

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра оснований, фундаментов, динамики сооружений  
и инженерной геологии

## **ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**

Учебно-методическое пособие к выполнению расчетно-графической работы по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», направленность (профиль) «Автомобильные дороги» на тему:

«Расчет устойчивости и деформативности основания насыпи  
земляного полотна»

Казань, 2015

Составитель: ХАСАНОВ Рубис Раисович

Основания и фундаменты: Учебно-методическое пособие к выполнению расчетно-графической работы по расчету устойчивости и деформативности основания насыпи земляного полотна по направлению 08.03.01 «Строительство», направленность (профиль) «Автомобильные дороги». КГАСУ. Сост. Р.Р.Хасанов. Казань, 2015. –36с.

В состав задач включены некоторые из наиболее распространенных задач, встречающиеся в практике проектирования автомобильных дорог в случаях строительства дорог на слабых и неустойчивых основаниях. Приведены числовые примеры решения задач.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Ф.С.Замалиев

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>1. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ..</b>	<b>4</b>
<b>2. ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ.....</b>	<b>5</b>
2.1 . ЗАДАЧА №1. УСТОЙЧИВОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАСЫПИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ВОЗВЕДЕННОГО НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ .....	5
2.1.1. Задача №1а. Проверка устойчивости основания насыпи .....	5
2.1.2. Задача №1б. Расчет конечной стабилизированной осадки основания насыпи .....	6
<b>3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ .....</b>	<b>9</b>
3.1. ЗАДАЧА №1 .....	9
3.1.1. Задача №1а. Проверка устойчивости основания насыпи .....	10
3.1.1.1. Определение расчетной и безопасной нагрузки на основание для условий быстрой отсыпки насыпи .....	10
3.1.1.2. Определение расчетной и безопасной нагрузки на основание для случая медленной отсыпки насыпи по методу предварительной консолидации .....	12
3.2.1.3. Определение типа основания насыпи.....	13
3.1.2. Задача №1б. Расчет конечной стабилизированной осадки основания насыпи.....	14
<b>4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ .....</b>	<b>17</b>
4.1. ЗАДАЧА №1а .....	17
4.2. ЗАДАЧА №1б .....	21
 ЛИТЕРАТУРА .....	 31
<i>Приложение 1. Графики функций <math>\beta</math>.....</i>	<i>32</i>
 <i>Приложение 2. Номограмма Остерберга для определения сжимающих напряжений от нагрузки, меняющейся по закону прямой.....</i>	 <i>33</i>

## ВВЕДЕНИЕ

В расчетно-графическую работу включены некоторые из наиболее важных задач, позволяющие студентам на практике закрепить, систематизировать и более глубоко усвоить теоретические положения курса.

Поэтому набор задач в расчетно-графической работе составлен таким образом, чтобы вооружить студента основными теоретическими знаниями, необходимыми в случаях строительства дорог в сложных и неблагоприятных условиях, на слабых и неустойчивых основаниях.

Приведены примеры решения задач для облегчения их самостоятельного решения и оформления.

Расчетно-графическая работа выполняется по индивидуальному заданию, соответствующему трехзначному шифру, который задается преподавателем.

### 1. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Выполненная и оформленная расчетно-графическая работа должна представлять собой пояснительную записку объемом 15-20 листов формата А4 (297×210 мм) с чертежами. Чертежи и схемы включаются в состав пояснительной записки и должны быть выполнены карандашом на миллиметровой бумаге либо с использованием компьютерной графики.

В пояснительной записке приводится подробное описание решений задач в соответствии с рекомендованной последовательностью. Расчет должен производиться в системе СИ и сопровождаться схемами и эскизами. Записка пишется на лицевой стороне листа. Схемы и эскизы подшиваются. Страницы должны быть пронумерованы.

Чертежи должны содержать следующее:

1. Схему насыпи с указанием всех заданных параметров: высоты, ширины по верху, ширины по низу, заложения откоса, физико-механических свойств насыпи и слоев основания насыпи, мощности слоев основания насыпи.
2. 4 схемы для расчета конечной осадки основания по методу послойного суммирования.
3. Графики компрессионной зависимости для каждого слоя грунта основания.
4. График для определения истинных значений осадки и нагрузки на основание.

## 2. ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

### 2.1. ЗАДАЧА №1. УСТОЙЧИВОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАСЫПИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ВОЗВЕДЕННОГО НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

#### 2.1.1. Задача №1а

##### Проверка устойчивости насыпи

Насыпи, возведенные на слабых основаниях, могут значительно просесть из-за уплотнения грунта основания и его выжимания в стороны из-под насыпи. Деформации чаще всего происходят в период строительства или вскоре после возведения насыпи, а иногда после возведения во время эксплуатации при длительной стоянке тяжелых транспортных средств.

Если предельное (безопасное) давление от насыпи  $P_{\text{без}}$  больше, чем расчетная нагрузка  $P_{\text{расч}}$ , то при определенной величине осадки основания, вызванной погружением насыпи в слабый грунт за счет его бокового выжимания, установится состояние предельного равновесия.

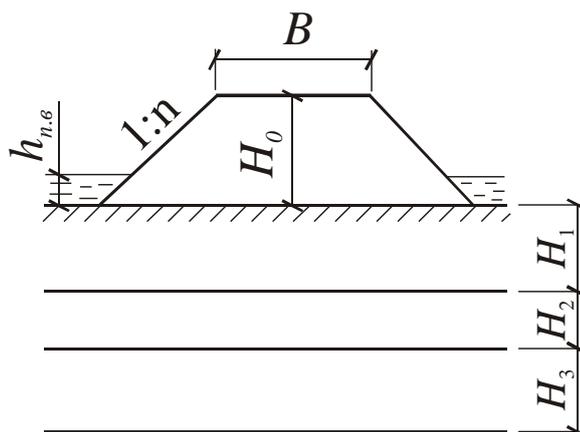


Рис.1. Схема насыпи на слабом основании

Необходимо установить степень обеспеченности устойчивости по величине коэффициента безопасности:

$$k_{\text{без}} = \frac{P_{\text{без}}}{P_{\text{расч}}}.$$

В том случае, если в результате расчета окажется, что  $k_{\text{без}} < 1$ , необходимо установить такую высоту насыпи, при которой  $k_{\text{без}} \geq 1$ .

## 2.1.2. Задача №16

### Расчет конечной стабилизированной осадки основания насыпи

При обеспеченной устойчивости основания (I и II тип основания) необходимо произвести расчет его конечной стабилизированной осадки под воздействием внешних нагрузок от насыпи с использованием графиков Остерберга.

Таблица 1

Исходные данные для задачи №1

Наименование характеристик	Цифры шифра задания				
	1	2	3	4	5
Проектная высота насыпи $H_0$ , м (по первой цифре шифра)	5	3,5	3,75	4	4,5
Ширина насыпи поверху $B$ , м (по второй цифре шифра)	12	35	28,5	27,5	15
Крутизна откосов насыпи 1: $n$ , (по третьей цифре шифра)	1:2	1:1,75	1:2	1:1,5	1:1,75
Удельный вес грунта насыпи $\gamma_n$ , кН/м <sup>3</sup>	19,0	20	19,8	19,5	20,5
Удельный вес частиц грунта $\gamma_{sn}$ , кН/м <sup>3</sup>	26,4	26,9	26,6	26,5	27
Коэффициент пористости насыпи $e_n$ (по первой цифре шифра)	0,65	0,6	0,56	0,65	0,58
Мощность слоев грунта основания насыпи, м (по второй цифре шифра)					
Торф – $H_1$	4,0	5,0	6,0	5,5	4,5
Пылеватый песок – $H_2$	12	13	8	10	8
Полутвердый суглинок – $H_3$	18	16	14	15	14

Основные физические характеристики грунтов основания: (по третьей цифре шифра)	1	2	3	4	5
$\gamma_1$ , кН/м <sup>3</sup>	10,4	10,4	10,5	10,5	10,4
$\gamma_{s1}$ , кН/м <sup>3</sup>	15,7	14,5	15	15,5	16
$W_1$	7,77	6,51	6,07	6,81	10,0
$\gamma_2$ , кН/м <sup>3</sup>	18,9	20,2	19,1	20	20,5
$\gamma_{s2}$ кН/м <sup>3</sup>	26,5	26,5	26,6	26,6	26,5
$W_2$	0,24	0,24	0,20	0,24	0,21
$\gamma_3$ , кН/м <sup>3</sup>	20	20	20	19,3	19,8
$\gamma_{s3}$ , кН/м <sup>3</sup>	27,4	27,4	27,4	27	27
$W_3$	0,26	0,27	0,24	0,23	0,27
Высота уровня воды над поверхностью основания, $h_{нв}$ , м (по второй цифре шифра)	1,0	0,5	0,6	0,7	0,8

Таблица 2

Зависимости  $\varphi_w$  и  $C_w$  от влажности  $W$  (для определения  $\varphi_{нач}$  и  $C_{нач}$ )

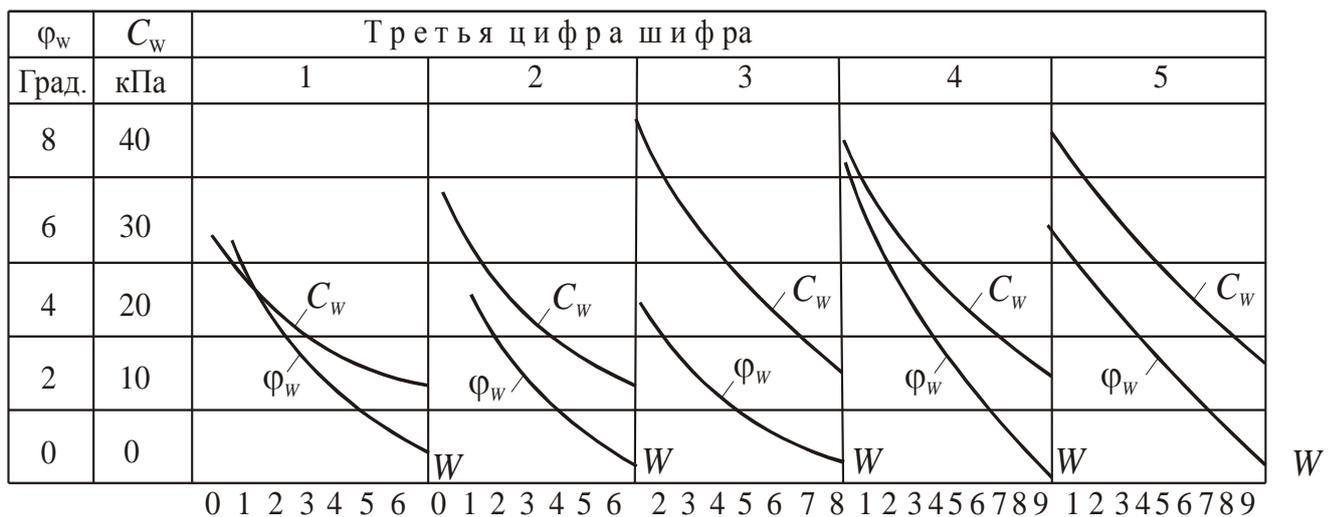


Таблица 3

Параметры прочности  $\varphi_k$  и  $C_k$  при консолидированном сдвиге

Параметры прочности	Третья цифра шифра				
	1	2	3	4	5
$\varphi_k$ , град.	11	9	10	12	10
$C_k$ , кПа	24	20	22	30	22

