

**«Земляное полотно в сложных условиях »**

курс лекций для студентов **5** курса специальности

**«Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей»**  
специализации

**«Управление техническим состоянием *железнодорожного пути* »**

**Лекция 9 Проектирование мероприятий по обеспечению необходимой устойчивости. Регулирование гравитационных процессов. Армогрунтовые конструкции.**

# **Изменение устойчивости откосов и склонов во времени**

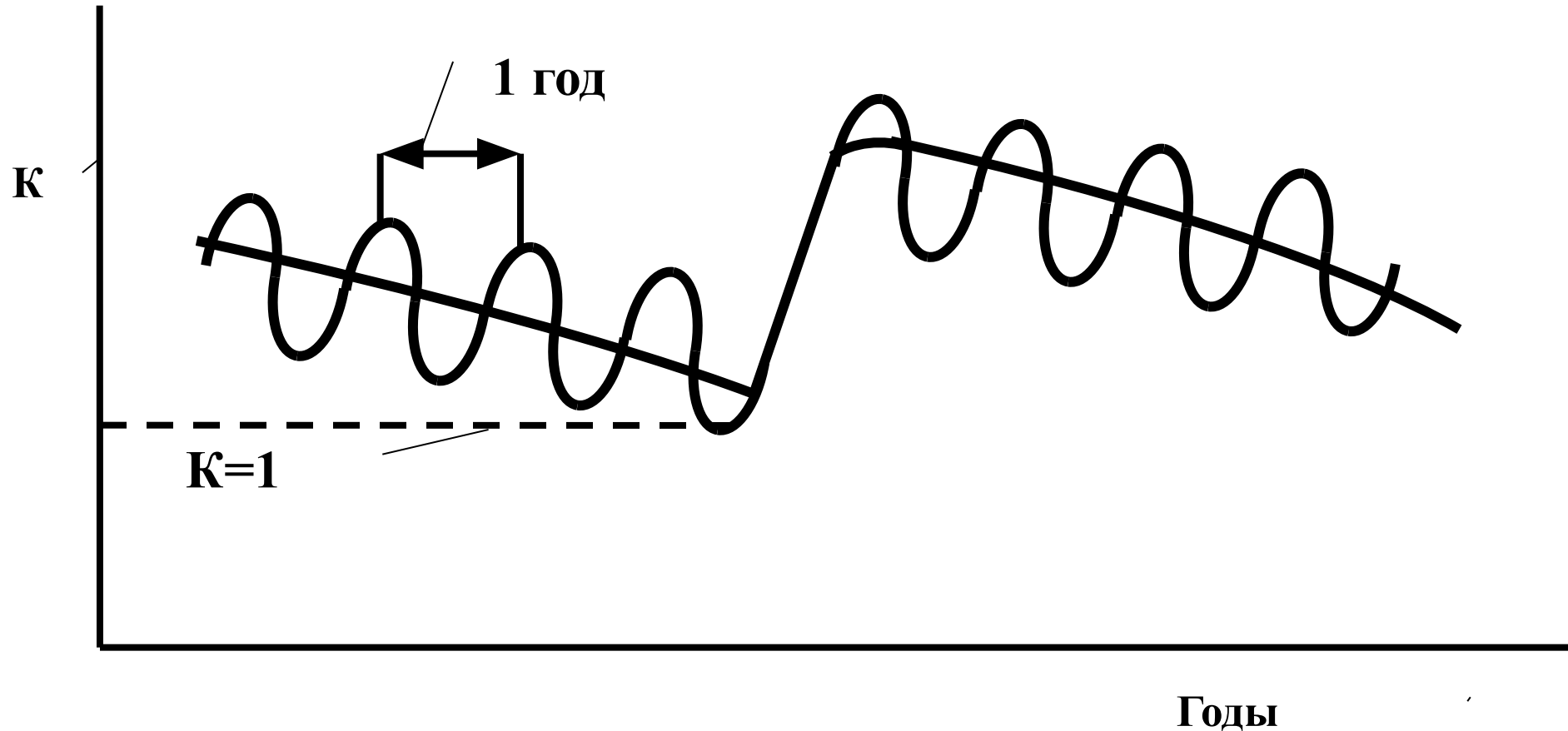
**Факторы, влияющие на устойчивость откосов и склонов, не остаются постоянными во времени. Так сопротивление грунтов воздействию на них нагрузок, изменяется с их влажностью, кроме того, имеет тенденцию к снижению с течением времени, приближаясь к некоторым значениям, носящим название длительной сопротивляемости.**

**В грунтовом массиве, находящемся в напряженном состоянии происходит под нагрузкой и в ходе природных воздействий, таких как замерзание-оттаивание грунта, высыхание-увлажнение, накопление микродефектов в виде трещин, которые могут увлажнять грунты, что также снижает устойчивость.**

**Профессор Г.М. Шахунянц высказал гипотезу, что на нестабилизированных объектах процесс изменения устойчивости происходит циклически.**

# Схема изменения устойчивости грунтового сооружения во времени

- График изменения устойчивости во времени.  $K$  – коэффициент устойчивости



# Циклы изменения устойчивости

В наиболее общем виде каждый цикл состоит из 4-х периодов:

**1) Период относительной устойчивости** (временного покоя).

Коэффициент устойчивости  $K > 1$ , отличается устойчивостью объекта как в целом, так и его частей – обычно занимает большую часть цикла;

**2) Период оживления** - локальные (местные) макродеформации (макроподвижки) и тотальные (общие) микродеформации.

Коэффициент устойчивости снижается и в отдельных частях приближается к  $K = 1$  – локальные смещения, трещины выпучивание грунта.

**3) Период тотальных макродеформаций** (макроподвижек, больших иногда катастрофических смещений).

Весь объект теряет равновесие,  $K = 1$ , происходят крупные деформации, протекающие относительно быстро.

**4) Период затухания** - тотальные микродеформации и локальные макродеформации.

Переход объекта в новую систему равновесия.

# Регулирование гравитационных процессов

Регулирование гравитационных процессов – обеспечение устойчивости нестабильных откосов или склонов производится:

- - террасированием;
- - устройством поддерживающих или удерживающих сооружений;
- - мелиорацией грунтов.

**Террасирование** - изменение рельефа склона (откоса) в целях повышения его устойчивости.

**Поддерживающие сооружения** – сооружения, которые для обеспечения необходимой устойчивости пристраиваются к земляному полотну или склону снаружи.

**Удерживающие сооружения** - сооружения, которые для обеспечения необходимой устойчивости внедрены целиком или частично внутрь земляного полотна или склона.

**Мелиорация грунтов** – изменение их прочностных свойств в целях повышения устойчивости откосов земляного полотна или склонов.

# Подпорные стены (основные положения проектирования)

1) По расположению относительно земляного полотна разделяют на:

- **низовые**, которые на крутых косогорах поддерживают с низкой стороны насыпи и полунасыпи;
- **верховые**, которые обеспечивают верховую часть склона до земляного полотна и применяют для поддержания откосов выемок и полувыемок.

2) Могут быть как поддерживающие (пристроенные), так и удерживающие (внедренные).

3) Могут выполняться из бутовой кладки, бетона, железобетона, армогрунта, габионов.

4) Вдоль оси пути делятся вертикальными швами (по всей высоте включая фундамент) на секции длиной 6-10 м.

5) Обратная засыпка выполняется из дренирующих грунтов.

6) Для подпорных стен из железобетона и бетона в обязательном порядке устраивается застенный дренаж с выпуском воды за лицевую грань через дренажные отверстия и далее в лоток у подошвы.

