

# **«Железнодорожный путь»**

курс лекций для студентов 3 курса 2

семестра

специальности

«Строительство железных дорог, мостов и  
транспортных тоннелей»

**Лекция 6 Устойчивость откосов земляного  
полотна. Расчет коэффициента устойчивости  
земляного полотна.**

# Расчеты устойчивости откосов и склонов

- Оценка устойчивости откосов и склонов выполняется с помощью инженерных методов.
- Откосы это искусственные, а склоны – естественные наклонные поверхности.
- Устойчивость откоса или склона количественно оценивается коэффициентом устойчивости  $k$ .
- **В общем виде  $k$  представляет собой отношение факторов, сопротивляющихся смещению, к факторам, его вызывающим.**
- Расчеты устойчивости производят при проектировании земляного полотна или противодеформационных мероприятий.
- **Оценка устойчивости выполняется из условия равновесия массива смещающегося грунта (блока возможного смещения) с некоторым запасом, который и является коэффициентом устойчивости  $k$ .**

# Модель для расчета устойчивости

## (предпосылки и допущения)

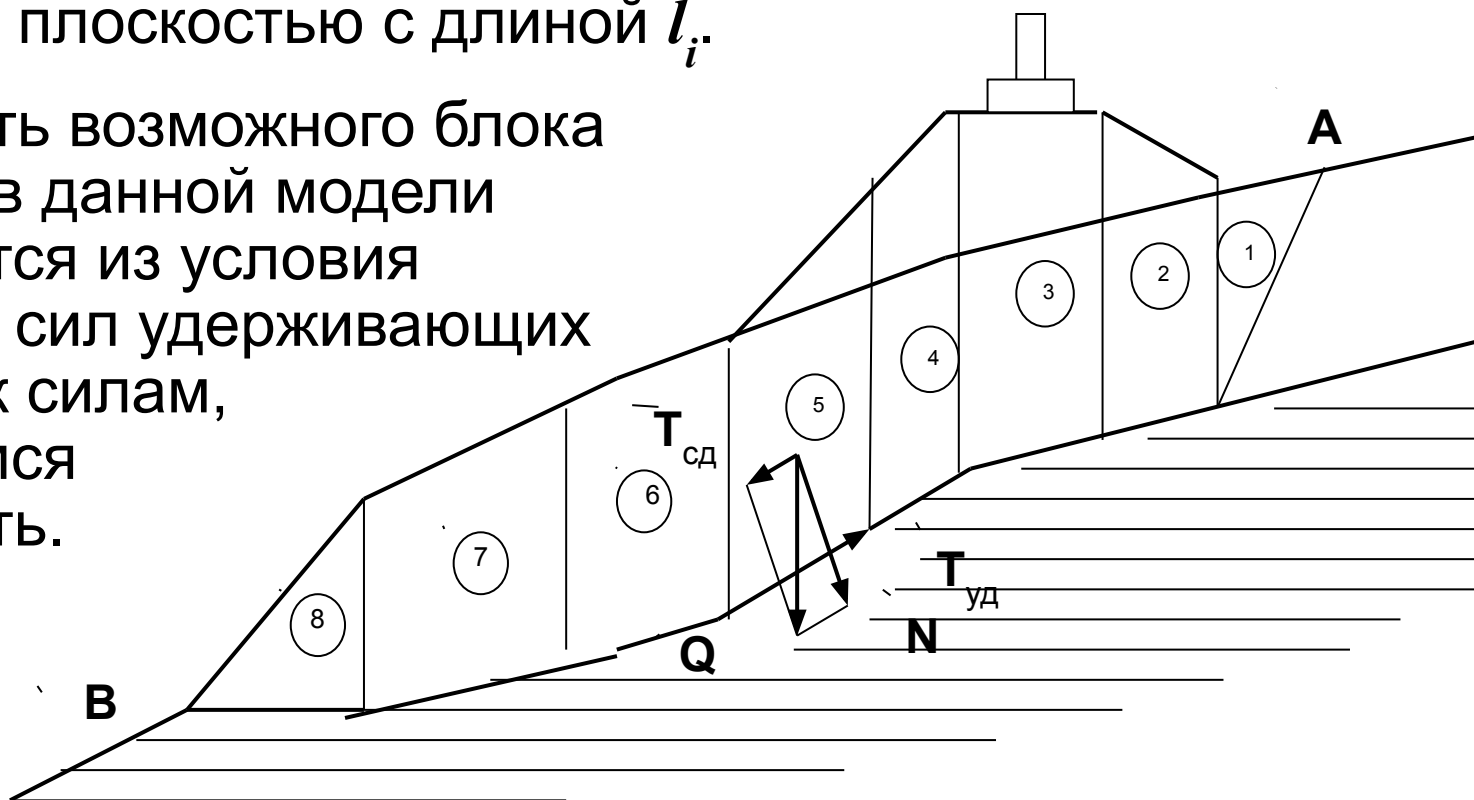
- 1) Задача, исходя из линейности земляного полотна, решается как плоская, в двухмерной постановке.
- 2) Все формы поверхностей возможного смещения в расчетных схемах сводятся к трем основным:
  - а) произвольной формы, определяемой литологическим строением (**предопределённая поверхность**) - наиболее общая модель и применяется для оценки устойчивости на оползневых склонах;
  - б) **круговая кривая (круглоцилиндрическая)** - принимается при расчете устойчивости откосов, из глинистых грунтов, имеющих силы сцепления;
  - в) **линейная (плоская)** - возникает в сыпучих грунтах.
- 3) Предполагается, что массив смещающегося грунта при деформации перемещается как единое целое, без разделения на части и образования трещин (гипотеза «затвердевшего клина»).
- 4) Внешние нагрузки от веса ВСП  $p_{вс}$  и подвижного состава  $p_{п}$  заменяются фиктивными столбами грунта расчетного удельного веса  $\gamma$  высотой .

