

## УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ МНОГОСЛОЙНОГО ГРУНТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Школа А.В., Войтенко И.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

В работе рассматривается задача по определению давления двухслойной грунтовой среды на подпорную стенку. Анизотропия прочностных свойств представлена годографами угла внутреннего трения и сцепления, удовлетворяющими условиям:

$$\varphi(\beta) = \varphi(\beta + \pi); \quad c(\beta) = c(\beta + \pi)$$

Настоящие результаты базируются на теории Ш. Кулона, в отличие от, полученных ранее на основе теории предельного напряженного состояния [1, 2]. Решение для случая активного давления с учетом сейсмического фактора, для плоской задачи. Сцепление учитывается на основании теоремы Како. Ориентация плоских границ грунтовых слоев принята произвольной.

Рассматривается крутая, шероховатая стенка высотой  $H$ ,  $\beta$  - угол ориентации стенки к горизонту. Слои грунта ориентированы к горизонту под углами  $\beta_{1,1}$  и  $\beta_{1,2}$  ( $\beta_{1,i}$  - обозначение угловых параметров, где  $i$  - индекс параметра;  $j$  - индексация слоя).

$\beta_{2,1}$  и  $\beta_{2,2}$  - углы, определяющие ориентацию плоскостей обрушения;

$h_1, h_2$  - мощности слоев на вертикальную проекцию стенки;



$\gamma_1, \gamma_2$  — удельные веса слоев;

$\varphi_1(\beta), c_1(\beta)$  — прочностные характеристики верхнего слоя;

$\varphi_2(\beta), c_2(\beta)$  — прочностные характеристики нижнего слоя.

Предусматривается учет поверхностной равномерно распределенной нагрузки  $q$ , ориентированной под углом  $\rho$  относительно нормали к поверхности верхнего слоя.

$\gamma_1(\beta_3)$  и  $\gamma_2(\beta_3)$  — углы шероховатости стенки в пределах верхнего и нижнего слоев.

Учет сцепления производится путем приложения давлений связности  $\sigma_{i,j} = \frac{c_j(\beta_{i,j})}{\operatorname{tg} \varphi_j(\beta_{i,j})}$  по контуру грунтовой призмы.

$\omega_{\gamma,i}$  — угол сейсма для объемных сил, определяемый согласно статической теории по формуле:

$$\omega_{\gamma,j} = \operatorname{arctg} \left[ \left( \alpha \frac{\gamma_{\text{нас},j}}{\gamma_{\text{взв},j}} \cos \chi \right) / \left( 1 - \frac{\gamma_{\text{нас},j}}{\gamma_{\text{взв},j}} \alpha \sin \chi \right) \right],$$

где:  $\gamma_{\text{нас},j}, \gamma_{\text{взв},j}$  — удельный вес  $j$ -го слоя грунта в насыщенном и взвешенном состоянии;

$\chi$  — угол наклона сейсмической силы к горизонту;

$\alpha$  — произведение коэффициентов, отражающих сейсмичность района строительства и функциональную ответственность сооружения;

$\gamma_j$  — удельный вес  $j$ -го слоя грунта:

$$\gamma_j = \gamma_{\text{взв},j} \left( 1 - \frac{\gamma_{\text{нас},j}}{\gamma_{\text{взв},j}} \alpha \sin \chi \right) / \cos \omega_{\gamma,j}.$$

Угол сейсма для поверхностной нагрузки:  $\omega_q = \omega_q^* - \Delta$ ,

где:  $\omega_q^* = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sin \Delta + \alpha \cos \chi}{\cos \Delta - \alpha \sin \chi} \right]$  — угол отклонения от вертикали по поверхностной нагрузке  $q_c$ ;

$\Delta$  — угол отклонения от вертикали поверхностной нагрузки  $q$ ;

$\Delta = \rho - \beta_{1,1} + \pi$ .

Поверхностная нагрузка, отклоненная под действием сейсма:

$$q_c = q \frac{\cos \Delta - \alpha \sin \chi}{\cos \omega_q^*}.$$

Расчетная схема приведена на рис. 1.



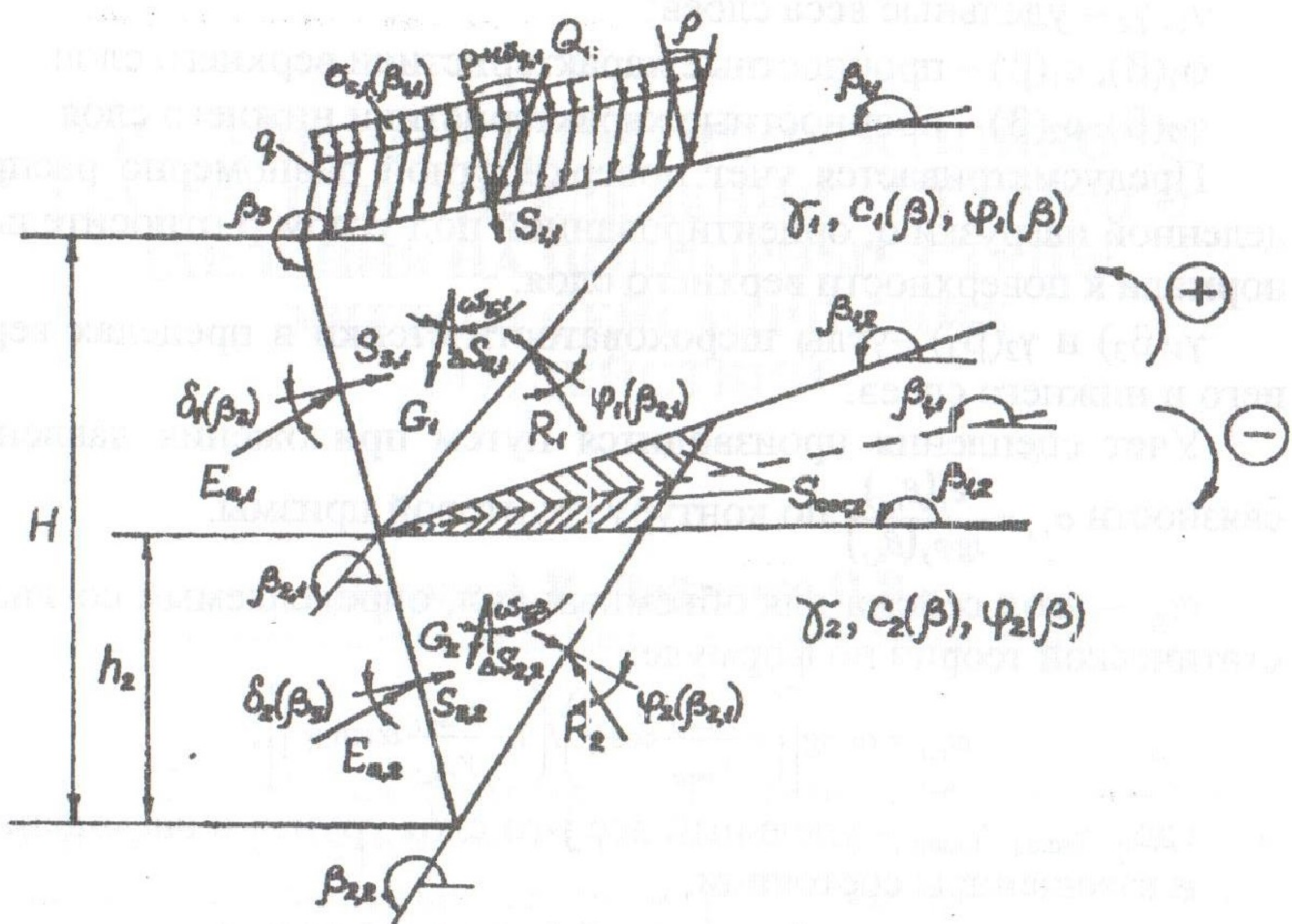


Рис. 1. Расчетная схема.