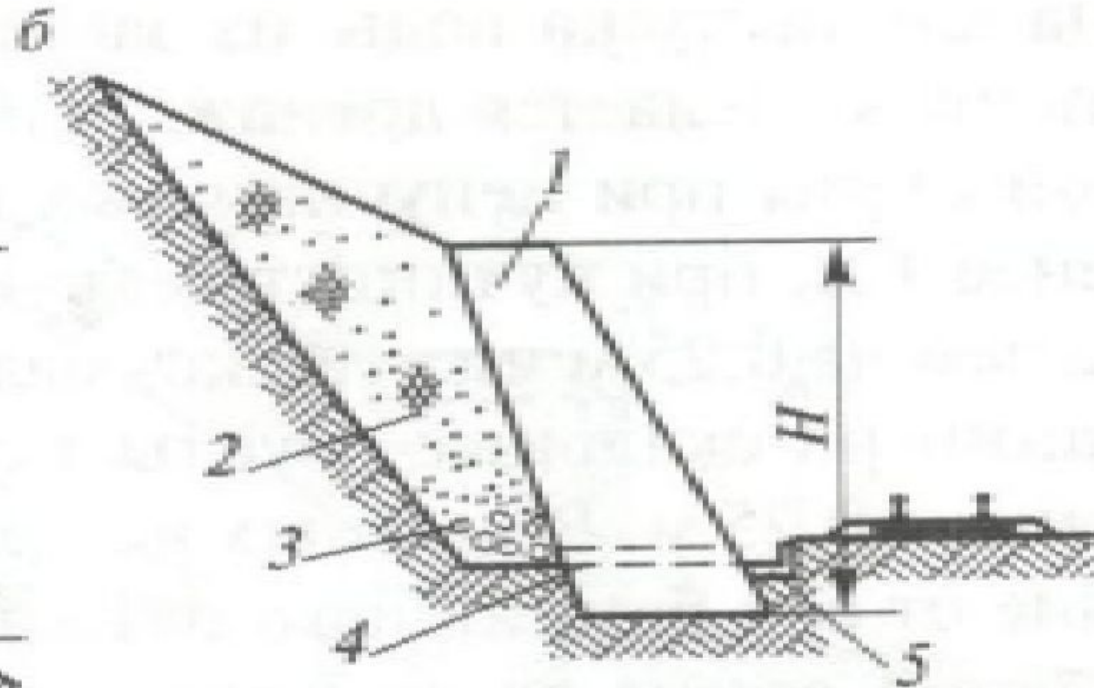
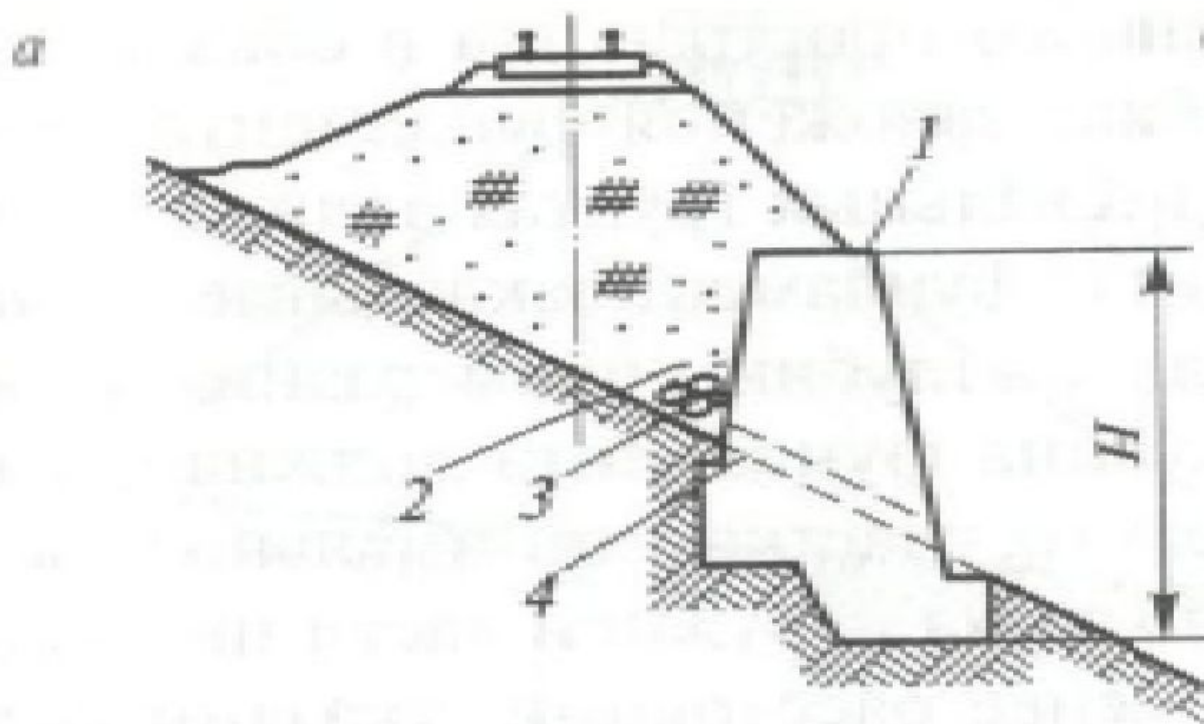
7) Глубина заложения фундамента: непучинистые нескальные грунты не менее 1 м;  
пучинистые на 0,25 м ниже глубины промерзания;  
скальные не менее 0,25 м.

8) Расстояние от оси пути до наружной грани стенки:

для линии:	I и II категории	III категории	IV категории
насыпи из дренирующих грунтов:	3,0 м;	2,6 м	2,5 м
насыпи из недренирующих грунтов:	3,5 м;	2,9 м	2,75 м
выемки стены располагают за кюветом, но не ближе 3,7 м			

**а) Низовая подпорная стенка для насыпи на крутом косогоре**

**б) Верховая подпорная стенка откоса полувыемки в трещиноватых скальных грунтах**

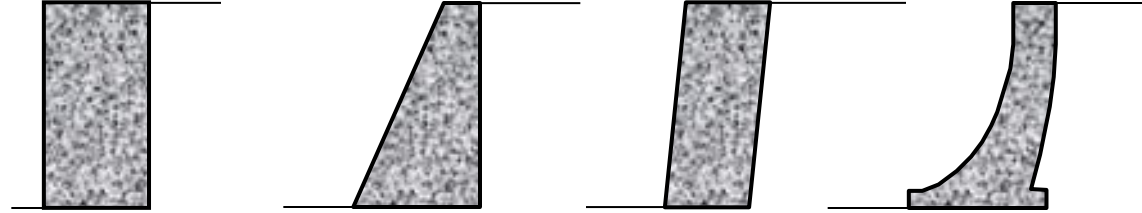


**1 - подпорная стенка; 2 – насыпь (обратная засыпка для б); 3 – застенный дренаж; 4 – дренажный выпуск; 5 лоток; H – высота стенки**

# Классификация подпорных стен

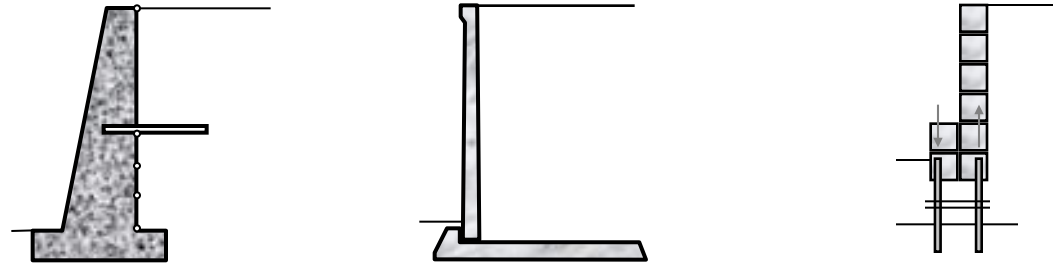
## гравитационные (массивные)

**не**  
**вовлекающие**  
грунт засыпки  
в работу



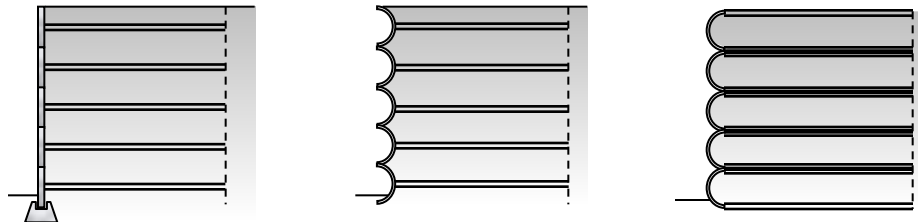
## полугравитационные, уголкового, тонкие

