

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Строительный факультет

Кафедра строительных технологий, геотехники и экономики строительства

УТВЕРЖДЕН  
на заседании кафедры  
строительных технологий, геотехники и  
экономики строительства  
«30» августа\_ 2017 г.,  
протокол №1  
Заведующий кафедрой  
Н.С.Соколов\_  
«30» августа 2017 г.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

по дисциплине

### **«ГЕОМЕХАНИКА»**

Направление подготовки (специальность) 08.05.01 – «Строительство уникальных зданий и сооружений»

Квалификация (степень) выпускника – «Инженер-строитель»

Специализация № 2 "Строительство подземных сооружений"

Методические материалы разработаны на основе рабочей программы дисциплины, предусмотренной образовательной программой высшего образования (ОП ВО) по направлению подготовки 08.05.01 – «Строительство уникальных зданий и сооружений».

*СОСТАВИТЕЛИ:*

Доцент кафедры строительных технологий,  
геотехники и экономики строительства \_\_\_\_\_ С.М.Ушков\_  
Доцент кафедры строительных технологий,  
геотехники и экономики строительства \_\_\_\_\_ С.С.Викторова

*СОГЛАСОВАНО:*

Методическая комиссия строительного факультета «30» августа 2017 г., протокол №1.

Декан факультета \_\_\_\_\_ А.Н. Плотников

## Температурный режим грунтов.

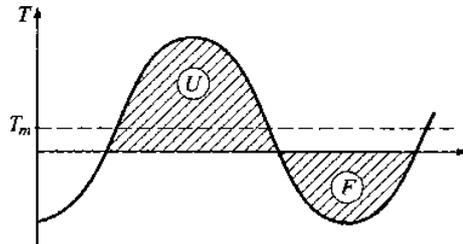


Рис. 1. График изменения температуры воздуха в течение полутора лет

Для оценки влияния температуры атмосферного воздуха в инженерной практике используют понятия индексов промерзания и оттаивания. Геометрически они представляют собой площади, ограниченные графиком изменения температуры воздуха и осью абсцисс, по которой откладывается время (рис. 1). Индекс промерзания вычисляется как сумма произведений абсолютных значений отрицательной, т.е. зимней, температуры на время  $F = \Sigma([T]\Delta t_i)$ , а индекс оттаивания — как сумма произведений положительной температуры на время  $U = \Sigma([T]\Delta t_i)$ . Выражаются  $F$  и  $U$  в градусо-часах ( $^{\circ}\text{С}\cdot\text{ч}$ ), градусо-сутках ( $^{\circ}\text{С}\cdot\text{сут}$ ) или градусо-месяцах ( $^{\circ}\text{С}\cdot\text{мес}$ ). Годичные индексы промерзания обычно находят, используя среднемесячные значения температуры воздуха, приводимые в нормативных документах.

По годичным индексам можно найти среднегодовую температуру воздуха  $T_m = (U-F)/365$ , а сопоставляя индексы  $F$  и  $U$ , можно оценить геокриологические условия местности. Если  $F > U$  или  $T_m < 0$ , то год от года идет нарастание мерзлого слоя, в результате чего формируется толщина многолетнемерзлого грунта. При  $F < U$  или  $T_m > 0$  наблюдается лишь сезонное промерзание верхних горизонтов земной коры, так как за теплое время года весь промерзший зимой грунт успевает оттаять.

В различные годы имеют место большие или меньшие отклонения от среднего годового хода температуры. Зарубежные специалисты в зависимости от вида и степени ответственности проектируемого сооружения при расчете глубины сезонного промерзания грунта принимают во внимание индексы промерзания, которые могут иметь место один раз в 5, 10, 20, 50 или 100 лет. Их обозначают соответственно  $F_5, F_{10}, F_{20}, F_{50}, F_{100}$  и находят путем статистической обработки данных многолетних наблюдений. В частности, в Финляндии при проектировании автодорог используют индекс  $F_{10}$ , фундаментов зданий —  $F_{50}$ . В Норвегии фундаменты проектируют с использованием индекса  $F_{100}$ .

Заметим, что индекс  $F_2$  не что иное, как среднее значение индекса промерзания за весь период метеонаблюдений, его можно вычислить, используя средние значения среднемесячных зимних температур. Если  $F_2$  изменяется в интервале от 2000 до 40 000  $^{\circ}\text{С}\cdot\text{ч}$ , в соответствии с норвежскими нормами можно использовать следующие зависимости:

$$F_5 = 6000 + F_2 \quad F_{10} = 8500 + 1,25 F_2 \quad F_{100} = 11\,000 + 1,4 F_2$$

Отечественные нормы индекс промерзания для расчета глубины сезонного промерзания определяют как среднее значение по данным наблюдений за период не менее 10 лет.

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. Амплитуд сезонных колебаний температуры грунта уменьшается с глубиной. Глубина, на которой

температура остается постоянной круглый год, составляет обычно несколько метров.

### Сезонное промерзание грунта

Первое и самое простое решение по расчету глубины сезонного промерзания грунта, который рассматривался как однородная среда с постоянным коэффициентом теплопроводности  $\lambda_f$  и исходной температурой  $T_{bf}$ , было получено в конце XIX в. Л. Заальпютцем и И. Стефаном :

$$d_f = \sqrt{2\lambda_f F / q_v}.$$

Приведенная формула в несколько измененном виде вошла в СП 25.13330.2012 [10], найденная по ней глубина промерзания называется нормативной:

$$d_{fn} = \sqrt{2\lambda_f (T_{bf} - T_{fm}) t_{fm} / q_2},$$

где  $T_{bf}$  и  $t_{fm}$  - средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур и продолжительность этого периода;  $q_2$  - количество тепловой энергии, которую следует отвести из грунта, для понижения температуры от  $T_{bf}$  до  $t_{fm}$ ,

$$q_2 = q_v - 0,5c_f(T_{fm} - T_{bf}).$$

Содержание незамерзшей воды при расчете  $\beta_v$  определяется при температуре

$$T = (T_{fm} - T_{bf})/2.$$

Формулу можно записать в более привычном виде:

$$d_{fn} = \sqrt{2\lambda_f (\bar{F} + T_{bf} t_{fm}) / q_2},$$

где  $F = F_2$  среднее значение годового индекса промерзания.

Практика вычислений показала, что приведенная формула дает завышенные значения глубины промерзания, поэтому рядом авторов предложено внести в нее поправочные коэффициенты:

$$d_{fn} = \beta \sqrt{2\lambda_f (n\bar{F} + T_{bf} t_{fm}) / (q_2 + q_3)},$$

где  $\beta$  - коэффициент, учитывающий нелинейное изменение температуры грунта по глубине, как правило,  $0,7 < \beta < 1$ ;  $n$  - коэффициент, показывающий отношение температуры поверхности к температуре воздуха, при наличии слоя снега  $0,5 \lll 1$ , деревьев и кустов со слоем снега  $0,25 < n < 0,3$ , асфальтобетонного покрытия  $0,3 < n < 1$ ;  $q_3$  - количество тепловой энергии, которую следует отвести из грунта, для понижения его температуры от так называемой предзимней до  $T_{bf}$ .

