

# Расчёт осадки насыпи

При индивидуальном проектировании производится расчет осадок основания насыпей и предусматривает мероприятия по устранению их последствий, либо по предотвращению их появлений:

- 1) Назначение запаса на осадку – применяется, если есть возможность обеспечить временное повышение отметок без нарушения требования по уклонам профиля (ограничения: участки с руководящим уклоном, подходы к мостам)
- 2) Уширение основной площадки земляного полотна с последующим в период эксплуатации подъемкой пути на балласт.
- 3) Мелиорация грунтов основной площадки для предотвращения осадки (устройство свайных оснований, мероприятия по ускорению консолидации грунтов) применяется при больших величинах осадок (слабые грунты в основании) на скоростных и особогрузонапряженных линиях.

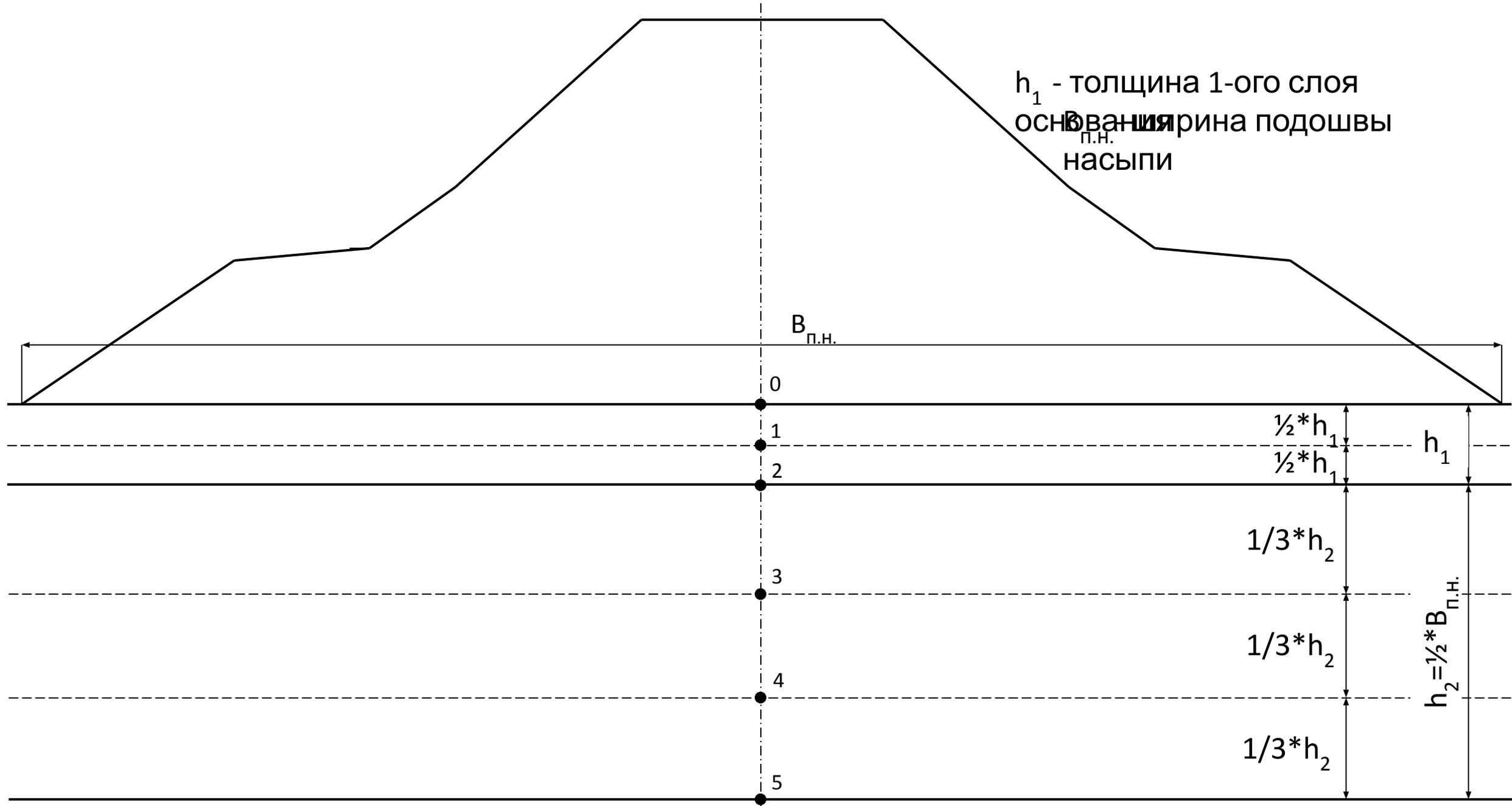
Для упрощения расчетов вводятся следующие допущения:

- осадки определяются для насыпей, находящихся в незатопляемом состоянии (время паводка занимает короткий период);
- в качестве расчетного сечения принимается ось насыпи, относительно которой поперечное сечение насыпи является симметричным;
- грунт основания насыпи является однородным на значительной глубине;
- поперечным уклоном поверхности земляного полотна пренебрегаем;
- задача плоская, статическая.

Расчет осадки производится с применением компрессионных кривых в следующей последовательности:

1. Основание по глубине делится горизонтальными плоскостями на  $i$  слоев с толщиной  $h_i$ .
2. Строятся эпюры вертикальной составляющей нормальных напряжений по глубине основания от веса грунта основания и коэффициента пористости в природном состоянии.
3. Строится эпюра вертикальной составляющей нормальных напряжений действующих по подошве насыпи (эпюра внешних нагрузок).
4. Эпюра напряжений от внешних нагрузок разбивается на элементарные прямоугольные и треугольные нагрузки.
5. От каждой элементарной нагрузки по основанию насыпи на глубине границ выделенных слоев находится вертикальная составляющая нормальных напряжений, и определяется величина суммарного напряжения от внешних нагрузок  $\sigma_p$  и строится их эпюра по глубине.
6. Строятся эпюры суммарных напряжений от внешних нагрузок и собственного веса грунта основания и коэффициента пористости в расчетном состоянии после сооружения насыпи.
7. Определяется толщина сжимаемой толщи из условия  $\sigma_p = 0,2\sigma_{пр}$ , исходя из этого условия пересчитывается толщина последнего сжимаемого слоя.
8. Определяют осадку каждого выделенного слоя.

# Схема к расчету осадки



# Построение эпюр природных напряжений в основании насыпи и коэффициента пористости грунта

Напряжения от собственного веса грунта основания  $\sigma_{\text{пр-}i}$  определяются из характеристик грунта основания насыпи (п.13 из задания).

Последовательность расчета:

1. Задается первоначальное значение удельного сложения грунта;
2. По компрессионной кривой определяется коэффициент пористости, и по нему находится плотность сложения грунта и удельный вес;
3. Сравнивается полученное значение удельного веса с первоначальным сложением грунта, если расхождение между ними больше  $0,05 \text{ кН/м}^3$ , то производится перерасчет до совпадения с заданной точностью.