**частично**  
**вовлекающие**  
грунт засыпки  
в работу



## из армированного грунта

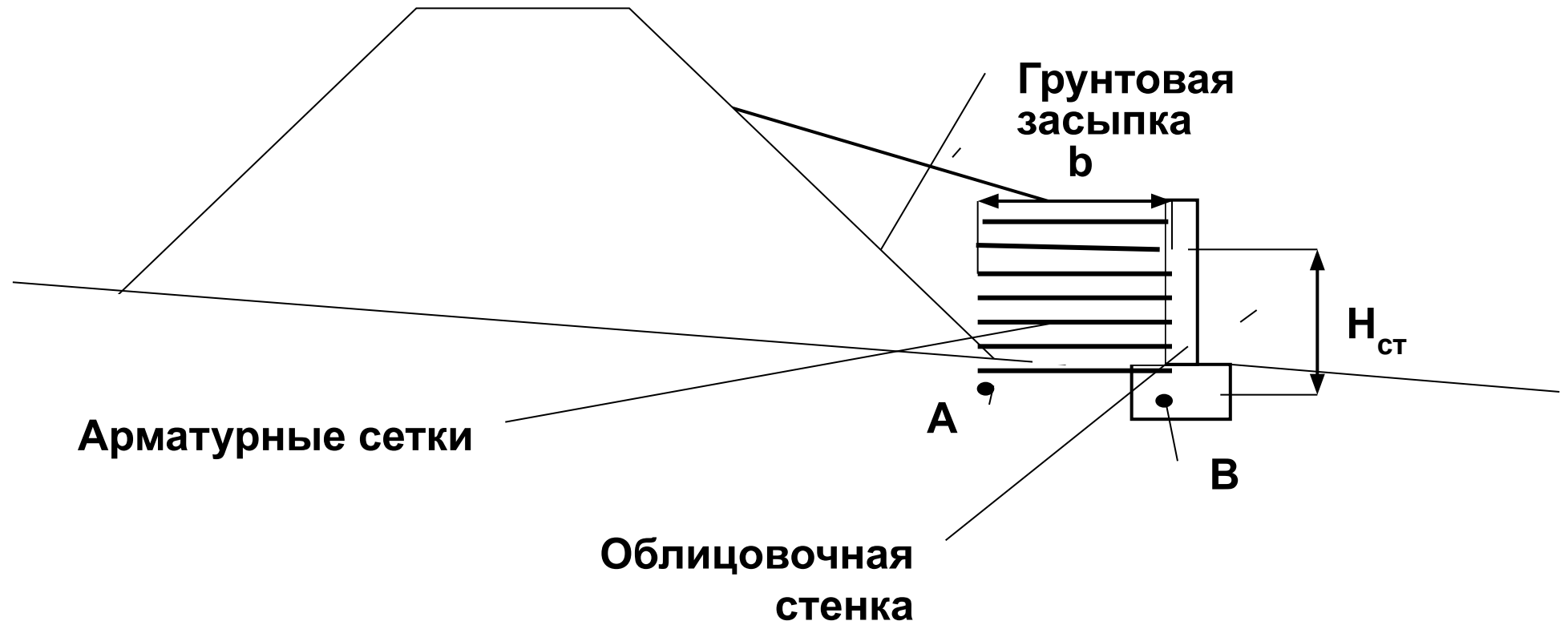
**полностью**  
**вовлекающие**  
грунт  
заполнителя  
в работу





# Армогрунтовые стены

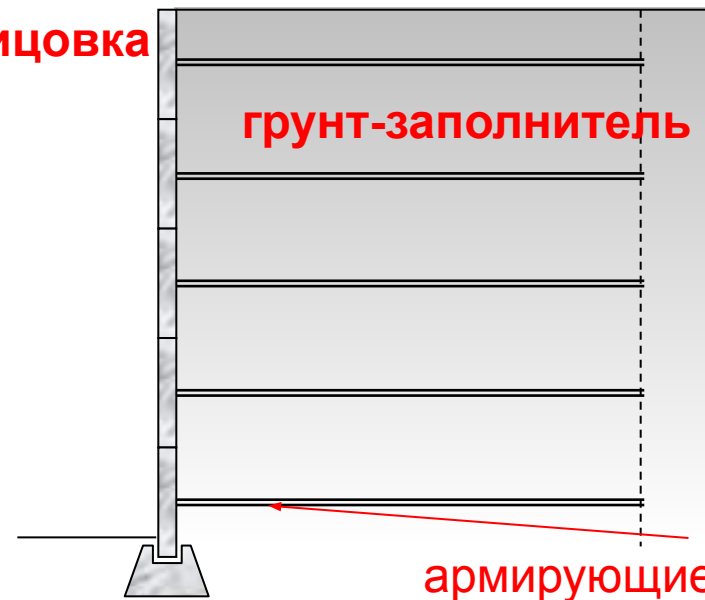
Представляют собой массив дренирующего грунта, армированный внутри арматурой обычно из силовых геосинтетиков (геоткань, георешетки, геосетки) или металлических сеток (из арматуры или габионной сетки) и защищенный снаружи облицовочной стенкой из железобетона или габионов. По поддерживающему воздействию заменяют собой упорный контрбанкет.



