.

Скорость промерзания**freezing rate, rate of freezing [v_f]**

The penetration rate of the freezing front through the soil structure.

Скорость пучения**frost heave rate [v_h]**

The rate at which frost heave occurs.

Стационарные условия**Steady-state conditions**

Conditions in which the temperature distribution within a body is constant and the boundary conditions remain unchanged.

Степень пучинистости**degree of frost susceptibility or FS-class**

The soil group in the FS-classification. It may be determined by several laboratory methods or by observations in situ.

Температура среднегодовая**mean annual temperature [T_m]**

Temperature averaged over a calendar year.

Теплоемкость**heat capacity [c]**

The amount of heat required to raise a system temperature on one degree, usually under constant pressure or constant volume. The specific heat capacity is expressed per unit weight, and the volumetric heat capacity is expressed per unit volume.

Теплоизоляция фундаментов**ground insulation**

The insulation is placed around the foundation. It keeps the ground temperature under the footings above freezing.

Теплопроводность**thermal conductivity [λ]**

The parameter, which characterizes the ability of a material to transmit heat by conduction, is defined as the quantity of heat flow that will occur in unit time through a unit area of a substance under a unit temperature gradient.

Теплота фазовых превращений**heat of fusion [q]**

The increase in enthalpy accompanying the conversion of a unit mass or volume of a solid to a liquid at its melting point under constant pressure and temperature. Also known as latent heat of fusion.

Удельная площадь поверхности**specific surface area [S]**

The surface area of soil particles per weight unit of dry soil.

Ухудшение свойств грунта при оттаивании**thaw weakening**

The reduction in shear strength or modulus of elasticity due to the increase of pore pressure when frozen soils containing ice are thawing.

Фронт промерзания**freezing front**

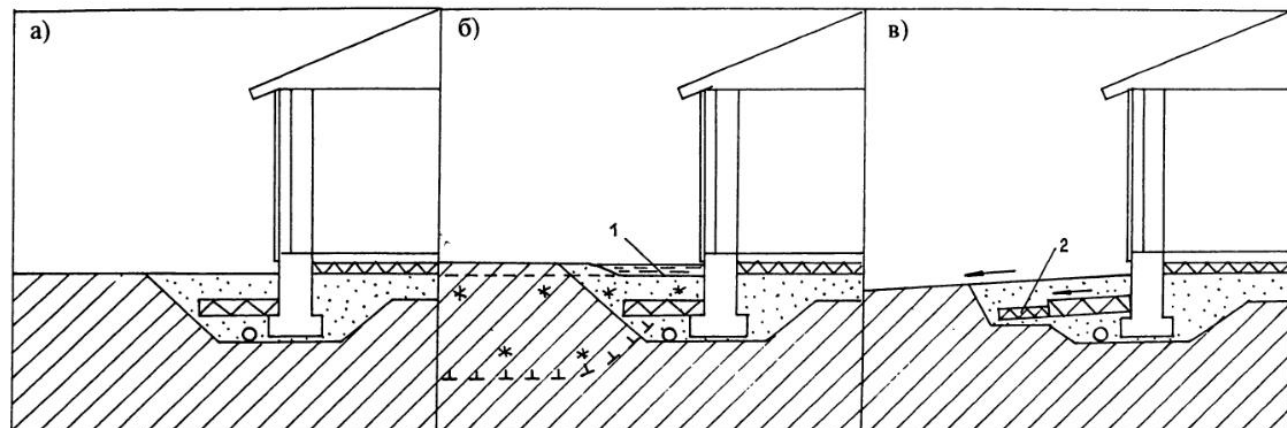
The advancing boundary between frozen ground and unfrozen ground. The freezing front may not coincide with the 0°C isotherm. Also known as frost front.