Основные формулы для расчета:

$$\gamma_{\text{пр-}i} = \frac{\gamma_s}{1 + e_{\text{пр-}i}} \cdot (1 + W)$$

$$\gamma'_{\text{пр-}i} = \gamma_{\text{пр-}i} + \Delta\gamma$$

$$\sigma_{\text{пр-}i} = \sigma_{\text{пр-(}i-1)} + \frac{\gamma_{\text{пр-}i} + \gamma'_{\text{пр-}i}}{2} \cdot \Delta h_i$$

$$|\gamma_{\text{пр-}i} - \gamma'_{\text{пр-}i}| \leq 0,05$$

## Пример расчета

Ширина подошвы насыпи – 75,6 м

Характеристики 1-ого слоя основания

Толщина 1-ого слоя основания – 2,5 м

Удельный вес частиц грунта – 26,7 кН/м<sup>3</sup>

Влажность – 32 %

Угол внутреннего трения – 11°

Характеристика компрессионной кривой

Характеристики 2-ого слоя основания

Толщина 2-ого слоя основания – 30,0 м

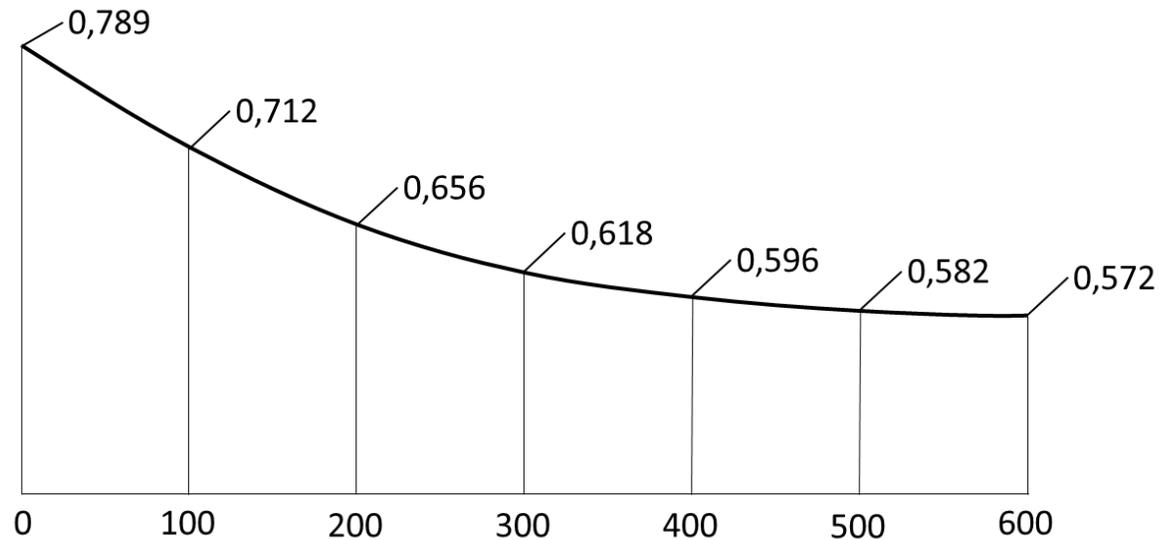
Удельный вес частиц грунта – 26,7 кН/м<sup>3</sup>

Влажность – 20 %

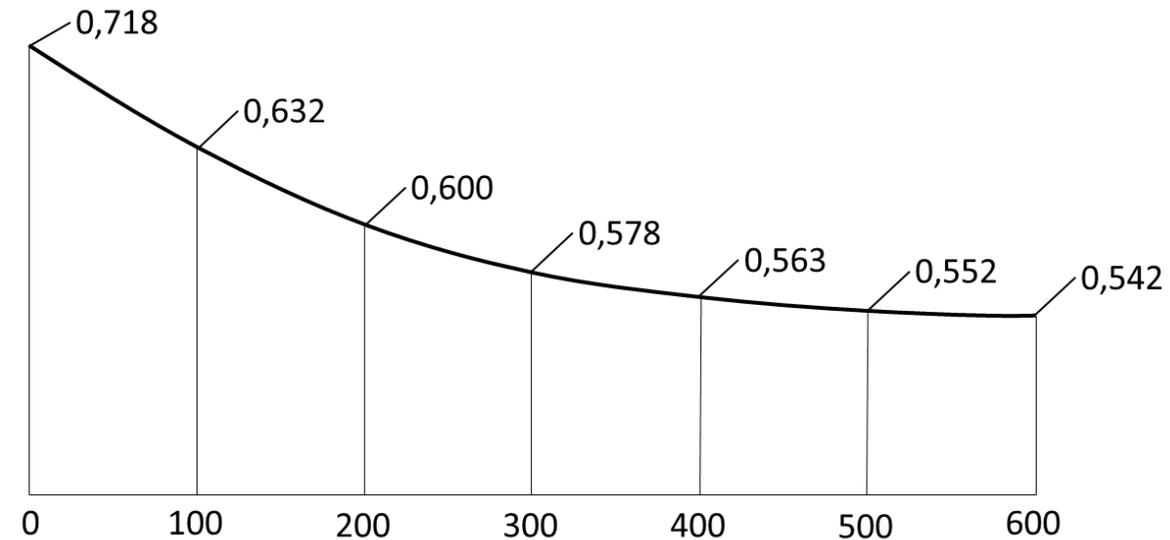
Угол внутреннего трения – 18°

		0	100	200	300	400	500	600
	1 слой	0,789	0,712	0,656	0,618	0,596	0,580	0,572
	2 слой	0,718	0,632	0,600	0,578	0,563	0,552	0,542

### Компрессионная кривая 1-ого слоя основания



### Компрессионная кривая 2-ого слоя основания



В точке 0:  $h = 0$  м

$$\sigma_{\text{пр-0}} = 0$$

По компрессионной кривой 1 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-0}} = 0,789$

$$\gamma_{\text{пр-0}} = \frac{26,7}{1 + 0,789} * (1 + 0,32) = 19,70 \text{ кН/м}^3$$