Согласно СП 22.13330.2012 нормативная глубина сезонного промерзания определяется на открытой, оголенной от снега площадке, где уровень грунтовых вод расположен ниже глубины промерзания, по упрощенной формуле

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{\bar{F}},$$

где  $d_0$  ~ параметр, принимаемый в зависимости от вида грунта. Для суглинков и глин  $d_0 = 0,23 \text{ м}/(^\circ\text{С-мес})^{0,5}$ ; супесей, песков мелких и пылеватых -  $0,28 \text{ м}/(^\circ\text{С-мес})^{0,5}$ ; песков гравелистых, крупных и средней крупности -  $0,30 \text{ м}/(^\circ\text{С-мес})^{0,5}$ ; крупнообломочных грунтов -  $0,34 \text{ м}/(^\circ\text{С-мес})^{0,5}$ .

При наличии в основании нескольких слоев грунта значение  $d_0$  определяется как средневзвешенное в пределах глубины промерзания.

Нормы допускают определение  $df_n$  по карте (рис. 2).

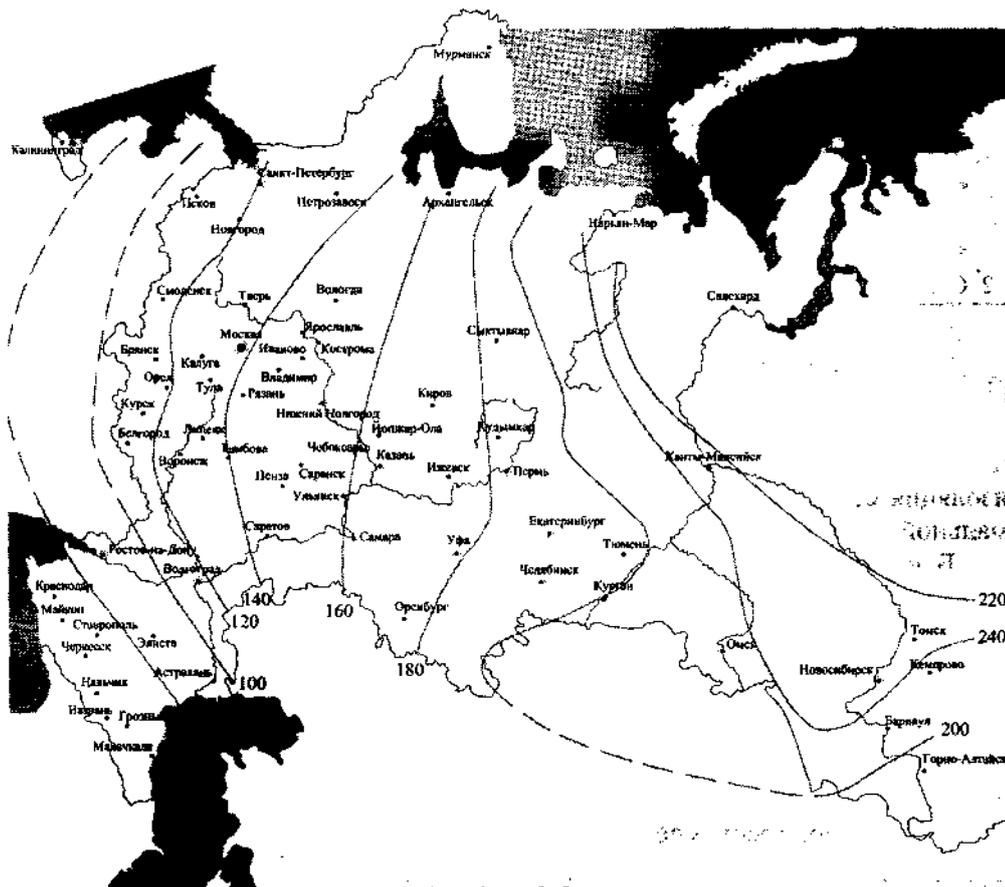


Рис. 2. Карта глубин сезонного промерзания грунтов

Необходимо иметь в виду, что карта составлена для суглинков и глин, для других грунтов значение глубины промерзания, найденное по ней, следует умножить на коэффициент, равный отношению параметра  $d_0$  для грунта, залегающего на площадке, к  $0,23 \text{ м}/(^\circ\text{Омес})^{0,5}$ .

При проектировании фундаментов находят расчетную глубину сезонного промерзания грунтов:

$$d_f = k_h d_{fn},$$

где  $k_h$  - коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения.

Для наружных и внутренних фундаментов неотапливаемых сооружений  $k_h = 1,1$

Значения  $k_h$  для наружных фундаментов отапливаемых зданий приведены в табл. 1. Табличные значения относятся к фундаментам, у которых расстояние от внешней грани стены до края фундамента менее 0,5 м. Если указанное расстояние составляет 1,5 м и более, значения коэффициента увеличивают на 0,1. При промежуточных значениях расстояния коэффициент  $k_h$  находят интерполяцией.

Значения коэффициента  $k_b$ 

Особенности сооружения	Температура воздуха в помещении, примыкающем к фундаменту, °С				
	0	5	10	15	>20
1. Без подвала с полами, устраиваемыми:	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
• по грунту	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
• на лагах по грунту	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7
• по утепленному цокольному	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4

Отметим, что снижение глубины промерзания грунта рядом со зданием происходит за счет тепловых потерь, т.е. обогрева прилегающего грунта в течение всего срока эксплуатации здания. Значения коэффициента  $k_b$ , перешли в последнюю редакцию норм из документов прежних лет, когда теплоизоляция стен подвала не выполнялась, а теплоизоляция полов была минимальной.

В настоящее время в связи с применением эффективной теплоизоляции приведенные значения коэффициента следует применять с большой осторожностью.

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 малонагруженных конструкций с раскрытием в них трещин. Для борьбы с промерзанием применяют временную теплоизоляцию, требуемое термическое сопротивление которой находят по формуле.

$$R = \frac{d_f^2 - d_{f1}^2}{2d_{f1}\lambda_f} - \frac{1}{\alpha_c},$$

где  $d_{f1}$  - допустимая глубина промерзания грунта под теплоизоляцией, может приниматься, например, как расстояние от пола подвала до подошвы фундамента, причем  $d_{f1} \neq 0$  коэффициент теплопроводности мерзлого грунта;  $\alpha_c$  - коэффициент теплоотдачи поверхности,  $\alpha_c = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

Зная величину  $R$ , находят толщину слоя  $\delta = \alpha \lambda_i$

### Пример

Найти нормативную глубину сезонного промерзания тугопластичного суглинка. Коэффициенты теплопроводности мерзлого (при  $T = -15^\circ\text{С}$ ) и талого суглинка составляют:  $\lambda_f = 1,80 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ,  $\lambda_{гт} = 1,52 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ . Объемная теплоемкость мерзлого суглинка  $c_{vf} = 2700 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$ . Средние значения среднемесячных температур воздуха на территории строительства в зимний период составляют:

Месяц	XI	XII	I	II	III	IV
Температура,	-4,1	-9,5	-12,9	-12,5	-8,0	-0,9

Продолжительность периода с отрицательными температурами (продолжительность зимы)  $180 \text{ сут} = 15,6 \cdot 10^6 \text{ с}$ .