# Пример армогрунтовой стены

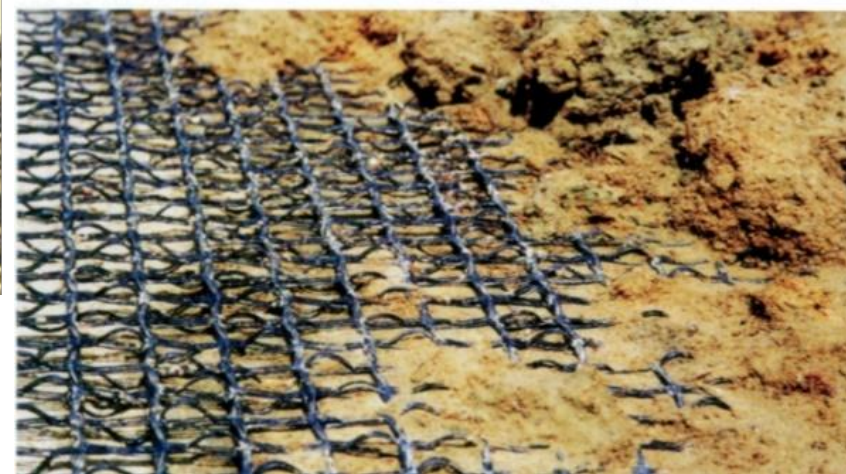


облицовка

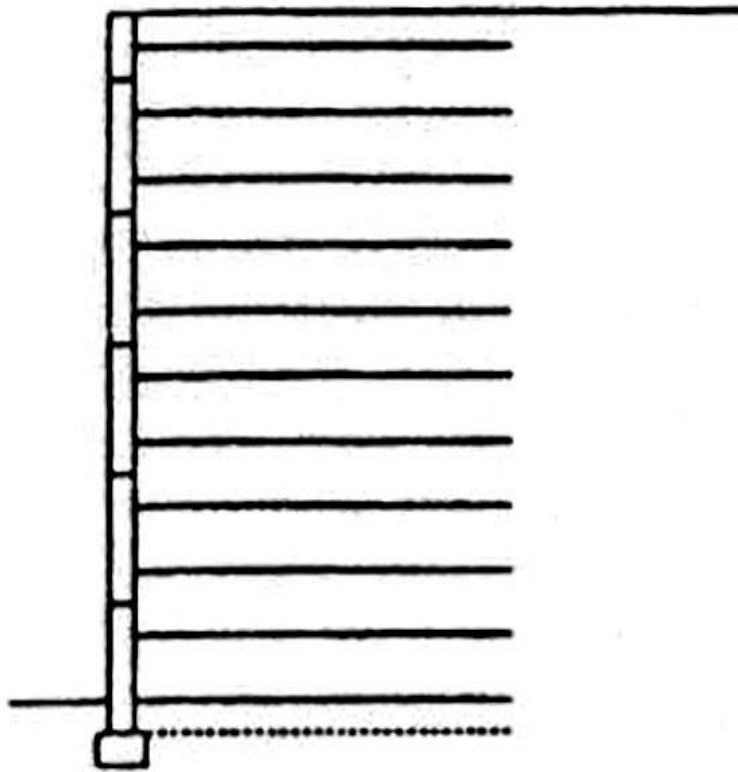


грунт-заполнитель

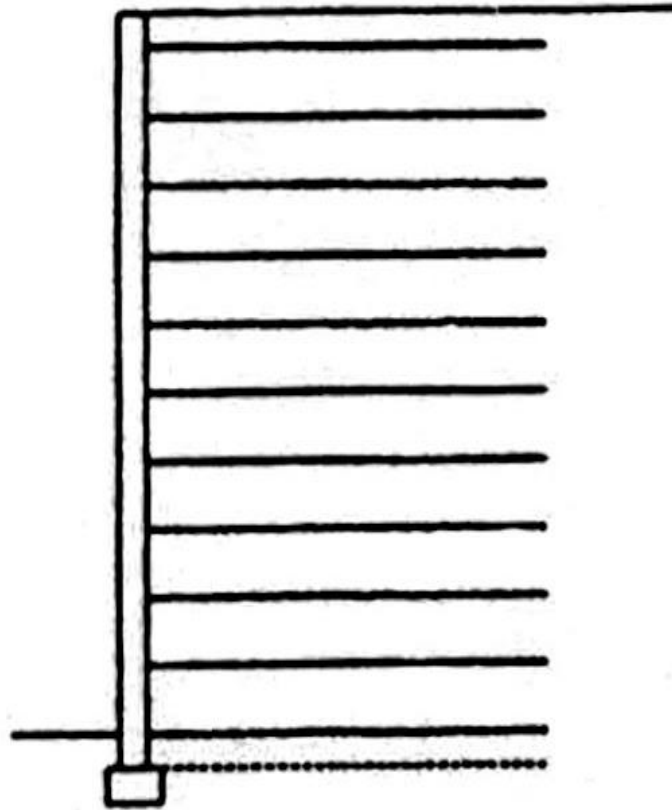
армирующие элементы



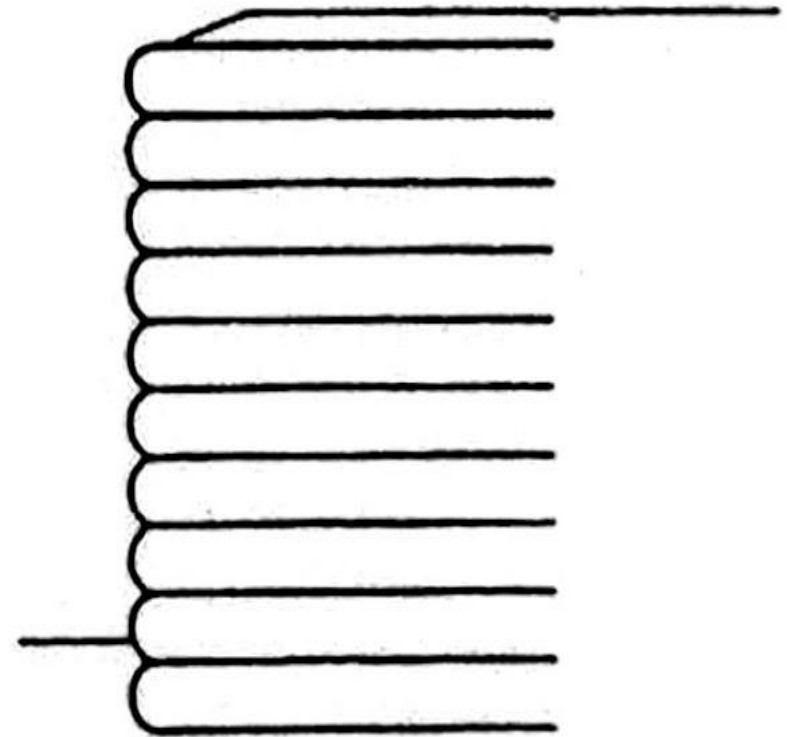
# Конструкции облицовки армогрунтовых стен



а) Дискретные панели



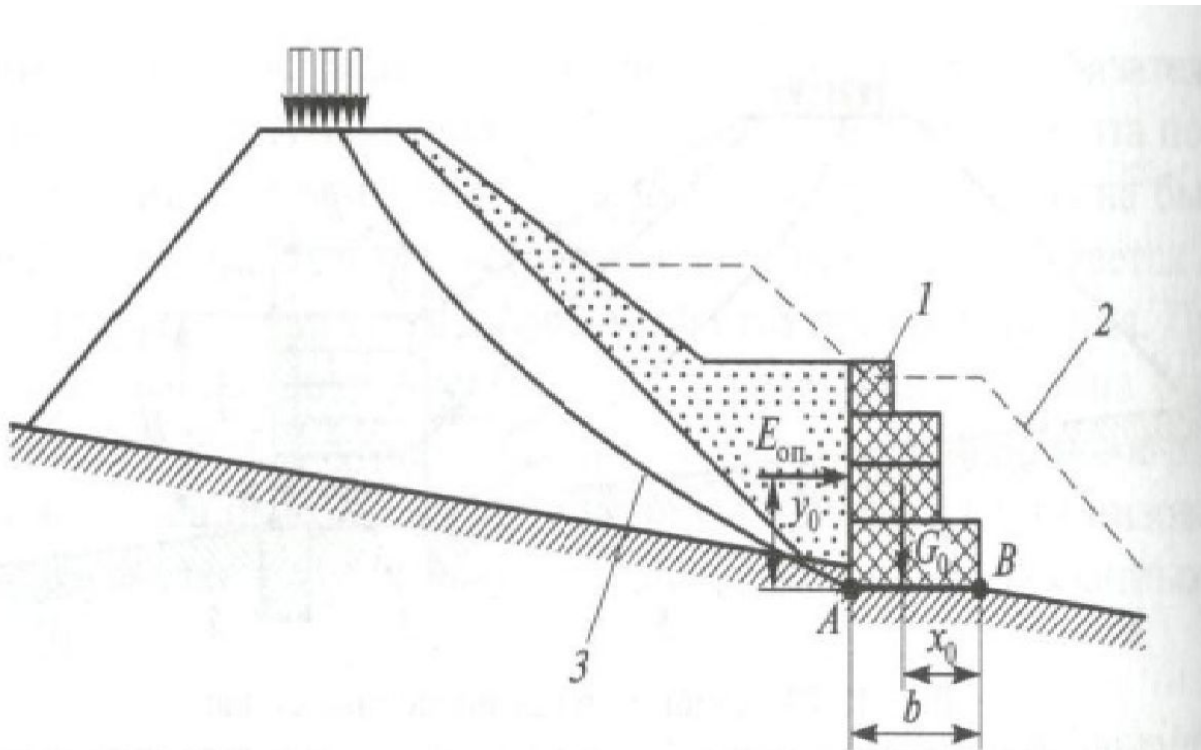
б) Панели полной высоты



в) Гибкая облицовка торца

# Стенки из габионов

- Гравитационная габионная стена выполнена из коробчатых прямоугольных габионов стандартных размеров. Внешняя сторона может иметь ступенчатое очертание.
- По поддерживающему воздействию эквивалентна массивной железобетонной стене – эффект достигается за счет веса габионов.
- Высота и размеры в плане (толщина) подбираются расчетом устойчивости.
- Преимуществом габионных стен является их гибкость и возможность воспринимать деформации без разрушения, а также экологичность и отсутствие застенного дренажа.



1- габионная стена;

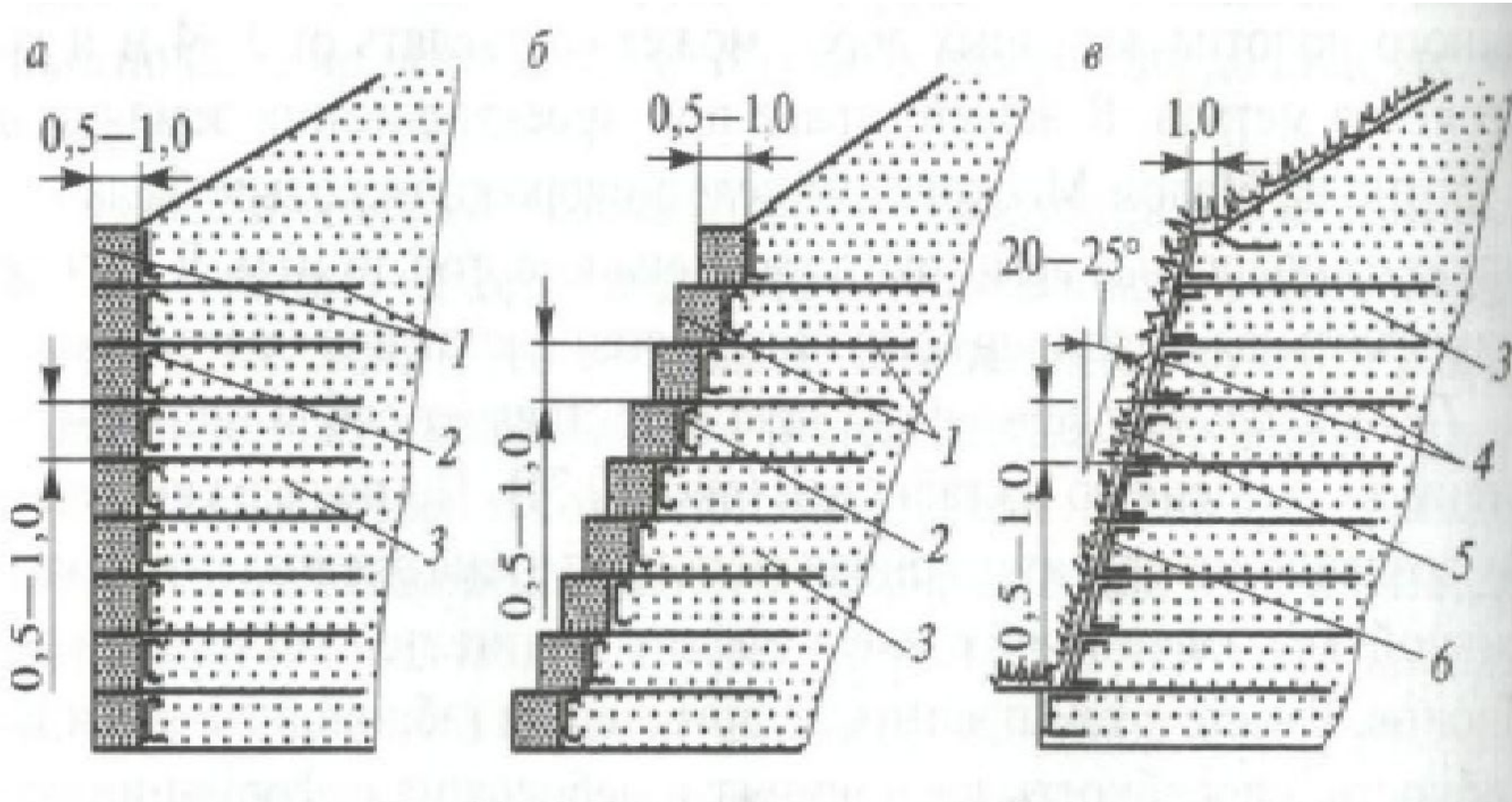
2 – контур альтернативного решения –  
контрбанкета;