Активные силы взаимодействия грунта со стеной определяются путем рассмотрения равновесия соответствующих призм обрушения с построением силовых многоугольников. Решение для однородного грунта было получено ранее [3]. Используя полученные результаты, запишем зависимости для верхнего слоя:

$$E_{a,1} = \gamma_1 h_1^2 N_{\gamma,1} + q_c h_1 N_{q,1} + c_1 h_1 N_{c,1}, \quad (1)$$

где:

$$N_{\gamma,1} = \frac{1}{2} \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,1}) \sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\varphi_1(\beta_{2,1}) - \omega_{\gamma,1} - \beta_{2,1})}{\sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,1} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_1(\beta_{2,1}) - \beta_{2,1} + \delta_1(\beta_3))}; \quad (2)$$

$$N_{q,1} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,1}) \sin(\beta_{1,1} - \beta_{2,1} - \rho - \omega_{q,1} + \varphi_1(\beta_{2,1}))}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,1} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_1(\beta_{2,1}) - \beta_{2,1} + \delta_1(\beta_3))}; \quad (3)$$

$$N_{c,1} = \left\{ \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,1}) \sin(\beta_{1,1} - \beta_{2,1} + \varphi_1(\beta_{2,1}))}{\sin(\beta_{2,1} - \beta_{1,1}) \operatorname{tg} \varphi_1(\beta_{1,1})} + \frac{c_1(\beta_3) \sin(\beta_3 + \varphi_1(\beta_{2,1}) - \beta_{2,1})}{c_1(\beta_{1,1}) \operatorname{tg} \varphi_1(\beta_3)} + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin \varphi_1(\beta_{2,1})}{\sin(\beta_{2,1} - \beta_{1,1})} \left[ \frac{c_1(\beta_{2,1})}{c_1(\beta_{1,1})} \operatorname{ctg} \varphi_1(\beta_{2,1}) - \operatorname{ctg} \varphi_1(\beta_{1,1}) \right] \right\} \times$$



$$\times \frac{1}{\sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \varphi_1(\beta_{2,1}) - \beta_{2,1} + \delta_1(\beta_3))}. \quad (4)$$

Угол  $\beta_{2,1}$ , характеризующий поверхность обрушения, неизвестен и определяется методом итераций.

Заметим, что в качестве базового принимаем сцепление на поверхности слоя, т. е.  $c_1 = c_1(\beta_{1,1})$ .

Для определения давления нижнего слоя  $E_{a,2}$  приведем схему к параллельному залеганию и воспользуемся решением, полученным ранее [4]:

$$E_{a,2} = \gamma_2 h_2^2 N_{\gamma,2} + q_{c,2} h_2 N_{q,2} + c_2(\beta_{1,1}) h_2 N_{c,2}, \quad (5)$$

где:

$$N_{\gamma,1} = \frac{1}{2} \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,1}) \sin(\beta_3 - \beta'_{1,1}) \sin(\varphi_1(\beta_{2,1}) - \omega_{\gamma,1} - \beta_{2,1})}{\sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,1} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_1(\beta_{2,1}) - \beta_{2,1} + \delta_1(\beta_3))}; \quad (6)$$

$$N_{q,2} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,1} - \beta'_{2,2} - \rho_2 - \omega_{q,2} + \varphi_2(\beta_{2,2}))}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2} + \delta_2(\beta_3))}; \quad (7)$$

$$N_{c,2} = \left\{ \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,1} - \beta_{2,2} + \varphi_2(\beta_{2,2}))}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1}) \operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{1,1})} + \frac{c_2(\beta_3) \sin(\beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2})}{c_2(\beta_{1,1}) \operatorname{tg} \varphi_2(\beta_3)} + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin \varphi_2(\beta_{2,2})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})} \left[ \frac{c_2(\beta_{2,2})}{c_2(\beta'_{1,1})} \operatorname{ctg} \varphi_2(\beta_{2,2}) - \operatorname{ctg} \varphi_2(\beta_{1,1}) \right] \right\} \times \frac{1}{\sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2} + \delta_2(\beta_3))}. \quad (8)$$

$q_{c,2}$  представляет собой результирующую равномерно распределенную нагрузку от веса верхнего слоя  $q_1$  и поверхностной нагрузки  $q$ .

$$q_{c,2} = q_2 \frac{(\cos \Delta_1 - \alpha \sin \chi)}{\cos \omega_q}, \quad (9)$$

где:

$$q_2 = (q_1 + q) \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right);$$

$q_1 = -\gamma h'_1 \cos \beta_{1,1}$ ;  $h'_1 = h_1 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1})}{\sin \beta_3 \cos \beta_{1,1}}$  - высота верхнего слоя по вертикали.

Поскольку действительное залегание слоев отлично от параллельного, полученное решение необходимо откорректировать, учитывая влияние объема грунта  $S_{\text{кор},2}$ , ограниченного углами  $\beta_{1,1}$ ,  $\beta_{1,2}$  и  $\beta_{2,2}$ , на собственный вес, сцепление, а также принимая во



внимание характер поверхностной нагрузки от веса верхнего слоя  $q_1$ .

Силовой многоугольник для определения  $E_{a,2}$  представлен на рис. 2. Очевидно, что вес корректирующего объема грунта  $G_{кор,2}$  учитывается в объемном факторе:

$$G_2' = G_2 + G_{кор,2}$$

где:  $G_2'$  - общий вес призмы обрушения;

$G_2$  - вес призмы обрушения объема;

$S_2$ , соответствующего параллельному залеганию;

$G_{кор,2}$  - вес корректирующего объема;

$S_{кор,2}$ , прибавляемый в случае положительного отсчета  $\beta_{1,2}$  и вычитаемый в случае отрицательного отсчета  $\beta_{1,2}$  (здесь и далее верхний знак соответствует положительному  $\beta_{1,2}$ , а нижний - отрицательному в соответствии с рис. 1).