### Решение.

Расчет индекса промерзания приведен в таблице:

Месяц	Число дней	$T, ^\circ\text{C}$	$\sum F, ^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$
XI	30	-4,1	123,0
XII	31	-9,5	294,5
I	31	-12,9	399,9
II	28	-12,5	350,0
III	31	-8,0	248,0
IV	30	-0,9	27,0
Итого		-47,9	1442,4

Средняя зимняя температура  $T_{\text{fm}} = -F/t_m = 1442,4/180 = -8,0 ^\circ\text{C}$ .

Температура начала замерзания суглинка  $T_{\text{bf}} = -0,2 ^\circ\text{C}$ .

Для температуры  $T = (-8,0 + 0,2)/2 = -3,9 \sim -4,0 ^\circ\text{C}$  берем характеристики мерзлого грунта из примера  $W = 0,45 - 0,19 = 0,086$ ,  $\lambda = 1,78 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $q_s = 76,31 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3$ .

Количество тепловой энергии, которую следует отвести для охлаждения грунта, когда на поверхности его температура меняется от  $T_{\text{fm}}$  до  $-8,0 ^\circ\text{C}$ , а на фронте промерзания остается равной  $T_{\text{bf}}$ .  $Q = -0,5 \cdot 2,7 \cdot 10^6 \cdot (-8,0 + 0,2) = 10,53 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3$ .

Суммируя, получаем  $q_z = (76,31 + 10,53) \cdot 10^6 = 86,84 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3$ .

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,78 \cdot (-0,2 + 8,0) \cdot 15,6 \cdot 10^6}{86,84 \cdot 10^6}} = 2,23 \text{ м.}$$

Вычисляем ту же величину по упрощенной формуле

$$d_{fn} = 0,23 \sqrt{47,9} = 1,59 \text{ м.}$$

Находим нормативную глубину промерзания суглинка:

Значения среднемесячных температур были приняты для г. Архангельска, где согласно карте, представленной на рис.2, 1,65 м.

### Пример

Для защиты основания строящегося здания от промерзания решено :пользовать временную теплоизоляцию из керамзитового гравия. Коэффициент теплопроводности мерзлого суглинка  $1,70 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , керамзитового гравия  $0,20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . нормативная глубина сезонного промерзания  $1,65 \text{ м}$ , допустимая глубина промерзания грунта основания под теплоизоляцией  $0,5 \text{ м}$ .

### Решение.

Находим требуемое термическое сопротивление и толщину слоя керамзитового гравия:

$$R = \frac{1,65^2 - 0,5^2}{2 \cdot 0,5 \cdot 1,78} - \frac{1}{23} = 1,35 \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{C)/Вт.}$$

Толщина слоя керамзитового гравия  $S = 1,35 \cdot 0,20 = 0,27 \text{ м}$ .

$$q_1 = q_v + (t_{th,c}/t_2 - 0,1) \cdot [c_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - c_f(T_0 - T_{bf})],$$

$$Q = k_m(0,25 - t_{th,c}/t_1) \cdot (T_0 - T_{bf}) \sqrt{\lambda_f c_f t_{th,c}}$$

В приведенных формулах:

$T$  ( $I_m$  и  $I, b_m$  - средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур и продолжительность этого периода;  $\wedge = 1,3 \cdot 10^7$  с = 3600 ч,  $/2 = 2,7 \cdot 10^7$  с = 7500 ч;  $T_0$  - среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта;  $k_m$  - коэффициент,

принимаемый для песчаных грунтов равным единице, для глинистых - по рис. 10.13 в зависимости от объемной теплоемкости  $c_{v,}$  и средней теплоемкости

Величина  $\wedge_v$  определяется при температуре 0,57\

Нормативную глубину оттаивания двухслойного основания определяют по формуле

где  $B$  - толщина слоя грунта 1, залегающего с поверхности;  $4A$  - нормативная глубина оттаивания основания, вся толща которого сложена грунтом 1 или грунтом 2 соответственно.

$$d_{th} = d_{th2} + h_1(1 - d_{th2}/d_{th1}),$$

Следует заметить, что в приведенной методике расчета не учитывается влияние растительного покрова, отражающей способности поверхности и других факторов.

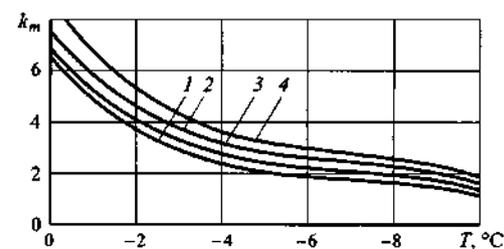


Рис. 10.13. Значения коэффициента  $k_m$  [10] для глинистых грунтов при  $c_{v,}$  и  $c_{с,у}$ , кДж/(м<sup>3</sup>°С):

1 - 2500. 2 - 2100. 3 - 1700. 4 - 1300.

**Пример.** Найти нормативную глубину сезонного оттаивания суглинка под песчаной насыпью высотой 1,2 м. Среднегодовая температура суглинка  $T_0 = -8,0^\circ\text{C}$ . Физические и теплофизические свойства песка и суглинка приведены в таблице.

Грунт	$\rho >$ г/см <sup>3</sup>	$\rho < >_3$ г/см <sup>3</sup>	РГ	Вт/(м- °С)	Вт/(м- °С)	$c_{л/к-}$ Дж/(м <sup>3</sup> - °С)	Дж/(м <sup>3</sup> - °С)
1. Песок	1,71	1,60	0,07	1,20	1,37	1,67-	1,43-
2.	2,07	1,70	0,22	1,52	1,78	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> 2,7-

Средние значения среднемесячной температуры воздуха составляют:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$T, ^\circ\text{C}$	-17,8	-19,2	-16,6	-9,5	-3,4	2,8	8,9	8,8	4,9	-2,2	-9,5	-13,9

Продолжительность зимнего периода  $I_m^\wedge = 238$  сут, летнего -  $I_{лm} = 127$  сут.