Таблица 4

Компрессионные свойства грунтов основания насыпи

Нормальное давление $\sigma$ , кПа	Третья цифра шифра														
	1			2			3			4			5		
	слои грунтов основания насыпи														
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
коэффициент пористости $e$ при давлении $\sigma$															
0	16,0	0,740	0,725	9,4	0,642	0,740	9,1	0,670	0,700	10,5	0,660	0,720	12,2	0,566	0,730
25	11,3	0,735	0,723	8,2	0,641	0,732	7,5	0,666	0,680	8,2	0,658	0,710	9,2	0,565	0,718
50	9,0	0,732	0,721	6,8	0,64	0,725	6,1	0,664	0,670	6,5	0,656	0,700	6,9	0,564	0,710
100	6,0	0,725	0,718	4,3	0,638	0,713	4,0	0,663	0,650	3,3	0,654	0,682	4,0	0,563	0,692
150	4,0	0,719	0,716	2,8	0,636	0,705	2,4	0,662	0,635	2,0	0,653	0,672	2,5	0,562	0,687
200	2,9	0,714	0,714	1,8	0,634	0,695	1,9	0,661	0,628	1,6	0,652	0,664	1,6	0,561	0,680
300	1,5	0,708	0,712	1,2	0,631	0,685	1,3	0,660	0,620	1,3	0,651	0,654	1,4	0,560	0,676
400	1,3	0,704	0,711	1,1	0,629	0,680	1,1	0,659	0,615	1,2	0,650	0,650	1,2	0,559	0,674
500	1,2	0,701	0,710	1,0	0,627	0,675	1,0	0,658	0,610	1,1	0,649	0,647	1,1	0,558	0,672

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

#### 3.1. ЗАДАЧА №1

##### Общие положения

К **слабым грунтам** относятся: торф, заторфованные грунты, илы, сапропели, глинистые грунты с показателем  $I_L > 0,5$ , иольдиевые глины, грунты мокрых солончаков, в целом, все грунты, имеющие прочность на сдвиг при испытании приборами вращательного среза менее 0,075 МПа или модуль осадки более 50 мм/м при нагрузке 0,25 МПа (модуль деформации ниже 5,0 МПа) (п.6.7 СНиП 2.05.02-85).

К **слабым основаниям** относятся такие, в которых в пределах активной зоны имеются слои слабых грунтов мощностью не менее 0,5 м. Мощность активной зоны следует принимать ориентировочно равной ширине насыпи понизу.

Известны следующие фазы деформации основания: фаза уплотнения основания, фаза локальных сдвигов, фаза выпирания в результате выжимания грунта из-под насыпи.

При проектировании насыпей на слабых основаниях необходимо предусматривать работу оснований в следующих фазах:

- в первой фазе деформаций – для насыпей на дорогах с капитальными цементобетонными и асфальтобетонными покрытиями (расчет на полное отсутствие сдвигов в основании);
- в начальном периоде второй фазы – для насыпей на дорогах с покрытиями облегченных типов (ограничение распространения сдвигов заданным значением);
- в конечном периоде второй фазы – для дорог местного значения с покрытиями переходных типов (условия, близкие к предельному состоянию).

Кроме общих требований, к насыпям на слабых основаниях предъявляются дополнительные требования (п.6.30 СНиП 2.05.02-85):

- боковое выдавливание слабого грунта в основании насыпи в период эксплуатации должно быть исключено;
- интенсивная часть осадки основания должна завершиться до устройства покрытия (исключение допускается при применении сборных покрытий в условиях двухстадийного строительства);
- упругие колебания насыпей на торфяных основаниях при движении транспортных средств не должны превышать величины, допустимой для данного типа дорожной одежды.

### 3.1.1 Задача №1а

#### Проверка устойчивости основания насыпи

В задачу расчета устойчивости основания насыпи входит выявление возможности и степени опасности бокового выдавливания слабого грунта из-под подошвы насыпи.

В зависимости от характера и степени устойчивости различают три типа оснований:

I – основания, не требующие специальных мероприятий по обеспечению устойчивости;

II – основания, для обеспечения устойчивости которых достаточно только технологических мер (регламентация режима отсыпки насыпи);

III – основания, которые требуют специальных конструктивных мер по обеспечению устойчивости (изменение конструкции насыпи или удаление слабого слоя).

Степень обеспеченности устойчивости устанавливается по величине **коэффициента безопасности**:

$$k_{без} = \frac{P_{без}}{P_{расч}}, \quad (1)$$

где  $P_{без}$  – безопасная нагрузка, отвечающая условиям устойчивости основания (несущая способность);  $P_{расч}$  – расчетная (проектная) нагрузка от насыпи.

Величины  $P_{без}$  и  $P_{расч}$  зависят не только от свойств слабого грунта и размеров насыпи, но и от режима возведения насыпи. В связи с этим величина  $k_{без}$  может устанавливаться применительно к условиям:

- быстрой (условно мгновенной) отсыпки насыпи  $k_{без}^{(нач)}$ ;
- медленной (в соответствии со скоростью уплотнения и упрочнения слабой толщи) отсыпки насыпи  $k_{без}^{(кон)}$  (метод предварительной консолидации).

Устойчивость основания считается обеспеченной при условии  $k_{без} > 1$ .

#### 3.1.1.1. Определение расчетной и безопасной нагрузок на основание для условий быстрой отсыпки насыпи



Рис. 2 Форма эпюры нагрузки

$$P_{расч}^{(нач)} = \gamma_n (H_p + S_k - h_{н.в.}) + \gamma_n^{636} h_{н.в.}; \quad (2)$$

где  $\gamma_n$  – удельный вес грунта насыпи;

$H_p$  – расчетная высота насыпи;

$S_k$  – расчетная конечная осадка основания насыпи;

$h_{н.в.}$  – расстояние от постоянного уровня воды до поверхности основания.

$\gamma_n^{636}$  – удельный вес грунта насыпи ниже уровня воды, определяемый по формуле

$$\gamma_n^{636} = \frac{\gamma_{sh} - \gamma_w}{1 + e_n}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{sh}$  и  $e_n$  – удельный вес твердых частиц и коэффициент пористости грунта насыпи;  $\gamma_w$  – удельный вес воды, принимаемый равным  $10 \text{ кН/м}^3$ .

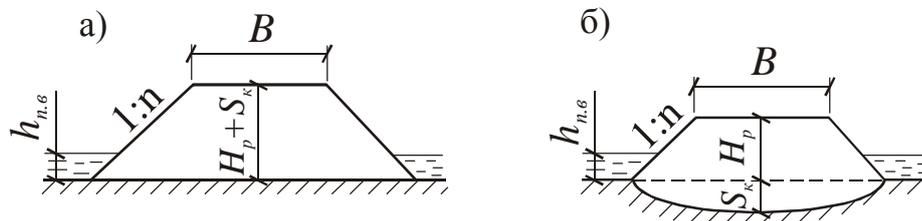


Рис.3 Схемы к расчету устойчивости насыпи на слабом основании:  
а) при быстрой отсыпке насыпи; б) при медленной отсыпке насыпи

В формуле (2) высота насыпного слоя рассматривается как сумма проектной высоты  $H_p$  и величины конечной осадки  $S_k$  по оси насыпи (см. рис. 3а).

При предварительных расчетах величиной конечной осадки задаются, принимая  $S_k \approx 0,2H_1$  (где  $H_1$  – толщина слоя торфа).

Истинные значения  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$  устанавливаются в процессе выполнения расчета конечной стабилизированной осадки основания (см. задачу №1б).

Расчетную высоту насыпи определяют по формуле:

$$H_p = H_0 + \frac{\sigma_0 k_y^{(экв)}}{\gamma_n}, \quad (4)$$

где  $H_0$  – проектная высота насыпи;

$\sigma_0$  – удельная нагрузка на поверхности проезжей части от подвижных транспортных средств;

$k_y^{(экв)}$  – коэффициент приведения подвижной нагрузки к эквивалентной статической.

В практических расчетах при  $H_0 \geq 2,5 \text{ м}$  принимают  $H_p = H_0$ .

При быстрой отсыпке условно принимается, что нагрузка от насыпи высотой  $(H_p + S_k)$  на основание передается мгновенно, плотность грунта основания не изменяется, и при этом сохраняются его природные (начальные) физико-механические свойства.

Безопасная нагрузка для условий быстрой отсыпки определяется по фор-

муле:

$$P_{\text{без}}^{(\text{нач})} = \left[ \frac{C_{\text{нач}} + \gamma_{\text{ср}} z \cdot \text{tg} \varphi_{\text{нач}}}{\beta} \right]_{\text{min}}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{\text{нач}}$  и  $C_{\text{нач}}$  – угол внутреннего трения и удельное сцепление слабого грунта основания при природной влажности-плотности на глубине  $z$ ;

$z$  – глубина расположения расчетного горизонта от поверхности основания насыпи;

$\gamma_{\text{ср}}$  – средний удельный вес грунтовой толщи, расположенной выше горизонта  $z$

$$\text{с учетом взвешивания в воде} \left( \gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_{\text{с1}} - \gamma_{\text{w}}}{1 + e_1} \right);$$

$\beta$  – функция угла внутреннего трения  $\varphi_{\text{нач}}$  и формы эпюры нагрузки.

Значения  $\varphi_{\text{нач}}$  и  $C_{\text{нач}}$  определяются по графикам  $\varphi_W = f(W)$  и  $c_W = f(W)$  задания (табл.2), принимая  $W = W_{\text{нач}}$ .

Коэффициент  $\nu$  определяется по графикам функций  $\beta$  (прил.1) в зависимости от начального угла внутреннего трения  $\varphi_{\text{нач}}$  и отношения  $2a/B$ . Для условий быстрой отсыпки насыпи  $a = (H_p + S_k) \cdot n$ .

Минимальное значение  $P_{\text{без}}$  будет соответствовать максимальному значению  $\beta$ , т.е.  $\beta = \beta_{\text{max}}$ . Для определения  $\beta_{\text{max}}$  нужно определить значение  $2a/B$  и на соответствующей кривой и графике функций  $\varphi$  найти значение  $\beta_{\text{max}}$ . Для промежуточных значений  $\varphi_{\text{нач}}$ , для которых графики функций отсутствуют,  $\beta_{\text{max}}$  находят по интерполяции. Далее по графику определяется значение  $\nu$  соответствующее  $\beta_{\text{max}}$  и по формуле  $z = \nu b$  вычисляется глубина расположения расчетного горизонта от поверхности основания насыпи.

Если найденное таким образом значение  $z > H_1$  следует принимать  $z = H_1$  и решая обратную задачу, т.е.  $\nu = z/b$ , определять по графику соответствующее значение  $\beta$ .

