

*А.Н. Богомолов, д.т.н., проф.; Б.С. Бабаханов, аспирант
С.И. Шиян, докторант; О.А. Богомолова, к.т.н., доц.*

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОРОДНОГО ГРУНТОВОГО ОТКОСА

Предлагается инженерный метод расчета сил оползневое давления, разработанный на основе анализа напряженного состояния грунтового массива. При разработке этого метода, в отличие от подавляющего большинства других, учтены три компоненты напряжения в каждой точке грунтового массива, величина коэффициента бокового давления грунта и другие физико-механические свойства грунта. Разбиения призмы обрушения на отдельные блоки не проводилось, что позволило избежать принятия не впопону корректных допущений для решения статически неопределимой задачи о равновесии блоков.

Ключевые слова: *однородный грунтовой откос, метод конечных элементов, напряженное состояние, коэффициент бокового давления грунта, удерживающие и сдвигающие силы, оползневое давление.*

*А.Н. Богомолов, д.т.н., проф.; Б.С. Бабаханов, аспирант
С.И. Шиян, докторант; О.А. Богомолова, к.т.н., доц.*

Волгоградський державний архітектурно-будівельний університет

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ ЗСУВНОГО ТИСКУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ОДНОРІДНИХ ҐРУНТОВИХ УКОСІВ

Запропоновано інженерний метод розрахунку сил зсувного тиску, розроблений на основі аналізу напруженого стану грунтового масиву. При розробленні цього методу, на відміну від переважної більшості інших, враховані три компоненти напружень у кожній точці грунтового масиву, величина коефіцієнта бічного тиску ґрунту та інші фізико-механічні властивості ґрунту. Розбиття призми обвалення на окремі блоки не проводилося, що дозволило уникнути прийняття не досить коректних допущень для вирішення статично невизначеного завдання щодо рівноваги блоків.

Ключові слова: *однорідний грунтовий укіс, метод скінченних елементів, напружений стан, коефіцієнт бічного тиску ґрунту, утримуючі та зсувні сили, зсувний тиск.*

*A.N. Bogomolov, doctor za technical sciences, professor
B.S. Babakhanov, post graduate student; S.I. Shiyan, person working for degree of doctor
O.A. Bogomolova, candidate of technical sciences, assistant professor
Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*

DETERMINATION OF THE LANDSLIDE PRESSURE BASED ON THE STRESS OF UNIFORM GROUNDWATER SLOPE ANALYSIS

Engineering method is proposed for calculating landslide pressure forces developed on the basis of the stress state of the soil mass analysis. During the development of this method, in contrast to the vast majority of others, three components of the stress at each point of the soil mass, coefficient of lateral earth pressure, and other physical properties of the soil were included. Partitioning of the sliding wedge into blocks didn't take place, which allowed avoiding making of incorrect assumptions for statically indeterminate problem of block's balance.

Keywords: *uniform soil slope, finite element method, stress state, coefficient of lateral earth pressure, retaining and shear forces, pressure landslide.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями. Существующие методы определения оползневого давления основаны в основном на разбиении призмы обрушения на отдельные блоки, что заставляет впоследствии при решении статически неопределимых задач равновесия блоков прибегать к не вполне корректным допущениям. Очевидна необходимость разработки метода расчета откосов, учитывающего пространственную работу массива грунта и избегающего такого рода предпосылок.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы. Известно, что величина коэффициента запаса устойчивости в точке грунтового откоса определяется выражением

$$K = \frac{\left[\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \tau_{xz} \sin 2\alpha + \sigma_{св} \right] \operatorname{tg} \varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\alpha + \tau_{xz} \cos 2\alpha}, \quad (1)$$

где σ_z ; σ_x ; τ_{xz} – компоненты напряжения; α – угол наклона площадки сдвига; $\sigma_{св} = C(\gamma H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ – приведенное давление связности; C ; φ ; γ и H – соответственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта и высота откоса.

Глобальный коэффициент запаса устойчивости откоса определяется по формуле

$$K = \frac{\int_0^l F_{уд}(S) ds}{\int_0^l F_{сд}(S) ds} \quad (2)$$

где $F_{уд}$ и $F_{сд}$ – удерживающие и сдвигающие силы в точках наиболее вероятной (опасной) линии скольжения, определяемые, соответственно, числителем и знаменателем формулы (1); S – дуговая координата точки наиболее вероятной линии скольжения (НВЛС) [1].