**Решение.** Расчет индексов промерзания и оттаивания

приведен в таблице:

Месяц	Число дней	$T, ^\circ\text{C}$	$u_n, ^\circ\text{C-сут}$	$ \wedge , ^\circ\text{C-сут}$
1	2	3	4	5
I	31	-17,8		551,8
II	28	-19,2		537,6
III	31	-16,6		514,6

1	2	3	4	5
IV	30	-9,5		285,0
V	31	-3,4		105,4
VI	30	2,8	84,0	
VII	31	8,9	275,9	
VIII	31	8,8	272,8	
IX	30	4,9	147,0	
X	31	-2,2		682,0
XI	30	-9,5		285,0
XII	31	-13,9		430,9
Итого			779,7	3392,3

Продолжительность периода с положительной температурой  $I_{Ikm} = 127$  сут = 3048 ч =  $10,9710^6$  с, отсюда  $I_{IKc} = 1,15 \cdot 3048 + 0,1 \cdot 3600 = 3865,2$  ч =  $13,91 \cdot 10^6$  с.

Средняя температура теплого периода года  $T_{Ikm} = I_{II}, u_m = 779,7/127 = 6,14$  °С, отсюда  $T_{IKc} = 1,4 - 6,14 + 2,4 = 10,9$  °С.

Проведем расчет глубины оттаивания основания, сложенного суглинком (грунт 2).

Температура начала замерзания суглинка  $T_b^{\wedge} = -0,2$  °С.

Вычислим температуру  $T = (-8,0 + 0,2)(3865,2/3600 - 0,22) = -6,7$  °С; тогда  $0,57 = -3,35$  °С.

Содержание незамерзшей воды при  $T = -3,35$  °С  $\gamma^{\wedge} = 0,4560,19 = 0,087$ .

Теплота фазовых переходов  $\partial_y = 335 - 1700 \cdot (0,22 - 0,08) = 75,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>.

$$q_1 = 75,7 \cdot 10^6 + (3865,2/7500 - 0,1) \cdot [3,18 \cdot 10^6(10,9 + 0,2) - 2,7 \cdot 10^6(-8 + 0,2)] = 99,1 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

$$Q = 1,8(0,25 - 3865,2/3600) \cdot (-8,0 + 0,2) \sqrt{1,78 \cdot 2,7 \cdot 10^6 \cdot 13,91 \cdot 10^6} = -0,14 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$$

Находим глубину оттаивания:

$$d_{th2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,52 \cdot (10,9 + 0,2) \cdot 13,91 \cdot 10^6}{99,1 \cdot 10^6} + \left(\frac{94,14 \cdot 10^6}{2 \cdot 98,0 \cdot 10^6}\right)^2} - \frac{94,14 \cdot 10^6}{2 \cdot 98,0 \cdot 10^6} = 1,75 \text{ м.}$$

Проведя аналогичные вычисления для основания, сложенного песком (грунт 1), при  $T_b = 0$ ,  $\gamma_{жв} = 0$  нашли глубину сезонного оттаивания  $a_{I1} = 2,43$  м. Нормативная глубина оттаивания двухслойного основания:

$$a_{Ik} = 1,75 + 1,2(1 - 1,75/2,43) = 2,09 \text{ м. Нормативная глубина}$$

оттаивания суглинка под песчаной насыпью  $2,09 - 1,2 = 0,89$  м.

### Сезонное оттаивание многолетнемерзлого грунта

Нормативная глубина сезонного оттаивания многолетнемерзлого грунта

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th,c} - T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \frac{Q}{2q_1},$$

где  $T_{hcc}$  - расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С, вычисляемая по формуле  $T_{hcc} = 1,4 T_{Ikm} + 2,4$ ;  $t_{th,c}$  - расчетный период положительных температур,  $t_{th,c} = 1/15 \cdot \lambda_{th,c} + 0,1/k$  вычисляется по формуле

$$Q = k_m(0,25 - t_{th,c}/t_1) \cdot (T_0 - T_{bf}) \sqrt{\lambda_f c_f t_{th,c}}.$$

В приведенных формулах:

$T_{\text{нсс}}$  и  $t_{b,m}$  - средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур и продолжительность этого периода;  $t = 1,3 \cdot 10^7 \text{ с} = 3600 \text{ ч}$ ,  $t/2 = 2,7 \cdot 10^7 \text{ с} = 7500 \text{ ч}$ ;  $T_0$  - среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта;  $\kappa_m$  - коэффициент, принимаемый для песчаных грунтов равным единице, для глинистых - по рис.3 в зависимости от объемной теплоемкости и средней температуре грунта

$$\bar{T} = (T_0 - T_{bf}) \cdot (t_{th,c} / t_1 - 0,22).$$

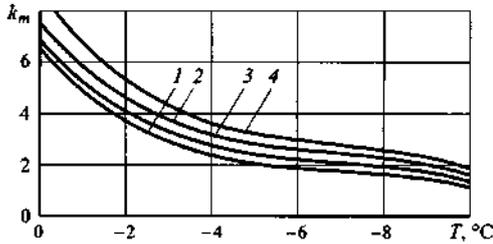


Рис. 3. Значения коэффициента  $\kappa_m$  [10] для глинистых грунтов при  $c_{с,у}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°С):

1-2500.2-2100.3-1700.4-1300

Следует заметить, что в приведенной методике расчета не учитывается влияние растительного покрова, отражающей способности поверхности и других факторов.

Величина  $q_v$  определяется при температуре  $0,5T$

Нормативную глубину оттаивания двухслойного основания определяют по формуле

$$d_{th} = d_{th2} + h_1(1 - d_{th2}/d_{th1}),$$

где  $h_j$  - толщина слоя грунта  $l$ , залегающего с поверхности;  $d_m$  - нормативная глубина оттаивания основания, вся толща которого сложена грунтом или грунтом соответственно.

Следует заметить, что в приведенной методике расчета не учитывается влияние растительного покрова, отражающей способности поверхности и других факторов.

### Пример.

Найти нормативную глубину сезонного оттаивания суглинка под песчаной насыпью высотой 1,2 м. Среднегодовая температура суглинка  $T_0^7 = -8,0^\circ\text{C}$ . Физические и теплофизические свойства песка и суглинка приведены в таблице.

Грунт	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	$W$	Вт/( м·°С)	Вт/( м·°С)	$c_{л/к-}$ Дж/( м <sup>3</sup> ·°С)	Дж/( м <sup>3</sup> ·°С)
1.	1,71	1,60	0,07	1,20	1,37	1,67	$1,43 \cdot 10^6$
2.	2,07	1,70	0,22	1,52	1,78	$-10^6$	$2,7 \cdot 10^6$

Средние значения среднемесячной температуры воздуха составляют:

М	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$T, ^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	2	8	8	4	-	-

Продолжительность зимнего периода 238 сут, летнего 127 сут.