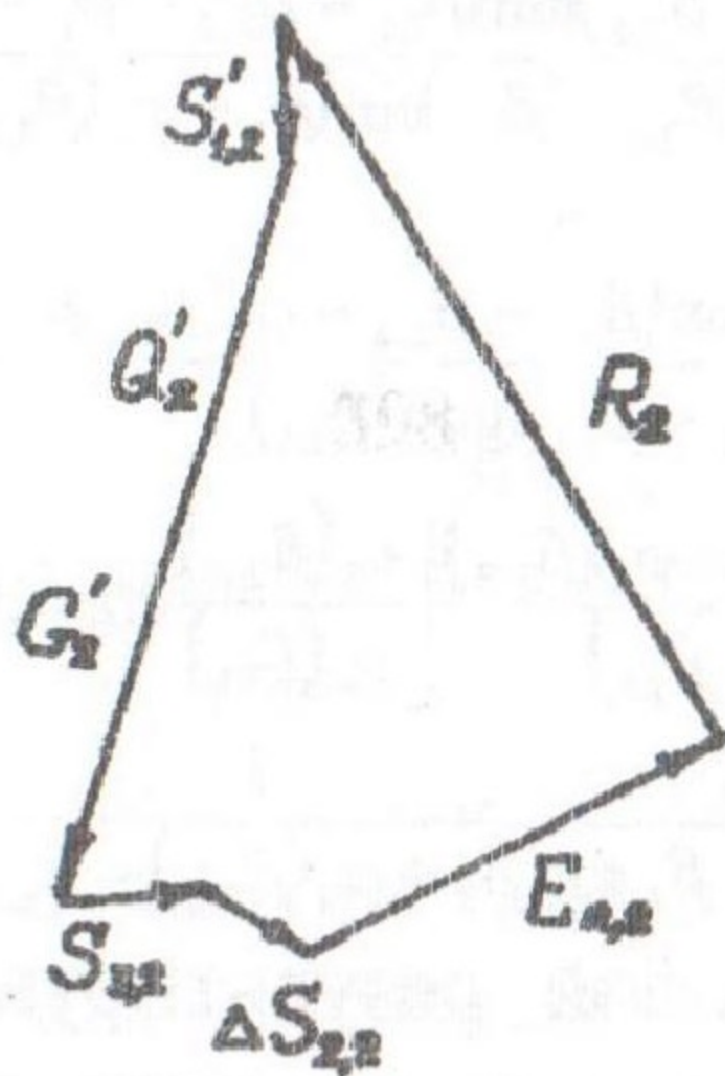


Рис. 2. Силовой многоугольник.

Площадь корректирующего треугольника:

$$S_{кор,2} = \frac{h_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\pm \beta_{1,2} \mp \beta_{1,1})}{2 \sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}$$

Тогда вес грунта в корректирующем объеме:

$$G_2' = \gamma_2 (S_2 \pm S_{кор,2}) = \gamma_2 h_2^2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 - \beta_{2,2})}{2 \sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})} \left( 1 + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})} \right) \quad (10)$$

Заметим, что полученный результат не зависит от направления угла  $\beta_{1,2}$ .

Очевидно, что корректирующий коэффициент для объемного фактора:



$$N_{\gamma, \text{cor}, 2} = \frac{G'_2}{G_2} = \left( 1 + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})} \right) \quad (11)$$

$$\text{Обозначим } N_{\text{cor}, 2} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}, \quad (12)$$

тогда,  $N_{\gamma, \text{cor}, 2} = (1 + N_{\text{cor}, 2})$ .

Определим влияние ориентации границ слоев грунта на нагружающий фактор путем выяснения корректирующего коэффициента для внешней нагрузки.

Действительная нагрузка от веса верхнего слоя является неравномерно распределенной (см. рис. 3), однако, для удобства вычислений заменим ее условной равномерно распределенной по поверхности AD нагрузкой  $q'_1 = \frac{q(A) + q(D)}{2}$ ,

где:  $q(A)$  и  $q(D)$  – значения нагрузки от собственного веса верхнего слоя в точках A и D, определяемые в соответствии с зависимостями:

$$q(A) = -\gamma_1 h'_1 \cos \beta_{1,1}; \quad (13)$$

$$q(D) = \gamma_1 (h'_1 [-\cos \beta_{1,1}] \mp \Delta h \cos(\pm \beta_{1,2} \mp \beta_{1,1})). \quad (14)$$

В итоге получим  $q'_1 = \gamma_1 \left( h'_1 [-\cos \beta_{1,1}] \mp \frac{1}{2} \Delta h \cos(\pm \beta_{1,2} \mp \beta_{1,1}) \right)$ .