Распределение горизонтальных σ_x напряжений в грунтовом массиве зависит от величины коэффициента бокового давления грунта ξ_0 . Следовательно, удерживающие и сдвигающие силы, величины которых определяют значения сил оползневого давления $E_{оп}$, напрямую зависят от этого параметра.

Целью работы является разработка инженерного метода определения сил оползневого давления. Для этого за основу нами принята методика, базирующаяся на анализе напряженного состояния грунтового массива, которая предложена в работе [2].

Изложение основного материала исследований. Определение напряжений и построение линий скольжения проведено при помощи компьютерной программы [3], в которой формализован метод конечных элементов и метод проф. В.К. Цветкова [1].

В зависимости от угла заложения откоса число треугольных конечных элементов, составляющих расчетную схему МКЭ, изменяется от 16820 до 17120. Дискретизация расчетных схем проведена таким образом, что размер стороны треугольного элемента не превышает 1/10 длины отрезка, определяющего высоту откоса.

В качестве независимых расчетных параметров приняты угол заложения откоса φ , приведенное давление связности и коэффициент бокового давления грунта, которые при проведении вычислений последовательно принимают следующие значения: $\varphi = 20^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; $\gamma_{св} = 0,05; 0,15; 0,3$ и $\sigma_0 = 0,75; 0,5; 0,3$. Угол внутреннего трения может принимать любое значение, т.к. его величина входит в качестве множителя в выражение для удерживающих сил (см. числитель формулы (1)).

Следует отметить, что все возможные сочетания численных значений обозначенных выше расчетных параметров охватывают практически все многообразие встречающихся на практике геометрических размеров откосов и физико-механических свойств грунтов, их слагающих.

При разработке инженерного метода расчета сил оползневого давления и составлении соответствующей базы данных для откосов с углами $\beta=30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ проделаны процедуры, описанные в работе [2], при всех возможных сочетаниях численных значений переменных расчетных параметров.

При этом дополнительно определялись: мощность сползающей толщи грунта (толщина призмы скольжения) $d_{ст}$ в сечении, совпадающем с осью удерживающего сооружения OC (см. рис. 1); вертикальная координата точки пересечения оси противооползневого сооружения с наклонной поверхностью откоса Z_{oc} ; угол α наклона к горизонту касательной, проведенной к наиболее опасной линии скольжения в точке ее пересечения с осью удерживающего сооружения $Z_{оус}$.

Массив соответствующих данных определен и при вычислении координат и графических построениях наиболее опасных локальных линий скольжения, исходящих из точек, расположенных на гипотетической оси удерживающего сооружения, а также при построении эпюр удерживающих и сдвигающих сил, действующих в сечениях откоса, совпадающих с этой осью. При этом координате Z_{oc} поочередно присваивались значения $Z_{oc}=0,3H; 0,5H; 0,7H$ (см. рис. 1).

На рис. 1 схематически изображен прямолинейный грунтовый откос с обозначениями всех перечисленных выше величин. Здесь же показаны наиболее опасная (вероятная) линия скольжения НВЛС и локальные восходящие наиболее вероятные линии скольжения.

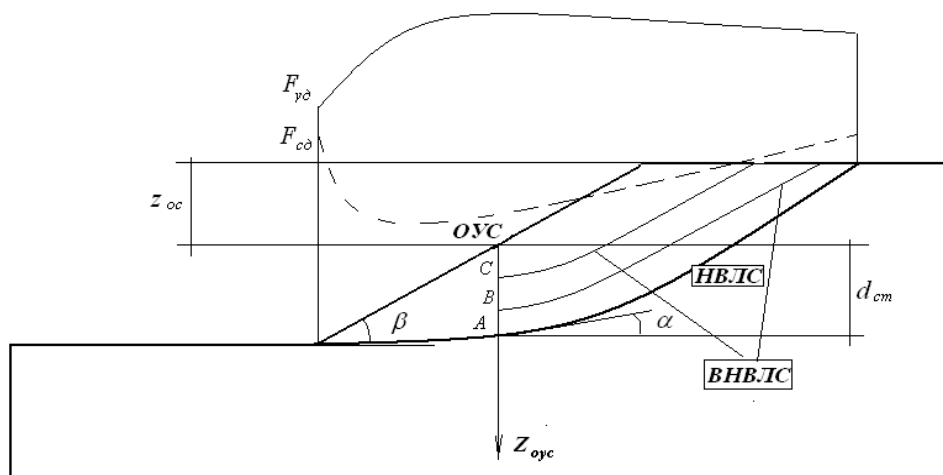


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследуемого откоса

На рис. 2 в качестве примеров приведены эпюры удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль осей гипотетических удерживающих сооружений при $\beta=20^\circ$; $\xi=0,75$ и $\sigma_{св}=0,05; 0,15; 0,3$, которые построены по результатам вычислений.