### 3.1.1.2. Определение расчетной и безопасной нагрузок на основание для случая медленной отсыпки насыпи по методу предварительной консолидации

Величина максимальных напряжений на поверхность основания при расчёте на медленную отсыпку насыпи определяется в соответствии со схемой, показанной на рис.6 б, по формуле (обозначения см. по формуле (2)):

$$P_{\text{расч}}^{(\text{конс})} = \gamma_{\text{н}} (H_p - h_{\text{н.в.}}) + \gamma_{\text{н}}^{e_{3\theta}} (S_k + h_{\text{н.в.}}), \quad (6)$$

Безопасная нагрузка для условий медленной отсыпки определяется по формуле:

$$P_{\text{без}}^{(\text{конс})} = \left[ \frac{C_k + \gamma_{\text{ср}} z \cdot \text{tg} \varphi_k}{\beta_k} \right]_{\text{min}}, \quad (7)$$

где  $\varphi_k$  и  $C_k$  – угол внутреннего трения и удельное сцепление, получаемые в

опыте с полной консолидацией грунта (консолидированные испытания на сдвиг с дренажом) по табл.3;  $\beta_k$  – та же функция, что и в формуле (5), но принимаемая в зависимости от значения  $\varphi_k$  и другого значения  $a$ , вычисленного при высоте насыпного слоя, равной  $H_p$ , т.е.  $a = H_p \cdot n$ .

### 3.2.1.3. Определение типа основания насыпи

Для оценки устойчивости основания насыпи при различных режимах ее возведения вычисляют коэффициенты безопасности  $k_{без}^{(нач)}$  и  $k_{без}^{(кон)}$  на основе формулы (1). В зависимости от значений  $k_{без}^{(нач)}$  и  $k_{без}^{(кон)}$  основание может быть отнесено к I, II или III типу по устойчивости (табл.5).

Таблица 5

Тип основания	Критерии	Характеристика устойчивости	Преобладающие деформации грунта наиболее опасного слоя	Возможность использования слабой толщи в качестве основания
I	$k_{без}^{(нач)} \geq 1$	Устойчивость обеспечена при любой скорости отсыпки насыпи	Сжатие	Можно использовать в качестве основания
II	$k_{без}^{(нач)} < 1$ $k_{без}^{(кон)} \geq 1$	Устойчивость при быстрой отсыпке не обеспечена, но обеспечена при медленной отсыпке	При быстрой отсыпке – сдвиг (выдавливание), при медленной – сжатие	Можно использовать в качестве основания при медленной отсыпке насыпи
III	$k_{без}^{(кон)} < 1$	Устойчивость не обеспечена ни при каких режимах отсыпки	Сдвиг (выдавливание)	Без конструктивных мероприятий в качестве основания использовать нельзя

### 3.1.2. Задача №16. Расчет конечной стабилизированной осадки основания насыпи

Осадка основания насыпи определяется как сумма вертикальных деформаций по оси насыпи всех слоев основания в пределах активной зоны. В качестве нижней границы активной зоны (сжимаемой толщи) принимают горизонт, на котором дополнительные напряжения от внешней нагрузки  $\sigma_{zp}$  не превышают 20% напряжений от собственного веса грунта, т.е.  $\sigma_{zp} \leq 0,2\sigma_{zg}$ .

Конечная величина стабилизированной осадки определяется методом послойного суммирования с использованием зависимости

$$S_{кон} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pzi} h_i, \quad (9)$$

где  $h_i$  – мощность  $i$ -го расчетного слоя;  $\varepsilon_{pzi}$  – относительная деформация грунта при компрессионном сжатии нагрузкой в диапазоне от природного  $\sigma_{zg}$  до суммарного значения ( $\sigma_{zg} + \sigma_{zp}$ ) на данном горизонте.

Расчет обычно выполняют в следующей последовательности.

Толщу грунта, залегающего ниже подошвы насыпи, разбивают на элементарные слои мощностью  $h_i \leq 0,8b$ . В случае если принятая таким образом мощность элементарного слоя получается больше, чем мощность слоя основания (т.е.  $h_i > H_i$ ), то принимают  $h_i = H_i$ .

Для определения  $\varepsilon_{pzi}$  необходимо вначале определить природное напряженное состояние основания по формуле:

$$\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \quad (10)$$

где  $\gamma_i$  – удельный вес грунта расчетного слоя.

При наличии грунтовых вод для водопроницаемого грунта необходимо учесть взвешивающее действие воды и  $\gamma_i^{636}$  определять по формуле:

$$\gamma_i^{636} = \frac{\gamma_{si} - \gamma_w}{1 + e_i}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{si}$  и  $e_i$  – удельный вес твердых частиц и коэффициент пористости грунта расчетного слоя;  $\gamma_w$  – удельный вес воды.

По полученным значениям слева от оси насыпи в масштабе строят эпюру природных давлений (на основе рис. 2), а справа от оси насыпи вспомогательную эпюру  $0,2\sigma_{zg}$ .

Далее необходимо в пределах сжимаемой толщи установить дополнительные напряжения  $\sigma_{zp}$  от внешней нагрузки в точках по оси насыпи на уровне границ расчетных слоев  $h_i$ ; по формуле:

$$\sigma_{zp} = (I_l + I_{np})P, \quad (12)$$

где  $P$  – нагрузка на поверхности основания;  $I_l, I_{np}$  – коэффициенты, определяемые по номограммам Остерберга, зависящие от величин  $a/z_i$  и  $b_1/z_i$  ( $b_1=B/2$ ). Номограммы Остерберга в полулогарифмических координатах приведены на

с.250 [4], на с.100 [5] и в приложении 2 настоящих методических указаний.

При определении напряжений по оси симметричных насыпей справедливо равенство  $I_n = I_{np} = I$ . Поэтому применительно к условиям данной задачи выражение (12) можно переписать в виде

$$\sigma_{zp} = 2 \cdot I \cdot P. \quad (13)$$

После определения напряжений вычисляют с помощью компрессионных зависимостей  $e = f(\sigma)$ , построенных по значениям, приведенным в табл. 5, расчетные значения относительной деформации грунта по формуле:

$$\varepsilon_{pzi} = \frac{e_{ni} - e_{ki}}{1 + e_{ni}}, \quad (14)$$

где  $e_{ni}$  – коэффициент пористости грунта  $i$ -го слоя при природном давлении, равном  $\sigma_{zgi}^{cp}$  на глубине от подошвы насыпи до середины рассматриваемого слоя;  $e_{ki}$  – то же при суммарном давлении  $(\sigma_{zpi}^{cp} + \sigma_{zgi}^{cp})$  на той же глубине.

Значения  $\sigma_{zpi}^{cp}$ ,  $\sigma_{zgi}^{cp}$  определяют для середины каждого расчетного слоя.

По полученным значениям строят эпюру дополнительных давлений. Точка пересечения эпюры дополнительных напряжений и вспомогательной эпюры условно принимается за нижнюю границу сжимаемой толщи (НГСТ), а расстояние от этой точки до низа подошвы насыпи – за мощность сжимаемой толщи (активной зоны)  $H_c$ . При расчете осадок учитывают деформации только тех слоев, которые расположены в пределах сжимаемой толщи. Деформациями грунтов за пределами сжимаемой толщи, в силу их малости, пренебрегают.

Вышеописанным методом определяют осадки основания насыпи от четырех нагрузок:  $P_1 = P_{без}^{(нач)}$ ;  $P_2 = P_{без}^{(нач)} + \Delta P$ ;  $P_3 = P_{без}^{(нач)} + 2\Delta P$ ;  $P_4 = P_{расч}^{(конс)}$ ,

где  $\Delta P = \frac{P_{расч}^{(конс)} - P_{без}^{(нач)}}{3}$ .

Расчет осадки для каждого значения нагрузки  $P_i$  рекомендуется производить в табличной форме:

Таблица 9

№ $i$ -ГО СЛОЯ	$h_i$ , м	$\sigma_{zgi}^{cp}$ , кПа	$e_{ni}$	$\sigma_{zpi}^{cp}$ , кПа	$\sigma_{zpi}^{cp} + \sigma_{zgi}^{cp}$ , кПа	$e_{ki}$	$\varepsilon_{pzi}$	$S_i$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагрузка $P_1 = \dots$								
Нагрузка $P_2 = \dots$								

Далее графическим способом определяют истинные значения  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$ . Суть способа заключается в следующем.

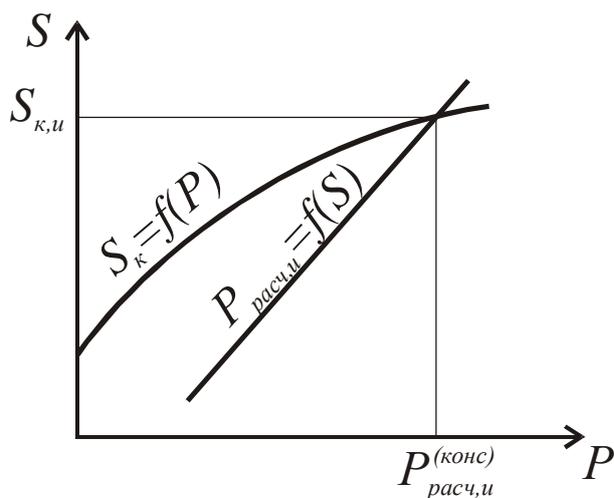


Рис.4. Схема к определению истинных значений  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$

По формуле (7) строят линейную зависимость  $P_{расч}^{(конс)} = f(S_к)$  задаваясь двумя произвольными значениями  $S_к$ . Затем на тот же график наносят по данным табл.9 зависимость  $S_к = f(P_i)$  (4 значения). Точка пересечения этих двух функций определит истинные значения  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$  (рис.7).

Затем заново проверяют условия устойчивости (2).

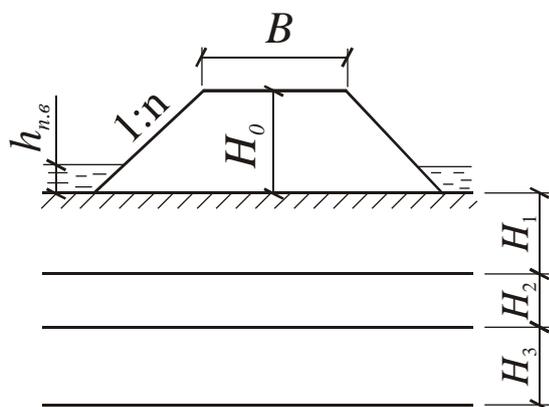
Если условие не выполняется, необходимо уменьшить проектную высоту насыпи, определив её по формуле (7) при  $P_{расч}^{(конс)} = 0,85P_{без}^{(конс)}$ .