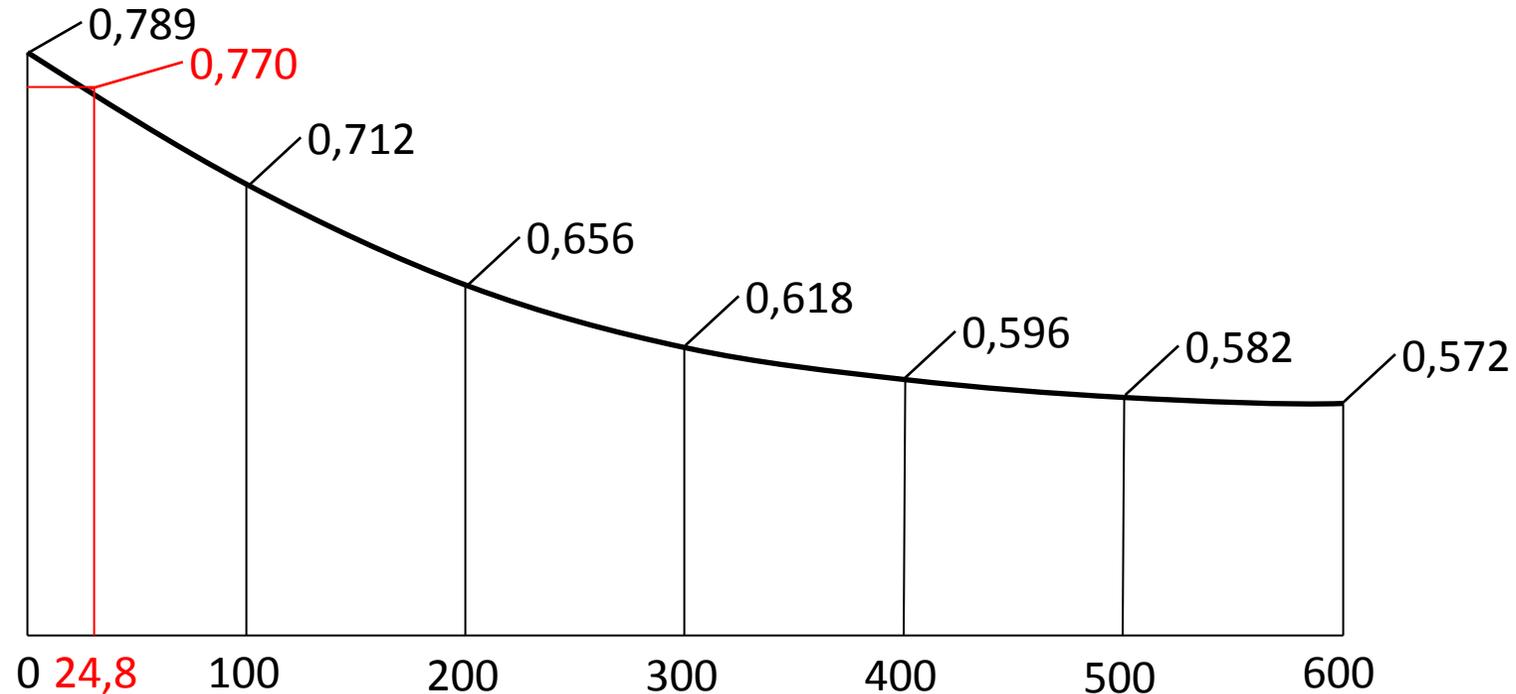
В точке 1:  $\Delta h = h_1/2 = 1,25$  м,  $h = 1,25$  м

Задаемся новым значением удельного веса. Принимаем  $\Delta\gamma = 0,2$  кН/м<sup>3</sup>

$$\gamma'_{\text{пр-1}} = \gamma_{\text{пр-1}} + \Delta\gamma = 19,70 + 0,2 = 19,90 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-1}} = \sigma_{\text{пр-0}} + \frac{\gamma_{\text{пр-1}} + \gamma'_{\text{пр-1}}}{2} \cdot \Delta h = 0 + \frac{19,70 + 19,90}{2} * 1,25 = 24,8 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 1 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-1}} = 0,770$



$$\gamma_{\text{пр-1}} = \frac{26,7}{1 + 0,770} * (1 + 0,32) = 19,91 \text{ кН/м}^3$$

$$|19,91 - 19,90| = 0,01 \text{ кН/м}^3 < 0,05$$

В дальнейших расчетах принимается:  $\gamma_{\text{пр-1}} = 19,91 \text{ кН/м}^3$

В точке 2:  $\Delta h = h_1/2 = 1,25 \text{ м}$ ,  $h = 2,5 \text{ м}$

Задаем новым значением удельного веса. Принимаем  $\Delta\gamma = 0,2 \text{ кН/м}^3$

$$\gamma'_{\text{пр-2}} = \gamma_{\text{пр-2}} + \Delta\gamma = 19,91 + 0,2 = 20,11 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-2}} = \sigma_{\text{пр-1}} + \frac{\gamma_{\text{пр-2}} + \gamma'_{\text{пр-2}}}{2} \cdot \Delta h = 24,8 + \frac{19,91 + 20,11}{2} * 1,25 = 49,8 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 1 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-2}} = 0,751$

$$\gamma_{\text{пр-2}} = \frac{26,7}{1 + 0,751} * (1 + 0,32) = 20,13 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,13 - 20,11| = 0,02 \text{ кН/м}^3 < 0,05$$

В дальнейших расчетах принимается:  $\gamma_{\text{пр-2}} = 20,13 \text{ кН/м}^3$

В точке 2':  $h = 2,5 \text{ м}$

По компрессионной кривой **2 слоя** находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-2}'} = 0,675$

$$\gamma_{\text{пр-2}'} = \frac{26,7}{1 + 0,675} * (1 + 0,2) = 19,13 \text{ кН/м}^3$$

В точке 3:  $\Delta h = h_2/3 = 12,6$  м,  $h = h_1 + \Delta h = 2,5 + 12,6 = 15,1$  м

Принимаем  $\Delta\gamma = 0,2$  кН/м<sup>3</sup>

$$\gamma'_{\text{пр-3}} = \gamma_{\text{пр-3}} + \Delta\gamma = 19,13 + 0,2 = 19,33 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-3}} = \sigma_{\text{пр-2}} + \frac{\gamma_{\text{пр-3}} + \gamma'_{\text{пр-3}}}{2} \cdot \Delta h = 49,8 + \frac{19,13 + 19,33}{2} * 12,6 = 292,1 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-3}} = 0,580$

$$\gamma_{\text{пр-3}} = \frac{26,7}{1 + 0,580} * (1 + 0,2) = 20,28 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,28 - 19,33| = 0,95 \text{ кН/м}^3 > 0,05$$

Условие не выполняется, необходимо задаться новым значением удельного веса.

Принимаем  $\Delta\gamma = 1,2$  кН/м<sup>3</sup>

$$\gamma'_{\text{пр-3}} = \gamma_{\text{пр-3}} + \Delta\gamma = 19,13 + 1,2 = 20,33 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-3}} = \sigma_{\text{пр-2}} + \frac{\gamma_{\text{пр-3}} + \gamma'_{\text{пр-3}}}{2} \cdot \Delta h = 49,8 + \frac{19,13 + 20,33}{2} * 12,6 = 298,4 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-3}} = 0,578$

$$\gamma_{\text{пр-3}} = \frac{26,7}{1 + 0,578} * (1 + 0,2) = 20,30 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,30 - 20,33| = 0,02 \text{ кН/м}^3 < 0,05$$

В дальнейших расчетах принимается:  $\gamma_{\text{пр-3}} = 20,30$  кН/м<sup>3</sup>

В точке 4:  $\Delta h = h_2/3 = 12,6$  м,  $h = 15,1 + 12,6 = 27,7$  м

Принимаем  $\Delta\gamma = 0,2$  кН/м<sup>3</sup>

$$\gamma'_{\text{пр-4}} = \gamma_{\text{пр-4}} + \Delta\gamma = 20,30 + 0,2 = 20,50 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-4}} = \sigma_{\text{пр-3}} + \frac{\gamma_{\text{пр-4}} + \gamma'_{\text{пр-4}}}{2} \cdot \Delta h = 298,4 + \frac{20,30 + 20,50}{2} * 12,6 = 555,4 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-4}} = 0,546$

$$\gamma_{\text{пр-4}} = \frac{26,7}{1 + 0,546} * (1 + 0,2) = 20,72 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,72 - 20,50| = 0,22 \text{ кН/м}^3 > 0,05$$

Условие не выполняется, необходимо задаться новым значением удельного веса.