В результате анализа эпюр удерживающих и сдвигающих сил, построенных на основе полученных при расчетах данных, удалось записать выражения, дающие возможность определить закон распределения удерживающих $F_{уд}$ и сдвигающих $F_{сд}$ силы вдоль некоторого вертикального сечения, выделенного в рассматриваемом однородном откосе, при любом возможном сочетании переменных расчетных параметров

$$\begin{cases} F_{уд} = 0,5[a + b(Z_{оуc} / H)]\gamma H \operatorname{tg} \varphi, \\ F_{сд} = 0,5[c + d(Z_{оуc} / H)]\gamma H, \end{cases} \quad (3)$$

где a ; b ; c ; d – безразмерные коэффициенты, определяемые по графикам (рис. 3; 4; 5 а, б, в) как функции β ; $\sigma_{св}$ и $Z_{оуc}$ – текущая безразмерная (в долях H) координата на оси $Z_{оуc}$, отсчитываемая от точки, обозначающей ось удерживающего сооружения (ОУС).

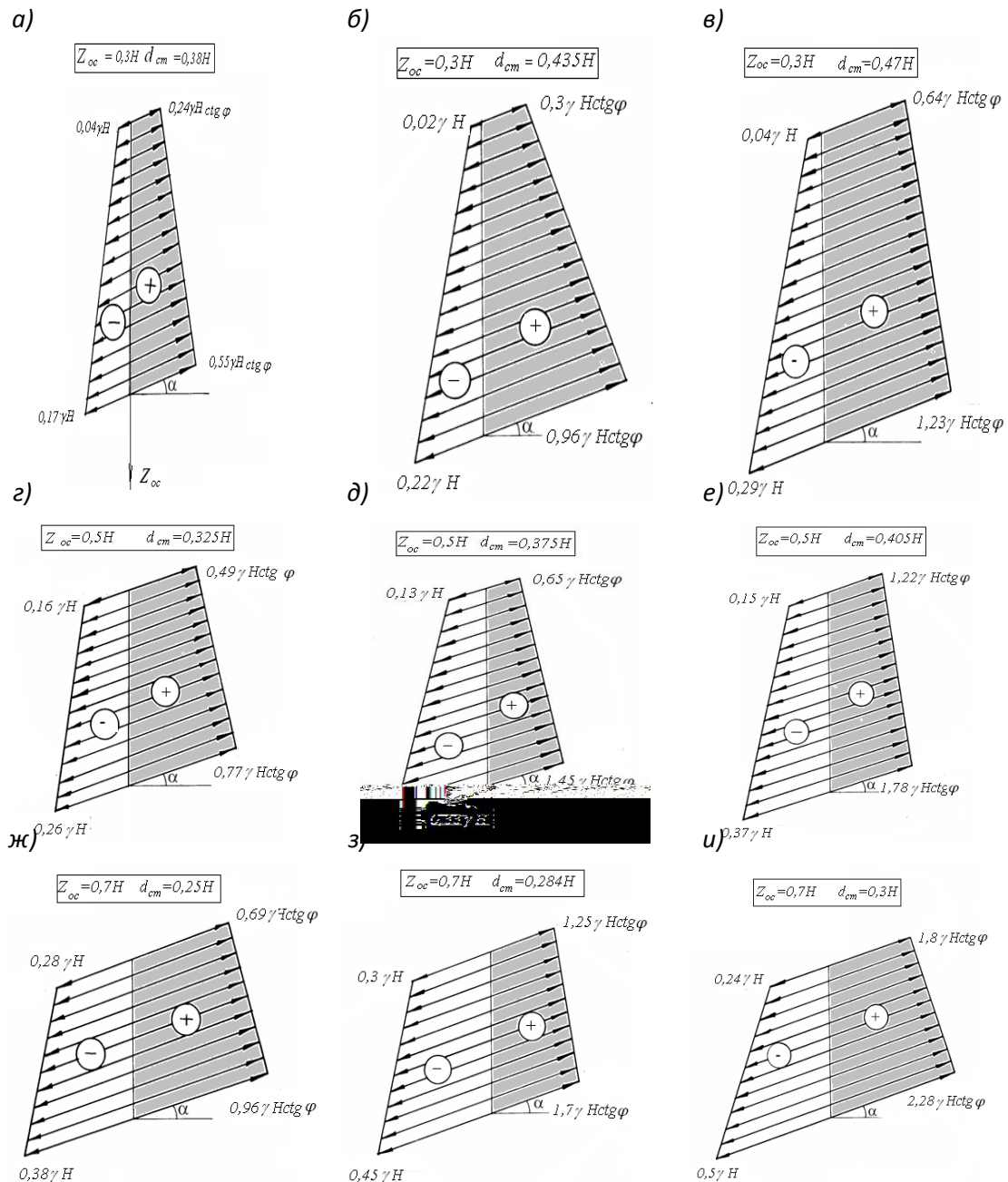