## 4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### 4.1. ЗАДАЧА №1а

#### Исходные данные к расчету:

- вид дорожного покрытия – облегченное из черного щебня;
- проектная высота насыпи  $H_0=4,5\text{ м};$
- ширина насыпи поверху  $B=35\text{ м};$
- крутизна откосов насыпи  $1:n$   $1:2$
- удельный вес грунта насыпи  $\gamma_n=20,5 \text{ кН/м}^3$
- удельный вес частиц грунта насыпи  $\gamma_{sh}=26,6 \text{ кН/м}^3$
- коэффициент пористости  $e_n=0,58;$
- мощность слоев грунта основания насыпи:
  - 1 слой – торф  $H_1 = 5 \text{ м};$
  - 2 слой – пылеватый песок  $H_2 = 10 \text{ м};$
  - 3 слой – полутвердый суглинок  $H_3 = 16 \text{ м}.$



- основные физические характеристики грунтов основания:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 10,5 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s1} &= 15 \text{ кН/м}^3, & W_1 &= 6,07; \\ \gamma_2 &= 19,1 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s2} &= 26,6 \text{ кН/м}^3, & W_2 &= 0,20; \\ \gamma_3 &= 20 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s3} &= 27,4 \text{ кН/м}^3, & W_3 &= 0,24. \end{aligned}$$

- высота уровня воды над поверхностью основания  $h_{n.в.} = 0,7\text{ м}.$

#### 4.1.1. Определение расчетной и безопасной нагрузок на основание для случая быстрой отсыпки насыпи

Определяем расчетную нагрузку для случая быстрой отсыпки насыпи

$$P_{расч}^{(нач)} = \gamma_n \cdot (H_p + S_k - h_{n.в.}) + \gamma_{н,взв} \cdot h_{n.в.} = 20,5 \cdot (4,5 + 1 - 0,7) + 10,5 \cdot 0,7 = 105,75 \text{ кПа},$$

где  $\gamma_{н,взв}$  – удельный вес грунта насыпи ниже уровня воды

$$\gamma_{н,взв} = \frac{\gamma_{sh} - \gamma_w}{1 + e_n} = \frac{26,6 - 10}{1 + 0,58} = 10,5 \text{ кН/м}^3;$$

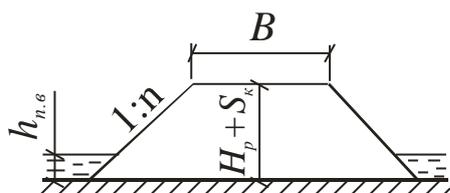
$H_p$  – расчетная высота насыпи,

т.к.  $H_0 = 4,5\text{ м} > 2,5\text{ м}$ , то принимаем

$$H_p = H_0 = 4,5\text{ м}.$$

$S_k$  – конечная осадка насыпи

$$S_k = 0,2 \cdot H_1 = 0,2 \cdot 5 = 1\text{ м}.$$



Определяем безопасную нагрузку на основание для условий быстрой отсыпки насыпи по формуле:

$$P_{\text{без}}^{(\text{нач})} = \left[ \frac{C_{\text{нач}} + \gamma_{\text{ср}} \cdot z \cdot \text{tg} \varphi_{\text{нач}}}{\beta} \right]_{\text{min}},$$

где  $\varphi_{\text{нач}}$  и  $C_{\text{нач}}$  – угол внутреннего трения и удельное сцепление слабого грунта основания, определяемые по графикам  $\varphi_w = f(w)$  и  $C_w = f(w)$  (табл. 3) для природной влажности, при этом получаем следующие значения  $\varphi_{\text{нач}} = 0,5^\circ$ ,  $C_{\text{нач}} = 15$  кПа.

Вычисляем необходимые величины для определения функции  $\beta$  и глубины распространения расчетного горизонта от поверхности основания насыпи  $z$ , соответствующей значению  $\beta_{\text{max}}$ :

- ширина проекции откоса насыпи  $a = (H_p + S_k) \cdot n = (4,5 + 1) \cdot 2 = 11$  м;

- отношение  $2 \frac{a}{B} = 2 \cdot \frac{11}{35} = 0,63$ .

Значение  $\beta_{\text{max}}$  по кривой 4 (прил.1) для  $\varphi = 0$  составляет 0,32, а для  $\varphi = 5^\circ - 0,26$ , соответственно, значения  $\nu$  равны 0,68 и 0,9. Интерполируя для значения  $\varphi = 0,5^\circ$ , получим  $\nu = \frac{z}{B} = 0,7$ . Отсюда  $z = \nu \cdot B = 0,7 \cdot 35 = 24,5$  м.

Так как  $z = 24,5$  м  $> H_1 = 5$  м, то принимаем  $z = H_1 = 5$  м.

Определяем значение  $\beta$ , при  $z = 5$  м:

$\nu = \frac{z}{B} = \frac{5}{35} = 0,143$ , откуда, по графикам прил. 1  $\rightarrow \beta = 0,2$ .

Определяем средний удельный вес грунтовой толщи, расположенной выше горизонта  $z$  с учетом взвешивания в воде по формуле  $\left( \gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum \gamma_i \cdot h_i}{z} \right)$ .

Т.к. выше горизонта  $z$  залегает только 1 слой (слой торфа), то средний удельный вес грунтовой толщи будет равен удельному весу торфа с учетом взвешивания в воде

$$\gamma_{\text{ср}} = \gamma_{1, \text{взв}} = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_w}{1 + e_1} = \frac{15 - 10}{1 + 9,1} = 0,5 \text{ кН/м}^3,$$

где  $e_1 = \frac{\gamma_{s1}(1 + W_1)}{\gamma_1} - 1 = \frac{15(1 + 6,07)}{10,5} - 1 = 9,1$ .

Подставляя полученные значения в формулу (6), получим:

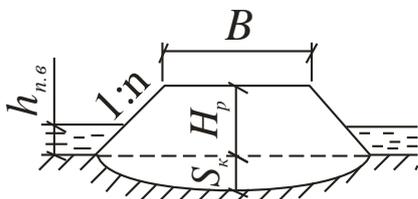
$$P_{\text{без}}^{(\text{нач})} = \left[ \frac{C_{\text{нач}} + \gamma_{\text{ср}} \cdot z \cdot \text{tg} \varphi_{\text{нач}}}{\beta} \right]_{\text{min}} = \left[ \frac{15 + 0,5 \cdot 5 \cdot \text{tg} 0,5^\circ}{0,2} \right]_{\text{min}} = 75,1 \text{ кПа.}$$

#### 4.1.2. Определение расчетной и безопасной нагрузок на основание для случая медленной отсыпки насыпи по методу предварительной консолидации

Определяем расчетную нагрузку для случая медленной отсыпки насыпи

$$P_{\text{расч}}^{(\text{конс})} = \gamma_n \cdot (H_p - h_{\text{н.в.}}) + \gamma_{\text{н,взв}} \cdot (S_k + h_{\text{н.в.}}) = 20,5 \cdot (4,5 - 0,7) + 10,5 \cdot (1 + 0,7) = 95,75 \text{ кПа,}$$

где  $\gamma_{\text{н,взв}}$  – удельный вес грунта насыпи ниже уровня воды



$$\gamma_{н,взв} = \frac{\gamma_{sh} - \gamma_w}{1 + e_n} = \frac{26,6 - 10}{1 + 0,58} = 10,5 \text{ кН/м}^3;$$

$H_p$  – расчетная высота насыпи,

т.к.  $H_0 = 4,5 \text{ м} > 2,5 \text{ м}$ , то принимаем  $H_p = H_0 = 4,5 \text{ м}$ .

$S_k$  – конечная осадка насыпи

$$S_k = 0,2 \cdot H_1 = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ м}.$$

Определяем безопасную нагрузку на основание для условий медленной отсыпки насыпи по формуле:

$$P_{без}^{(конс)} = \left[ \frac{C_k + \gamma_{cp} \cdot z \cdot \text{tg} \varphi_k}{\beta_k} \right]_{\min},$$

где  $\varphi_k$  и  $C_k$  – угол внутреннего трения и удельное сцепление слабого грунта основания, определяемые по табл. 4 для консолидированного сдвига, при этом получаем следующие значения  $\varphi_k = 11^\circ$ ,  $C_k = 22 \text{ кПа}$ .

Вычисляем необходимые величины для определения функции  $\beta$  и глубины распространения расчетного горизонта от поверхности основания насыпи  $z$ , соответствующей значению  $\beta_{max}$ :

- ширина проекции откоса насыпи  $a = H_p \cdot n = 4,5 \cdot 2 = 9 \text{ м}$ ;

- отношение  $2 \frac{a}{B} = 2 \cdot \frac{9}{35} = 0,52$ .

Значение  $\beta_{max}$  по кривой 4 (прил.1) для  $\varphi = 10^\circ$  составляет 0,23, которому соответствует значение  $\nu = \frac{z}{B} = 0,8$ . Отсюда  $z = \nu \cdot B = 0,8 \cdot 35 = 28 \text{ м}$ .

Так как  $z = 28 \text{ м} > H_1 = 5 \text{ м}$ , то принимаем  $z = H_1 = 5 \text{ м}$ .

Определяем значение  $\beta$ , соответствующее  $z = 5 \text{ м}$ :

$\nu = \frac{z}{B} = \frac{5}{35} = 0,143$ , откуда, по графику приложения 1  $\rightarrow \beta = 0,21$ .

Определяем средний удельный вес грунтовой толщи, расположенной выше горизонта  $z$  с учетом взвешивания в воде по формуле  $\left( \gamma_{cp} = \frac{\sum \gamma_i \cdot h_i}{z} \right)$ .

Но т.к. выше горизонта  $z$  залегает только 1 слой (слой торфа), то средний удельный вес грунтовой толщи будет равен удельному весу торфа с учетом взвешивания в воде

$$\gamma_{cp} = \gamma_{1,взв} = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_w}{1 + e_1} = \frac{15 - 10}{1 + 9,1} = 0,5 \text{ кН/м}^3,$$

где  $e_1 = \frac{\gamma_{s1}(1 + W_1)}{\gamma_1} - 1 = \frac{15(1 + 6,07)}{10,5} - 1 = 9,1$ .

Подставляя полученные значения в формулу (6), получим:

$$P_{без}^{(конс)} = \left[ \frac{C_k + \gamma_{cp} \cdot z \cdot \text{tg} \varphi_k}{\beta} \right]_{\min} = \left[ \frac{22 + 0,5 \cdot 5 \cdot \text{tg} 11^\circ}{0,21} \right]_{\min} = 107,07 \text{ кПа}.$$

### 4.1.3. Определение типа основания насыпи земляного полотна

Определяем коэффициенты безопасности для разных режимов возведения насыпи:

а) для случая быстрой отсыпки насыпи

$$K_{без}^{(нач)} = \frac{P_{без}^{(нач)}}{P_{расч}^{(нач)}} = \frac{75,1}{105,75} = 0,71 < 1;$$

б) для случая медленной отсыпки насыпи

$$K_{без}^{(конс)} = \frac{P_{без}^{(конс)}}{P_{расч}^{(конс)}} = \frac{107,07}{95,75} = 1,12 > 1.$$

В зависимости от значений  $K_{без}^{(нач)}$  и  $K_{без}^{(конс)}$  основание может быть отнесено к I, II или III типу по устойчивости. В данном случае  $K_{без}^{(нач)} = 0,71$ , а  $K_{без}^{(конс)} = 1,12$ , соответственно, основание, согласно табл.8, относится ко II типу по устойчивости.

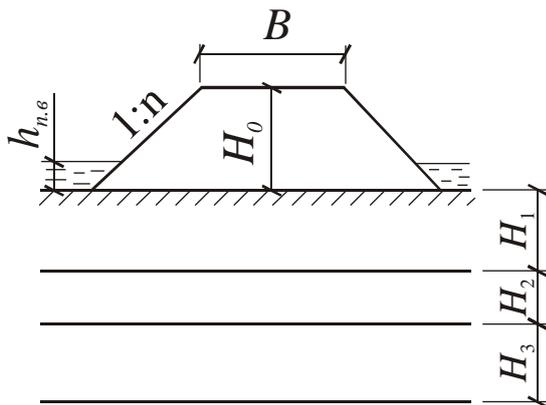
#### **Вывод:**

Слабую толщу, залегающую под подошвой насыпи, можно использовать в качестве основания только при медленной отсыпке насыпи, так как при быстрой отсыпке произойдет выдавливание грунта основания.