3 – критическая поверхность смещения



# Подпорные стены Террамеш

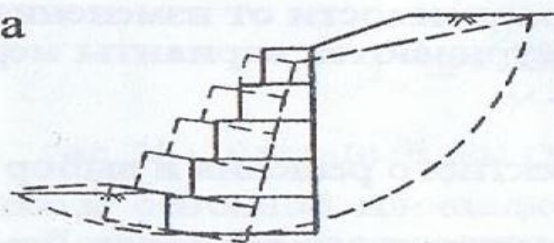
Представляют собой массив дренирующего грунта, облицованный снаружи габионами (с вертикальной лицевой гранью (а), со ступенчатой лицевой гранью (б) или без габионов – зеленый Террамеш (в)), а внутри армированный металлическими сетками, составляющие единое целое с облицовкой.



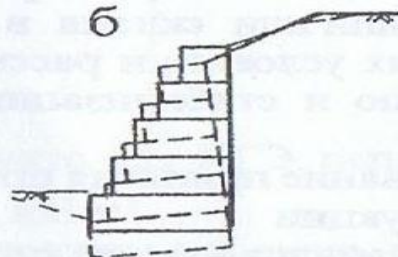
- 1- элементы системы;
- 2 – геотекстиль;
- 3 – грунт засыпки;
- 4 – элемент зеленого Террамеш;
- 5 – гидропосев;
- 6 – биополотно.

## ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГАБИОННОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ СТЕНЫ

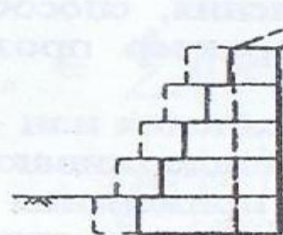
а



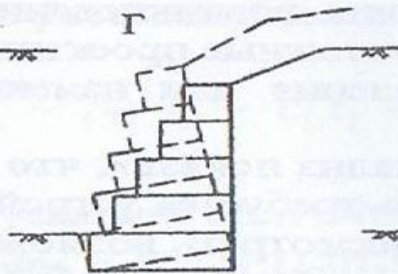
б



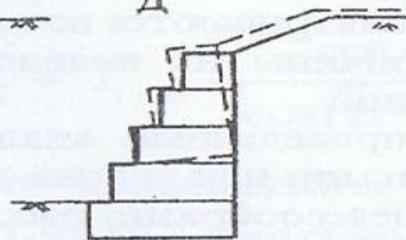
в



г



д



а - полное обрушение

б - нарушение несущей способности основания

в - сдвиг

г - опрокидывание

д - внутреннее разрушение

# Причины разрушений подпорных стен

- ❑ ошибки при проектировании (при выполнении расчетов, определении размеров конструкции, учете нагрузок, выборе материалов, армирования, грунтов заполнителя, облицовки и т.п)
- ❑ ошибки при реконструкции стен и близлежащих сооружений (зданий, дорог, площадок), в результате которой нарушаются условия работы подпорной стены и ее дальнейшее поведение трудно прогнозировать
- ❑ отсутствие технического обслуживания (своевременная замена поврежденных частей, контроль над состоянием дренажных систем), вследствие чего возможно изменение характеристик грунтов обратной засыпки и под подошвой фундамента (например, обводнение)
- ❑ некачественное возведение элементов стен (без проекта), неудовлетворительное изготовление узлов крепления (неудовлетворительное замоноличивание, сварка), отказ от устройства дренажных систем, некачественное распределение грунтов заполнителя и обратной засыпки и т. д.



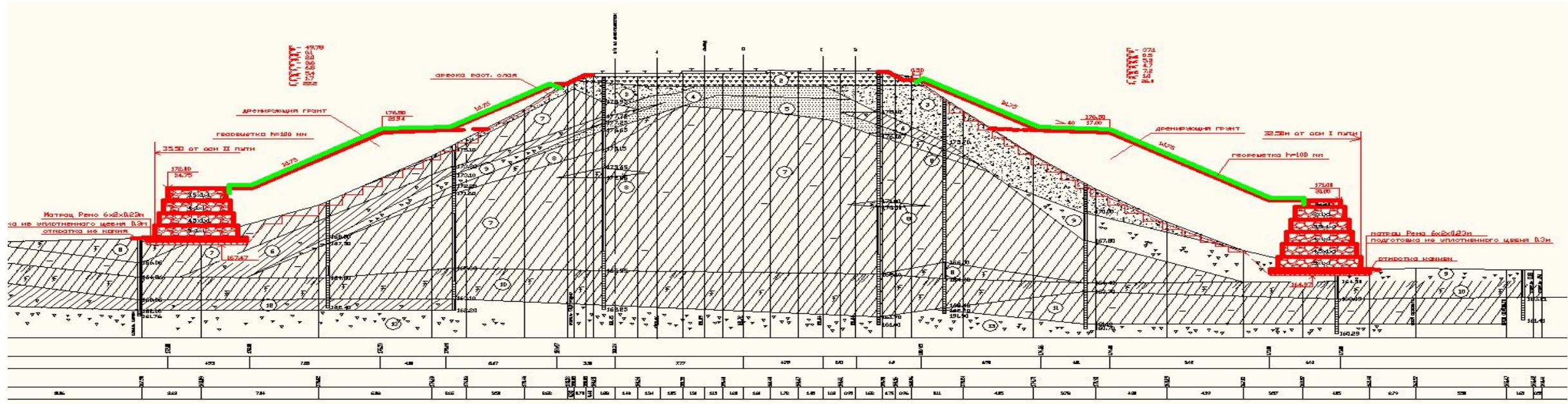


Разрушение подпорной стенки из габионов 569км  
С-Петербург - Москва



## Общие положения к расчету подпорной стены из коробчатых габионов

1. Обоснование принятия проектного решения и выбор конструкции подпорной стены (тип конструкции).
2. Определение проектных очертаний подпорной стены с учетом местных условий (высоты, ширины и размещения габионов в поперечном сечении).
3. Определение расчетных оползневых давлений ( $E_{оп}$  и  $E_a$ , кН/м).
4. Расчеты подпорной стены, заданной конструкции:
  - устойчивость стены против сдвига по поверхности основания;
  - устойчивость стены против опрокидывания;
  - проверка несущей способности основания стены;
  - проверка внутренней устойчивости стены.

















# ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСИЛЕНИЯ НАСЫПИ ГАБИОННОЙ СТЕНОЙ

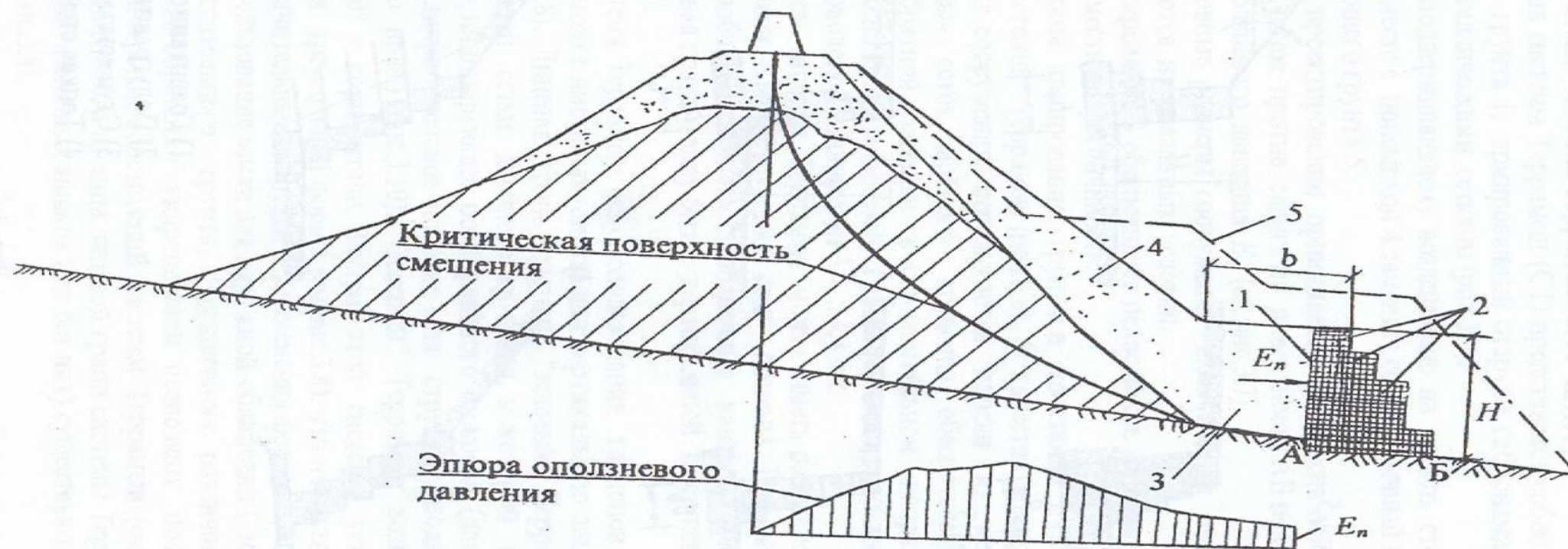
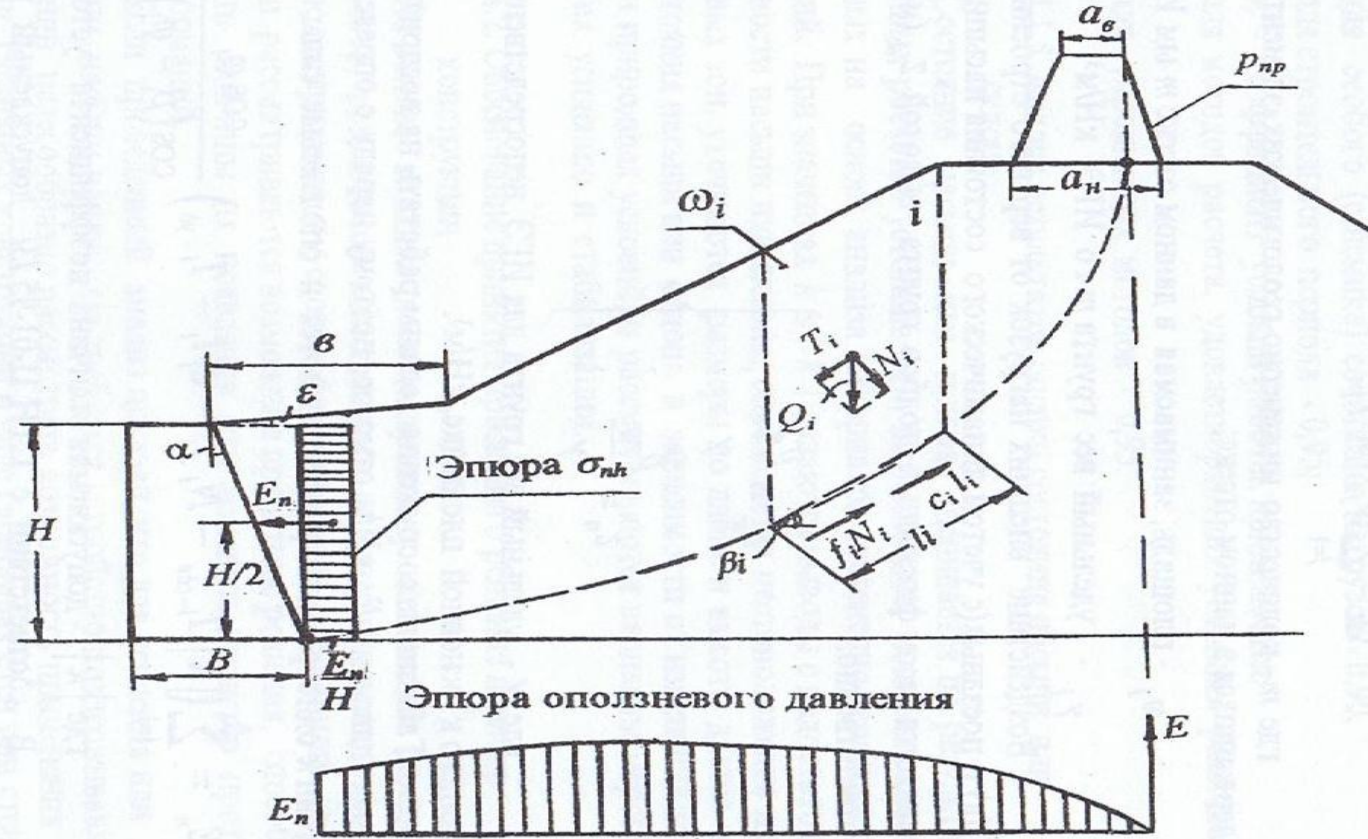


СХЕМА ДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ  $E_n$  НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ

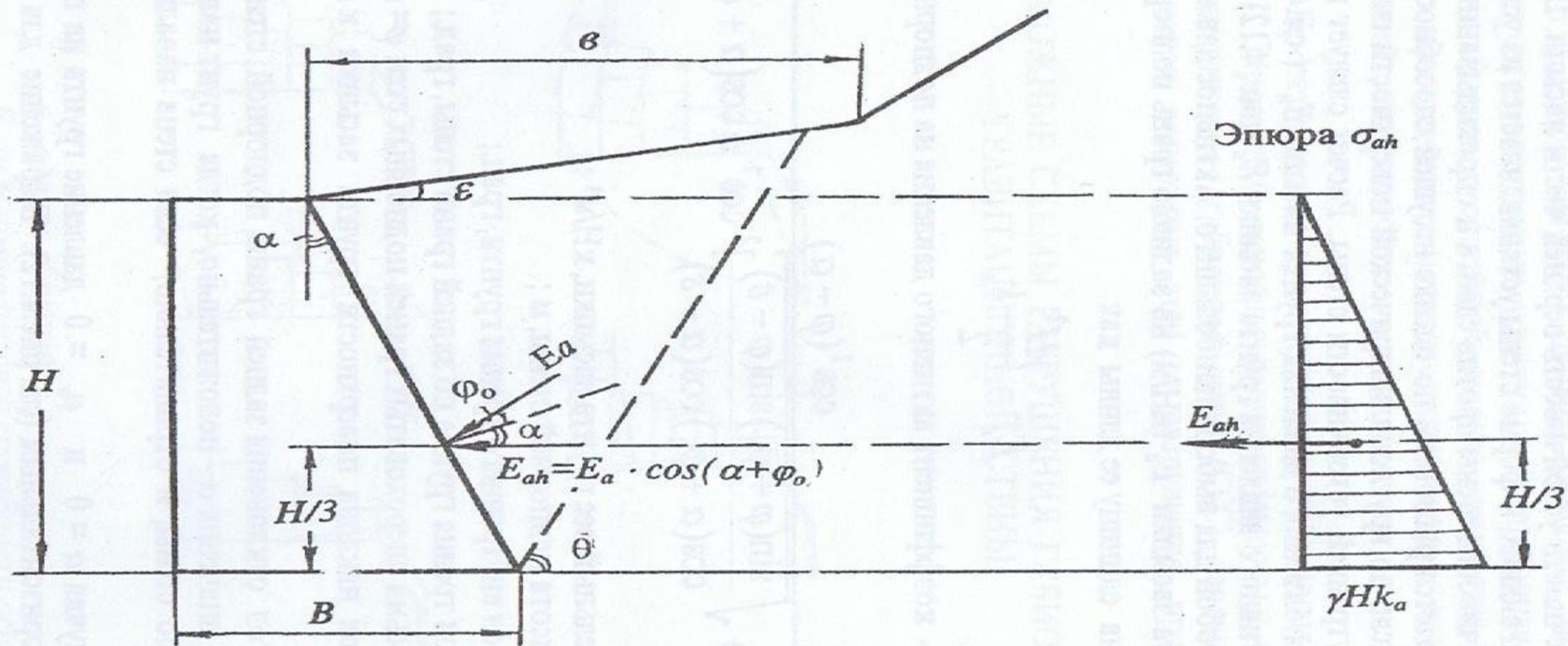


$$E_n = \sum_{i=1}^n \left( |k| T_{i-сдв} - N_i f_i - c_i l_i - T_{i-уд} \right) \frac{\cos \varphi_i}{\cos (\beta_1 - \varphi_i)}, \quad (4.6)$$

где  $|k|$  - допускаемая величина коэффициента устойчивости.