Рисунок 2 – Эпюры удерживающих и сдвигающих сил при $\beta=20^\circ$; $\xi_0=0,75$; $\sigma_{св}=0,05$; $0,15$; $0,3$ и $Z_{oc}=0,3H$ соответственно (а-в); при $Z_{oc}=0,5H$ (г-е); при $Z_{oc}=0,7H$ (ж-и)

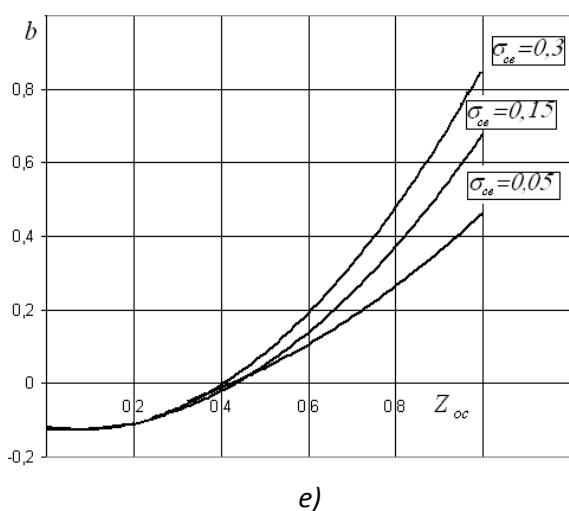
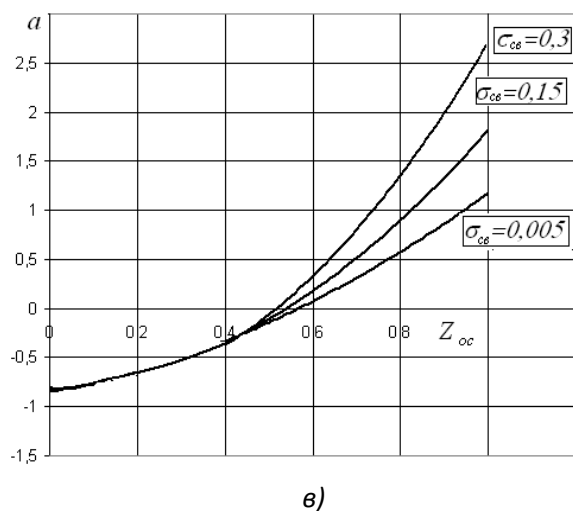
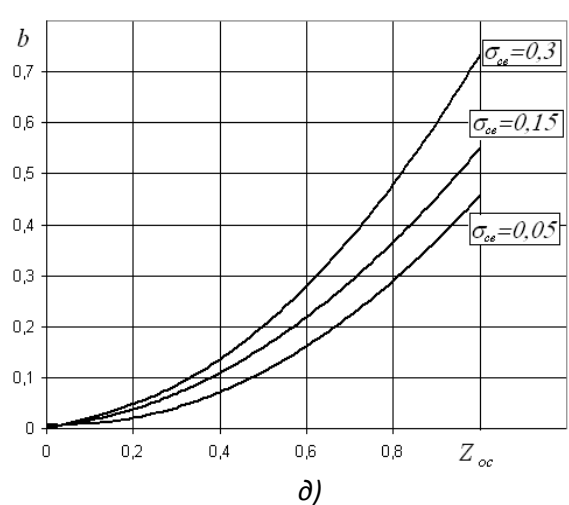
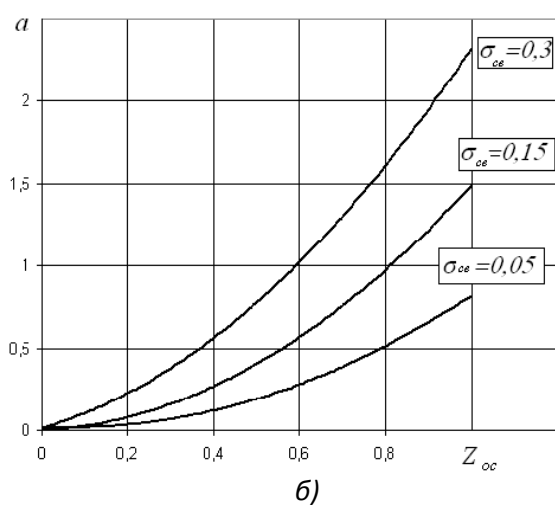
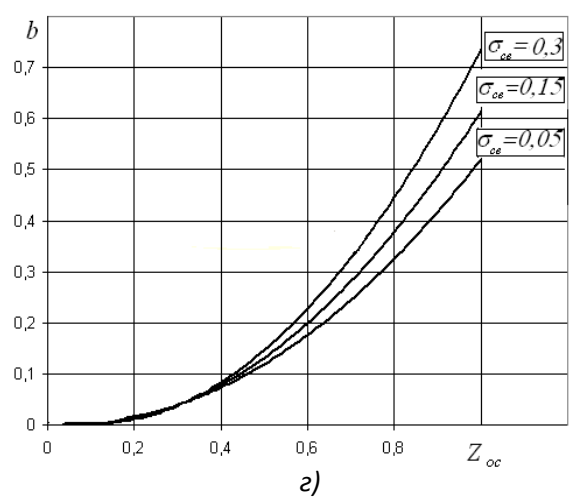
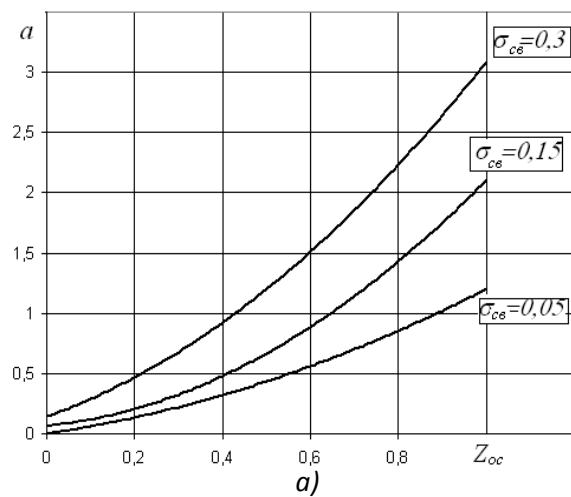