Фундамент с теплоизоляцией**frost-protected foundation**

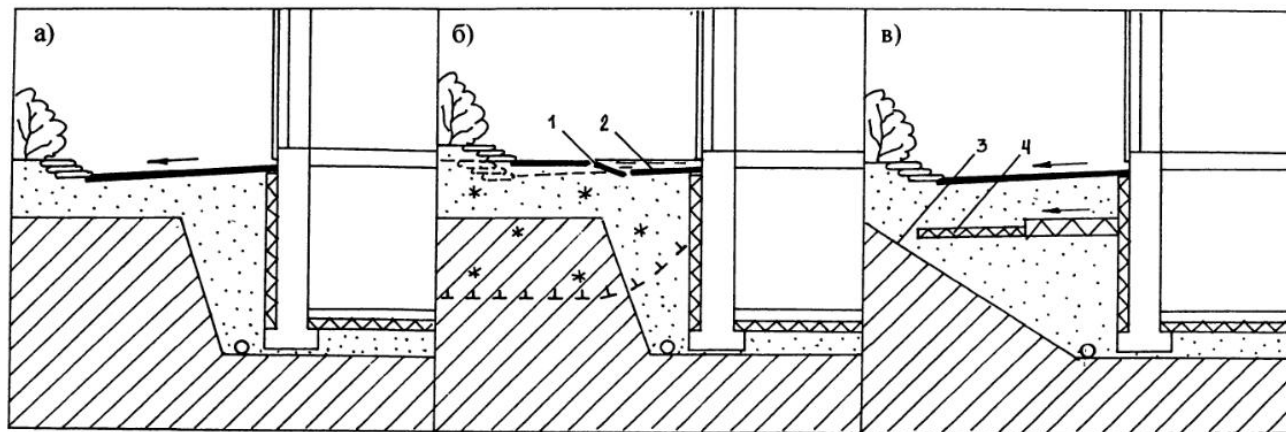
The foundation with the slab-edge insulation reducing the frost depth of soil.

ОШИБКИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ [80]

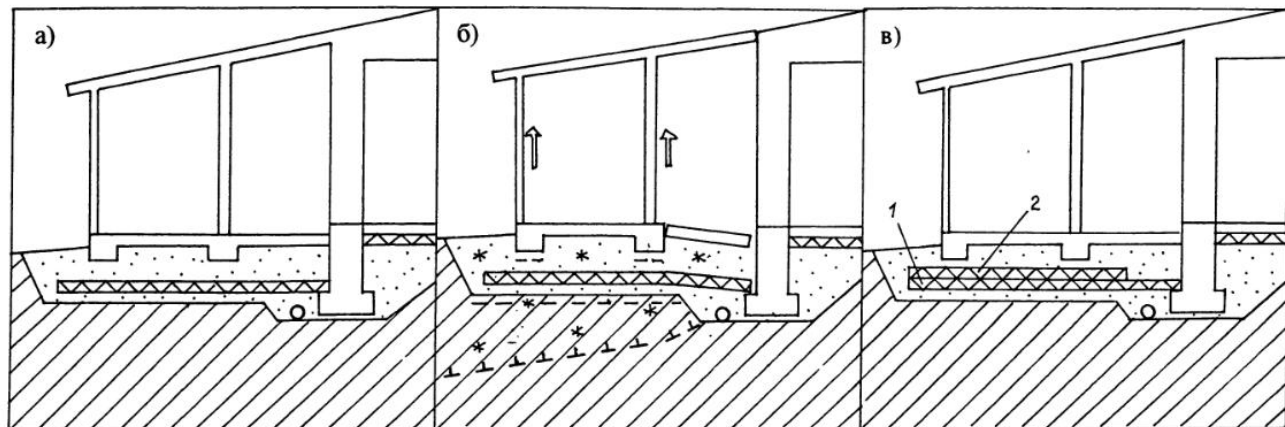
1. При горизонтальной поверхности планировки (см. схему *а* на рисунке) за счет морозного пучения прилегающего массива грунта рядом со зданием возникает впадина. Весной во впадине 1 скапливается вода, увлажняющая фундаменты и стены (схема *б*). Избежать этого можно, создав при планировке уклон от здания и, кроме того, дополнительно увеличив ширину горизонтальной изоляции 2 (схема *в*).



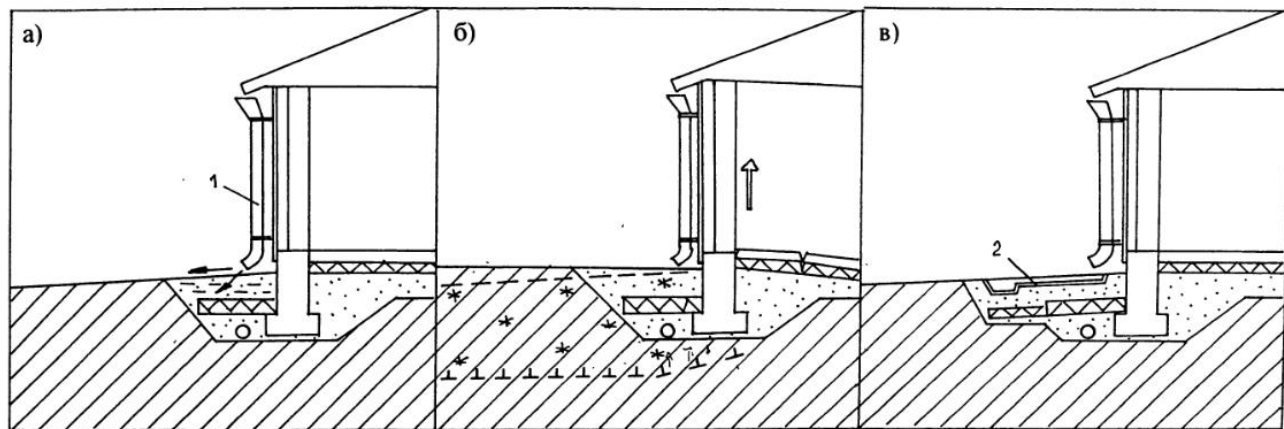
2. Резкое изменение глубины залегания кровли пучинистого грунта под проездом или тротуаром (см. схему *а* на рисунке) за счет неравномерности пучения приводит к разрушению покрытия 1 и скапливанию воды во впадине 2 рядом со зданием (схема *б*). Уполоожение откоса 3, сложенного пучинистым грунтом, или устройство горизонтальной теплоизоляции 4 позволит предотвратить неравномерность деформаций пучения (схема *в*).