## 4.2. ЗАДАЧА №16

### Исходные данные к расчету:

- вид дорожного покрытия – облегченное из черного щебня;
- проектная высота насыпи  $H_0=4,5\text{ м}$ ;
- ширина насыпи поверху  $B=35\text{ м}$ ;
- крутизна откосов насыпи 1:n 1:2;
- мощность слоев грунта основания насыпи:
  - 1 слой – торф  $H_1 = 5\text{ м}$ ;
  - 2 слой – пылеватый песок  $H_2 = 10\text{ м}$ ;
  - 3 слой – полутвердый суглинок  $H_3 = 16\text{ м}$ .



- основные физические характеристики грунтов основания:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 10,5 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s1} &= 15 \text{ кН/м}^3, & W_1 &= 6,07; \\ \gamma_2 &= 19,1 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s2} &= 26,6 \text{ кН/м}^3, & W_2 &= 0,20; \\ \gamma_3 &= 20 \text{ кН/м}^3, & \gamma_{s3} &= 27,4 \text{ кН/м}^3, & W_3 &= 0,24. \end{aligned}$$

- высота уровня воды над поверхностью основания  $h_{н.в.} = 0,7\text{ м}$ .

### Расчет:

При обеспеченной устойчивости основания, производим расчет его осадки под действием внешних нагрузок от насыпи.

Расчет осадки производим для четырех значений давления на основание:

$$P_1 = P_{без}^{(нач)} = 75,1 \text{ кПа},$$

$$P_2 = P_{без}^{(нач)} + \Delta P = 75,1 + 6,88 = 82,0 \text{ кПа},$$

$$P_3 = P_{без}^{(нач)} + 2\Delta P = 75,1 + 2 \cdot 6,88 = 88,86 \text{ кПа},$$

$$P_4 = P_{расч}^{(конс)} = 95,75 \text{ кПа},$$

$$\text{где } \Delta P = \frac{P_{расч}^{(конс)} - P_{без}^{(нач)}}{3} = \frac{95,75 - 75,1}{3} = 6,88 \text{ кПа}.$$

Конечная величина стабилизированной осадки определяется методом послойного суммирования с использованием зависимости (9), разбивая основание насыпи на элементарные слои мощностью  $h_i \leq 0,8b$ , при этом должно соблюдаться условие  $h_i \leq H_i$ .

$$b = B/2 + a = 35/2 + 9 = 26,5 \text{ м}, \text{ тогда } h_i = 0,8 \cdot 26,5 = 21,2 \text{ м}.$$

Однако для дальнейших расчетов полученное значение  $h_i$  использовать нельзя, так как не соблюдается второе условие. Поэтому принимаем  $h_i = H_i$ , т.е. мощности элементарных слоев будут совпадать с мощностями слоев грунтов основания.

Определяем природное напряженное состояние основания по формуле (10)

$$\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \cdot$$

В точке 0

$$\sigma_{zg0} = 0; \quad 0,2 \cdot \sigma_{zg0} = 0.$$

В точке 1

$$\sigma_{zg1} = \gamma_{1, \text{эзв}} \cdot H_1 = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ кПа},$$

$$0,2\sigma_{zg1} = 0,2 \cdot 2,5 = 0,5 \text{ кПа},$$

$$\text{где } \gamma_{1, \text{эзв}} = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_w}{1 + e_1} = \frac{15,0 - 10}{1 + 9,1} = 0,5 \text{ кН/м}^3;$$

$$e_1 = \frac{\gamma_{s1}(1+W_1)}{\gamma_1} - 1 = \frac{15(1+6,07)}{10,5} - 1 = 9,1.$$

В точке 2

$$\sigma_{zg2} = \sigma_{zg1} + \gamma_{2, \text{эзв}} \cdot H_2 = 2,5 + 9,94 \cdot 10 = 101,9 \text{ кПа},$$

$$0,2\sigma_{zg2} = 20,38 \text{ кПа},$$

$$\text{где } \gamma_{2, \text{эзв}} = \frac{\gamma_{s2} - \gamma_w}{1 + e_2} = \frac{26,6 - 10}{1 + 0,67} = 9,94 \text{ кН/м}^3;$$

$$e_2 = \frac{\gamma_{s2}(1+W_2)}{\gamma_2} - 1 = \frac{26,6(1+0,2)}{19,1} - 1 = 0,67.$$

В точке 2 с учетом гидростатического давления воды

$$\sigma'_{zg2} = \sigma_{zg2} + \gamma_w \cdot h_w = 101,9 + 10 \cdot (0,7 + 5 + 10) = 308,9 \text{ кПа},$$

$$0,2\sigma'_{zg2} = 61,78 \text{ кПа},$$

где  $h_w$  – высота столба воды от уровня верха поверхностных вод до водоупорного слоя.

В точке 3:

$$\sigma_{zg3} = \sigma'_{zg2} + \gamma_3 \cdot H_3 = 308,9 + 20 \cdot 16 = 628,9 \text{ кПа},$$

$$0,2\sigma_{zg3} = 125,78 \text{ кПа}.$$

По полученным значениям слева от оси насыпи в масштабе строим эпюру природных давлений  $\sigma_{zg}$  (рис. 5, 6, 7, 8), а справа от оси насыпи вспомогательную эпюру  $0,2\sigma_{zg}$ .

Далее в пределах сжимаемой толщи определяем дополнительные напряжения  $\sigma_{zp}$  от внешней нагрузки в точках по оси насыпи на уровне границ расчетных слоев  $h_i$ , по формуле (13)

$$\sigma_{zp} = 2 \cdot I \cdot P,$$

где  $I = f\left(\frac{a}{z}; \frac{b_1}{z}\right)$  – определяется по графикам Остерберга ( $b_1=B/2=17,5\text{м}$ ).

В точке 0 ( $z = 0$ )

$$a/z = 9/0 = \infty, \quad b_1/z = 17,5/0 = \infty, \quad \rightarrow \quad I_0 = 0,5.$$

В точке 1 ( $z = 5\text{м}$ )

$$a/z = 9/5 = 1,8, \quad b_1/z = 17,5/5 = 3,5, \quad \rightarrow \quad I_1 = 0,49;$$

В точке 2 ( $z = 15\text{м}$ )

$$a/z = 9/15 = 0,6, \quad b_1/z = 17,5/15 = 1,17, \quad \rightarrow \quad I_2 = 0,455;$$

В точке 3 ( $z = 31\text{м}$ )

$$a/z = 9/31=0,29, \quad b_1/z = 17,5/31 = 0,56, \quad \rightarrow \quad I_3 = 0,34;$$

Далее вычисляем напряжения в этих точках при разных значениях нагрузок от насыпи.

1. При нагрузке  $P_1 = 75,1$  кПа:

- в точке 0:  $\sigma_{zp0} = 2 \cdot I_0 \cdot P_1 = 75,1$  кПа;
- в точке 1:  $\sigma_{zp1} = 2 \cdot I_1 \cdot P_1 = 73,6$  кПа;
- в точке 2:  $\sigma_{zp2} = 2 \cdot I_2 \cdot P_1 = 68,34$  кПа;
- в точке 3:  $\sigma_{zp3} = 2 \cdot I_3 \cdot P_1 = 51,07$  кПа.

2. При нагрузке  $P_2 = 82,0$  кПа:

- В точке 0:  $\sigma_{zp0} = 2 \cdot I_0 \cdot P_2 = 82,0$  кПа;
- В точке 1:  $\sigma_{zp1} = 2 \cdot I_1 \cdot P_2 = 80,36$  кПа;
- В точке 2:  $\sigma_{zp2} = 2 \cdot I_2 \cdot P_2 = 74,62$  кПа;
- В точке 3:  $\sigma_{zp3} = 2 \cdot I_3 \cdot P_2 = 55,76$  кПа.

3. При нагрузке  $P_3 = 88,86$  кПа:

- в точке 0:  $\sigma_{zp0} = 2 \cdot I_0 \cdot P_3 = 88,86$  кПа;
- в точке 1:  $\sigma_{zp1} = 2 \cdot I_1 \cdot P_3 = 87,08$  кПа;
- в точке 2:  $\sigma_{zp2} = 2 \cdot I_2 \cdot P_3 = 80,86$  кПа;
- в точке 3:  $\sigma_{zp3} = 2 \cdot I_3 \cdot P_3 = 60,42$  кПа.

4. При нагрузке  $P_4 = 95,75$  кПа:

- в точке 0:  $\sigma_{zp0} = 2 \cdot I_0 \cdot P_4 = 95,75$  кПа;
- в точке 1:  $\sigma_{zp1} = 2 \cdot I_1 \cdot P_4 = 93,84$  кПа;
- в точке 2:  $\sigma_{zp2} = 2 \cdot I_2 \cdot P_4 = 87,13$  кПа;
- в точке 3:  $\sigma_{zp3} = 2 \cdot I_3 \cdot P_4 = 65,11$  кПа.

По полученным значениям строим эпюру дополнительных напряжений. Точка пересечения эпюры дополнительных напряжений  $\sigma_{zp}$  и вспомогательной эпюры  $0,2\sigma_{zg}$  условно принимается за нижнюю границу сжимаемой толщи (НГСТ), а расстояние от этой точки до низа подошвы насыпи – за мощность сжимаемой толщи (активной зоны)  $H_c$ .

По данным табл.5 строим графики компрессионных зависимостей  $e = f(\sigma)$  для всех 3 слоев грунтов основания (рис.16).

Расчет осадки для каждого значения нагрузки  $P_i$  производим в табличной форме. Значения  $\sigma_{zpi}^{cp}$  и  $\sigma_{zgi}^{cp}$  определяем для середины каждого слоя. Соответствующие значения коэффициентов пористости  $e_{ni}$  и  $e_{ki}$  определяем по графикам компрессионной зависимости. При расчете осадок учитываем деформации только тех слоев, которые расположены в пределах сжимаемой толщи. Деформациями грунтов за пределами сжимаемой толщи, в силу их малости, пренебрегаем.