Рисунок 3 – График для определения коэффициента a при $\beta=20^\circ$ (а); $\beta=45^\circ$ (б); $\beta=60^\circ$ (в) и коэффициентов b при $\beta=20^\circ$ (з); $\beta=45^\circ$ (д); $\beta=60^\circ$ (е)

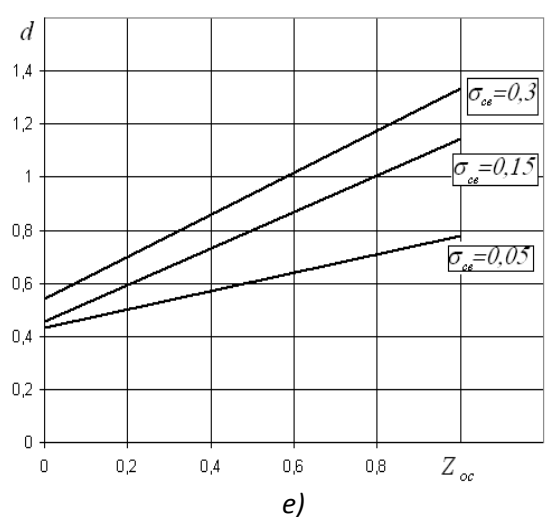
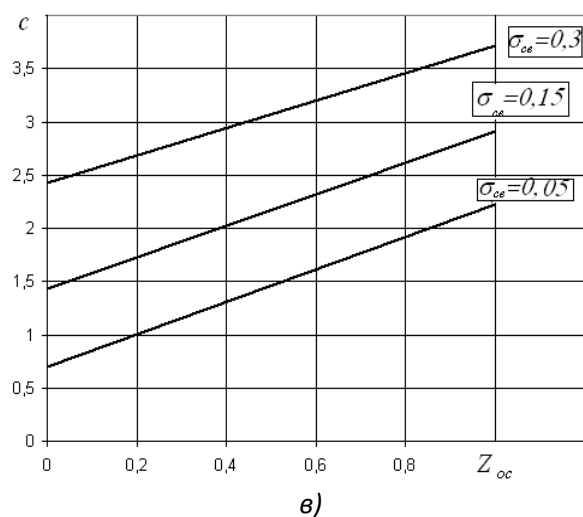
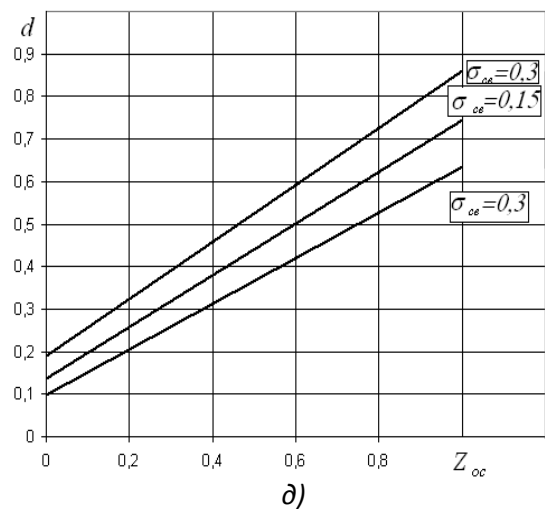
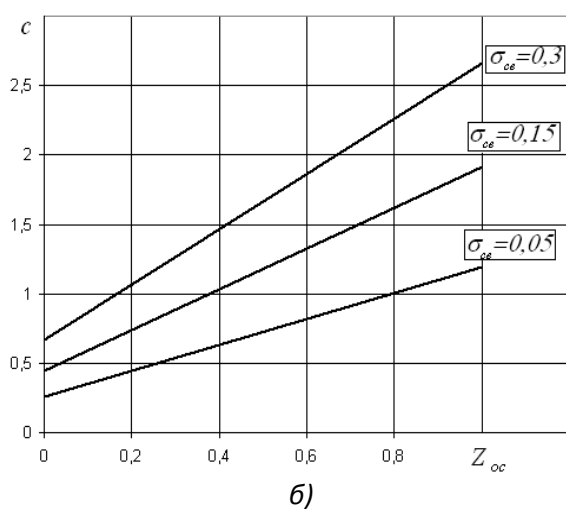
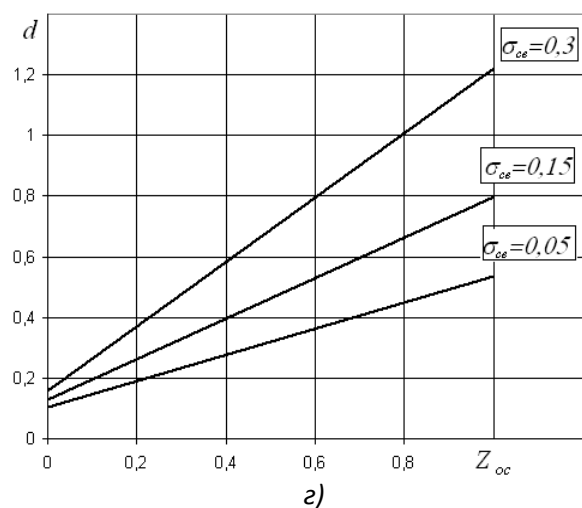
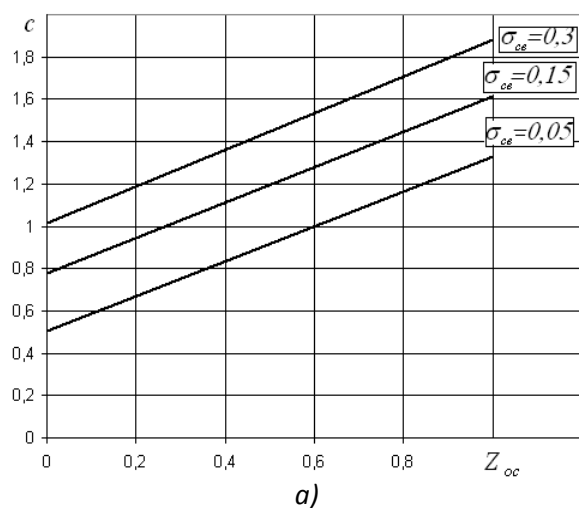