**Решение.** Расчет индексов промерзания и оттаивания приведен в таблице:

Месяц	Число	$T, ^\circ\text{C}$	$u_n, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$	$ \wedge , ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$
1	2	3	4	5
I	31	-17,8		551,8
II	28	-19,2		537,6
III	31	-16,6		514,6

## Примеры расчетов ограждений котлованов

### Расчет консольной стенки на устойчивость

Рассмотрим простейшую задачу - определим необходимую длину заделки консольной шпунтовой стенки из условия обеспечения устойчивости ограждения. В качестве инженерно-геологических данных примем инженерно-геологический разрез, изображенный на рис. 4. Физико-механические<sup>5</sup> свойства грунта приведены в табл. 4.

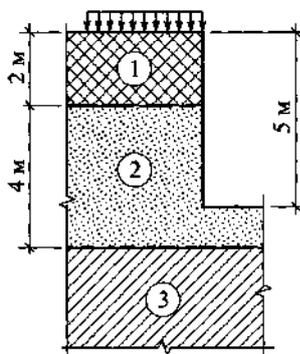


Таблица 4.

№ ИГЭ	Тип грунта	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\phi$ , град	$c$ , кПа
1	Насыпной	18	10	0
2	Песок	19	20	1
3	Суглинок	21	20	25

Ограждением будет являться металлический шпунт.

Величина нагрузки на рис.4., составляет 10 кН/м<sup>2</sup>

Зададимся начальной длиной шпунтовой стенки  $l_{ш} = 12$  м, тогда глубина заделки ограждения ниже дна котлована составит 7 м.

Определим осредненные значения объемного веса, угла внутреннего трения и сцепления в пределах глубины погружения шпунтовой стенки  $l_{ш}$ , м:

$$\gamma_{ср} = \frac{2 \cdot 18 + 4 \cdot 19 + 6 \cdot 21}{12} = 19,83 \text{ кН/м}^3;$$

$$\phi_{ср} = \frac{2 \cdot 10 + 10 \cdot 20}{12} = 18,33^\circ; \quad c_{ср} = \frac{2 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 6 \cdot 25}{12} = 12,83 \text{ кН/м}^2.$$

Вычислим осредненные величины объемного веса, угла внутреннего трения и сцепления грунта в пределах глубины забивки

$$\gamma'_{ср} = \frac{1 \cdot 19 + 6 \cdot 21}{7} = 20,71 \text{ кН/м}^3;$$

$$\phi'_{ср} = 20^\circ; \quad c'_{ср} = \frac{1 \cdot 1 + 6 \cdot 25}{7} = 21,57 \text{ кН/м}^2.$$

Определим величину активного давления грунта и опрокидывающего момента. Так как ограждением будет являться металлический шпунт, то стенка считается гладкой,  $\delta = 0$ , а так как стенка вертикальна, а поверхность грунта горизонтальна, то коэффициент активного давления  $K_a$  можно считать по упрощенной формуле

$$K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_{\text{ср}}/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 18,33/2) = 0,52;$$

$$\sigma_{a,0} = (q + \gamma_{\text{ср}}z)K_a - 2c_{\text{ср}}\sqrt{K_a} = (10 + 19,83 \cdot 0) \cdot 0,52 - 2 \cdot 12,83 \cdot \sqrt{0,52} =$$

$$= -13,3 = 0 \text{ кПа.}$$

Понятно, что давление на ограждение не может быть отрицательным, поэтому принимается значение, равное нулю. Такая ситуация возникает в связных грунтах, когда удельное сцепление грунта достаточно велико и вычитаемая часть выражения превышает уменьшаемую.

$$\sigma_a = (10 + 19,83 \cdot 12) \cdot 0,52 - 2 \cdot 12,83 \cdot \sqrt{0,52} = 110,44 \text{ кПа};$$

$$E_a = 0,5 \cdot 12 \cdot 110,44 = 662,64 \text{ кН};$$

$$r_a = 12/3 = 4 \text{ м}; \quad M_a = 662,64 \cdot 4 = 2650,56 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Определим величину пассивного давления грунта и удерживающего момента

$$K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi'_{\text{ср}}/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + 20^\circ/2) = 2,04;$$

$$\sigma_{p,0} = 2 \cdot c'_{\text{ср}} \cdot \sqrt{K_p} = 2 \cdot 21,57 \cdot \sqrt{2,04} = 61,62 \text{ кПа};$$

$$\sigma_p = 20,71 \cdot 7 \cdot 2,04 + 2 \cdot 21,57 \cdot \sqrt{2,04} = 357,36 \text{ кПа};$$

$$E_p = 0,5 \cdot 7 \cdot (61,62 + 357,36) = 1466,4 \text{ кН};$$

$$r_p = \frac{1}{3} \cdot \frac{2\sigma_{p,0} + \sigma_p}{\sigma_{p,0} + \sigma_p} = \frac{7}{3} \cdot \frac{2 \cdot 61,62 + 357,36}{61,62 + 357,36} = 2,68 \text{ м};$$

$$M_p = 1466,4 \cdot 2,68 = 3930,03 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Найдем отношение удерживающего момента к опрокидывающему:

Таким образом, условие выполнено, следовательно, шпунт подобран правильно. В случае невыполнения условия следует увеличить глубину забивки и выполнить перерасчет.

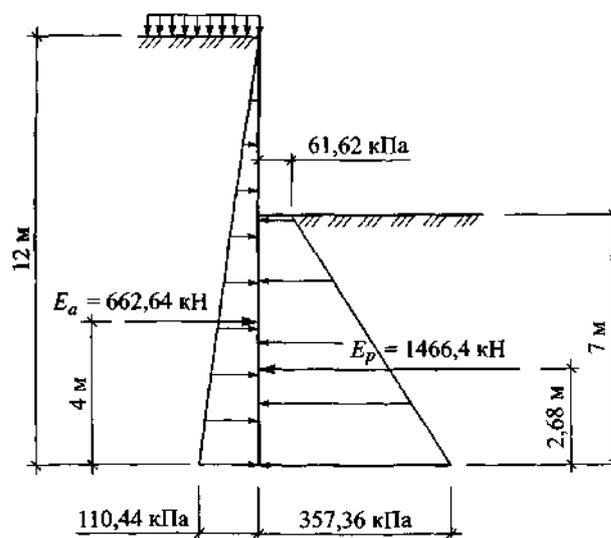


Рис. 5. Схема к расчету на устойчивость

## Расчет раскрепленной стенки на устойчивость

Инженерно-геологические данные возьмем те же, что и в первом примере. Нагрузку по бровке котлована примем также 10 кПа. Стенка раскрепляется в уровне дневной поверхности.

Зададимся начальной длиной шпунтовой стенки 8 м, тогда глубина заделки ограждения ниже дна котлована составит 3 м.