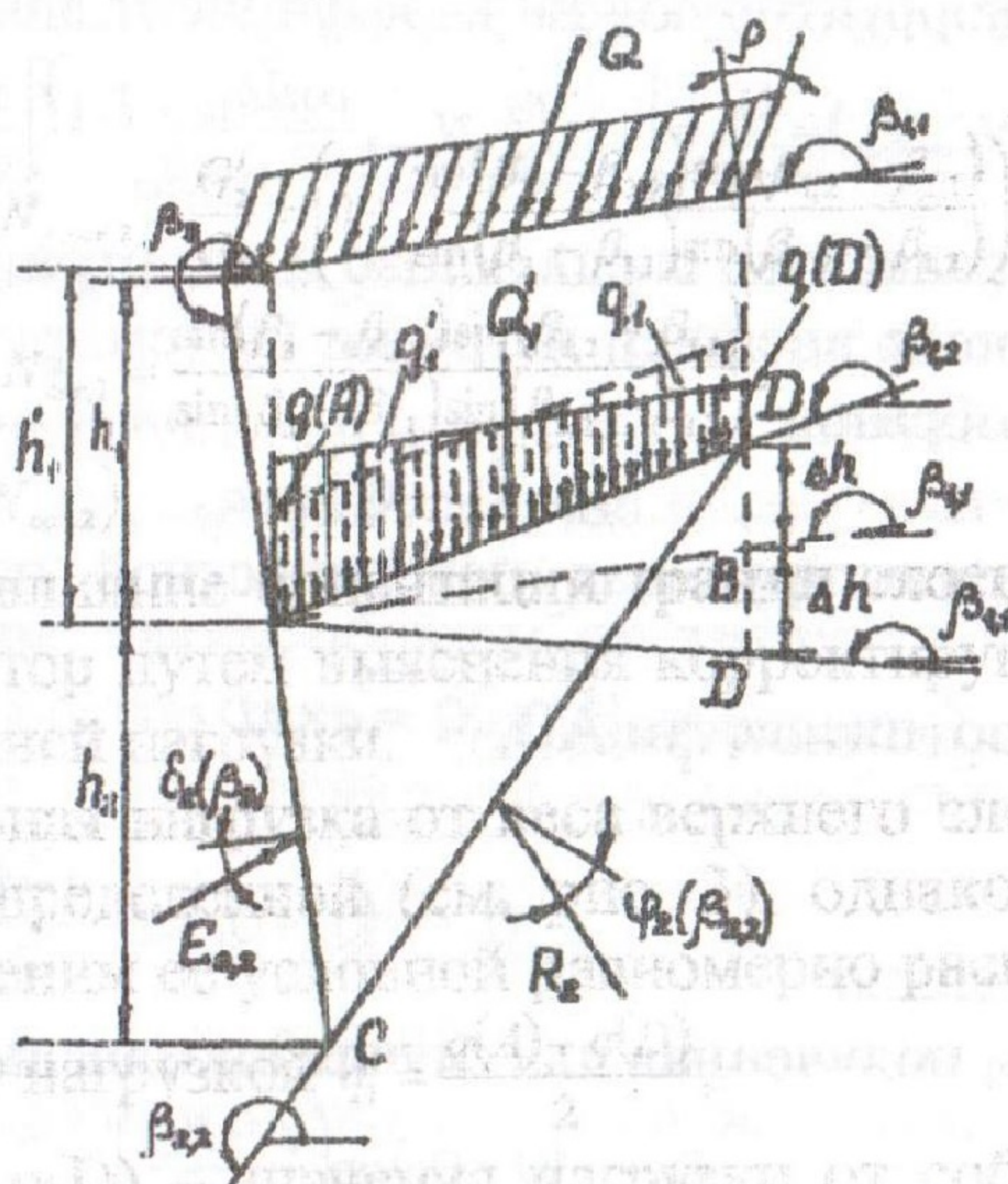


Рис.3. К учету нагрузки на подстилающий слой.



Результирующая этой нагрузки  $Q'_1 = q'_1 \times AD$ .

Из треугольника ABD:

$$\Delta h = h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\pm \beta_{1,2} \mp \beta_{1,1})}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \cos \beta_{1,1}};$$

$$AD = h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2})}{-\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}.$$

После преобразований получим:

$$Q = \gamma_1 h_1 h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 - \beta_{2,2})}{\sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})} \left[ 1 + \frac{h_2 \sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{2 h_1 \sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \cos \beta_{1,1}} \right]. \quad (15)$$

Результирующая внешней нагрузки от веса верхнего слоя при параллельном залегании:

$$Q_1 = q_1 \times AB, \text{ где } q_1 = \gamma_1 h'_1 \cos(\beta_{1,1} - \pi) = -\gamma_1 h_1 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1})}{\sin \beta_3}.$$

Из треугольника ABC:

$$AB = -h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2})}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}.$$

В итоге получим:

$$Q_1 = g_1 \eta_1 \eta_2 \frac{\sin(b_3 - b_{1,1}) \sin(b_3 - b_{2,2})}{\sin^2 b_3 \sin(b_{2,2} - b_{1,1})}.$$

Найдем корректирующий коэффициент для  $Q_1$ :

$$N_{cor}(Q_1) = \frac{Q'_1}{Q} = \left[ 1 + \frac{h_2}{2 h_1} N_{cor,2} \frac{\cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\cos \beta_{1,1}} \right] \frac{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}. \quad (16)$$

Полученное равенство справедливо и для отрицательного  $\beta_{1,2}$ .

Результирующая внешней нагрузки  $Q_2$  (см. рис. 4) определяется следующим образом:

$$Q'_2 = (Q' + Q'_1) \cos \alpha,$$

где:  $Q'$  - результирующая поверхностной нагрузки, распре-

ленной по плоскости AD,  $Q' = q \times AD$ ;

$$\alpha = \frac{\rho' + \pi - \beta_{1,2}}{2};$$

$$\rho' = \rho + \beta_{1,2} - \beta_{1,1}.$$

Окончательно

$$Q'_2 = -(Q' + Q'_1) \sin\left(\frac{\rho - \beta_{1,1}}{2}\right). \quad (17)$$

Зависимость, полученная для случая параллельного залегания:

$$Q_2 = -(Q + Q_1) \sin\left(\frac{\rho - \beta_{1,1}}{2}\right),$$

где:  $Q$  - результирующая поверхностной нагрузки по площадке AB, соответствующая параллельному залеганию слоев,  $Q = q \times AB$ .



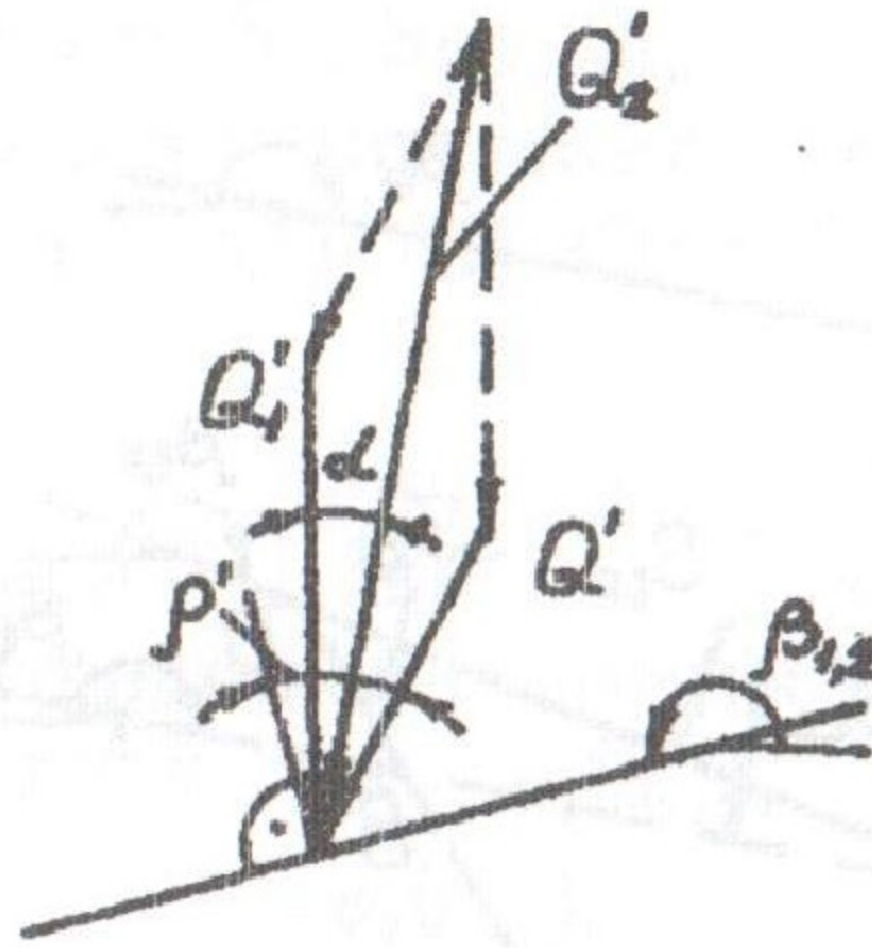


Рис. 4. К выводу результирующей  $Q'_2$ .