$$z_{вс} = \frac{p_{вс}}{\gamma} \quad \text{и} \quad z_{п} = \frac{p_{п}}{\gamma}$$

# Общий случай расчета устойчивости (модель проф. Шахунянца)

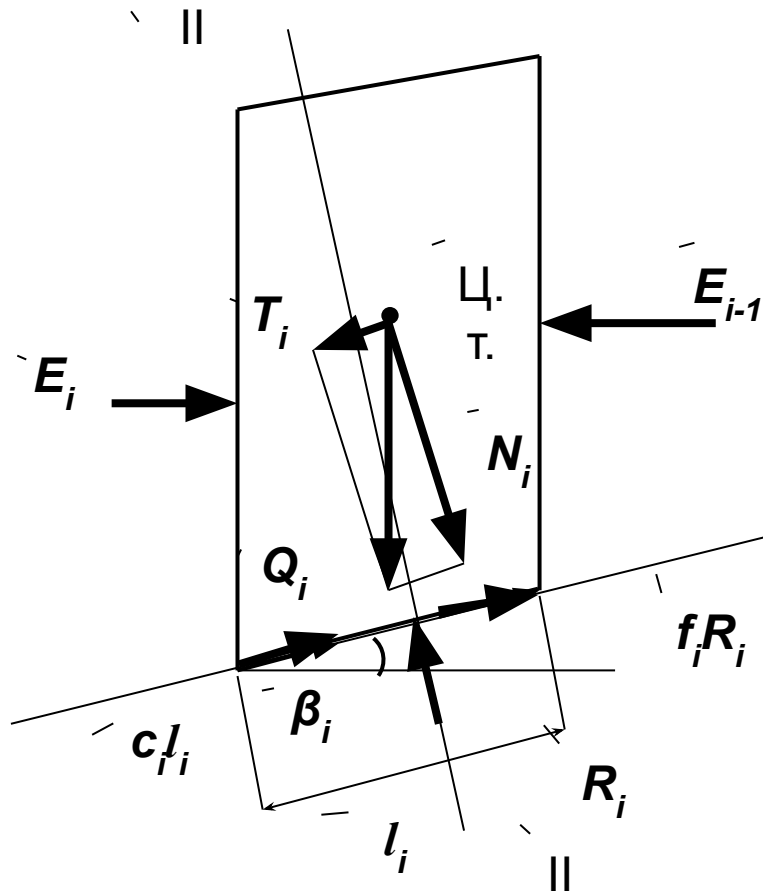
- Массив грунта блока смещения с внешними нагрузками условно вертикальными плоскостями делится на отдельные части (отсеки) так, чтобы в пределах отсека поверхность возможного смещения можно было бы заменить плоскостью с длиной  $l_i$ .

Устойчивость возможного блока смещения в данной модели определяется из условия равновесия сил удерживающих от сдвига к силам, стремящимся его сдвинуть.