Определим осредненные значения объемного веса, угла внутреннего трения и сцепления в пределах глубины погружения шпунтовой стенки

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot 18 + 4 \cdot 19 + 2 \cdot 21}{8} = 19,25 \text{ кН/м}^3;$$
$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot 10 + 6 \cdot 20}{8} = 17,5^\circ; \quad c_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 25}{8} = 6,75 \text{ кН/м}^2.$$

Вычислим осредненные величины объемного веса, угла внутреннего трения и сцепления грунта в пределах глубины забивки  $S$ .

$$\gamma'_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 19 + 2 \cdot 21}{3} = 20,33 \text{ кН/м}^3;$$
$$\varphi'_{\text{ср}} = 20^\circ; \quad c'_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 1 + 2 \cdot 25}{3} = 17 \text{ кН/м}^2.$$

Определим величину активного давления грунта и опрокидывающего момента:

$$K_a = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi_{\text{ср}}/2) = \text{tg}^2(45^\circ - 17,5^\circ/2) = 0,54;$$
$$\sigma_{a,0} = (q + \gamma_{\text{ср}}z)K_a - 2c_{\text{ср}}\sqrt{K_a} = (10 + 19,25 \cdot 0) \cdot 0,54 - 2 \cdot 6,75 \cdot \sqrt{0,54} =$$
$$= -4,52 = 0 \text{ кПа.}$$

Давление на ограждение не может быть отрицательным, поэтому принимается значение, равное нулю. Такая ситуация возникает в связных грунтах, когда удельное сцепление грунта достаточно велико и вычитаемая часть выражения превышает уменьшаемую.

$$\sigma_a = (10 + 19,83 \cdot 8) \cdot 0,54 - 2 \cdot 6,75 \cdot \sqrt{0,54} = 78,64 \text{ кПа};$$
$$E_a = 0,5 \cdot 8 \cdot 78,64 = 314,56 \text{ кН};$$
$$r_a = 8 - \frac{8}{3} = 5,33 \text{ м};$$
$$M_a = 314,56 \cdot 5,33 = 1676,6 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

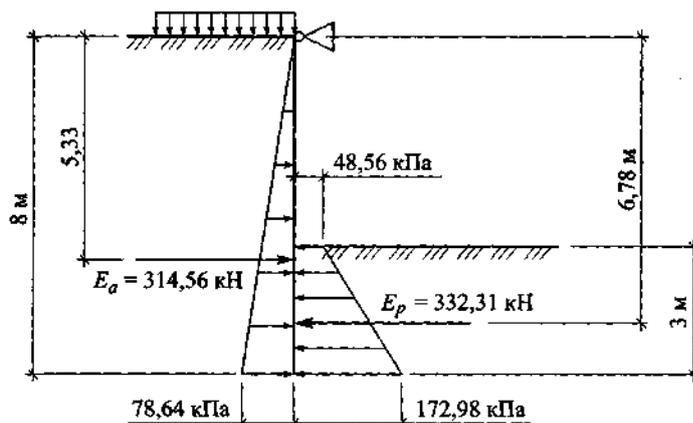


Рис. 6. Схема к примеру расчета на устойчивость

Определим величину пассивного давления грунта и удерживающего момента:

$$K_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi'_{\text{cp}}/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + 20^\circ/2) = 2,04;$$

$$\sigma_{p,0} = 2 \cdot c'_{\text{cp}} \cdot \sqrt{K_p} = 2 \cdot 17 \cdot \sqrt{2,04} = 48,56 \text{ кПа};$$

$$\sigma_p = 20,33 \cdot 3 \cdot 2,04 + 2 \cdot 17 \cdot \sqrt{2,04} = 172,98 \text{ кПа};$$

$$E_p = 0,5 \cdot 3 \cdot (48,56 + 172,98) = 332,31 \text{ кН};$$

$$r_p = l_w - \frac{t}{3} \cdot \frac{2\sigma_{p,0} + \sigma_p}{\sigma_{p,0} + \sigma_p} = 8 - \frac{3}{3} \cdot \frac{2 \cdot 48,56 + 172,98}{48,56 + 172,98} = 6,78 \text{ м};$$

$$M_p = 332,31 \cdot 6,78 = 2253,06 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Найдем отношение удерживающего момента к опрокидывающему:

$$\frac{M_p}{M_a} = \frac{2253,06}{1676,6} = 1,34 > 1,2.$$

Таким образом, условие выполнено, следовательно, шпунт подобран правильно.

$$\frac{M_p}{M_a} = \frac{3930,03}{2650,56} = 1,48 > 1,2.$$

### Расчет методом упругой линии

В данной задаче определим необходимую длину заделки консольной и раскрепленной шпунтовой стенки, а также усилия, действующие в ограждении и распорке. В качестве инженерно-геологических данных примем разрез, изображенный на рис. 7 Физико-механические свойства грунта приведены в табл. 5. Ограждением будет являться металлический шпунт.

Таблица 5

## Исходные данные

№ игэ	Тип грунта	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\Phi$ , град	$c$ , кПа
1	Песок	19	30	1
2	Глина	21	20	25

Величина нагрузки на рис. 7 составляет 20 кН/м<sup>2</sup>.

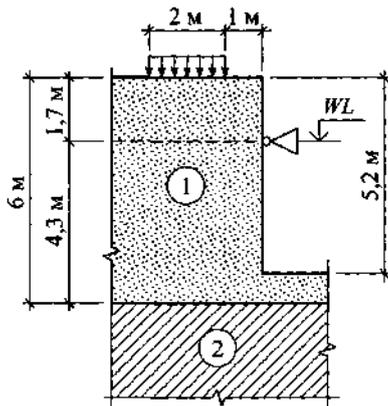


Рис. 7 Расчетная схема

Определение активного и пассивного давлений, действующих на ограждение, а также построение веревочного многоугольника будут одинаковыми как для случая консольного, так и раскрепленного ограждения.

Глина является естественным водоупором.

Вначале определим диапазон глубин, на которых на ограждение передается действие нагрузки. Определим величину угла  $\theta$ :

$$\theta = 45^\circ - \varphi/2 = 45^\circ - 30^\circ/2 = 30^\circ.$$

Выполним построения и по чертежу определим необходимые размеры. Определим активные и пассивные давления в характерных точках. Вычислим коэффициенты активного  $K_a$  и пассивного  $K_p$  давлений для обоих ИГЭ:

$$K_{a1} = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_1/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 30^\circ/2) = 0,33;$$

$$K_{a2} = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_2/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 20^\circ/2) = 0,49;$$

$$K_{p1} = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi_1/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + 30^\circ/2) = 3,0;$$

$$K_{p2} = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi_2/2) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + 20^\circ/2) = 2,04.$$

В данном расчете вес грунта в водонасыщенном состоянии принят равным 9,5 кН/м<sup>3</sup>.