Рисунок 4 – График для определения коэффициента c при $\beta=20^\circ$ (а); $\beta=45^\circ$ (б); $\beta=60^\circ$ (в) и коэффициентов d при $\beta=20^\circ$ (з); $\beta=45^\circ$ (д); $\beta=60^\circ$ (е)

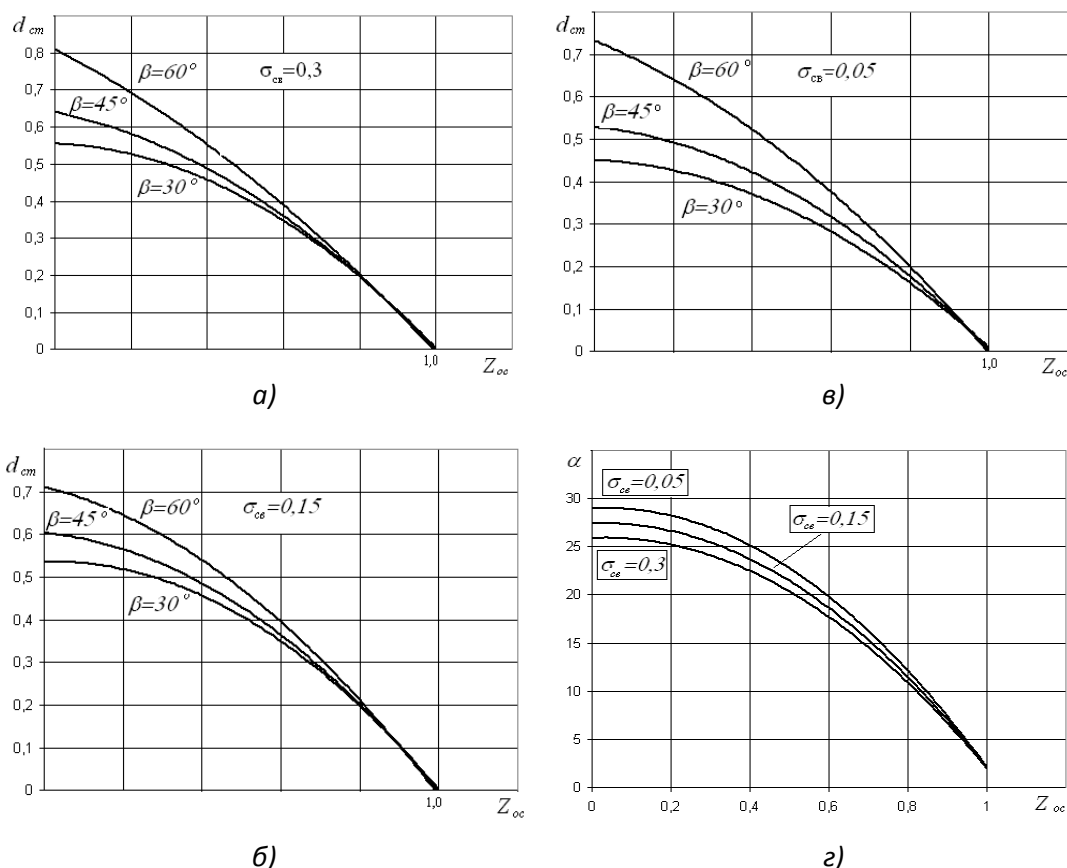


Рисунок 5 – Графики для определения мощности сползающей толщи d_{cm} (в долях H) при $\sigma_{cv}=0,05$ (а); $\sigma_{cv}=0,15$ (б); $\sigma_{cv}=0,3$ (в) и угла β наклона касательной к НОЛС (г)

Величина локального коэффициента запаса устойчивости откоса (той его части, которая лежит выше рассматриваемого сечения) может быть определена по формуле

$$K_{\text{л}} = (a + b d_{cm}) \operatorname{tg} \varphi (c + d_{cm})^{-1}. \quad (4)$$

Если $K_{\text{л}} > 1$, то $F_{\text{уд}} > F_{\text{сд}}$, и говорить о силах оползневого давления не имеет смысла. Однако в строительной практике грунтовые (земляные) сооружения, в частности откосы насыпей автомобильных и железных дорог, грунтовые плотины, откосы строительных котлованов, проектируются с коэффициентом запаса устойчивости $K_{\text{пр}} = 1,2 - 1,5$, а в особо ответственных случаях при значениях $K_{\text{пр}} = 2$ [4].