# Равновесие одного $i$ -го отсека блока смещения.

Схема действующих на отсек внешних и внутренних сил



$Q_i$  – сила веса  $i$ -го отсека (с учетом внешней нагрузки); в простейшем случае  $Q_i = \omega_i \cdot 1 \cdot \gamma_i$  (1)

где  $\omega_i$  и  $\gamma_i$  – площадь и удельный вес грунта  $i$ -го отсека; сила веса  $Q_i$  раскладывается на две силы: нормальную  $N_i$  и тангенциальную  $T_i$  к плоскости основания отсека

$$N_i = Q_i \cos \beta_i; T_i = Q_i \sin \beta_i \quad (2)$$

где  $\beta_i$  – угол наклона основания  $i$ -го отсека к горизонту;  $E_{i-1}$  и  $E_i$  – силы, заменяющие действие на  $i$ -й отсек соответственно вышележащей и нижележащей части массива блока смещения;

$R_i$  – нормальная реакция основания;  $c_i l_i$  – сила сцепления ( $c_i$  – удельное сцепление грунта основания отсека,  $l_i$  – длина основания отсека),  $f_i R_i$  – сила внутреннего трения ( $f_i$  – коэффициент внутреннего трения,  $f_i = \operatorname{tg} \phi_i$ ,  $\phi_i$  – угол внутреннего трения грунта).

# Уравнения равновесия в схеме Шахунянца

Уравнения предельного равновесия отсека: равенство нулю сумм проекций всех сил на поверхность возможного смещения I-I и на нормаль к ней II-II

$$\bullet T_i = c_i l_i + f_i R_i + (E_i - E_{i-1}) \cos \beta_i \quad (3.1);$$

$$\bullet N_i = R_i - (E_i - E_{i-1}) \sin \beta_i \quad (3.2).$$

Выразив  $R_i$  во втором уравнении и подставив его в первое, после несложных преобразований можно получить

$$\bullet T_i = c_i l_i + f_i N_i + (E_i - E_{i-1}) \frac{\cos(\beta_i - \varphi_i)}{\cos \varphi_i} \quad (4)$$

Данное уравнение является условием предельного равновесия отсека, а для того, чтобы имело место устойчивое равновесие, необходимо, чтобы правая часть уравнения, представляющая собой сумму удерживающих сил, была бы в  $k$  раз больше левой его части – сдвигающей силы  $T_i$ .

Поэтому в условии предельного равновесия (4) необходимо увеличить сдвигающую силу  $T_i$  в  $k$  раз и тогда

$$\bullet k T_i = c_i l_i + f_i N_i + (E_i - E_{i-1}) \frac{\cos(\beta_i - \varphi_i)}{\cos \varphi_i} \quad (5)$$

# Уравнения равновесия в схеме Шахунянца (продолжение)

Уравнение (5) является условием устойчивого равновесия для  $i$ -го отсека блока смещения. В нем неизвестна сила  $E_i$ . Сила  $E_{i-1}$  определяется из равновесия предыдущего блока. Эта сила называется оползневой и находится из уравнения устойчивого равновесия

- $$E_i = (k T_i - c_i l_i - f_i N_i) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\beta_i - \varphi_i)} + E_{i-1} \quad (6)$$

Величина силы для последнего отсека получается, если записать уравнения последовательно для всех отсеков, с подстановкой значения  $E_{i-1}$  из предыдущего уравнения и считая, что  $E_0 = 0$

- $$E_n = \sum_{i=1}^{i=n} (k T_i - c_i l_i - f_i N_i) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\beta_i - \varphi_i)} \quad (7)$$

Если откос свободный, то  $E_n = 0$  и тогда искомый коэффициент устойчивости определяется из уравнения (7)

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (c_i l_i + f_i N_i + T_{y\partial-i}) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\beta_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^{i=n} T_{c\partial-i} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\beta_i - \varphi_i)}} \quad (8)$$

# Нормативные коэффициенты устойчивости

Полученное в расчетах устойчивости минимальное значение коэффициента  $k_{min}$  сравнивается с допускаемым значением  $[k]$ , нормирование которого производится в СП 238.132600.2015

$$[k] = \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c}$$

где  $\gamma_n$  – коэффициент надёжности по назначению сооружения (коэффициент ответственности сооружения); для линий: скоростных и особогрузонапряженных  $\gamma_n = 1,25$ , для I и II категорий –  $\gamma_n = 1,20$ , для III категорий –  $\gamma_n = 1,15$ , для IV категорий –  $\gamma_n = 1,10$ ;

$\gamma_{fc}$  – коэффициент сочетания нагрузок; при основном сочетании  $\gamma_{fc} = 1,00$ , при особом (сейсмика) –  $\gamma_{fc} = 0,90$ , для строительного периода –  $\gamma_{fc} = 0,95$ ;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы; при использовании методов расчета, удовлетворяющих условиям равновесия,  $\gamma_c = 1,00$ , при использовании упрощенных методов –  $\gamma_c = 0,95$ .