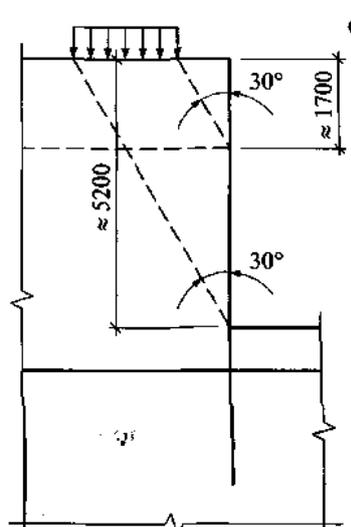
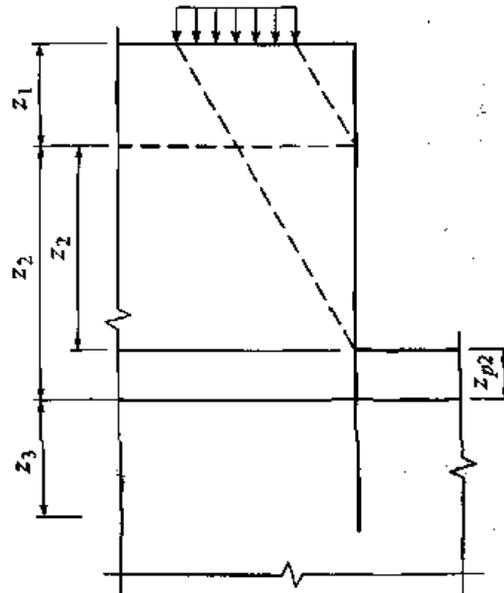


Рис. 8. Определение диапазона глубин влияния нагрузки по бровке



Вычислим активные давления:

$$\sigma_{ah=0} = 0;$$

$$\sigma_{ah=1,7} = \gamma_1 z_1 K_{a1} - 2c_1 \sqrt{K_{a1}} = 19 \cdot 1,7 \cdot 0,33 - 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,33} = 9,51 \text{ кПа};$$

$$\sigma'_{ah=1,7} = (q + \gamma_1 z_1) K_{a1} - 2c_1 \sqrt{K_{a1}} = (20 + 19 \cdot 1,7) \cdot 0,33 - 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,33} = 16,11 \text{ кПа};$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ah=5,2} &= (q + \gamma_1 z_1 + \gamma_{1sb} z_2) K_{a1} - 2c_1 \sqrt{K_{a1}} + \gamma_w z_2 = \\ &= (20 + 19 \cdot 1,7 + 9,5 \cdot 3,5) \cdot 0,33 - 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,33} + 10 \cdot 3,5 = 62,08 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{ah=5,2} &= (\gamma_1 z_1 + \gamma_{1sb} z_2) K_{a1} - 2c_1 \sqrt{K_{a1}} + \gamma_w z_2 = \\ &= (19 \cdot 1,7 + 9,5 \cdot 3,5) \cdot 0,33 - 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,33} + 10 \cdot 3,5 = 55,48 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ah=6} &= (\gamma_1 z_1 + \gamma_{1sb} z'_2) K_{a1} - 2c_1 \sqrt{K_{a1}} + \gamma_w z'_2 = \\ &= (19 \cdot 1,7 + 9,5 \cdot 4,3) \cdot 0,33 - 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,33} + 10 \cdot 4,3 = 65,99 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{ah=6} &= [\gamma_1 z_1 + (\gamma_{1sb} + \gamma_w) z'_2] K_{a2} - 2c_2 \sqrt{K_{a2}} = \\ &= [19 \cdot 1,7 + (9,5 + 10) \cdot 4,3] \cdot 0,49 - 2 \cdot 25 \cdot \sqrt{0,49} = 21,91 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{ah=8} &= [\gamma_1 z_1 + (\gamma_{1sb} + \gamma_w) z'_2 + \gamma_2 z_3] K_{a2} - 2c_2 \sqrt{K_{a2}} = \\ &= [19 \cdot 1,7 + (9,5 + 10) \cdot 4,3 + 21 \cdot 2] \cdot 0,49 - 2 \cdot 25 \cdot \sqrt{0,49} = 42,49 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Вычислим пассивные давления. При производстве котлована вместе с разработкой грунта проводится откачка воды, таким образом, отметка уровня воды в котловане равна отметке дна котлована.

$$\sigma_{p h=5,2} = 2c_1 \sqrt{K_{p1}} = 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{3,0} = 3,46 \text{ кПа};$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p h=6,0} &= \gamma_{1sb} z_{p2} K_{p1} + 2c_1 \sqrt{K_{p1}} + \gamma_w z_{p2} = \\ &= 9,5 \cdot 0,8 \cdot 3,0 + 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{3,0} + 10 \cdot 0,8 = 34,26 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{p h=6,0} &= (\gamma_{1sb} + \gamma_w) z_{p2} K_{p2} + 2c_2 \sqrt{K_{p2}} = \\ &= (9,5 + 10) \cdot 0,8 \cdot 2,04 + 2 \cdot 25 \cdot \sqrt{2,04} = 103,24 \text{ кПа}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{p h=8,0} &= [(\gamma_{1sb} + \gamma_w) z_{p2} + \gamma_2 z_3] K_{p2} + 2c_2 \sqrt{K_{p2}} = \\ &= [(9,5 + 10) \cdot 0,8 + 21 \cdot 2] \cdot 3,0 + 2 \cdot 25 \cdot \sqrt{3,0} = 188,92 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Далее строим суммарную эпюру напряжений 8, которую делим на полосы шириной не более одного метра. Вычисления сведены в табл. 6

Таблица 6

Определение площадей отдельных участков суммарной эпюры давлений

я,, м	кПа	кПа	Ср 0,1,	Р к, Б	кПа	"о к, "р к, Б	кН
0,85	0,00	4,75			0,00	4,75	2,02
0,85	4,75	9,50			4,75	9,50	6,06
0,875	16,11	27,60			16,11	27,60	19,12
0,875	27,60	39,09			27,60	39,09	29,18
0,875	39,09	50,58			39,09	50,58	39,23
0,875	50,58	62,07			50,58	62,07	49,28
0,8	55,48	65,98	3,46	34,26	52,02	31,72	33,50
1,0	21,91	32,20	103,24	146,08	-81,33	-113,88	97,61
1,0	32,20	42,49	146,08	188,92	-113,88	-146,43	130,16
1,0	42,49	52,78	188,92	231,76	-146,43	-178,98	162,71
1,0	52,78	63,07	231,76	274,60	-178,98	-211,53	195,26

Вычисляем величины площадей полосок-трапеций по формуле

$$P_i = 0,5h_i(\sigma_i + \sigma_{i+1}).$$

Для упрощения расчета будем прикладывать силы Р, не в центре тяжести трапеции, а посередине каждой полоски (рис. 13.53, б), после чего строим силовой многоугольник. Для этого в масштабе рисуем силу Р, далее от нее вправо откладываем силу Р<sub>2</sub> и т.д. Направление силы в силовом многоугольнике соответствует направлению на рис. 8, поэтому начиная с силы будут откладываться влево.

Назначаем полюс, точку О и от него к концам отрезков сил строим лучи от О-ОдоО-11.

Строим веревочный многоугольник по правилам.