Очевидно, что справедливо равенство:

$$Q'_2 = (Q \cdot N_{cor}(Q) + Q_1 \cdot N_{cor}(Q_1)) \left( -\sin\left(\frac{\rho - \beta_{1,1}}{2}\right) \right),$$

где:  $N_{cor}(Q)$  – корректирующий коэффициент для  $Q$ , учитывающая реальный характер распределения поверхностной нагрузки  $q$ .

$$N_{cor}(Q) = \frac{q \times AD}{q \times AB} = \frac{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}.$$

Тогда,

$$Q'_2 = - \left( Q + Q_1 \left[ 1 + \frac{\eta_2}{2\eta_1} N_{cor,2} \frac{\cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\cos \beta_{1,1}} \right] \right) \frac{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})} \sin\left(\frac{\rho - \beta_{1,1}}{2}\right). \quad (18)$$

Запишем равенство для равномерно распределенной нагрузки:

$$q'_2 = - \left[ q + q_1 \left( 1 + \frac{h_2}{2h_1} N_{cor,2} \frac{\cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{\cos \beta_{1,1}} \right) \right] \frac{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})} \sin\left(\frac{\rho - \beta_{1,1}}{2}\right). \quad (19)$$

С учетом сейсма:

$$q'_{e,2} = q'_2 \frac{(\cos \Delta - \alpha \sin \chi)}{\cos \omega_q^*}. \quad (20)$$

Рассмотрим, каким образом отразится произвольное залегание слоев на фактор сцепления. В выводах будем опираться на схему параллельного залегания, учитывая сцепление корректирующего объема.

Для примера приведем вариант (рис. 5, а), когда  $\beta_{1,2} > \beta_{1,1}$  (отсчет угла  $\beta_{1,2}$  положительный).

Отметим сразу, что аналогичный результат получаем и в случае отрицательного  $\beta_{1,2}$ .



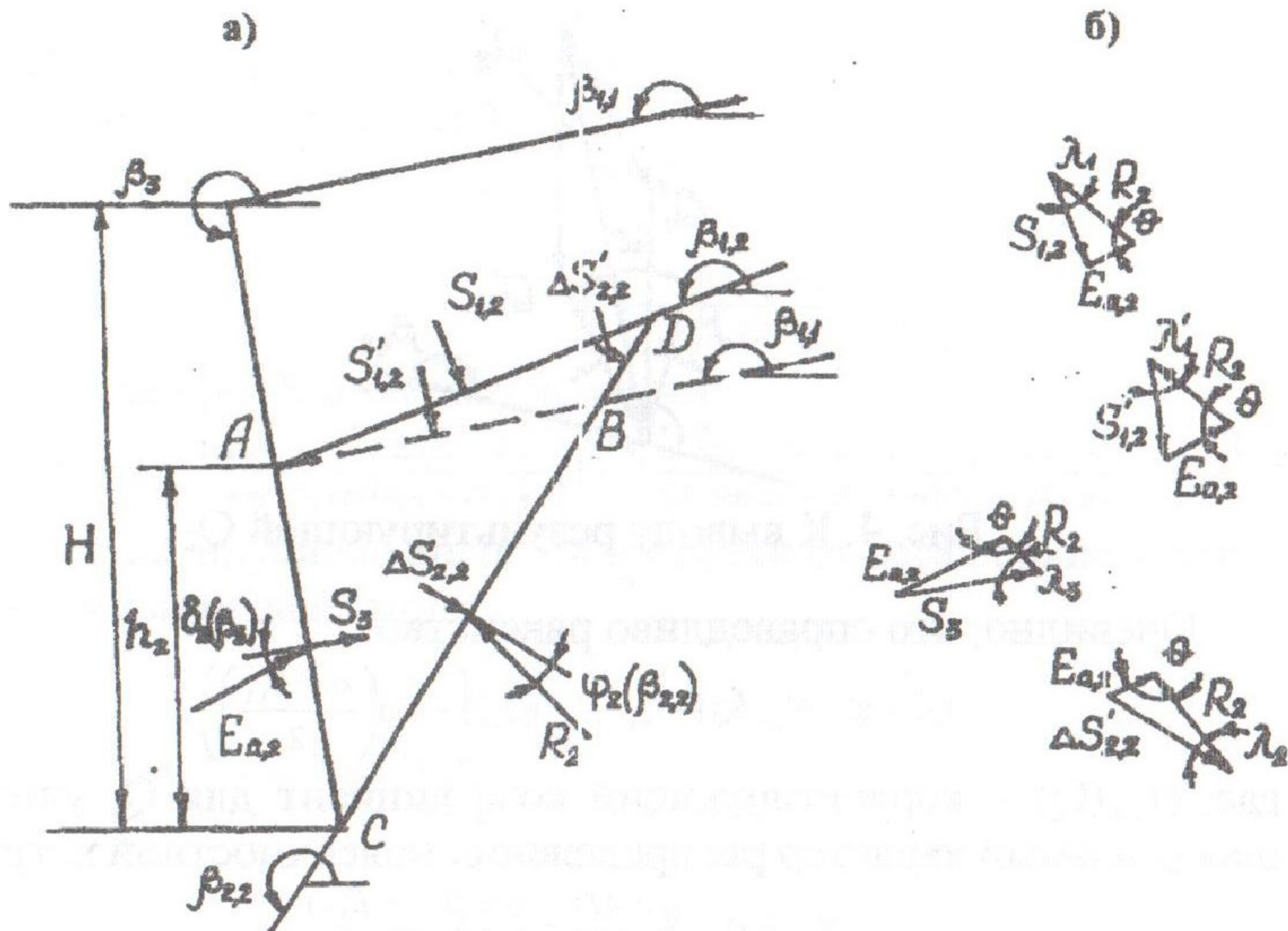


Рис. 5. Учет сцепления корректирующего объема.

Для определения давления с учетом фактора сцепления рассмотрим равновесие призмы обрушения, условие которого отражено в силовых многоугольниках (рис. 5, б), при этом пренебрегая объемным и нагружающим фактором. Очевидно, что учет сцепления для призмы ACD определяется сцеплением для призмы ABC, соответствующей параллельному залеганию и сцеплением для корректирующего объема ABD.

Таким образом, давление  $E_{a,2}$ , отражающее сцепление:

$$E_{a,2}(S_{ACD}) = E_{a,2}(S_{ABC}) + E_{a,2}(S_{ABD}).$$

Из силовых многоугольников получим зависимости, отражающие зависимость давления от сцепления для призмы ABC:

$$E_{a,2}(S_{ABC}) = \frac{S'_{1,2} \sin \lambda'_1}{\sin \theta} + \frac{S_3 \sin \lambda_3}{\sin \theta} + \frac{\Delta S_{2,2} \sin \lambda_2}{\sin \theta}.$$

и для призмы ABD:

$$E_{a,2}(S_{ABD}) = \frac{S_{1,2} \sin \lambda_1}{\sin \theta} + \frac{\Delta S'_{2,2} \sin \lambda_2}{\sin \theta} - \frac{S'_{1,2} \sin \lambda'_1}{\sin \theta}.$$



В данных зависимостях  $S_3$ ,  $S_{1,2}$ ,  $S_{1,2}'$ ,  $\Delta S_{2,2}$  и  $\Delta S_{2,2}'$  представляют собой результирующие сцепления связности соответственно по сторонам призмы AC, AD, AB, CB и BD.

