

## РАСЧЁТ ОСАДКИ НАСЫПИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО СУММИРОВАНИЯ

### 1 Расчёт глубины активной зоны

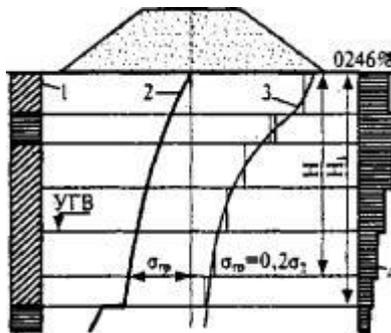


Рисунок 1 – Напряжения в грунте основания

Прогноз устойчивости и осадки основания насыпи осуществляют на основе расчетов [1]. Осадку насыпей определяют на заданных вертикалях поперечного профиля, как суммарную деформацию столба грунта до практически несжимаемых плотных слоёв. Считают, что мощность *активной зоны*, в пределах которой необходимо суммировать деформации грунтовой толщи, необходимо принимать до глубины, на которой напряжения от веса насыпи составляют некоторую долю  $K$  от собственного веса деформируемого грунта:

$$\sigma_{nz} = K_a \cdot \sigma_{осн,z}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{nz}$  – сжимающее напряжение в грунтовой толще основания дорожной насыпи на глубине  $z$  (на рис. 1 кривая 3);  $\sigma_{осн,z}$  – напряжения от собственного веса сжимаемого грунтового основания на глубине  $z$  (кривая 2);

$$K_a = \begin{cases} 0,2 & \text{– для слабосжимаемых грунтов;} \\ 0,1 & \text{– для сильносжимаемых грунтов.} \end{cases} \quad (2)$$

При определении осадок насыпей автомобильных дорог в практике проектирования наибольшее распространение получил метод послойного суммирования деформаций сжатия отдельных слоёв в пределах активной зоны (рис. 1).

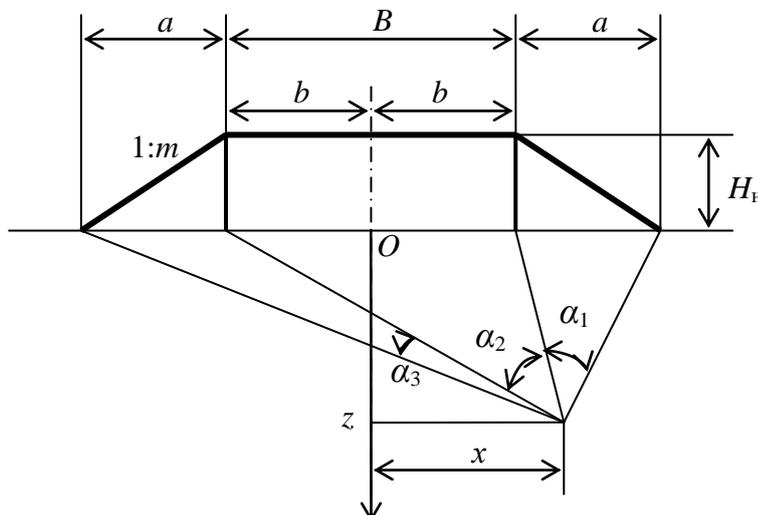


Рисунок 2 – Расчётная схема для оценки осадки насыпи

В качестве временной подвижной нагрузки следует принимать нагрузку АК. Она включает в себя равномерно распределенную нагрузку  $q$  и одну двухосную тележку с нагрузкой на ось  $10K$  (рис. 3). В расчетах осадки насыпи равномерно распределенную составляющую нагрузки при этом не учитывают. Нагрузку от тележки приводят к эквивалентной равномерно распределенной нагрузке  $P_{AK}$  интенсивностью, кПа:

$$P_{AK} = \frac{7,4n}{B_{3П}} K, \quad (3)$$

где  $n$  – число полос движения;  $B_{3П}$  – ширина земляного полотна, м;  $K$  – класс нагрузки АК. Для автомобильных дорог с капитальными дорожными одеждами (обычно это дороги I и II категории) –  $K = 11,5$ ; с облегченными и переходного типа дорожными одеждами (обычно это дороги III-V категорий) –  $K = 10$ .

Эквивалентную равномерно распределенную нагрузку  $P_{AK}$  следует располагать по всей ширине земляного полотна. Вдоль земляного полотна эквивалентная равномерно распределенная нагрузка располагается на неограниченную длину [2].