3. Размещение легких неотапливаемых пристроек (галерей, веранд, гаражей) над слоем горизонтальной изоляции 1 малозаглубленного фундамента (см. схему *а* на рисунке) может вызвать промерзание основания и неравномерные деформации конструкций (схема *б*). Под неотапливаемыми помещениями следует укладывать дополнительные слои утеплителя 2 (схема *в*).

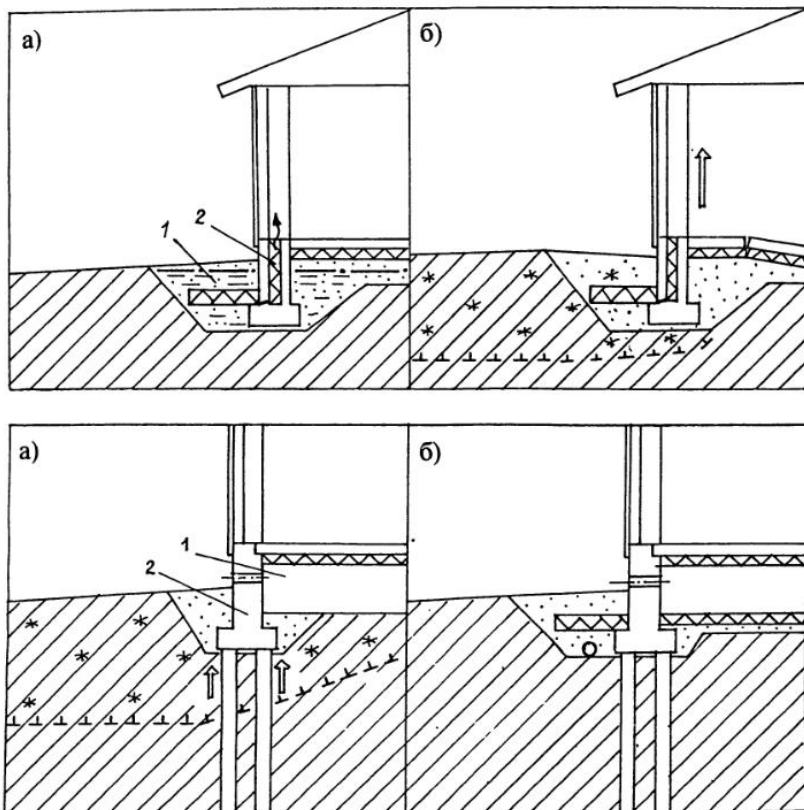


4. Поток воды, стекающей с кровли через водосточную трубу 1, приводит к росту влажности, а следовательно, и теплопроводности грунта и теплоизоляционного материала (см. схему *а* на рисунке). Следствием этого является промерзание основания и неравномерный подъем конструкций (схема *б*). Для отвода воды от здания можно использовать бетонные лотки 2 (схема *в*).