В итоге:

$$E_{a,2}(S_{ACD}) = \frac{S_{1,2} \sin \lambda_1}{\sin \theta} + \frac{S_3 \sin \lambda_3}{\sin \theta} + \frac{(\Delta S_{2,2} + \Delta S_{2,2}') \sin \lambda_2}{\sin \theta}.$$

Из силовых многоугольников получим угловые зависимости:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \beta_{2,2} - \beta_{1,1} - \varphi_2(\beta_{2,2}), \\ \lambda_2 &= \varphi_2(\beta_{2,2}), \\ \lambda_3 &= \beta_3 - \beta_{2,2} + \varphi_2(\beta_{2,2}), \\ \theta &= \beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2} + \delta_2(\beta_3). \end{aligned}$$

Равнодействующие сцеплений связности по контуру призмы обрушения:

$$\begin{aligned} S_{1,2} &= \frac{c_2(\beta_{1,2})}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{1,2})} AD; & \Delta S_{2,2}' &= \left[ \frac{c_2(\beta_{2,2})}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{2,2})} - \frac{c_2(\beta_{1,1})}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{1,1})} \right] BC; \\ S_3 &= \frac{c_2(\beta_3)}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_3)} AC; & \Delta S_{2,2}'' &= \left[ \frac{c_2(\beta_{2,2})}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{2,2})} - \frac{c_2(\beta_{1,1})}{\operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{1,1})} \right] DB. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $BD = h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{-\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}$  и принимая в качестве базового сцепление  $c_2(\beta_{1,1})$  по плоскости, параллельной поверхности верхнего слоя, получим выражение для давления, отражающее фактор сцепления:

$$E_{a,2} = c_2(\beta_{1,1}) h_2 N_{c,2},$$

где:

$$\begin{aligned} N_{c,2} &= \left\{ \frac{c_2(\beta_{1,2}) \sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{2,2} + \varphi_2(\beta_{2,2}))}{c_2(\beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \operatorname{tg} \varphi_2(\beta_{1,2})} + \frac{c_2(\beta_3) \sin(\beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2})}{c_2(\beta_{1,1}) \operatorname{tg} \varphi_2(\beta_3)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin \varphi_2(\beta_{2,2})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})} (1 + N_{\text{cor},2}) \left[ \frac{c_2(\beta_{2,2})}{c_2(\beta_{1,1})} \operatorname{ctg} \varphi_2(\beta_{2,2}) - \operatorname{ctg} \varphi_2(\beta_{1,1}) \right] \right\} \times \\ &\quad \times \frac{1}{\sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2(\beta_{2,2}) - \beta_{2,2} + \delta_2(\beta_3))}. \end{aligned} \quad (21)$$

Окончательно получим выражение для активного давления нижнего слоя:

$$E_{a,2} = \gamma_2 h_2^2 N_{\gamma,2} N_{\gamma,\text{cor},2} + q'_{c,2} h_2 N_{q,2} + c_2(\beta_{1,1}) h_2 N_{c,2}, \quad (22)$$

где:  $N_{\gamma,2}$ ,  $N_{\gamma,\text{cor},2}$ ,  $N_{q,2}$  и  $N_{c,2}$  — коэффициенты из формул (6), (11), (7), (21), а  $q'_{c,2}$  — из выражения (20).



$$e_{a,1,y} = \frac{dE_{a,1,y}}{dx} = \frac{d(E_{a,1} \cos \mu_1)}{dx} = (2\gamma_1 x N_{\gamma,1} + q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \mu_1;$$

$$e_{a,2,x} = \frac{dE_{a,2,x}}{dy} = \frac{d(E_{a,2} \cos \nu_2)}{dy} = (2\gamma_2 y N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} + q'_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \nu_2;$$

$$e_{a,2,y} = \frac{dE_{a,2,y}}{dx} = \frac{d(E_{a,2} \cos \mu_2)}{dx} = (2\gamma_2 x N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} + q_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \mu_2.$$