Далее расчет для консольной и раскрепленной стенок различен.

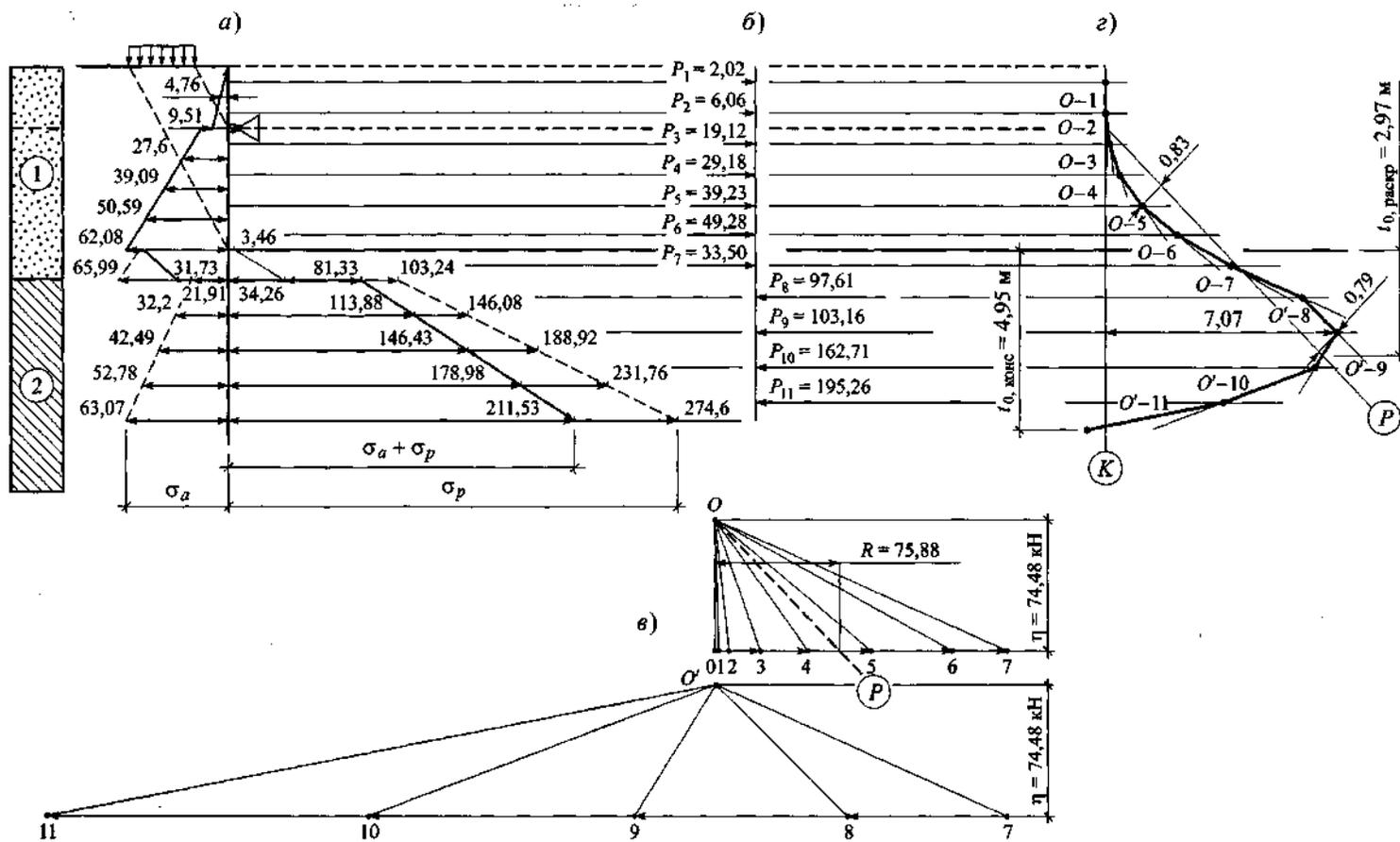


Рис. 9 Графоаналитический расчет для консольной стенки:

*a* - построение эпюр активного, пассивного и суммарного давлений; *б* - замена распределенной нагрузки системой сосредоточенных сил; *в* - построение силового многоугольника; *г* - построение веревочного многоугольника

*Определение глубины заделки и моментов в консольном ограждении*

В случае консольной стенки замыкающая веревочного многоугольника должна быть продолжением первого отрезка веревочного многоугольника (в нашем случае замыкающая, как и первый отрезок, направлена вертикально). Проводим замыкающую веревочного многоугольника (луч  $K$  на рис. 9, г) и определяем глубину погружения шпунта:

$$t_0 = 4,95 \text{ м};$$

$$t = 1,1 \cdot t_0 = 1,1 \cdot 4,95 = 5,45 \text{ м};$$

$$l_{\text{шпунта}} = H_k + t = 5,2 + 5,45 = 10,65 \approx 10,7 \text{ м}.$$

Максимальный изгибающий момент в консольной стенке:

$$M_{\text{max}} = \eta \cdot \gamma_{\text{max}} = 74,48 \cdot 7,07 = 526,57 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

*Определение глубины заделки и моментов в раскрепленном ограждении*

В случае раскрепленной стенки замыкающая веревочного многоугольника проводится из точки пересечения соответствующего отрезка с линией действия распорного усилия с таким расчетом, чтобы максимальное значение в верхней части было на 5... 10% больше, чем максимальная величина в нижней части.

Проводим замыкающую веревочного многоугольника (луч  $P$  на рис. 9, з) и определяем

$$t_0 = 2,97 \text{ м};$$

$$t = 1,2 \cdot t_0 = 1,2 \cdot 2,97 = 3,56 \text{ м};$$

$$l_{\text{шпунта}} = H_k + t = 5,2 + 3,56 = 8,76 \approx 8,8 \text{ м}.$$

Максимальный изгибающий момент в консольной стенке:

$$M_{\text{max}} = \eta \cdot \gamma_{\text{max}} = 74,48 \cdot 0,83 = 62,08 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Усилие в распорке:  $K = /B, \text{бй кН}.$

С учетом корректирующих коэффициентов

$$M_{\text{расч}} = M_{\text{max}} / 1,35 = 62,08 / 1,35 = 45,98 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$R_{\text{расч}} = R \cdot 1,4 = 75,88 \cdot 1,4 = 106,23 \text{ кН}.$$

глубину погружения шпунта:

## Список литературы

1. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика / Учебник для ВУЗов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. МГГУ, 2008. – 438 с.
2. Каспарьян Э.В., Козырев А.А., Иофис М.А., Макаров А.Б. Геомеханика / Учеб. Пособие. – М.: Высш. шк., 2006. – 503 с.
3. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты: (включая специальный курс инженерной геологии) : [учебник для вузов по специальности "Промышленное и гражданское строительство"] / Далматов Б. И. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 2008. - 415с.: с.