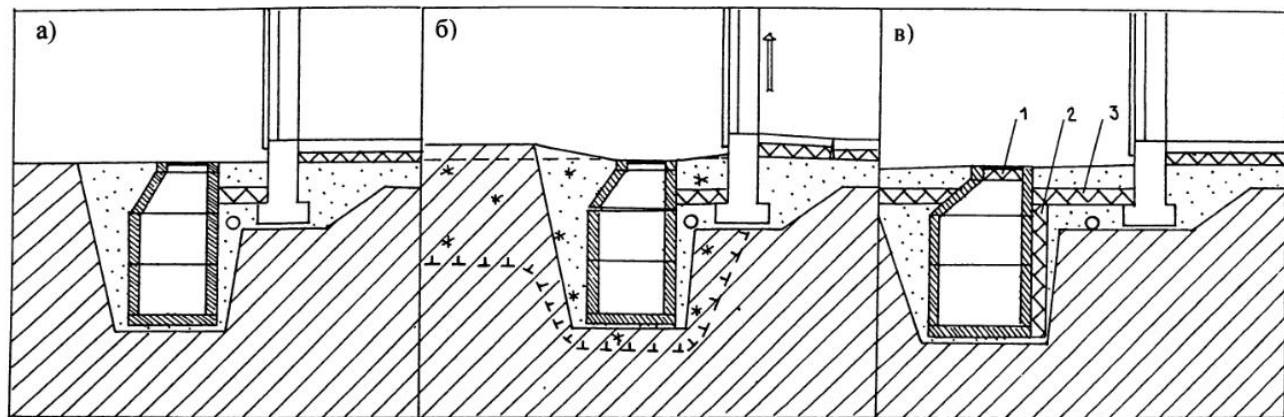


5. Отсутствие или повреждение дренажа приводит к накоплению воды в обратной засыпке фундамента 1 (см. схему *a* на рисунке) и, как и в предыдущем случае, увлажнению и промерзанию грунта под его подошвой (схема *б*). Отрицательным последствием является также капиллярное увлажнение стен через вертикальную теплоизоляцию 2, расположенную в теле фундамента.

6. Промерзание грунта через вентилируемое подполье 1 может привести к подъему ростверка 2 свайного фундамента (см. схему *a* на рисунке). Одним из способов защиты является размещение горизонтальной изоляции над кровлей пучинистого грунта (схема *б*).



7. Размещение смотрового колодца в непосредственной близости от фундамента (см. схему *а* на рисунке) может послужить причиной промерзания основания и неравномерного подъема конструкций (схема *б*). Для защиты основания можно применить: откос колодца от стен, утепление люка, укладку слоев вертикальной и горизонтальной теплоизоляции вокруг колодца (на рисунке обозначены: 1- утепленный люк колодца, 2- вертикальная теплоизоляция с внешней стороны стен колодца, 3- горизонтальная теплоизоляция).



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПРОВЕРКА ДАВЛЕНИЯ ПОД ПОДОШВОЙ ФУНДАМЕНТА [32, 49]

В соответствии с требованиями СНиП 2.02.01-83 [49] при проектировании фундаментов на естественном основании должно выполняться условие

$$p \leq R, \quad (1)$$

где p – среднее давление под подошвой фундамента;

R – расчетное сопротивление грунта основания.

Давление под подошвой находят по формуле

$$p = \frac{N + G_f + G_g}{A}, \quad (2)$$

где N – нагрузка на фундамент, найденная с коэффициентом надежности 1;

G_f, G_g – вес фундамента и грунта на его уступах;

A – площадь подошвы фундамента.

Для ленточных фундаментов используют значения N, G_f, G_g , приходящиеся на один метр длины, а площадь подошвы находят по формуле

$A = 1 b$, где b – ширина подошвы.

Значение R определяют из условия развития зон пластических деформаций грунтов в основании на глубину не более $b/4$ по формуле

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} [M_\gamma b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + (M_q - 1) d_b \gamma'_{II} + M_c C_{II}], \quad (3)$$

где γ_{c1} – коэффициент условий работы, зависящий от вида грунта в основании (табл.1);

γ_{c2} – коэффициент условий работы, зависящий от конструктивной схемы и соотношения размеров здания; при гибкой конструктивной схеме принимается равным 1;

k – коэффициент, принимаемый равным 1, если характеристики грунта (ϕ и c) определены непосредственными испытаниями, и 1,1, если они приняты по таблицам СНиПов;

M_γ, M_q, M_c – коэффициенты, определяемые по табл.2;

γ_{Π} – удельный вес грунта, залегающего под подошвой фундамента, при наличии подземных вод вычисляется с учетом взвешивающего воздействия воды (этот фактор в суглинках и глинах обычно не учитывается);

γ_{Π}^1 – то же для грунта, залегающего выше подошвы;

C_{Π} – удельное сцепление грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента;

d_1 – глубина заложения фундамента;

d_b – глубина подвала – расстояние от уровня планировки до пола подвала; при глубине свыше 2 м принимают $d_b = 2$ м, при ширине подвала более 20 м принимают $d_b = 0$.