Принимаем  $\Delta\gamma = 0,4$  кН/м<sup>3</sup>

$$\gamma'_{\text{пр-4}} = \gamma_{\text{пр-4}} + \Delta\gamma = 20,30 + 0,4 = 20,70 \text{ кН/м}^3$$

$$\sigma_{\text{пр-4}} = \sigma_{\text{пр-3}} + \frac{\gamma_{\text{пр-4}} + \gamma'_{\text{пр-4}}}{2} \cdot \Delta h = 298,4 + \frac{20,30 + 20,70}{2} * 12,6 = 556,7 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-4}} = 0,546$

$$\gamma_{\text{пр-4}} = \frac{26,7}{1 + 0,546} * (1 + 0,2) = 20,72 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,72 - 20,70| = 0,02 \text{ кН/м}^3 < 0,05$$

В дальнейших расчетах принимается:  $\gamma_{\text{пр-4}} = 20,72$  кН/м<sup>3</sup>

В точке 5:  $\Delta h = h_2/3 = 12,6$  м,  $h = 27,7 + 12,6 = 40,3$  м

Принимаем  $\Delta\gamma = 0$  кН/м<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}\gamma'_{\text{пр-5}} &= \gamma_{\text{пр-5}} + \Delta\gamma = 20,72 + 0 = 20,72 \text{ кН/м}^3 \\ \sigma_{\text{пр-5}} &= \sigma_{\text{пр-4}} + \frac{\gamma_{\text{пр-5}} + \gamma'_{\text{пр-5}}}{2} \cdot \Delta h = 556,7 + \frac{20,72 + 20,72}{2} * 12,6 = 817,8 \text{ кПа}\end{aligned}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости: если  $\sigma_{\text{пр}} > 600$  кПа;  $e_{\text{пр}} = e_{\text{пр-}\sigma 600}$

$$\begin{aligned}e_{\text{пр-5}} &= 0,542 \\ \gamma_{\text{пр-5}} &= \frac{26,7}{1 + 0,542} * (1 + 0,2) = 20,78 \text{ кН/м}^3\end{aligned}$$

$$|20,78 - 20,72| = 0,06 \text{ кН/м}^3 > 0,05$$

Условие не выполняется, необходимо задаться новым значением удельного веса.

Принимаем  $\Delta\gamma = 0,1$  кН/м<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}\gamma'_{\text{пр-5}} &= \gamma_{\text{пр-5}} + \Delta\gamma = 20,72 + 0,1 = 20,82 \text{ кН/м}^3 \\ \sigma_{\text{пр-5}} &= \sigma_{\text{пр-4}} + \frac{\gamma_{\text{пр-5}} + \gamma'_{\text{пр-5}}}{2} \cdot \Delta h = 556,7 + \frac{20,72 + 20,82}{2} * 12,6 = 818,4 \text{ кПа}\end{aligned}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{\text{пр-5}} = 0,542$

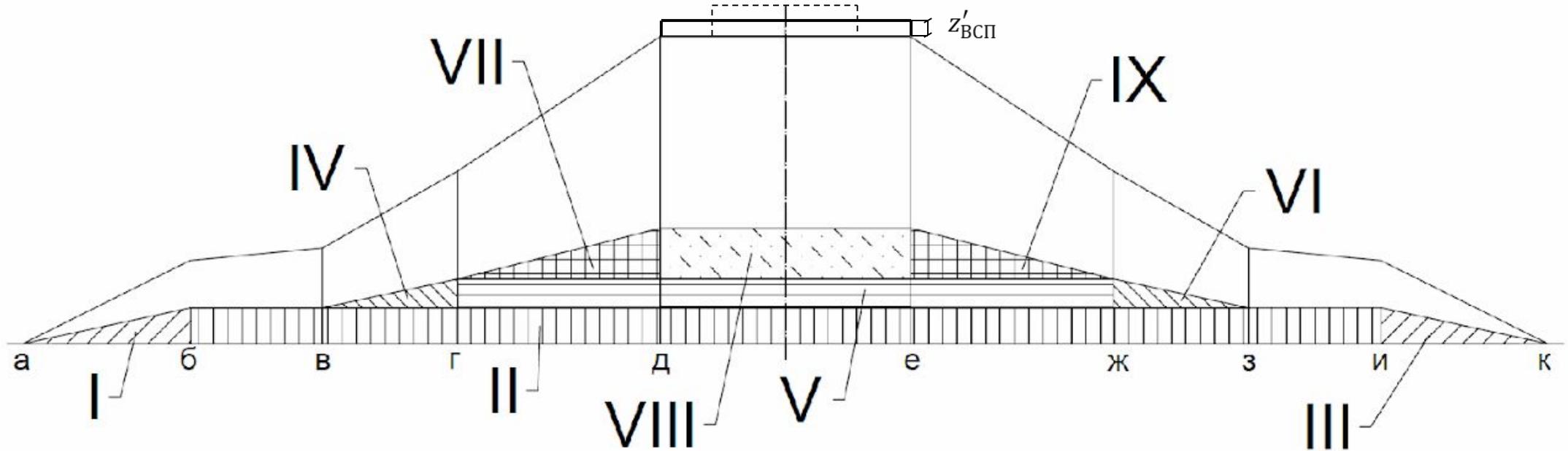
$$\gamma_{\text{пр-5}} = \frac{26,7}{1 + 0,542} * (1 + 0,2) = 20,78 \text{ кН/м}^3$$

$$|20,78 - 20,82| = 0,04 \text{ кН/м}^3 < 0,05$$

В дальнейших расчетах принимается:  $\gamma_{\text{пр-5}} = 20,72$  кН/м<sup>3</sup>

# Построение эпюры напряжений по подошве насыпи

Эпюра напряжений от внешних нагрузок  $\sigma_p$  разбивается на элементарные прямоугольные и треугольные нагрузки. От воздействия внешних нагрузок  $\sigma_p$  строится эпюра  $\sigma_{p-i}$ . Расчетная схема для нахождения  $\sigma_p$  представлена ниже.



Необходимо учесть интенсивность нагрузки от верхнего строения пути. Высота фиктивного столба грунта ВСП, приведенная к ширине ОПЗП определяется по формуле

$$z'_{\text{всп}} = \frac{b_{\text{всп}} * P_{\text{всп}}}{B_0 * \gamma_{\text{з.с}}}$$

где:  $b_{\text{всп}}$  – ширина ВСП;  $P_{\text{всп}}$  – нагрузка от веса ВСП;

$B_0$  – ширина ОПЗП;  $\gamma_{\text{з.с}}$  – удельный вес грунта защитного слоя.

Напряжения в точках «а» и «к» равны 0.

Напряжение в точке «б» равно напряжениям в точках «в», «з», «и»:

$$\sigma_b = \sigma_v = \sigma_z = \sigma_i = \gamma^{\text{низ}} * h_b,$$

где:  $\gamma^{\text{низ}}$  - удельный вес нижней части насыпи;

$h_b$  – высота незатопляемой бермы (п.11 из задания).

Напряжение в точке «г» равно напряжениям в точке «ж»:

$$\sigma_g = \sigma_j = \gamma^{\text{низ}} * (H_n - 6),$$

где:  $H_n$  – высота насыпи (п.5 из задания).