Отметим, что на рис. 3 – 5 в качестве примеров приведены графические зависимости, построенные при условии, что $\xi_0 = 0,75$. Нами построены аналогичные графики для значений $\xi_0 = 0,3; 0,5$, которые здесь не показываются по причине их полного подобия предъявленным и ввиду ограниченного объема публикации.

Исходя из вышесказанного, предлагается следующая последовательность построения эпюры оползневого давления:

1. Строятся горизонтальные и вертикальные составляющие эпюр удерживающих и сдвигающих сил. Для этого численные значения удерживающих и сдвигающих сил, распределенных (см. рис. 2) по гипотетической оси удерживающего сооружения, умножаются поочередно на $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$ (см. рис. 5з).

2. Для того чтобы учесть величину проектного коэффициента запаса устойчивости, все абсциссы горизонтальной и вертикальной составляющих эпюры сдвигающих сил увеличиваются в $n = K_{\text{пр}} (K_{\text{л}})^{-1}$ раз.

В этом случае в каждой точке, расположенной на гипотетической оси удерживающего элемента, выполнялось соотношение

$$\frac{F_{\text{сд}}}{F_{\text{уд}}} \geq \frac{K_{\text{пр}}}{K_{\text{л}}}, \quad (5)$$

которое вытекает из условия, что в случае потери склоном устойчивости призма обрушения сползает по наиболее вероятной линии скольжения как цельный массив, т.е. не допускается ее расслоения.

3. Складывая полученную расчетную горизонтальную составляющую эпюры сдвигающих сил с горизонтальной составляющей эпюры удерживающих сил, получаем искомую расчетную эпюру оползневое давления $E_{\text{оп}}$.

4. Путем наложения вертикальных составляющих эпюр удерживающих и сдвигающих сил получаем расчетное вертикальное усилие, которое должно «гасится» силами трения между грунтом и гранью удерживающего сооружения (или каким-либо другим образом) во избежание «переползания» сползающего массива грунта через удерживающее сооружение.

Аналитические аппроксимации кривых, изображенных на рис. 3 – 5, и им подобных, о которых сказано в примечании, и численные значения коэффициентов аппроксимирующих выражений составили базу данных компьютерной программы [3], разработанной нами для отыскания численных значений пяти параметров, которые необходимы для построения эпюры оползневое давления $E_{\text{оп}}$ и эпюры «отрицательного» трения $F_{\text{от}}$. К ним относятся: собственно высота эпюры, которая равна мощности сползающей толщи грунта в рассматриваемом сечении и измеряется в долях H (высоты откоса), и численные значения абсциссы эпюр $E_{\text{оп}}$ и $F_{\text{от}}$ (в долях γH с учетом знака) в верхней и нижней ее точках.

Отложив от нижнего и верхнего концов отрезка, выражающего высоту эпюры, отрезки, определяющие значения соответствующих абсцисс, а затем соединив их концы прямой, получим искомые эпюры оползневое давления и «отрицательного» трения.

Вывод: предложен инженерный метод расчета сил оползневое давления, разработанный на основе анализа напряженного состояния однородного грунтового откоса. При этом, в отличие от известных методов расчета, учтены три компоненты напряжения в каждой точке грунтового массива, величина коэффициента бокового давления грунта и другие его физико-механические свойства. Разбиения призмы обрушения на отдельные блоки не проводится, что позволяет избежать принятия не корректных допущений для решения статически неопределимой задачи о равновесии блоков.

Литература

1. Цветков, В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов / В.К. Цветков. – Волгоград: Нижне-Волжское кн. из-во, 1974. – 238 с.
2. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes / A.N. Bogomolov, O.A. Vikhareva, A.N. Ushakov, S.I. Shiyan // *Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction : Proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007)*. – Yuzhno-Sakhalinsk : [Kazakhstan Geotechnical Society], 2007. – P. 281 – 285.
3. Богомолов, А.Н. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) / А.Н. Богомолов и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.
4. Флорин, В.А. Основы механики грунтов / В.А. Флорин – Т. 1,2. – М.-Л.: Госстройиздат, 1961.

Надійшла до редакції 27.09.2012

©А.Н. Богомолов, Б.С. Бабаханов, С.И. Шиян, О.А. Богомоллова