Таблица 6

№ i-го слоя	$h_i$ , м	$\sigma_{zgi}^{cp}$ , кПа	$e_{ni}$	$\sigma_{zpi}^{cp}$ , кПа	$\sigma_{zpi}^{cp} + \sigma_{zgi}^{cp}$ , кПа	$e_{ki}$	$\varepsilon_{pzi} = \frac{e_{ni} - e_{ki}}{1 + e_{ni}}$	$S_i$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагрузка $P_1 = 75,1$ кПа								
1	5	1,25	9,09	74,35	75,6	5,0	0,406	2,03
2	10	52,2	0,664	70,97	123,17	0,6625	0,0009	0,009
3	1,3	321,8	0,619	67,62	389,42	0,6155	0,0022	0,0028
								$S_{k1}=2,04$
Нагрузка $P_2 = 82,0$ кПа								
1	5	1,25	9,09	81,18	82,43	4,69	0,436	2,18
2	10	52,2	0,664	77,5	129,7	0,6624	0,00096	0,0096
3	2,5	333,8	0,619	73,16	406,96	0,6146	0,0027	0,0069
								$S_{k2}=2,20$
Нагрузка $P_3 = 88,86$ кПа								
1	5	1,25	9,09	87,97	89,22	4,44	0,461	2,304
2	10	52,2	0,664	83,97	136,17	0,6623	0,001	0,01
3	3,6	345,1	0,619	78,58	423,68	0,6138	0,0032	0,0116
								$S_{k3}=2,33$
Нагрузка $P_4 = 95,75$ кПа								
1	5	1,25	9,09	94,8	96,05	4,1	0,495	2,473
2	10	52,2	0,664	90,5	142,7	0,6622	0,00108	0,0108
3	4,7	356,05	0,619	83,87	439,92	0,613	0,0037	0,0174
								$S_{k4}=2,50$

Далее графическим способом определяем истинные значения  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$ . Для этого по формуле (7) строим линейную зависимость  $P_{расч,и}^{(конс)} = f(S_k)$  по двум точкам:

$$1) \text{ при } S_k = 0,2 \cdot H_1 = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ м,}$$

$$P_{расч}^{(конс)} = \gamma_n (H_p - h_{н.в.}) + \gamma_n^{636} (S_k + h_{н.в.}) = 20,5 \cdot (4,5 - 0,7) + 10,5 \cdot (1 + 0,7) = 95,75 \text{ кПа;}$$

$$2) \text{ при } S_k = 0,5 \cdot H_1 = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ м,}$$

$$P_{расч}^{(конс)} = \gamma_n (H_p - h_{н.в.}) + \gamma_n^{636} (S_k + h_{н.в.}) = 20,5 \cdot (4,5 - 0,7) + 10,5 \cdot (2,5 + 0,7) = 111,5 \text{ кПа.}$$

По этим данным строим прямую (рис. 10) и на этот же график наносим зависимость  $S_k = f(P_i)$  (точки A, B, C, D):

$$\text{при } P_1 = 75,1 \text{ кПа} \quad S_{к1} = 2,04 \text{ м;}$$

$$\text{при } P_2 = 82,0 \text{ кПа} \quad S_{к2} = 2,20 \text{ м;}$$

$$\text{при } P_3 = 88,86 \text{ кПа} \quad S_{к3} = 2,33 \text{ м;}$$

$$\text{при } P_4 = 95,75 \text{ кПа} \quad S_{к4} = 2,50 \text{ м.}$$

По точке пересечения этих двух функций  $P_{расч,и}^{(конс)} = f(S_k)$  и  $S_k = f(P)$  определяем истинное значение  $P_{расч,и}^{(конс)}$  и  $S_{к,и}$ :

$$P_{расч,и}^{(конс)} = 116 \text{ кПа,} \quad S_{к,и} = 2,95 \text{ м.}$$

Проверяем условие устойчивости (2):

$$K_{без}^{(конс)} = \frac{P_{без}^{(конс)}}{P_{расч,и}^{(конс)}} = \frac{107,07}{116,0} = 0,92 < 1.$$

Условие не выполняется, необходимо уменьшить проектную высоту насыпи, определив её по формуле (7) при

$$P_{расч}^{(конс)} = 0,85 P_{без}^{(конс)} = 0,85 \cdot 107,07 = 91,0 \text{ кПа.}$$

Решая уравнение (7) относительно  $H_p$ , получаем выражение для определения проектной высоты насыпи

$$H_p = \frac{P_{расч}^{(конс)} - \gamma_{н,636} (S_k + h_{н.в.})}{\gamma_n} + h_{н.в.} = \frac{91,0 - 10,5 \cdot (2,95 + 0,7)}{20,5} + 0,7 = 3,27 \text{ м.}$$

### **Вывод:**

Принятая вначале проектная высота насыпи  $H_0 = 4,5$  м не удовлетворяет условиям устойчивости основания, поэтому необходимо уменьшить высоту насыпи до  $H_0 = 3,27$  м.

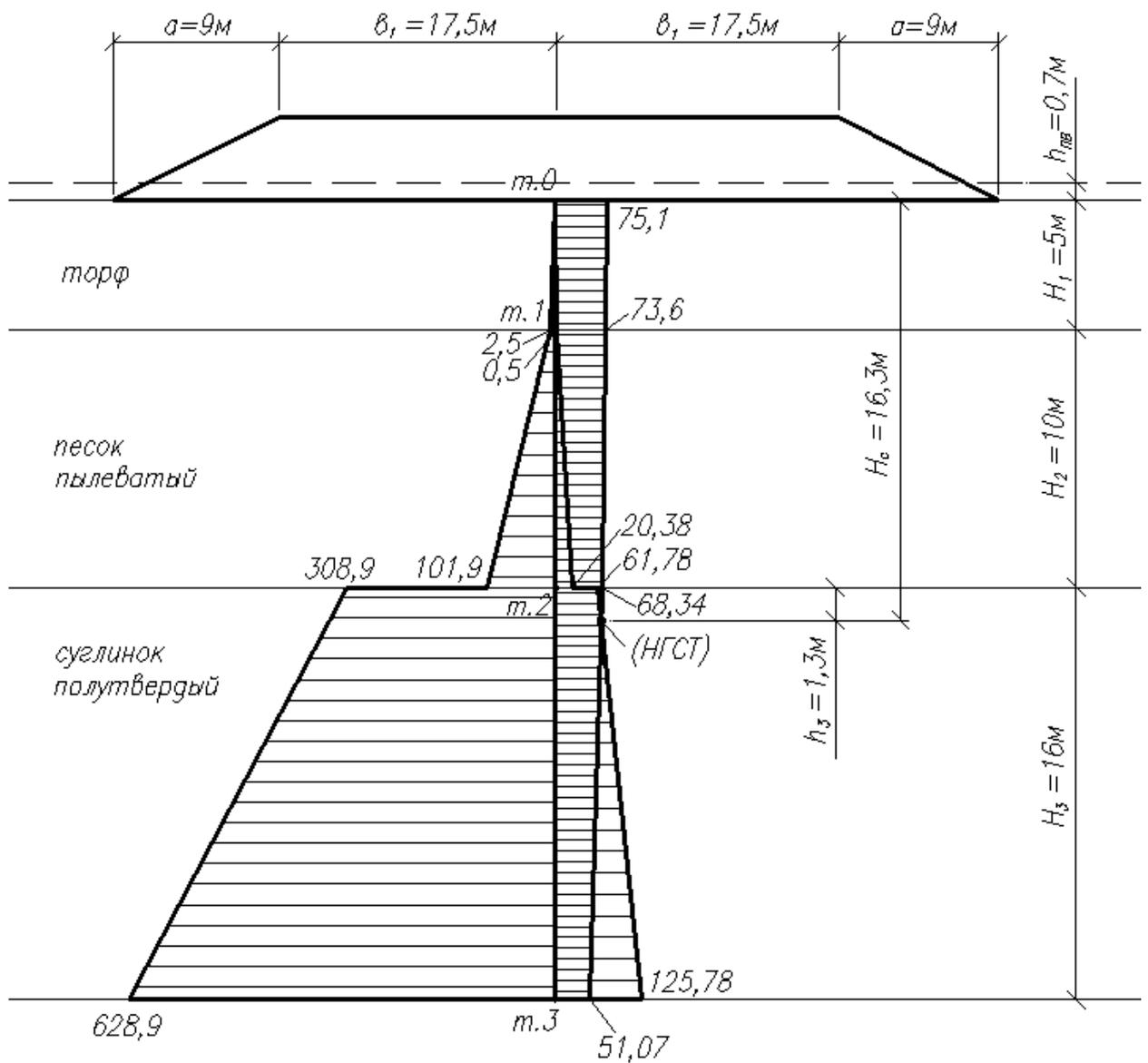


Рис. 5. Эпюры напряжений при нагрузке  $P_1$  (масштабы эпюр 1:100 кПа)

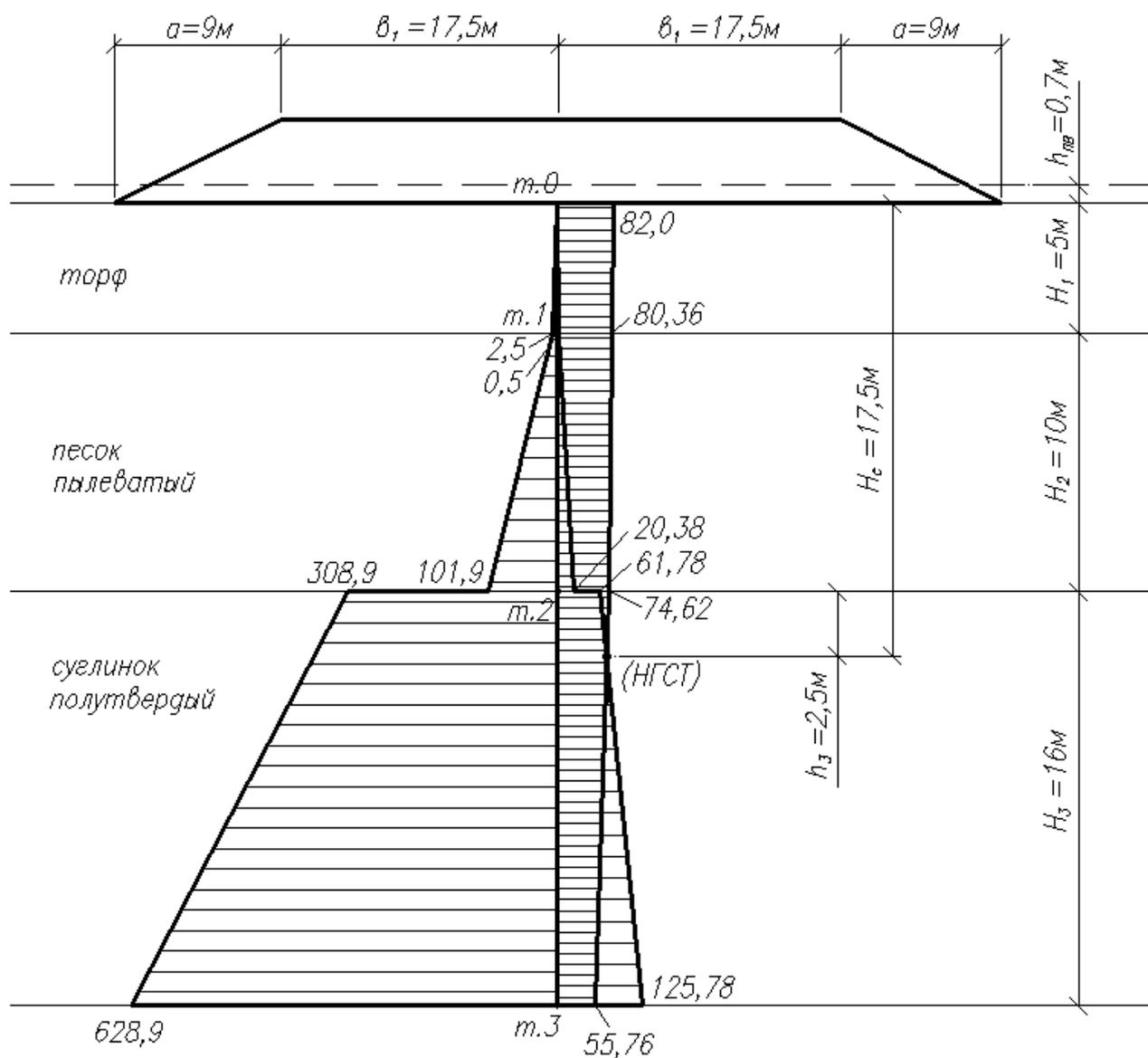


Рис. 6. Эпюры напряжений при нагрузке  $P_2$  (масштабы эпюр 1:100 кПа)