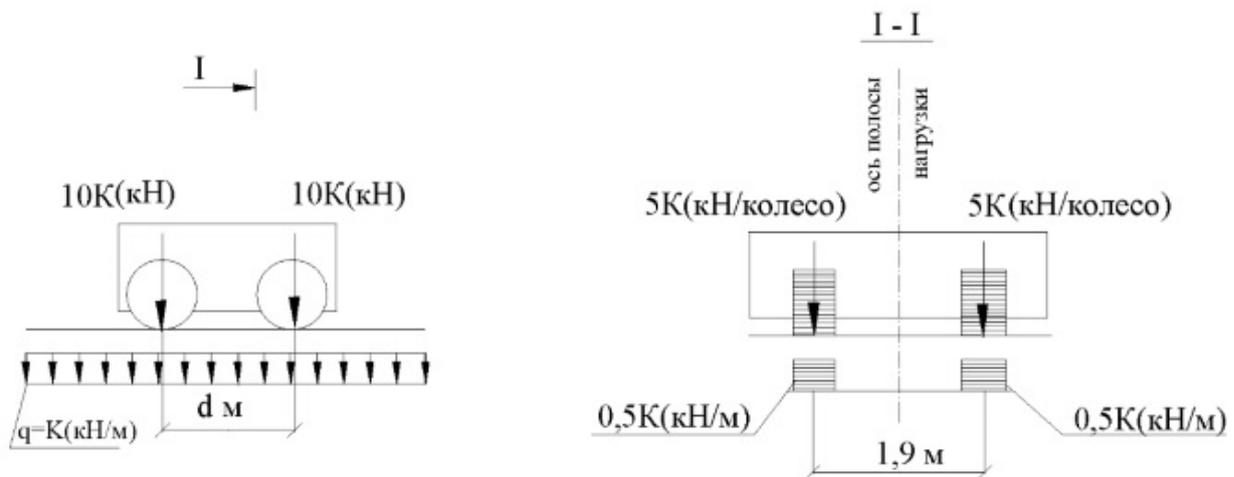


Рисунок 3 – Нормативная нагрузка от автомобилей АК

Давление на грунт основания от веса грунта насыпи

$$P_n = \gamma_n \cdot H_n, \quad (4)$$

где  $H_n$  – высота насыпи. Далее находят суммарное давление от веса насыпи и подвижной нагрузки

$$P = P_{AK} + P_n. \quad (5)$$

Поле сжимающих напряжений в грунтовой толще основания под дорожной насыпью определяют по формуле теории упругости

$$\sigma_{nz} = \frac{P}{\pi a} (aA_1 + bA_2 + xA_3), \quad (6)$$

где  $a$  – горизонтальная проекция откоса насыпи;

$$a = H_n \cdot m, \quad (7)$$

$$b = B/2; \quad (8)$$

$x$  – расстояние от оси дороги до заданной вертикали;

$$A_1 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \arctg \frac{a+b+x}{z} + \arctg \frac{a+b-x}{z}; \quad (9)$$

$$A_2 = \alpha_1 + \alpha_3 = A_1 - \left( \arctg \frac{b+x}{z} - \arctg \frac{x-b}{z} \right); \quad (10)$$

$$A_3 = \alpha_1 - \alpha_3 = A_2 - 2 \left( \operatorname{arctg} \frac{a+b-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x-b}{z} \right); \quad (11)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы между лучами, проведёнными из точки грунтового массива, для которой отыскивают величину сжимающего напряжения;  $z$  – ордината.

Напряжения от собственного веса сжимаемого грунтового основания для каждой вертикали поперечного профиля:

$$\sigma_{\text{осн},z} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \gamma_i \Delta h_{ij}, \quad (12)$$

где  $k$  – число геологических слоёв в пределах активной зоны;  $l$  – число элементарных полосок, на которые делится каждый геологический слой;  $\gamma_i$  – объёмный вес грунта  $i$ -го геологического слоя;  $\Delta h_{ij}$  – толщина  $j$ -го элементарного слоя  $i$ -го геологического слоя.

Границу активной зоны определяют глубиной, на которой

$$\sigma_{nz} = 0,2\sigma_{\text{осн},z}. \quad (13)$$

## 2 Определение величины осадки насыпи

Суммарная осадка основания на заданной вертикали

$$S = \sum_{i=1}^k \Delta S_i, \quad (14)$$

где  $\Delta S_i$  – осадка  $i$ -го слоя грунта, определяемая по формуле

$$\Delta S_i = \sum_{j=1}^l \Delta h_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (15)$$

где  $\Delta h_{ij}$  – толщина  $j$ -й полоски  $i$ -го геологического слоя на заданной вертикали поперечного сечения дороги;  $\varepsilon_{ij}$  – безразмерный коэффициент, характеризующий сжимаемость грунта в пределах  $j$ -й полоски  $i$ -го геологического слоя.

Коэффициент  $\varepsilon_{ij}$  вычисляют по формуле

$$\varepsilon_{ij} = \left( \frac{e_{ij}^{\text{быт}} - e_{ij}^{\text{полн}}}{1 + e_{ij}^{\text{быт}}} \right) \quad (16)$$

где  $e_{ij}^{\text{быт}}$  – значение пористости при бытовом давлении, осреднённом в пределах  $j$ -й полоски  $i$ -го геологического слоя;  $e_{ij}^{\text{полн}}$  – значение пористости при полном давлении, осреднённом в пределах  $j$ -й полоски  $i$ -го геологического слоя. Тогда

$$\Delta S_i = \sum_{j=1}^l \Delta h_{ij} \left( \frac{e_{ij}^{\text{быт}} - e_{ij}^{\text{полн}}}{1 + e_{ij}^{\text{быт}}} \right). \quad (17)$$

Одной из наиболее трудных задач при определении осадки основания насыпей, состоящего из нескольких слоёв грунта с различными физико-механическими свойствами, является моделирование кривых компрессионных зависимостей, получаемых в результате лабораторных испытаний образцов грунта с последующей статистической обработкой результатов измерений [3].