Таблица 1

Грунт	$\gamma_{сг}$
Крупнообломочный, песок гравелистый, крупный и средней крупности	1,4
Песок мелкий	1,3
Песок пылеватый:	
- маловлажный и влажный	1,25
- насыщенный водой	1,1
Пылевато-глинистый с показателем текучести:	
$I_L \leq 0,25$	1,25
$0,25 < I_L \leq 0,50$	1,2
$I_L > 0,50$	1,1

Таблица 2

Фп, ...	Коэффициент			Фп, ...	Коэффициент			Фп, ...	Коэффициент		
	M_{γ}	M_q	M_c		M_{γ}	M_q	M_c		M_{γ}	M_q	M_c
0	0	1,0	3,14	16	0,36	2,43	4,99	32	1,34	6,34	8,55
1	0,01	1,06	3,23	17	0,39	2,57	5,15	33	1,44	6,76	8,88
2	0,03	1,12	3,32	18	0,43	2,73	5,31	34	1,55	7,22	9,22
3	0,04	1,18	3,41	19	0,47	2,89	5,48	35	1,68	7,71	9,58
4	0,06	1,25	3,51	20	0,51	3,06	5,66	36	1,81	8,24	9,97
5	0,08	1,32	3,61	21	0,56	3,24	5,84	37	1,95	8,81	10,37
6	0,10	1,39	3,71	22	0,61	3,44	6,04	38	2,11	9,44	10,80
7	0,12	1,47	3,82	23	0,69	3,65	6,24	39	2,28	10,11	11,25
8	0,14	1,55	3,93	24	0,72	3,87	6,45	40	2,46	10,85	11,73
9	0,16	1,64	4,05	25	0,78	4,11	6,67	41	2,66	11,64	12,24
10	0,18	1,73	4,17	26	0,84	4,37	6,90	42	2,88	12,51	12,79
11	0,21	1,83	4,29	27	0,91	4,64	7,14	43	3,12	13,46	13,37
12	0,23	1,94	4,42	28	0,98	4,93	7,40	44	3,38	14,50	13,98
13	0,26	2,05	4,55	29	1,06	5,25	7,67	45	3,66	15,64	14,64
14	0,29	2,17	4,69	30	1,15	5,59	7,95				
15	0,32	2,30	4,84	31	1,24	5,95	8,24				

Глубина заложения фундамента для сечений без подвала берется от отметки планировки, для сечений с подвалом

$$d_1 = h_s + \frac{h_{cf} \gamma_{cf}}{\gamma_{II}} , \quad (4)$$

где h_s – толщина слоя грунта выше подошвы фундамента со стороны подвала;

h_{cf} – толщина конструкции пола подвала;

γ_{cf} – удельный вес материала пола подвала.

В случае залегания выше или ниже подошвы фундамента нескольких слоев грунта с удельным весом $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ мощностью соответственно $h_1, h_2, \dots, h_n$ находят их средний удельный вес по формуле

$$\gamma_{II} = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} . \quad (5)$$

Под подошвой фундамента при этом рассматривается слой мощностью $(h_1 + h_2 + \dots + h_n) = 0,5 b$.

Для внецентренно нагруженных фундаментов, кроме среднего давления, под подошвой фундамента определяют значения крайних напряжений

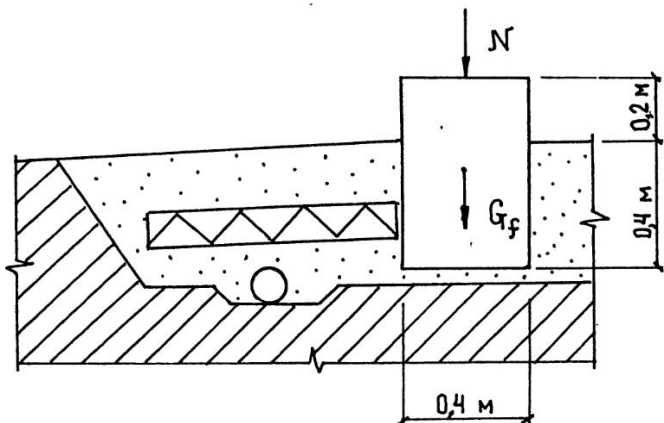
$$p_{\max/\min} = p \left(1 \pm 6 \frac{e}{x} \right), \quad (6)$$

где e – эксцентриситет нагрузки;

x – размер подошвы фундамента в направлении действия момента, в частности, для ленточных фундаментов $x = b$.

Нормы [49] требуют выполнения условий: $p_{\max} \leq 1,2R$, $p_{\min} \geq 0$.