Напряжение в точке «д» равно напряжениям в точке «е»:

$$\sigma_d = \sigma_e = \gamma^{\text{низ}} * (H_n + z'_{\text{ВСП}}),$$

Далее необходимо произвести расчет интенсивности каждой элементарной нагрузки:

$$\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III} = \sigma_b$$

$$\sigma_{IV} = \sigma_V = \sigma_{VI} = \sigma_g - \sigma_b$$

$$\sigma_{VII} = \sigma_{VIII} = \sigma_{IX} = \sigma_d - \sigma_g$$

Напряжения от элементарных нагрузок определяются по формуле:

$$\sigma_{\square} = -\frac{p}{\pi} \left( \beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - \beta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right)$$

$$\sigma_{\Delta} = -\frac{p * z}{\pi * b} \left[ (\sin \beta_1)^2 - (\sin \beta_2)^2 - \operatorname{tg} \beta_2 \left( \beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - \beta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right) \right]$$

где:  $b$  – ширина нагрузки.

## Пример расчета

Категория дороги – 2

Количество путей – 1

Высота насыпи – 15 м

Высота незатопляемой бермы – 7 м

Ширина незатопляемой бермы – 8 м

Удельный вес грунта защитного слоя – 19,5 кН/м<sup>3</sup>

Удельный вес нижней части насыпи – 18,8 кН/м<sup>3</sup>

$$\sigma_6 = \sigma_B = \sigma_3 = \sigma_{II} = \gamma^{\text{низ}} * h_6 = 18,8 * 7 = 131,6 \text{ кПа}$$

$$\sigma_7 = \sigma_{ж} = \gamma^{\text{низ}} * (H_H - 6) = 18,8 * (15 - 6) = 169,2 \text{ кПа}$$

$$z'_{\text{ВСП}} = \frac{b_{\text{ВСП}} * P_{\text{ВСП}}}{B_0 * \gamma_{з.с}} = \frac{4,88 * 90}{6,6 * 19,5} = 0,64 \text{ м}$$

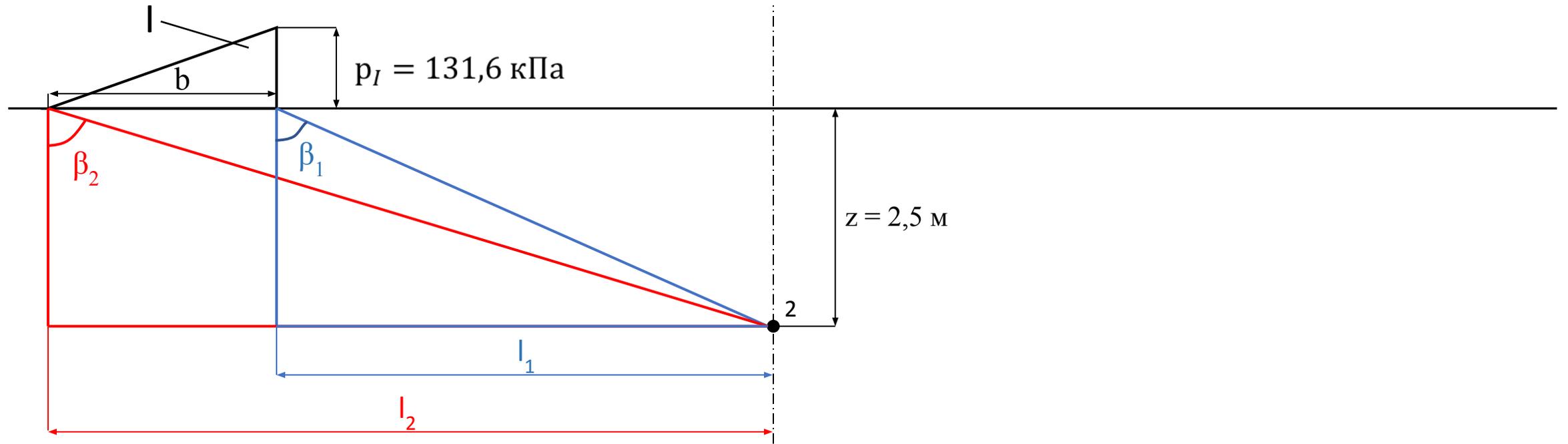
$$\sigma_д = \sigma_e = \gamma^{\text{низ}} * (H_H + z'_{\text{ВСП}}) = 18,8 * (15 + 0,64) = 294,1 \text{ кПа}$$

$$\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III} = \sigma_6 = 131,6 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{IV} = \sigma_V = \sigma_{VI} = \sigma_7 - \sigma_6 = 169,2 - 131,6 = 37,6 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{VII} = \sigma_{VIII} = \sigma_{IX} = \sigma_д - \sigma_7 = 294,1 - 169,2 = 124,9 \text{ кПа}$$

Для точки «2» схема определения напряжений от элементарной нагрузки I выглядит следующим образом:



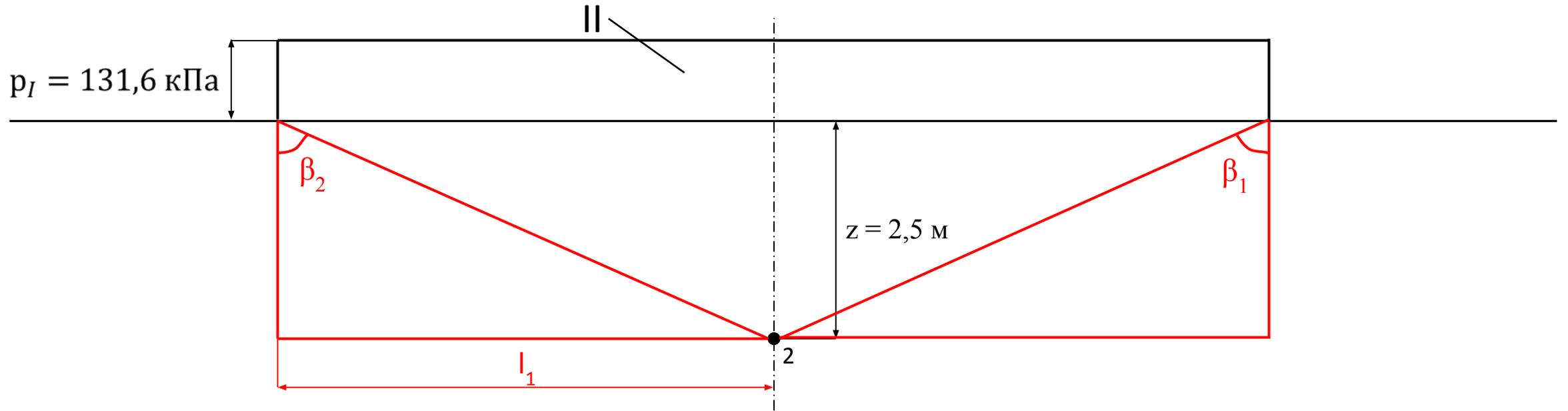
Углы отрицательные, так как отложены против часовой стрелки. Для нахождения угла  $\beta_1$  необходимо найти  $\operatorname{tg}\beta_1$  из выделенного треугольника. Один из катетов будет равен глубине точки «2». Второй катет можно найти, измерив его на чертеже, или посчитать в зависимости от ОПЗП, уклона откосов, высоты насыпи и ширины бермы. Для данного варианта  $l_1 = b_{\text{опзп}}/2 + 6 \cdot 1,5 + (H_{\text{н}} - 6 - h_{\text{бермы}}) \cdot 1,75 + b_{\text{бермы}} = 6,6/2 + 6 \cdot 1,5 + (15 - 6 - 7) \cdot 1,75 + 8 = 23,8 \text{ м}$

Следовательно  $\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{l_1}{z}$ . Угол  $\beta_1 = \operatorname{arctg}\beta_1$ .