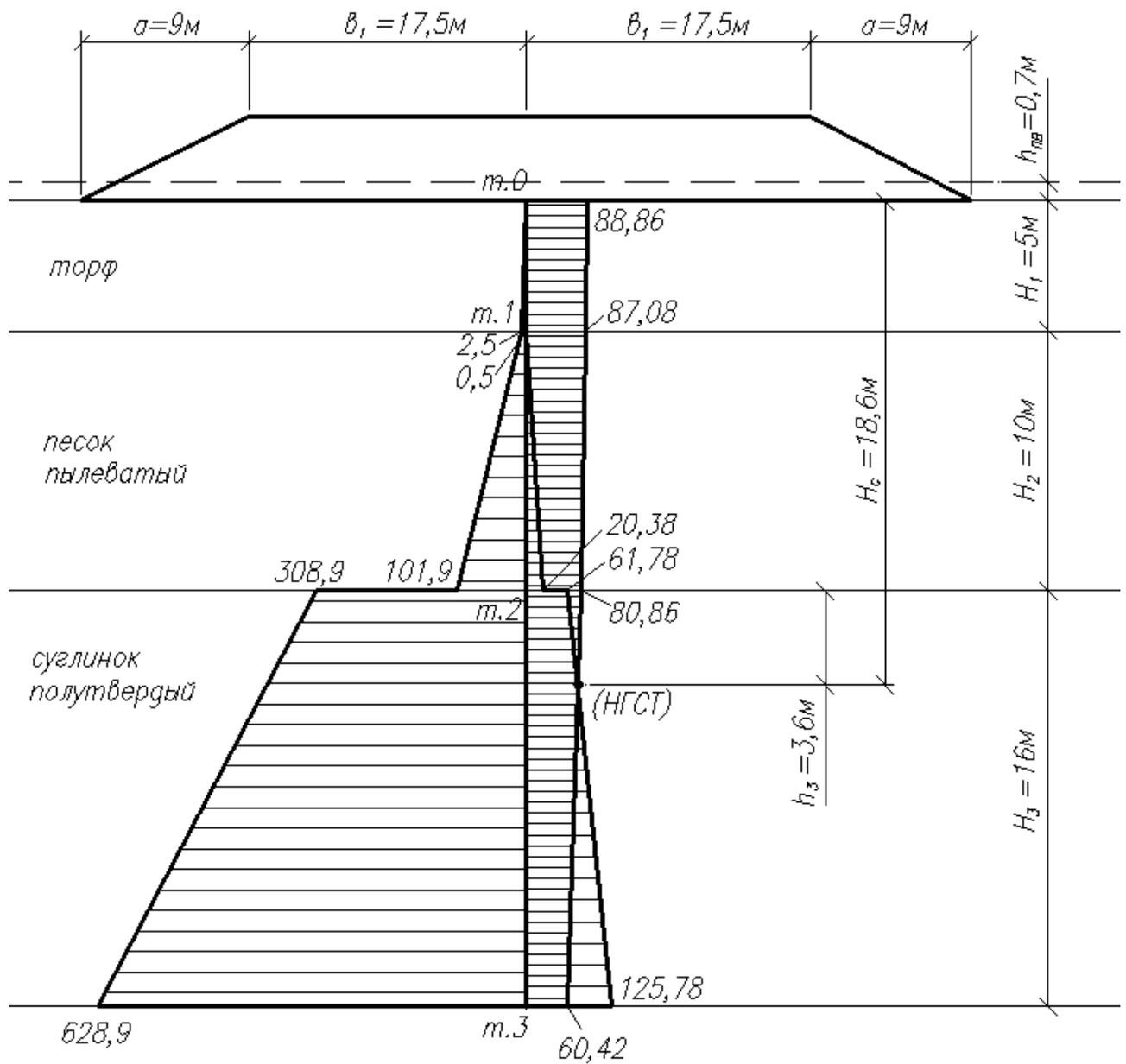


Рис. 7. Эпюры напряжений при нагрузке  $P_3$  (масштабы эпюр 1:100 кПа)

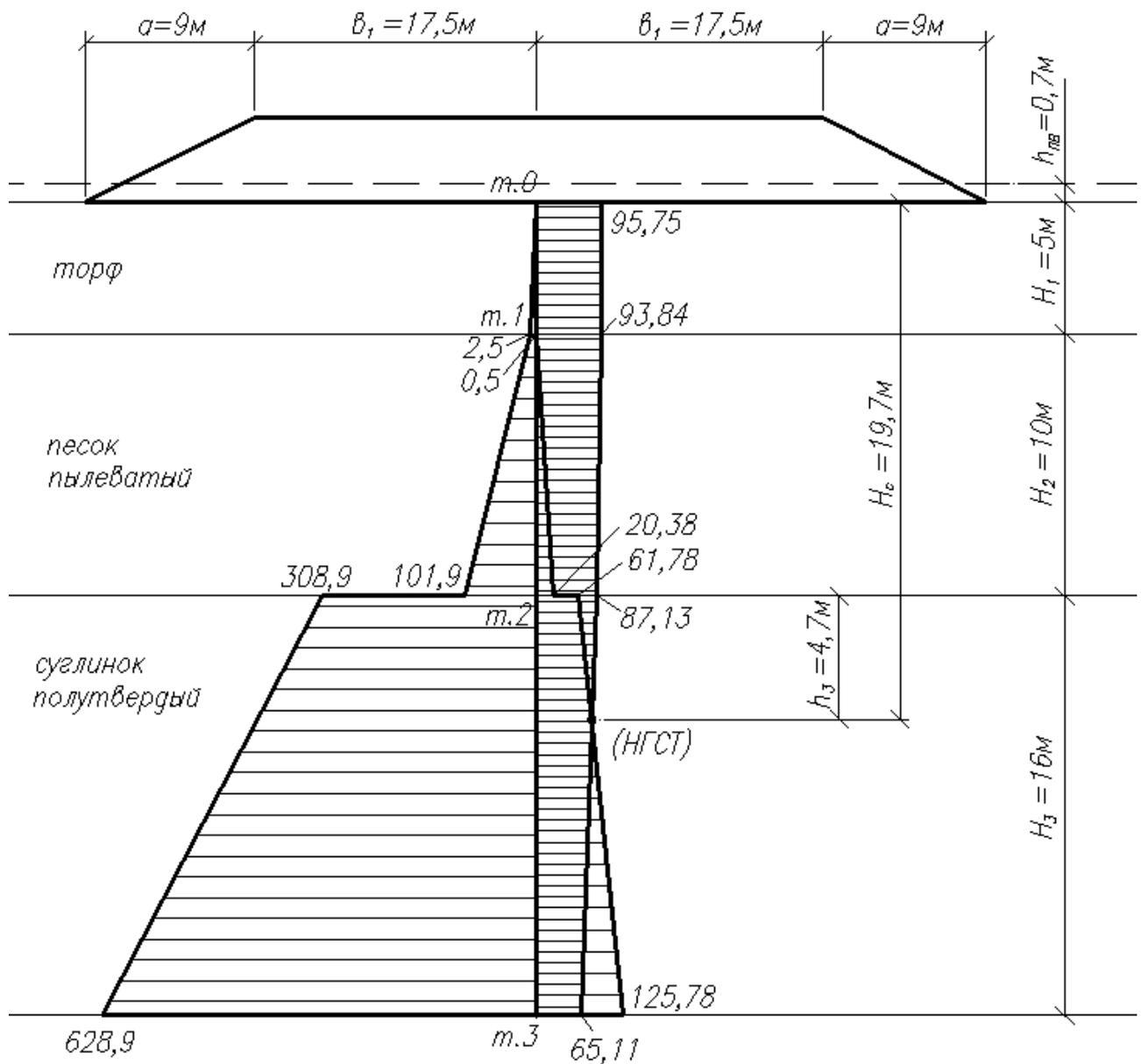


Рис. 8. Эпюры напряжений при нагрузке  $P_4$  (масштабы эпюр 1:100 кПа)

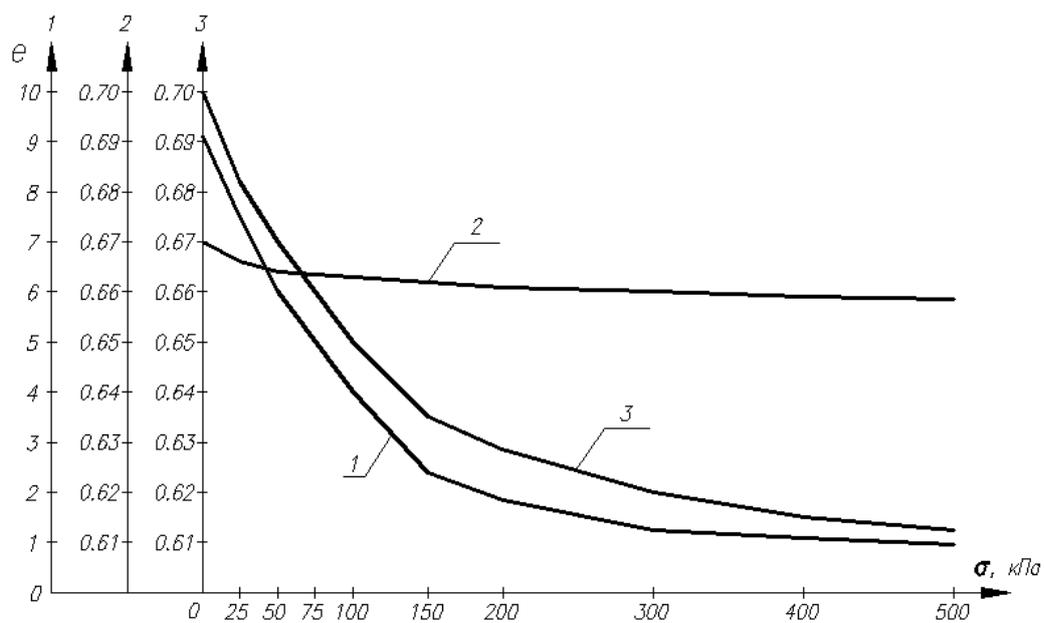


Рис. 9. Графики компрессионной зависимости  
(1, 2, 3 – номера слоев грунтов основания)