Задача. Наружная стена каркасного жилого дома опирается на ленточный фундамент с глубиной заложения 0,4 м и шириной подошвы 0,4 м (см. рисунок). Нагрузка от стены на фундамент приложена без эксцентриситета и составляет 10 кН/м. В основании залегает моренный суглинок со следующими свойствами: показатель текучести $I_L = 0,27$, удельный вес $\gamma_{II} = 20,7$ кН/м³, угол внутреннего трения $\varphi_{II} = 10^\circ$, удельное сцепление $C_{II} = 25$ кПа.



Выше подошвы залегают песок с удельным весом $\gamma_{II}=16,0 \text{ кН/м}^3$ и слой пенополистирола толщиной 10 см с удельным весом $0,15 \text{ кН/м}^3$. Определите допустимость давления под подошвой фундамента.

Решение. При глубине заложения подошвы 0,4 м и удельном весе бетона 24 кН/м^3 вес фундамента составит $G_f=(0,4+0,2)0,4 \cdot 24=5,8 \text{ кН}$.

Уступов у фундамента нет. Давление под подошвой составляет:
 $p=(10+5,8)/0,4=39,5 \text{ кПа}$.

Для вычисления расчетного сопротивления грунта основания найдем значения параметров, входящих в формулу (3):

$\gamma_{c1}=1,2$ - для пылевато-глинистых грунтов в тугопластичном состоянии,

$\gamma_{c2}=1$ - для зданий с гибкой конструктивной схемой,

$k=1$ - так как прочностные характеристики грунта определялись лабораторными испытаниями;

$M_\lambda=0,18$, $M_q=1,73$, $M_c=4,17$ - для угла $\phi_{II}=10^\circ$,

$\gamma_{II}=20,7 \text{ кН/м}^3$, $b=0,4 \text{ м}$,

$\gamma_{II}^I=(16,0 \cdot 0,3+0,15 \cdot 0,1)/0,4=12,0 \text{ кН/м}^3$ - среднее значение удельного веса грунта и утеплителя, расположенных выше подошвы фундамента,
 $d_b=0$, $d_1=0,4 \text{ м}$, $c_{II}=25 \text{ кПа}$.

Расчетное сопротивление грунта:

$R=(1,2 \cdot 1/1) \cdot (0,18 \cdot 0,4 \cdot 20,7+1,73 \cdot 0,4 \cdot 12,0+0+4,17 \cdot 25)=136,9 \text{ кПа}$.

Условие (1) выполняется, размеры фундамента допустимы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 389211 СССР, МКИ Е02Д 27/34. Способ защиты фундамента зданий, сооружений от воздействия сил морозного пучения / Г.И.Соболев и др. – Оpubл. 05.07.73 // Бюл. изобретений. – № 29.
2. А.с. 643594 СССР, МКИ Е02Д 27/34. Фундамент зданий, сооружений, возводимых на пучинистых грунтах / Г.И.Соболев, Ю.Г.Чернышев. – Оpubл. 25.01.79 // Бюл. изобретений. – № 3.
3. А.с. 885445 СССР, МКИ Е02Д 27/34 Фундамент зданий, сооружений / В.А. Кузюрин и др. – Оpubл. 30.11.81 // Бюл. изобретений. – № 44.
4. А.с. 1019059 СССР, МКИ Е02Д 27/35. Фундамент зданий, сооружений, возводимых на пучинистых грунтах / П.С.Пинчук, Г.П.Протодяконов. – Оpubл. 23.05.83 // Бюл. изобретений. – № 19.
5. А.с. 1043266 СССР, МКИ Е02Д 27/35. Противопучинное покрытие фундамента здания, сооружения / А.М. Пчелинцев и др. – Оpubл. 23.09.83 // Бюл. изобретений. – № 35.
6. А.с. 1246660 СССР, МКИ Е02Д 27/35. Фундамент здания, возводимого на пучинистых грунтах / Е.А. Гоberman и др. – Оpubл. 7.12.91 // Бюл. изобретений. – № 45.
7. А.с. 1530675, МКИ Е02Д 27/35. Способ защиты фундаментов от нормальных сил морозного пучения / В.О. Орлов. – Оpubл. 23.12.89 // Бюл. изобретений. – № 47.
8. А.с. 1551778, МКИ Е02Д 27/35. Фундамент сооружения, возводимого в пучинистых грунтах / В.Ю. Петухов. – Оpubл. 23.03.90 // Бюл. изобретений. – № 11.
9. А.с. 1664975, МКИ Е02Д 27/35. Свая / А.А.Коновалов и др. – Оpubл. 23.07.91 // Бюл. изобретений. – № 27.
10. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
11. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Госстандарт, 1985. – 24 с.
12. ГОСТ 24847-81. Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. – М.: Госстандарт, 1981. – 10 с.
13. ГОСТ 25100-96. Грунты. Классификация. – М.: Госстандарт, 1982. – 18 с.