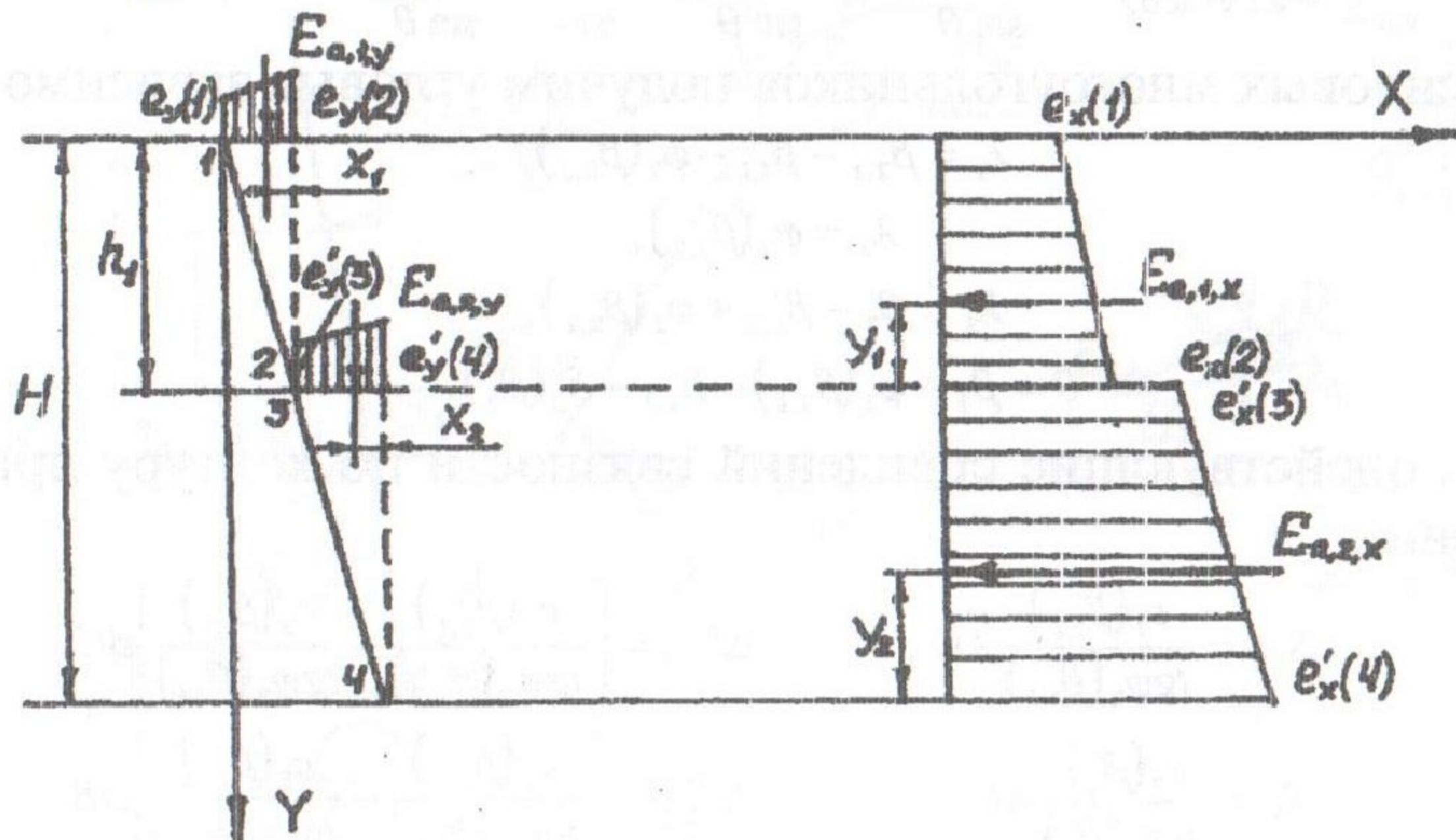


Рис. 7. Построение эпюр составляющих активного давления.

Полученные зависимости позволяют определить интенсивность давления в характерных точках - по оси Y:

$$e_x(1) = (q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \nu_1;$$

$$e_x(2) = (2\gamma_1 h_1 N_{\gamma,1} + q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \nu_1;$$

$$e_x(3) = (2\gamma_2 h_1 N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} + q'_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \nu_2;$$

$$e_x(4) = (2\gamma_2 H N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} + q'_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \nu_2;$$

- по оси X:

$$e_y(1) = (q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \mu_1;$$

$$e_y(2) = (2\gamma_1 h_1 N_{\gamma,1} \operatorname{tg} \zeta + q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \mu_1;$$

$$e_y(3) = (2\gamma_2 h_1 N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} \operatorname{tg} \zeta + q'_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \mu_2;$$

$$e_y(4) = (2\gamma_2 H N_{\gamma,2} N_{\gamma,cor,2} \operatorname{tg} \zeta + q'_{c,2} N_{q,2} + c_2 (\beta_{1,1}) N_{c,2}) \cos \mu_2,$$

где:  $\zeta = \beta_3 - 1.5\pi$  при  $\beta_3 > 1.5\pi$  и  $\zeta = 1.5\pi - \beta_3$  при  $\beta_3 < 1.5\pi$ .

Напомним, однако, что в формуле (22) равномерно распределенная нагрузка  $q_{c,2}$  является условной, поскольку действительный ее характер неравномерен. В связи с этим, необходимо откорректировать ординаты эпюры в точках 3 и 4.

Для случая, когда  $\beta_{1,2} > \beta_{1,1}$  уточненные ординаты:



Результирующую активного давления на стенку определим согласно схемы (б, а):

$$E_a = (E_{a,1} + E_{a,2}) \cos \left( \frac{\delta_1(\beta_3) - \delta_2(\beta_3)}{2} \right). \quad (23)$$

Для проверки устойчивости подпорной стенки на опрокидывание необходимо определить значение проекций составляющих на оси X и Y (рис. 6. б):

$$\left. \begin{aligned} E_{a,x,1} &= E_{a,1} \cos \nu_1, \\ E_{a,y,1} &= E_{a,1} \cos \mu_1, \\ E_{a,x,2} &= E_{a,2} \cos \nu_2, \\ E_{a,y,2} &= E_{a,2} \cos \mu_2. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где угловые параметры определим из формул:

$$\left. \begin{aligned} \nu_1 &= \delta_1(\beta_3) + \beta_3 - 1,5\pi, \\ \nu_2 &= \delta_2(\beta_3) + \beta_3 - 1,5\pi, \\ \mu_1 &= 2\pi - \delta_1(\beta_3) - \beta_3, \\ \mu_2 &= 2\pi - \delta_2(\beta_3) - \beta_3. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