Аналогично находится  $\beta_2$ .  $l_2 = b_{\text{опзп}}/2 + 6 \cdot 1,5 + (H_{\text{н}} - 6 - h_{\text{бермы}}) \cdot 1,75 + b_{\text{бермы}} + h_{\text{бермы}} \cdot 2 = 6,6/2 + 6 \cdot 1,5 + (15 - 6 - 7) \cdot 1,75 + 8 + 7 \cdot 2 = 37,8 \text{ м}$   
 $\operatorname{tg}\beta_1 = -\frac{23,8}{2,5} = -9,52$      $\beta_1 = \operatorname{arctg} - 9,52 = -1,466 \text{ рад}$      $\operatorname{tg}\beta_2 = -\frac{37,8}{2,5} = -15,12$      $\beta_2 = \operatorname{arctg} - 15,12 = -1,505$

$$\sigma_{p-I} = \frac{131,6 \cdot 2,5}{3,14 \cdot 14} \left[ (\sin(-1,466))^2 - (\sin(-1,505))^2 - (-15,12) \cdot \left( -1,466 + \frac{1}{2} \sin 2 \cdot (-1,466) - (-1,505) - \frac{1}{2} \sin 2 \cdot (-1,505) \right) \right] = 0,02 \text{ кПа}$$

Для точки «2» схема определения напряжений от элементарной нагрузки II выглядит следующим образом:



Угол  $\beta_2$  равен углу  $\beta_1$  из предыдущего расчета. Нагрузка симметрична относительно оси насыпи, следовательно углы  $\beta_2$  и  $\beta_1$  равны и имеют разный знак.

$$\beta_2 = -1,466 \text{ рад} \quad \beta_1 = -\beta_2 = 1,466$$

$$\sigma_{p-II} = -\frac{131,6}{3,14} \left( 1,466 + \frac{1}{2} \sin 2 * 1,466 - (-1,466) - \frac{1}{2} \sin 2 * (-1,466) \right) = 131,54 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{p-III} = \sigma_{p-I}$$

**Напряжения от остальных элементарных нагрузок рассчитываются аналогично.**

**Весь расчет рекомендуется свести в таблицу.**

№ точки	Глубина		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	σр
2	2,5	β1	-1,466	1,466	1,466	-1,370	1,370	1,370	-0,922	0,922	0,922	291,1
		β2	-1,505	-1,466	1,505	-1,414	-1,370	1,414	-1,370	-0,922	1,370	
		sinβ1	-0,995	-	0,995	-0,980	-	0,980	-0,797	-	0,797	
		sinβ2	-0,998	-	0,998	-0,988	-	0,988	-0,980	-	0,980	
		sinβ1^2	0,989	-	0,989	0,960	-	0,960	0,635	-	0,635	
		sinβ2^2	0,996	-	0,996	0,976	-	0,976	0,960	-	0,960	
		sin2*β1	-0,208	0,208	0,208	-0,390	0,390	0,390	-0,963	0,963	0,963	
		sin2*β2	-0,132	-0,208	0,132	-0,309	-0,390	0,309	-0,390	-0,963	0,390	
		σi	0,02	131,54	0,02	0,02	37,47	0,02	5,20	111,61	5,20	
3	15,1	β1	-1,005	1,005	1,005	-0,684	0,684	0,684	-0,215	0,215	0,215	223,9
		β2	-1,191	-1,005	1,191	-0,808	-0,684	0,808	-0,684	-0,215	0,684	
		sinβ1	-0,844	-	0,844	-0,632	-	0,632	-0,214	-	0,214	
		sinβ2	-0,929	-	0,929	-0,723	-	0,723	-0,632	-	0,632	
		sinβ1^2	0,713	-	0,713	0,399	-	0,399	0,046	-	0,046	
		sinβ2^2	0,862	-	0,862	0,523	-	0,523	0,399	-	0,399	
		sin2*β1	-0,905	0,905	0,905	-0,979	0,979	0,979	-0,417	0,417	0,417	
		sin2*β2	-0,689	-0,905	0,689	-0,999	-0,979	0,999	-0,979	-0,417	0,979	
σ	2,01	122,11	2,01	0,87	28,08	0,87	17,16	33,67	17,16			
4	27,7	β1	-0,710	0,710	0,710	-0,418	0,418	0,418	-0,119	0,119	0,119	174,1
		β2	-0,938	-0,710	0,938	-0,518	-0,418	0,518	-0,418	-0,119	0,418	
		sinβ1	-0,652	-	0,652	-0,406	-	0,406	-0,118	-	0,118	
		sinβ2	-0,807	-	0,807	-0,495	-	0,495	-0,406	-	0,406	
		sinβ1^2	0,425	-	0,425	0,165	-	0,165	0,014	-	0,014	
		sinβ2^2	0,651	-	0,651	0,245	-	0,245	0,165	-	0,165	
		sin2*β1	-0,989	0,989	0,989	-0,742	0,742	0,742	-0,235	0,236	0,235	
		sin2*β2	-0,954	-0,989	0,954	-0,861	-0,742	0,861	-0,742	-0,236	0,742	
σ	5,15	100,90	5,15	0,99	18,88	0,99	11,59	18,84	11,59			
5	40,3	β1	-0,533	0,533	0,533	-0,296	0,296	0,296	-0,082	0,082	0,082	139,7
		β2	-0,753	-0,533	0,753	-0,374	-0,296	0,374	-0,296	-0,082	0,296	
		sinβ1	-0,509	-	0,509	-0,292	-	0,292	-0,082	-	0,082	
		sinβ2	-0,684	-	0,684	-0,365	-	0,365	-0,292	-	0,292	
		sinβ1^2	0,259	-	0,259	0,085	-	0,085	0,007	-	0,007	
		sinβ2^2	0,468	-	0,468	0,133	-	0,133	0,085	-	0,085	
		sin2*β1	-0,876	0,875	0,876	-0,558	0,558	0,558	-0,163	0,163	0,163	
		sin2*β2	-0,998	-0,875	0,998	-0,680	-0,558	0,680	-0,558	-0,163	0,558	
σ	6,53	81,32	6,53	0,84	13,76	0,84	8,42	13,01	8,42			

# Построение эпюр напряжений в основании насыпи после сооружения насыпи и коэффициента пористости грунта

Суммарное напряжение в расчетных точках определяется по формуле:

$$\sigma_{o-i} = \sigma_{пр-i} + \sigma_{р-i}$$

По найденному значению напряжения необходимо найти соответствующий коэффициент пористости по компрессионной кривой.