14. ГОСТ 26263-84. Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов. – М.: Госстандарт, 1985. – 9 с.
15. ГОСТ 28622-90. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – М.: Госстандарт, 1990. – 10 с.
16. Голли А.В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах: Конспект лекций. – Л.: Изд-во ЛИСИ, 1977. – 60 с.
17. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. – М.: Наука, 1984. – 230 с.
18. Дерягин Б.В., Кладько С.Н., Чураев Н.В. Свойства тонких незамерзающих слоев воды и морозное пучение грунтов // Тр. Третьего симпозиума по реологии грунтов. – Ереван, 1980. – С. 47-57.
19. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 167 с.
20. Ершов Э.Д. Физикохимия и механика мерзлых пород. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 336 с.
21. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Недра, 1990. – 559 с.
22. Инженерная геокриология: Справочное пособие / Под ред. Э.Д.Ершова. – М.: Недра, 1991. – 439 с.
23. Карлов В.Д. Основания и фундаменты в районах распространения вечномерзлых грунтов. – М.; СПб.: Изд-во АСВ, 1997. – 176 с.
24. Киселев М.Ф. Мероприятия против деформации зданий и сооружений от воздействия сил морозного выпучивания фундаментов. – М.: Стройиздат, 1971. – 220с.
25. Климат Архангельска / Под ред. Ц.А. Швер и А.С. Егоровой. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 208 с.
26. Климатология / О.А. Дроздов и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
27. Коган А.А., Кривоногова А.Н. Основные закономерности процесса пучения грунтов // Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов (ИГК-92): Сб.тр. – СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. – С. 4-18.
28. Коптяев В.В., Невзоров А.Л. Возможность утилизации гидролизного лигнина при возведении фундаментов и земляных сооружений // Геоэкология. – 1999. – №2. – С.140-145.

29. Костэ Ж., Санглера Г. Механика грунтов: Практик. курс. – М.: Стройиздат, 1981. – 455 с.
30. Лабораторные методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 350 с.
31. Лукина В.А., Гурьев Т.А. Водно-тепловой режим и его влияние на прочность лесовозных автомобильных дорог. – Л.: ЛТА, 1984. – 76 с.
32. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский и др. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.
33. Миронов В.А. Проектирование оснований и фундаментов сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. – Калинин: КГУ, 1988. – 95 с.
34. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3: Многолетние данные. Ч. 1-6, вып. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 483 с.
35. Невзоров А.Л. Инженерная геология и механика грунтов: Учебное пособие. – Архангельск: РИО АГТУ, 1994. – 111 с.
36. Невзоров А.Л. Прогноз и экспериментальное определение морозного пучения грунтов // Разведка и охрана недр. – 1997. – № 5. – С. 37 - 39.
37. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
38. Орлов В.О., Елгин Б.Б., Железняк И.И. Морозное пучение грунтов в расчетах оснований сооружений. – Новосибирск: Наука, 1987. – 136 с.
39. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплого режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02-85) / СоюздорНИИ. – М.: Стройиздат. 1989. – 97 с.
40. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1986. – 445 с.
41. Пусков В.И. Характеристика пучинистых свойств промерзающих грунтов при инженерно-геологических изысканиях для целей строительства // Инж.-геол. условия, основания и фундаменты транспортных сооружений в Сибири: Межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НИИЖТ, 1991. – С. 21 - 28.
42. Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах / НИИОСП. – М., 1985. – 60 с.
43. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с.

44. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах / НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1980. – С. 303.
45. Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
46. Справочник по климату СССР. Вып. 1: Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. Ч. VIII / Севгидромет. – Архангельск, 1973. – 401 с.
47. Строительная климатология / НИИ строительной физики. – М.: Стройиздат, 1990. – 89 с.
48. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.
49. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 40 с.
50. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
51. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 38 с.
52. Теоретические основы инженерной геологии: Физико-химические основы / Под ред. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
53. Теплофизические свойства мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с.
54. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 186 с.
55. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. шк., 1973. – 446 с.
56. Шевченко Л.В., Лапшин В.Я. Морозное пучение грунта при различных криогенных текстурах с учетом его усадки // Мерзлотные исследования. 1977. Вып. XVI. – М.: Изд-во МГУ. – С. 188-194.
57. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. – New York: Chapman and Hall, 1994 – 352 p.
58. Anderson D.M., Tice A.R., Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements // Highway Res. Record, 1972. – № 393. – P. 12-18.
59. Ehrola E. Road and traffic engineering in cold climate: Course of lectures / Oulu Univ. – 1996.