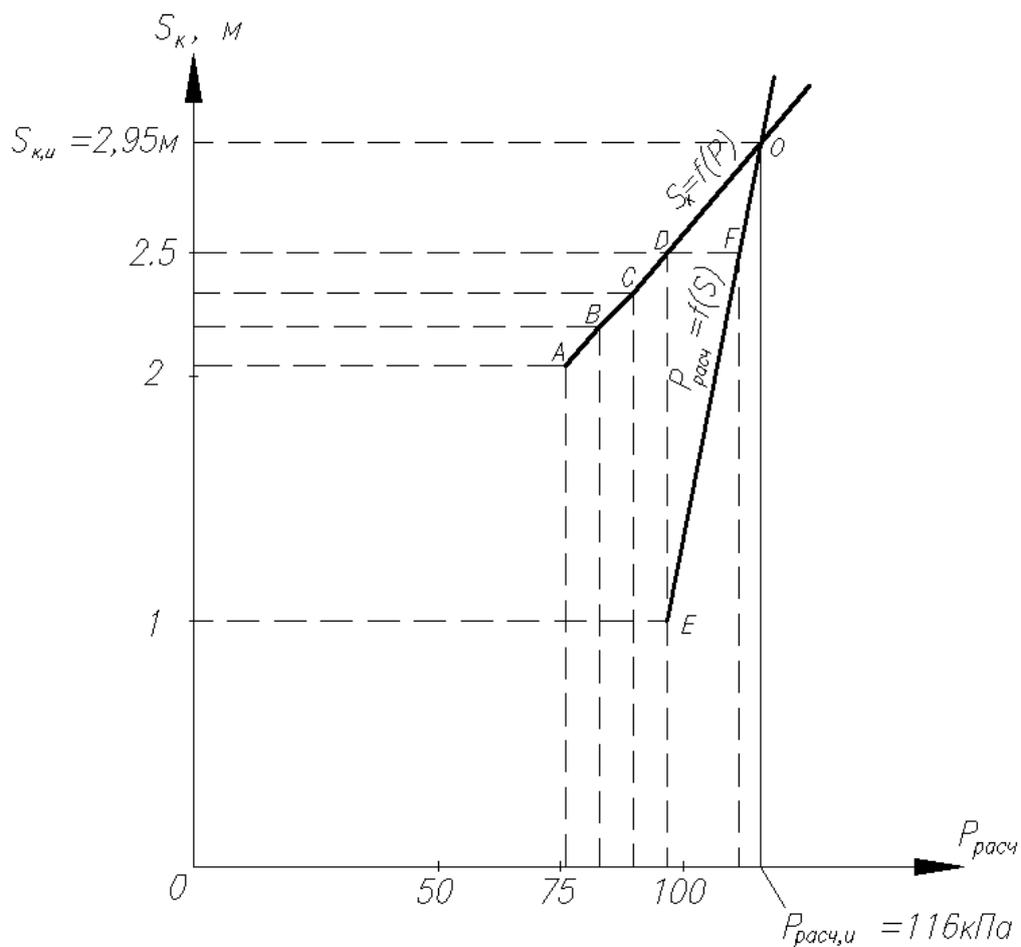
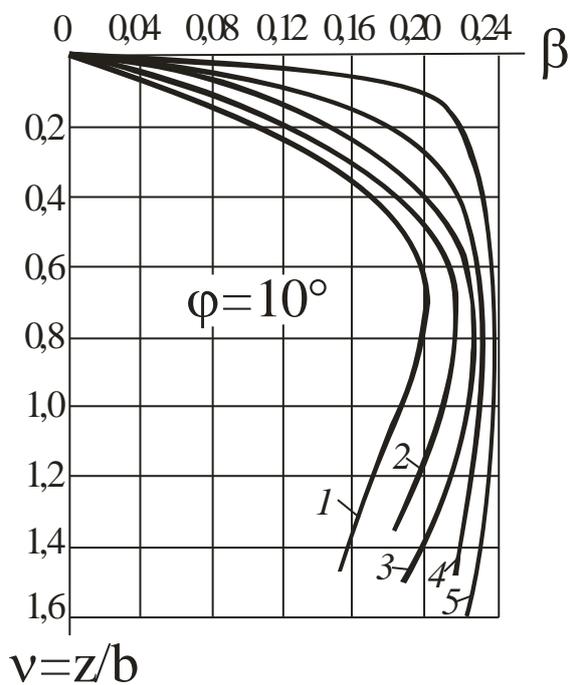
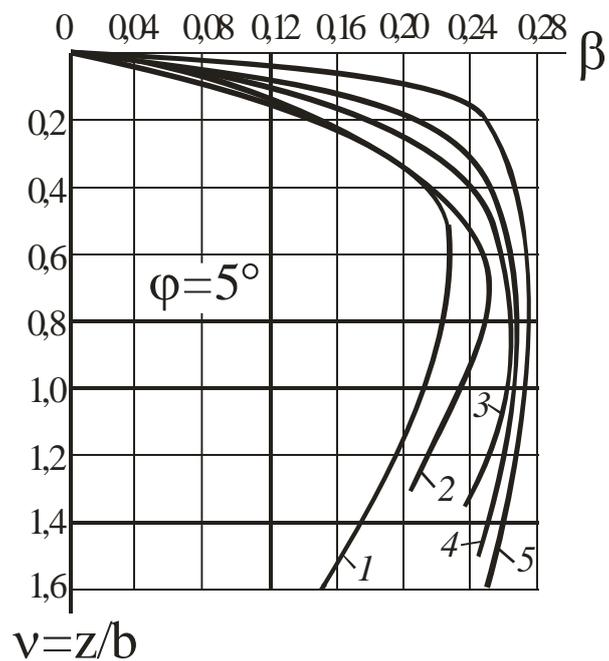
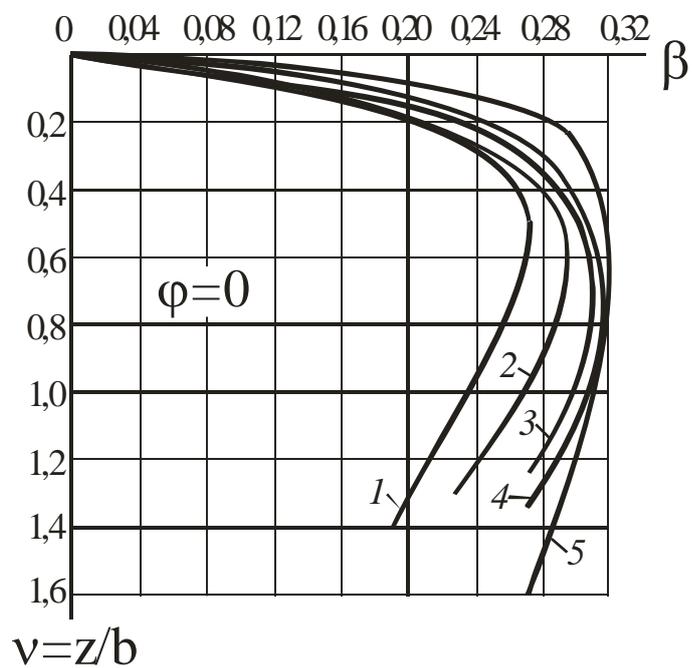


Рис. 10. Схема к определению  $P_{расч,и}$  и  $S_{к,и}$

## ЛИТЕРАТУРА

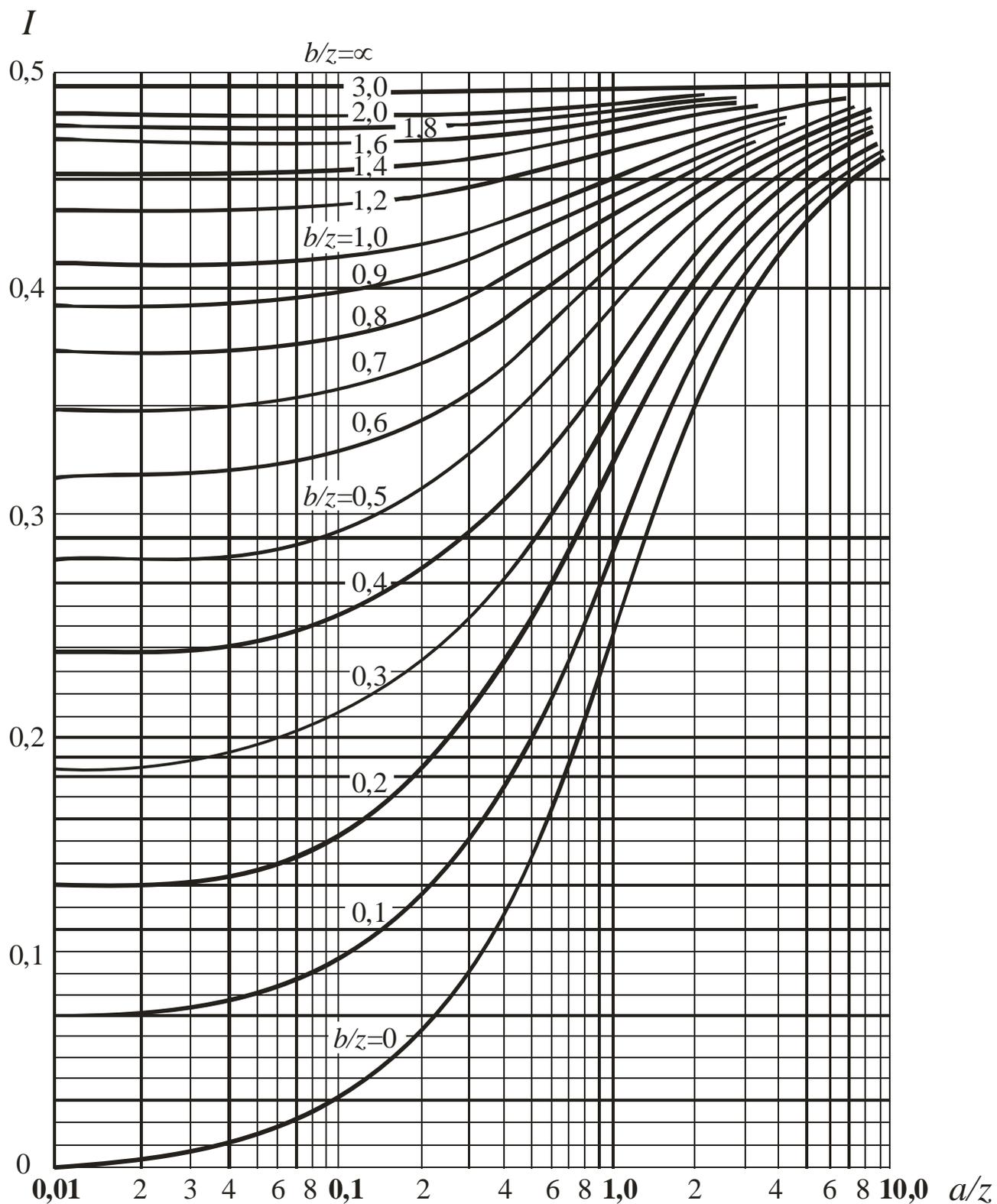
1. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги / Минрегион России – М., 2013. – 164 с.
2. Бондарева Э.Д. Изыскания и проектирование автомобильных дорог: учебное пособие / Э.Д. Бондарева, М.П. Клековкина. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, АСВ, 2012. – 94с.
3. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982. - 511 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. - 272 с.
5. Проектирование автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника/ Под ред. Г.А. Федотова. М.: Транспорт, 1989. - 437 с.

Графики функций  $\beta$



- 1 - для  $\frac{2a}{B} = 10$ ;
- 2 - для  $\frac{2a}{B} = 3$ ;
- 3 - для  $\frac{2a}{B} = 1$ ;
- 4 - для  $\frac{2a}{B} = 0,6$ ;
- 5 - для  $\frac{2a}{B} = 0,2$ .

Номограмма Остерберга для определения сжимающих напряжений в грунте от нагрузки, меняющейся по закону прямой





## **ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**

Учебно-методическое пособие к выполнению расчетно-графической работы по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», направленность (профиль) «Автомобильные дороги» на тему:

«Расчет устойчивости и деформативности основания насыпи земляного полотна»

Автор:  
Рубис Раисович ХАСАНОВ

Редакционно-издательский отдел  
Казанского государственного архитектурно-строительного университета  
Лицензия ЛР №                      от

---

Подписано в печать			Формат 60x84/16
Заказ		Печать офсетная	Усл.-печ.л.1,0
Тираж	экз.	Бумага тип №	Учетн.-изд.л.1,0

---

**Печатно-множительный отдел КГАСУ**  
Лицензия ПД №                      от  
420043, Казань, Зеленая, 1