# СХЕМА ДЕЙСТВИЯ АКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ $E_a$ НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ





$$E_a = \frac{\gamma H^2}{2} k_a \quad , \quad (4.8)$$

где  $k_a$  - коэффициент активного давления на подпорную стену;

$$k_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi - \varepsilon)}{\cos(\alpha + \varphi_0) \cos(\alpha - \varepsilon)}} \right]^2 \cos^2 \alpha \cos(\alpha + \varphi_0)} \quad , \quad (4.9)$$

$\gamma$  - удельный вес грунта засышки, кН/м<sup>3</sup> ;

$H$  - высота подпорной стены, м ;

$\varphi$  - угол внутреннего трения грунта, град.;

$\varphi_0$  - угол трения грунта по задней грани стены, град.;

для весьма шероховатых граней подпорных стен  $\varphi = \varphi_0$ ;

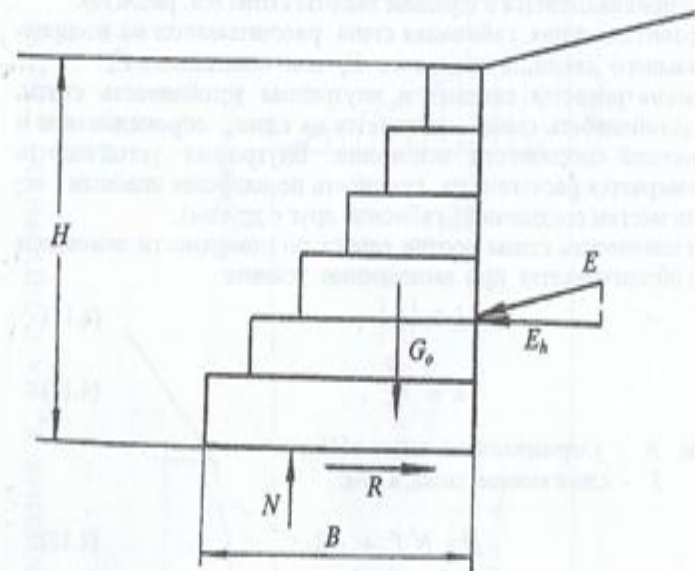
$\varepsilon$  - угол наклона поверхности грунта засышки к горизон-  
тали, град.;

$\alpha$  - угол отклонения задней грани подпорной стены от вер-  
тикали, град.: значения  $\alpha$  - положительно, когда грунт нависает над  
задней гранью стены, и отрицательно, если стена наваливается на  
грунт.

Для случая  $\alpha = 0$  и  $\varphi_0 = 0$  давление грунта на подпорную  
стену будет горизонтальным (см. рис.4.12). Выражение для определе-  
ния коэффициента активного давления примет вид

$$k_a = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \varphi / 2 \right) \quad . \quad (4.10)$$

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНЫ НА СДВИГ



$$k \geq |k|, \quad (4.11)$$

$$k = \frac{R}{T}, \quad (4.12)$$

где  $R$  - удерживающие силы, кН/м;  
 $T$  - сдвигающие силы, кН/м;

$$R = Nf + cB, \quad (4.13)$$

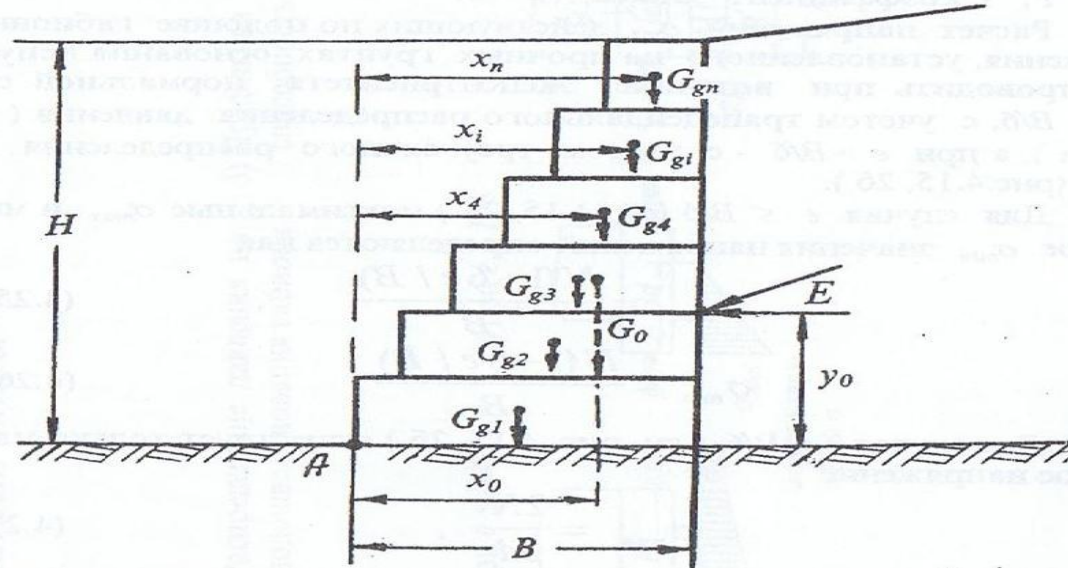
$$T = E, \quad (4.14)$$

где  $E$  - максимальная величина горизонтальной составляющей активного давления  $E_{ah}$  или оползневое давление  $E_n$ , кН/м.

$$E = \max \left\{ \begin{array}{l} E_{ah} = E_a \cos(\alpha + \varphi_0) \\ E_n \end{array} \right\}. \quad (4.15)$$



РАСЧЕТНАЯ СХЕМА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНЫ НА ОПРОКИДЫВАНИЕ



Устойчивость стены против опрокидывания (рис.4.14) обеспечивается при выполнении условия (4.11), но  $k$  определяется из выражения

$$k = \frac{M_{y\partial}}{M_{on}}, \quad (4.16)$$

где  $M_{y\partial}$  - момент удерживающих сил, кН\*м/м;  
 $M_{on}$  - момент сил, действующих на опрокидывание стены, кН\*м/м.

$$M_{y\partial} = G_0 x_0, \quad (4.17)$$

где  $G_0$  - равнодействующая всех вертикальных нагрузок, кН/м;

$$G_0 = \sum_{i=1}^n G_{gi}, \quad (4.18)$$

где  $G_{gi}$  - вес  $i$ -ой секции габиона, кН/м;  
 $x_0$  - плечо равнодействующей всех вертикальных нагрузок, м

$$x_0 = \frac{\sum G_{gi} x_i}{\sum G_{gi}}, \quad (4.19)$$

где  $x_i$  - плечо силы  $G_{gi}$ , относительно точки А (см. рис.4.14), м;  
Вес  $i$ -го габиона  $G_{gi}$  определяется как

$$G_{gi} = \omega_{gi} \gamma_g, \quad (4.20)$$

где  $\omega_{gi}$  - площадь  $i$ -го габиона, м<sup>2</sup>;  
 $\gamma_g$  - удельный вес материала заполнения габиона, кН/м<sup>3</sup>;

$$\gamma_g = \gamma_s (1 - n) \quad (4.21)$$

$\gamma_s$  - удельный вес частиц материала заполнения габиона, кН/м<sup>3</sup>,  
(см. рис.3.4, табл. 3.5);

$n$  - пористость материала заполнения габиона (см. 3.1.11)

$$M_{on} = E y_0, \quad (4.22)$$

где  $y_0$  - плечо равнодействующей всех горизонтальных нагрузок  $E$ , м.

Несущая способность основания габионной стены обеспечивается при выполнении условия

$$\left. \begin{aligned} \sigma_v &\leq |\sigma| \\ k_s &= \frac{|\sigma|}{\sigma_v} \geq |k| \end{aligned} \right\}, \quad (4.23)$$

где  $\sigma_v$  - максимальное вертикальное напряжение, действующее в основании поддерживающего сооружения, кПа;  
 $|\sigma|$  - допускаемое давление под подошвой габионной стены, кПа;



Расчет напряжений  $\sigma$ , действующих по подошве габионного сооружения, установленного на прочных грунтах основания допускается проводить при величине эксцентриситета нормальной силы  $N e \leq B/6$ , с учетом трапецеидального распределения давления (рис. 4.15, 2а), а при  $e > B/6$  - с учетом треугольного распределения давления (рис.4.15, 2б).