Компрессия – это сжатие грунта без возможного бокового расширения. Она имеет место в следующих случаях:

- уплотнение слоя грунта при сплошной равномерно распределенной нагрузке (плотина, насыпь и т.д.);
- уплотнение слоя грунта толщиной  $h \leq 0,5b$  под центром под центром тяжести подошвы фундамента.

Схема, рассматриваемая в первом случае, приведена на рис. 4 слева, компрессионная кривая – справа.

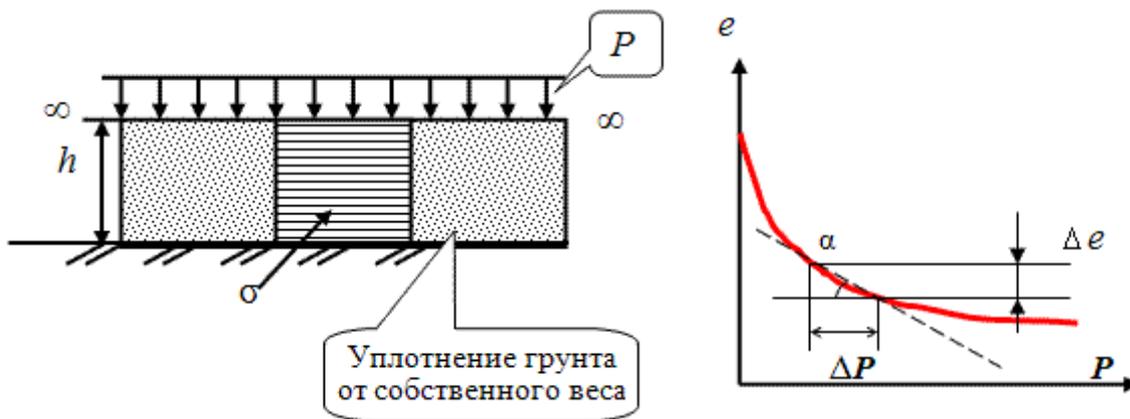


Рисунок 4 – Схема уплотнения грунта при равномерно распределённой нагрузке

На небольшом участке рассмотрим приращение нагрузки  $\Delta P$  и получим соответственно  $\Delta e$ . Заменим дугу прямой и тогда упрощенная формула для определения пористости

$$e = e_0 - \beta P, \quad (18)$$

где  $\beta$  – коэффициент сжимаемости, определяемый, как

$$\beta = \frac{\Delta e}{\Delta P}, \quad (19)$$

и измеряемый в  $\text{МПа}^{-1}$ .

В соответствии с формулой (18)

$$e_{ij}^{\text{быт}} = e_0 - \beta \cdot \sigma_{\text{осн},z}, \quad (20)$$

$$e_{ij}^{\text{полн}} = e_0 - \beta \cdot (\sigma_{\text{осн},z} + \sigma_{nz}). \quad (21)$$

Расчеты осадки ведут по нескольким вертикалям.

## Приложение А

### Отладочный пример

Категория дороги – 3; количество полос движения – 2; класс нагрузки  $K$  – 10.

Высота насыпи – 8,95 м. Удельный вес грунта насыпи –  $\gamma_n = 26,7 \text{ кН/м}^3$ .

Основание имеет вид:

1 Песок средней крупности, средней плотности:  $e_0 = 0,67$ ;  $\gamma = 26,6 \text{ кН/м}^3$ ;  $H = -6 \text{ м}$ ; коэффициент сжимаемости  $\beta = 0,00006 \text{ кПа}^{-1}$ .

2 Песок пылеватый, средней плотности:  $e_0 = 0,76$ ;  $\gamma = 25,1 \text{ кН/м}^3$ ;  $H = -7 \text{ м}$ ;  $\beta = 0,00007 \text{ кПа}^{-1}$ .

3 Суглинок влажный  $e_0 = 0,63$ ;  $\gamma = 22,3 \text{ кН/м}^3$ ;  $\beta = 0,00007 \text{ кПа}^{-1}$ .

Толщина элементарного слоя 0,5 м.

---

### Источники информации

- 1 Федотов, Г.А. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог / Г.А. Федотов. – М.: Транспорт, 1986. 317 с.
- 2 ГОСТ Р 32960-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 6 с.
- 3 Алексеев, С.И. Механика грунтов: учебное пособие для студентов вузов /С.И. Алексеев. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. 111с.