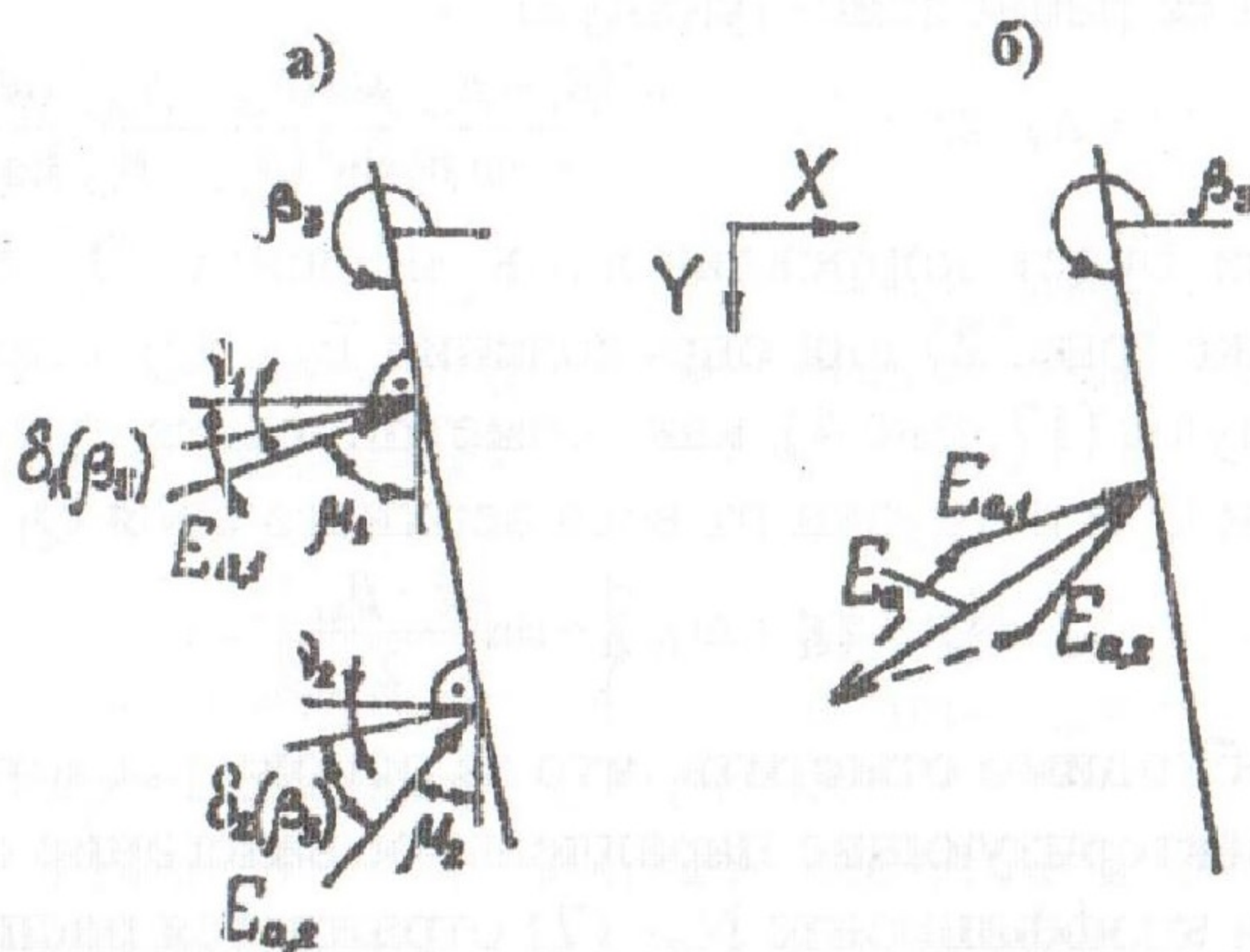


Рис. 6. Схема к определению  $E_a$  и проекций составляющих  $E_{a,x}$  и  $E_{a,y}$ .

Характер распределения давления вдоль осей X и Y (рис. 7) получим, дифференцируя составляющие  $E_{a,x}$  и  $E_{a,y}$  для верхнего и нижнего слоя:

$$e_{a,1,x} = \frac{dE_{a,1,x}}{dy} = \frac{d(E_{a,1} \cos \nu_1)}{dy} = (2\gamma_1 y N_{\gamma,1} + q_{c,1} N_{q,1} + c_1 N_{c,1}) \cos \nu_1;$$



$$\left. \begin{aligned} e'_x(3) &= e_x(3) + \Delta e_x; \\ e'_x(4) &= e_x(4) - \Delta e_x; \\ e'_y(3) &= e_y(3) + \Delta e_y; \\ e'_y(4) &= e_y(4) - \Delta e_y. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Величина  $\Delta e_x$  определяется разностью между условным значением  $q'_1$  и действительным значением распределенной нагрузки и действительным значением распределенной нагрузки в точке А и в точке D. Поправочный параметр в т. А находим, используя зависимости (13) и (14):

$$\Delta q(A) = q(A) - q'_1 = \frac{1}{2} \gamma_1 \Delta h \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}).$$

В точке D поправочный параметр идентичен:

$$\Delta q(D) = q'_1 - q(D) = \frac{1}{2} \gamma_1 \Delta h \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}),$$

т. е. справедливо равенство:

$$\Delta q(A) = \Delta q(D) = \Delta q.$$

Распределив данную пригрузку на площадку загрузки AD, получим ее равнодействующую:

$$\Delta Q'_1 = \Delta q \cdot AD = \frac{1}{2} \gamma_1 h^2 \frac{\sin^2(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1})}{-\sin \beta_3 \sin^2(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \cos \beta_{1,1}}. \quad (27)$$

Эта сила будет корректировать значение  $Q'_2$  в силовом многоугольнике (рис. 2) для определения  $E_{a,2}$ .  $Q'_2$  определяется согласно формулы (17, рис 4), как геометрическая сумма поверхностной нагрузки  $Q'$  и нагрузки от веса верхнего слоя  $Q'_1$  с учетом  $\Delta Q'_1$ :

$$Q'_2 = \left[ Q' + (Q'_1 + \Delta Q'_1) \right] \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right). \quad (28)$$

Необходимо отметить, что за основу расчета взяты зависимости, характеризующие параллельное залегание слоев. Это означает, что в коэффициенте  $N_{q,2}$  (7) отражается распределение нагрузки на отрезке АВ. Таким образом, необходимо ввести корректирующий коэффициент и для  $\Delta Q'_1$ :

$$N_{cor,2}(\Delta Q'_1) = \frac{\Delta Q'_1}{\Delta q'_1 \cdot AB} = \frac{\Delta q'_1 \cdot AD}{\Delta q'_1 \cdot AB} = \frac{AD}{AB} = \frac{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,2})}.$$

Отсюда, используя формулы (25) для учета угловых соотношений, получаем значение поправочной интенсивности:



$$\Delta e_x = \Delta q_1 \cdot N_{cor,2} (\Delta Q') N_{q,2} \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right) \cos \nu_2 = \quad ; \quad (29)$$

$$= \frac{1}{2} \gamma_1 h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin^2(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \sin \beta_3 \cos \beta_{1,1}} N_{q,2} \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right) \cos \nu_2$$

$$\Delta e_y = \Delta q_1 \cdot N_{cor,2} (\Delta Q') N_{q,2} \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right) \cos \mu_2 = \quad (30)$$

$$= \frac{1}{2} \gamma_1 h_2 \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,2}) \sin(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \cos(\beta_{1,2} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,2} - \beta_{1,1})}{\sin^2(\beta_{2,2} - \beta_{1,2}) \sin \beta_3 \cos \beta_{1,1}} N_{q,2} \left( -\sin \frac{\rho - \beta_{1,1}}{2} \right) \cos \mu_2$$

Заметим, что в случае  $\beta_{1,2} < \beta_{1,1}$  получим зависимости, аналогичные (26). Точки приложения проекций составляющих активно-

го давления:  $y_1 = \frac{2e_x(1) + e_x(2)}{3(e_x(1) + e_x(2))} h_1; \quad y_2 = \frac{2e'_x(3) + e'_x(4)}{3(e'_x(3) + e'_x(4))} h_2;$

$$x_1 = \frac{2e_y(1) + e_y(2)}{3(e_y(1) + e_y(2))} h_1 \operatorname{tg} \zeta; \quad x_2 = \frac{2e'_y(3) + e'_y(4)}{3(e'_y(3) + e'_y(4))} h_2 \operatorname{tg} \zeta.$$

Приведенный выше алгоритм позволяет решить задачу по определению активного давления с использованием компьютеров, что автоматизирует расчет и значительно упрощает поиск углов  $\beta_{2,2}$  и  $\beta_{2,1}$ , характеризующих положение поверхности обрушения, определяемых методом итераций.

### Литература

1. Школа А. В. Расчет несущей способности анизотропных по сопротивлению сдвигу нескальных оснований гидротехнических сооружений. Гидротехническое строительство. 1989 г. №4. с. 22-24/.
2. Школа А. В. Несущая способность оснований и боковое давление грунтов, анизотропных по сопротивлению сдвигу. /Москва: В/О «Мортехинформреклама», 1991 г. 48 с. /.
3. Школа А. В., Гришко Е. В. Боковое давление анизотропного грунта на сооружения, возведенные методом «стена в грунте» с учетом сейсмических воздействий. /2 Украинская конференция по механике грунтов и фундаментостроению. Полтава. 1995 г. с. 183-191/.
4. Школа А. В., Войтенко И. В. Определение активного давления двухслойной анизотропной засыпки на подпорные стены. /3. Украинская конференция по механике грунтов и фундаментостроению. Одесса. 1997 г. с. 126-131/.