$$\sigma_{o-2} = \sigma_{пр-2} + \sigma_{р-2} = 49,8 + 291,1 = 340,9 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{o-2} = 0,572$

$$\sigma_{o-3} = \sigma_{пр-3} + \sigma_{р-3} = 298,4 + 223,9 = 522,3 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{o-3} = 0,550$

$$\sigma_{o-4} = \sigma_{пр-4} + \sigma_{р-4} = 556,7 + 174,1 = 730,8 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{o-4} = 0,542$

$$\sigma_{o-5} = \sigma_{пр-5} + \sigma_{р-5} = 818,4 + 139,7 = 958,1 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{o-5} = 0,542$

# Определение относительных осадок слоев и суммарной осадки насыпи

Осадка слоя в любом вертикальном сечении основания под воздействием нагрузки  $\sigma_i$  определяется по формуле:

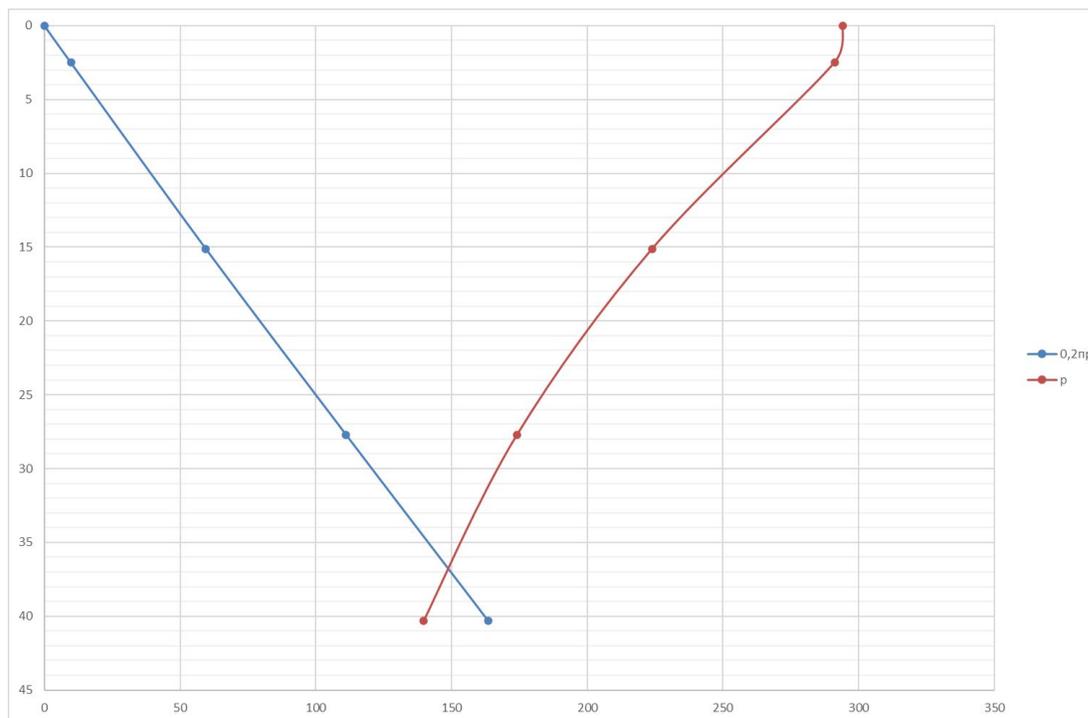
$$\Delta h_i = \eta_i * h_i,$$
$$\eta_i = \frac{\bar{e}_{\text{пр-}i} - \bar{e}_{\text{o-}i}}{1 + \bar{e}_{\text{пр-}i}}$$

где:  $\bar{e}_{\text{пр-}i}$  — средняя величина коэффициента пористости  $i$ -ого слоя грунта основания в природном состоянии;  
 $\bar{e}_{\text{o-}i}$  — средняя величина коэффициента пористости грунта;  
 $h_i$  — толщина слоя грунта для данного сечения насыпи.

Суммарную осадку слоев грунта находим как сумму осадок  $i$ -ых слоев грунта:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta h_i = \sum_{i=1}^{i=n} \eta_i * h_i,$$

Осадка основания не реализуется ниже глубины, где  $\sigma_p = 0,2\sigma_{пр}$ , исходя из этого условия пересчитывается толщина последнего сжимаемого слоя. Определение глубины сжимаемой толщи показано на рисунке.



Из рисунка видно, что глубина сжимаемой толщи будет равна 37 м. Так как изначально задавались глубиной сжимаемой толщи равной 40,3 м и толщиной слоев по 12,6 м, то после пересчета толщина последнего слоя будет равна  $\Delta h = 9,3$  м. Для данной точки:

$$\sigma_{пр-5'} = 556,7 + 20,78 * 9,3 = 750,0 \text{ кПа}$$

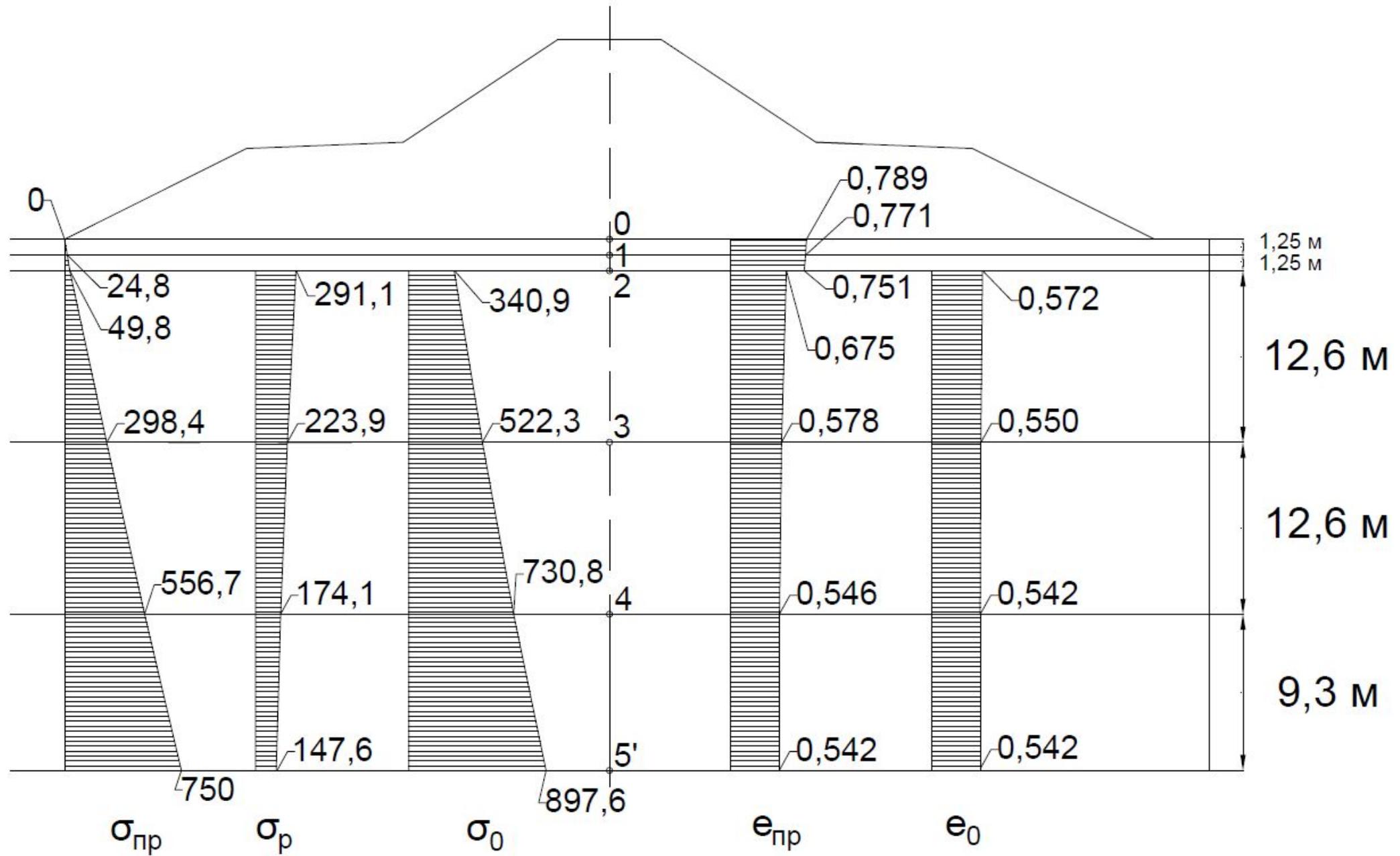
По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{пр-5'} = 0,542$