Для случая  $e \leq B/6$  (см. 4.15, 2а) максимальные  $\sigma_{max}$  и минимальное  $\sigma_{min}$  значения напряжений определяются как

$$\sigma_{max} = \frac{N(1 + 6e/B)}{B}, \quad (4.25)$$

$$\sigma_{min} = \frac{N(1 - 6e/B)}{B}, \quad (4.26)$$

Для случая  $e > B/6$  (см. рис. 4.15, 2б) существует только максимальное напряжение

$$\sigma_{max} = \frac{2N}{3d}, \quad (4.27)$$

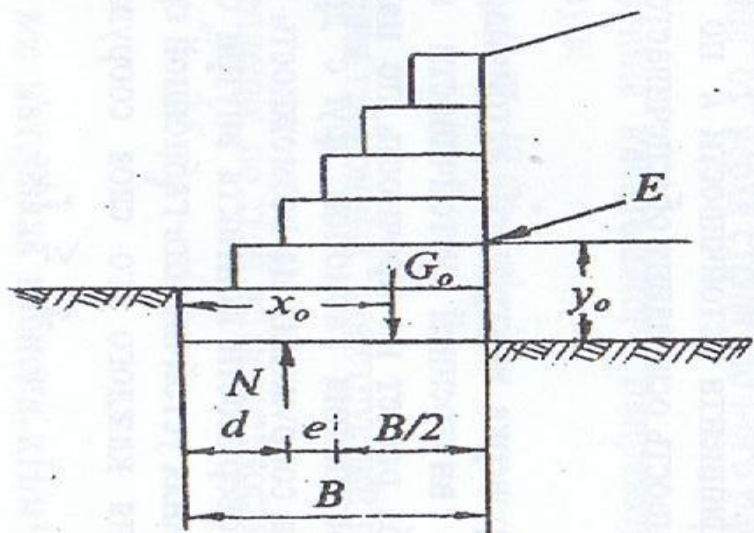
где  $d$ - расстояние от нижнего левого края подошвы габиона до точки приложения реакции грунта основания  $N$ , м (см. рис.4.15, 1)

$$d = \frac{M_{y\partial} - M_{on}}{N}, \quad (4.28)$$

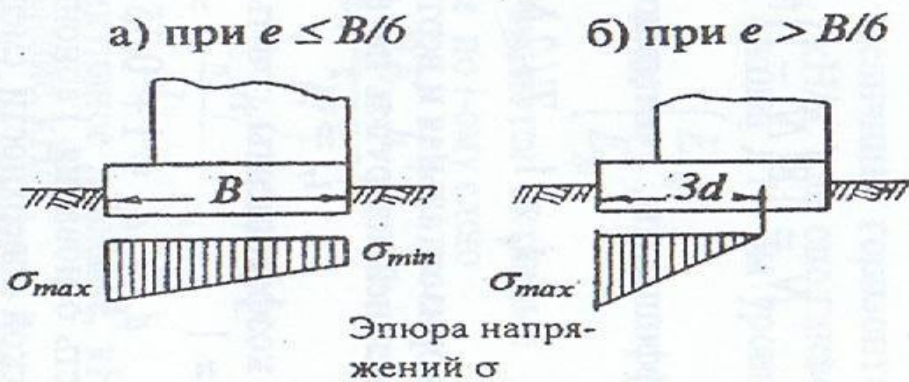
где  $M_{y\partial}$  и  $M_{on}$  определяются в п.4.3.1 по формулам (4.17-4.22).

## РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

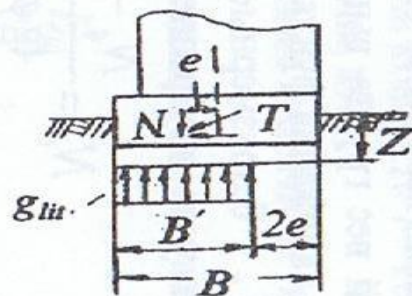
1) Силы действующие на габионную стену



2) Распределение давления по подошве основания габиона

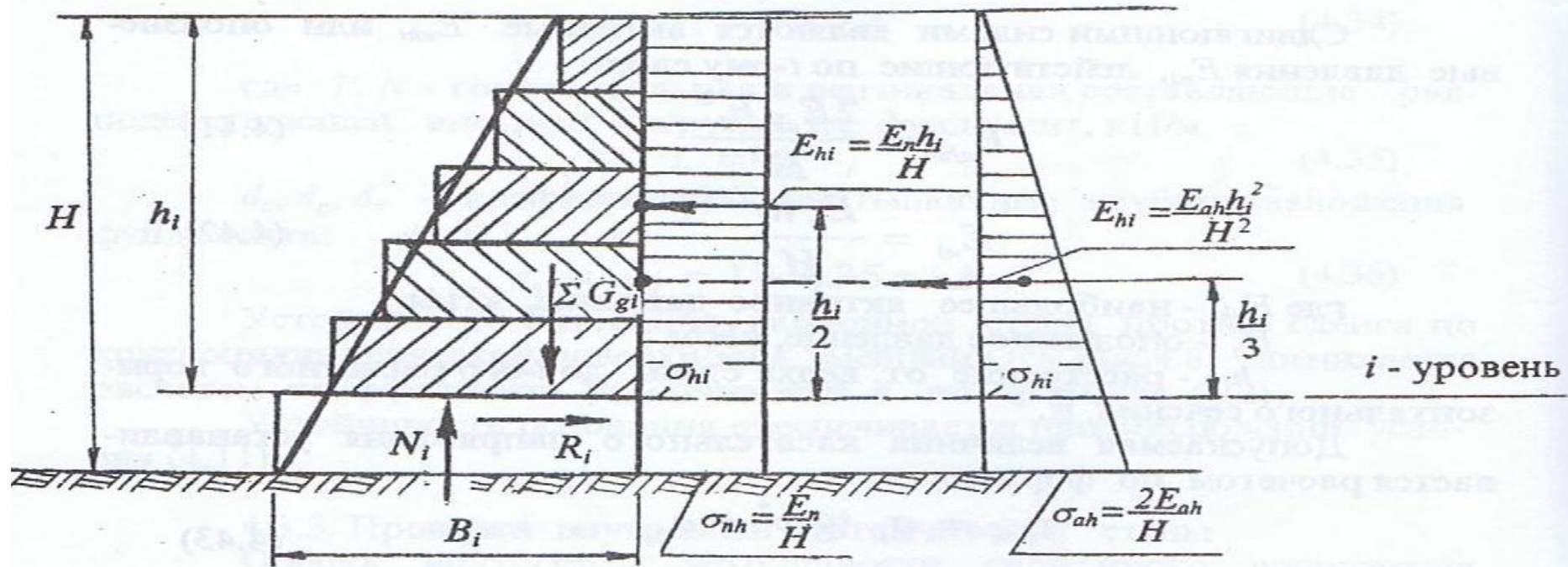


3) Предельная несущая способность основания





Эпюры напряжений  $\sigma_{hi}$   
 при действии  
 а) оползневого      б) активного  
 давления  $E_n$       давления  $E_{ah}$





Внутренняя устойчивость габионной стены обеспечивается при выполнении для каждого  $i$ -го слоя сооружения (рис.4.16) условий

$$\tau_i \leq \tau_{доп} \quad , \quad (4.37)$$

$$\sigma_i \leq \sigma_{доп} \quad , \quad (4.38)$$

где  $\tau_i$ ,  $\sigma_i$  - действующие на контакте  $i$  - го слоя стены касательные и нормальные напряжения, кПа;

$\tau_{доп}$ ,  $\sigma_{доп}$  - допускаемые величины касательного и нормального напряжений, кПа.

$$\tau_i = \frac{E_{hi}}{B_i}, \quad (4.39)$$

где  $B_i$  - ширина габионной секции в  $i$ -ом уровне, м;  
 $E_{hi}$  - максимальная величина горизонтальной составляющей активного давления  $E_{ahi}$ , кН/м или оползневое давление  $E_{ni}$ , кН/м на контакте габионных секций в  $i$ -ом уровне

$$E_{ahi} = \frac{2E_{ah} h_i^2}{H^2}, \quad (4.41)$$

$$E_{ni} = \frac{E_n h_i}{H}, \quad (4.42)$$

где  $E_{ah}$  - наибольшее активное давление, кН/м;  
 $E_n$  - оползневое давление, кН/м;  
 $h_i$  - расстояние от верха стены до  $i$ -ого расчетного горизонтального сечения, м.

Допускаемая величина касательного напряжения устанавливается расчетом по формуле

$$\tau_{\text{дон}} = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi^* + c_g \quad , \quad (4.43)$$

где  $\varphi^*$  - угол трения габионных конструкций по  $i$ -ой расчетной поверхности, град.;

$c_g$  - удельное сцепление по этой же поверхности, кПа.

$$\varphi^* = 2.5 \gamma_g - 10 \quad , \quad (4.44)$$

$\gamma_g$  - удельный вес материала габиона, кН/м<sup>3</sup>;

$$c_g = 3P_u - 5 \quad , \quad (4.45)$$

$P_u$  - масса сетки габионной секции, кг/м<sup>3</sup>.



Нормальное напряжение, действующее на контакте габионных секций в  $i$ -ом уровне

$$\sigma_i = \frac{N_i}{B_i} = \frac{\sum G_{gi}}{B_i} \quad , \quad (4.46)$$

где  $N_i$  - нормальная реакция нижележащих слоев габионов, кН/м;

$$N_i = \sum G_{gi} \quad , \quad (4.47)$$

$B_i$  - ширина стены в расчетном сечении, м.

Допускаемая величина нормального напряжения определяется из выражения

$$\sigma_{дон} = 50 \gamma_g - 300 \quad . \quad (4.48)$$