60. Eranti E., Lee G.C. Cold region structural engineering. – New York: McGraw – Hill Book Co., 1986. – 529 p.
61. Farouki O.T. Thermal properties of soils // Trans. Tech. publications 1986. – 136 p.
62. Frost in geotechnical engineering: Int. Symp. V.1,2 / Edited by H. Rathmayer. – Espoo: VTT, 1989.
63. Frost in geotechnical engineering: Proc. of 2nd Int. Symp. on frost in geotechn. eng. / Edited by A. Phukan. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993.
64. Frost i jord. – № 17. – Oslo, 1976. – 400 p.
65. Frost i jord. № 22. – Oslo, 1981. – 64 p.
66. Geoteknikk i vegbygging, N 016'92, 2.utgave, Oslo:Trykk – 1992. – 418 p.
67. Hutcheon N.B., Handegord G.O.P. Building science for a cold climate. – Toronto: John Wiley & sons, 1983. – 440 p.
68. Ishizaki T. Experimental study of frost heaving of saturated soils under overburden pressure: Ph.D. Thesis, Supporo / Hokkaido Univ. – 1985. – 98 p.
69. Konrad J.M. Frost heave mechanics: Ph.D. Thesis, Edmonton Alberta. – 1980. – 472 p.
70. Konrad J.M. Procedure for determining the segregation potential of freezing soils // Geotech. Testing J. – 1987. – V.10. – № 2. – P. 51 - 58.
71. Kujala K. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils // Acta Univ. Oulu, C58. – Oulu, 1991. – 99 p.
72. Kujala K. Routanousun mallintaminen – Oulu: Tielaitos, 1994 – 135 s.
73. Kujala K., Ravaska O. Soil water content measurement with a time domain reflectometer // XIII ICSMFE Conf. – New Delhi, India, 1994. – P. 219-224.
74. Makela H., Tammirinne M. Rakennusten perustusten routasuo-jausohje. – Espoo: VTT, 1979. – 53 s.
75. McFadden T.T., Bennett F.L. Construction in cold regions. – New York: John Wiley & sons, 1991. – 615 p.
76. Nevzorov A.L. Forecast and experimental determination of frost heave of soils // Arctic civil eng.: Peculiarities of road building in European North: Seminar collection. – № 6. – Oulu, 1995. – P. 72-90.
77. Phukan A. Frozen ground engineering. – New Jersey: Prentice – Hall Englewood Cliffs, 1985. – 336 p.
78. Ravaska O. Arctic Geotechnics: Course of lectures / Oulu Univ. – 1996.

79. Ravaska O., Kujala K. Prediction of frost penetration depth by heat transfer analysis // 2nd European Spec. Conf. on Numerical Methods in Geotechn. Eng. – Santander, 1990. – P. 293-302.
80. RIL 193-1992. Suomen Rakennus-Sinorien Liitto. Routavauriot ja routa-Suojaus. – Lahti: Lahti Print. – 1992. – 89 s.
81. Smith M.W., Paterson D.E. Detailed observations on the nature of frost heaving at a field scale // Can.Geotechn.J. – 1989. – V.26. – №2. – P.306-312.
82. Soveri U., Johansson S. Havaintoja lumesta raivatun maan routaantumisesta Helsinki, Vesihallitus, julkaisu 107. – 1966. – 56 s.
83. Soveri J., Varjo M. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955 - 1975. Helsinki: Vesihallitus, julkaisu 20. – 1977. – 66 s.
84. Sundberg J. Thermal properties of soil and rock / Sweden Geotechn. Inst. Rep. № 35. – 1988. – P. 65.
85. Talonrakennuksen routasuojausohjeet / VTT geotekniikan laboratorio. – Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy. – 1987 – 95 s.
86. Washburn A.L. Geocryology. – Norwich: GB - Fletcher and sons Ltd. – 1979. – 472 p.
87. Williams P.J., Smith M.W.. The frozen earth. Fundamentals of geocryology. Cambridge: University Press. – 1989. – 306 p.
88. Yong R.N., Warkentin B.P. Soil properties and behaviour. – New York, 1975. – 449 p.

Учебное пособие

Невзоров А.Л.

ФУНДАМЕНТЫ НА СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ

Редактор	Г.М. Боголицына
Технический редактор	Н.З. Попова
Корректор	Л.Н. Героева
Компьютерная верстка	Е.А. Банниковой

Лицензия ЛР № 071618 от 01.04.98

Сдано в набор 15.03.99. Подписано к печати 29.06.99

Формат 60x88/16. Бумага офсетная

Гарнитура таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,75. Заказ № 1525. Тираж 2000 экз.

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., 6.