$$\sigma_{p-5'} = 147,6 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{o-5'} = \sigma_{пр-5'} + \sigma_{p-5'} = 750,0 + 147,6 = 897,6 \text{ кПа}$$

По компрессионной кривой 2 слоя находим коэффициент пористости:  $e_{o-5'} = 0,542$

# Эпюры к расчету осадки насыпи



Так как производилась замена грунта первого слоя основания на грунт с характеристиками защитного слоя, то осадка первых двух слоев  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2 = 0$ .

Для третьего слоя:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{\text{пр-3}} &= \frac{e_{\text{пр-2}} + e_{\text{пр-3}}}{2} = \frac{0,675 + 0,578}{2} = 0,627 \\ \bar{e}_{\text{o-3}} &= \frac{e_{\text{o-2}} + e_{\text{o-3}}}{2} = \frac{0,572 + 0,550}{2} = 0,561 \\ \eta_3 &= \frac{\bar{e}_{\text{пр-3}} - \bar{e}_{\text{o-3}}}{1 + \bar{e}_{\text{пр-3}}} = \frac{0,627 - 0,561}{1 + 0,627} = 0,0405 \\ \Delta h_3 &= \eta_3 h_3 = 0,0405 * 12,6 = 0,511 \text{ м} \end{aligned}$$

Для четвертого слоя:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{\text{пр-4}} &= \frac{e_{\text{пр-3}} + e_{\text{пр-4}}}{2} = \frac{0,578 + 0,546}{2} = 0,562 \\ \bar{e}_{\text{o-4}} &= \frac{e_{\text{o-3}} + e_{\text{o-4}}}{2} = \frac{0,550 + 0,542}{2} = 0,546 \\ \eta_4 &= \frac{\bar{e}_{\text{пр-4}} - \bar{e}_{\text{o-4}}}{1 + \bar{e}_{\text{пр-4}}} = \frac{0,562 - 0,546}{1 + 0,562} = 0,0105 \\ \Delta h_4 &= \eta_4 h_4 = 0,0105 * 12,6 = 0,133 \text{ м} \end{aligned}$$

Для пятого слоя:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{\text{пр-5}} &= \frac{e_{\text{пр-4}} + e_{\text{пр-5}'}}{2} = \frac{0,546 + 0,542}{2} = 0,544 \\ \bar{e}_{\text{o-5}} &= \frac{e_{\text{o-4}} + e_{\text{o-5}'}}{2} = \frac{0,542 + 0,542}{2} = 0,542 \\ \eta_5 &= \frac{\bar{e}_{\text{пр-5}} - \bar{e}_{\text{o-5}}}{1 + \bar{e}_{\text{пр-5}}} = \frac{0,544 - 0,542}{1 + 0,544} = 0,0014 \\ \Delta h_5 &= \eta_5 h_5 = 0,0014 * 9,3 = 0,013 \text{ м} \end{aligned}$$

При известном значении  $S$  можно определить запас на осадку  $S_{00}$ .

Запас на осадку насыпи:

$$S_{00} = S_0 + S_{\text{нас}}$$

где:  $S_0$  — осадка основной площадки из-за сжатия основания, м;

$S_{\text{нас}}$  — осадка грунтов насыпи, если они при её возведении были не уплотнены; при соблюдении норм плотности для скоростных, особогрузонапряженных и линий I и II категорий можно принимать  $S_{\text{нас}} = 0$ .

$$S_0 = (1 - \alpha)S - iH$$

где:  $\alpha$  — доля осадки основания, реализуемая в период строительства (п.14 из задания);

$i$  — коэффициент погашения осадки основания в теле насыпи, являющимся не совсем упругим телом, можно для практических расчетов принимать  $i = 0,001$ ;

$H$  — высота насыпи, м.

Полученная осадка сравнивается с допустимой величиной из таблицы 3 СП 238

$$S_{00} \leq [S]$$

Категория	Расчетная допустимая величина деформации, мм			
	Равномерное морозное пучение	Осадка основания насыпи		
		Упругая	остаточная	
			Полная до реконструкции	Максимальная за год
Скоростная	10	2	150	100
Особогрузонапряженная	15	2	200	100
I и II	20	2	400	150
III	25	2	600	200
IV	35	3	1000	250

Если условие не выполняется, необходимо предусмотреть мероприятия для уменьшения величины осадки до предельно-допустимого значения.

Далее рассчитывается уширение основной площадки земляного полотна. Это делается для того, чтобы с помощью подъёмки на балласт можно было поднять уровень головки рельса до проектной отметки.

$$\Delta b_{\text{уш}} = mS_{00}$$

Минимальное уширение ОПЗП принимается равным 0,5 м.

$$B_{\text{уш}} = B_0 + 2\Delta b_{\text{уш}}$$

где:  $m$  – показатель крутизны откоса балластной призмы, равный 1,5;

$B_0$  – нормируемая ширина основной площадки, м.

Суммарная осадка слоев грунта равна:

$$S = \sum_{i=3}^{i=5} \Delta h_i = 0,511 + 0,133 + 0,013 = 0,657 \text{ м}$$

$$S_0 = (1 - \alpha)S - iH = (1 - 0,52) * 0,657 - 0,001 * 15 = 0,3 \text{ м}$$

$$S_{00} = S_0 + S_{\text{нас}} = 0,3 + 0 = 0,3 \text{ м}$$

$$S_{00} = 0,3 \text{ м} < [S] = 0,4 \text{ м}$$

$$\Delta b_{\text{уш}} = mS_{00} = 1,5 * 0,3 = 0,45 \text{ м}$$

Минимальное уширение ОПЗП принимается равным 0,5 м, поэтому для дальнейших расчетов используем это значение.

$$B_{\text{уш}} = 6,6 + 2 * 0,5 = 7,6 \text{ м}$$