УДК 622.271.333: 624.131.537

А.М.Мочалов
ВНИМИ, Санкт-Петербург, Россия

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКИХ ОТВАЛОВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Разработан новый метод расчета устойчивости высоких отвалов песчано-глинистых пород, исключающий погрешности в расчетах устойчивости. Метод может применяться также для расчета устойчивости откосов прибортовых массивов, сложенных пластичными породами.

New method of sandy – clay rocks high dump stability calculations is suggested. This method is fulfilled without errors. It may be applied to plastic rocks quarry slopes calculations.

Устойчивость отвалов песчано-глинистых пород обусловлена свойствами отвальной массы.

Рыхлые горные породы (суглинки, глинистые пески, глины, алевролиты, аргиллиты и др.), теряющие природное сцепление при экскавации и транспортировке, отсыпанные в отвал, обладают способностью частично или полностью, в зависимости от свойств пород и высоты отвала, восстанавливать сцепление.

Прочностные характеристики массы рыхлых пород в отвале зависят от уплотняющих напряжений и изменяются с глубиной. При больших нормальных напряжениях внутри отвала развивается поровое давление, трение исчезает и породы переходят в пластическое состояние; прочность отвальной массы при этом характеризуется полным сопротивлением сдвигу τ_{max}. Зависимость сопротивляемости сдвигу с ростом нормальных напряжений, характерная для песчано-глинистых пород, приведена на графике $\tau = f(\sigma_n)$ отвальной массы внешнего отвала одного из разрезов Приморья (рис.1). До момента достижения τ_{max} = 2,0 кг/см^2, которое наблюдается при σ_n = 7,5 кг/см^2, график имеет криволинейную форму и на различных интервалах нормальных напряжений отражает различное состояние отвальной массы, зависящее от напряженного состояния, которое может быть охарактеризовано соответствующими прочностными параметрами – углом внутреннего трения и сцеплением. Зависимость состояния отвальной массы от напряжений внутри отвала позволяет оценивать отвальную массу песчано-глинистых пород как слоистую среду без четко выраженных контактов между условно выделенными на различных глубинах слоями.

Рекомендуемая «Правилами обеспечения устойчивости...» [2] методика определения параметров отвалов песчано-глинистых пород и поверочных расчетов их устойчивости состоит в следующем.

Вначале определяют условные (приближенные) характеристики сопротивления сдвигу отвальной массы, для че-

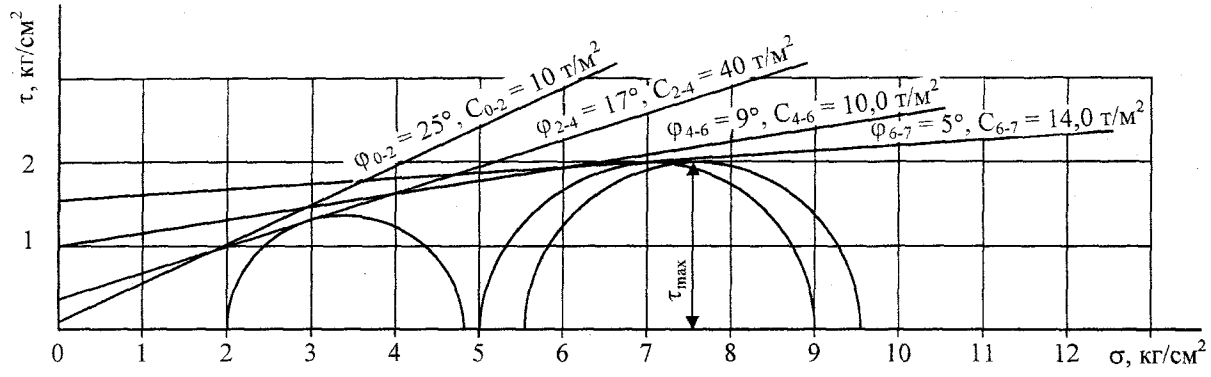


Рис.1. График зависимости $\tau = f(\sigma_n)$ отвальной массы песчано-глинистых пород

го криволинейный участок графика $\tau = f(\sigma_n)$ на интервале между $\sigma_{n\ min}$ и $\sigma_{n\ max}$ заменяют отрезком прямой. Минимальная величина σ_n соответствует точке пересечения графика с лучом, выходящим из начала осей координат τ, σ_n под углом 60° к оси σ_n. Максимальная величина $\sigma_n = \gamma h_i \cos^2\beta_i$ соответствует наибольшему нормальному напряжению на ориентировочно построенной расчетной поверхности в отвале с принятыми параметрами. Значение сцепления, отсекаемое на оси ординат при продолжении этого отрезка, будет искомым сцеплением С, а угол наклона этого отрезка – искомым углом φ.

Далее, по условным характеристикам сопротивления сдвигу отвальной массы, используя соответствующие графики [1,2], определяют приближенные к искомым параметры отвала.

Наконец, отвал с установленными приближенными параметрами подвергают поверочным расчетам по ряду расчетных поверхностей. Поверочные расчеты производят алгебраическим сложением сил на расчетной поверхности по общему сопротивлению отвальной массы сдвигу без разделения его на силы сцепления и трения (по касательным напряжениям) следующим образом:

• в откосе отвала с установленными параметрами в серединах оснований столбиков, на которые разбита призма обрушения, на расчетной поверхности определяют касательные $\tau_{сдв\ i}$ и нормальные $\sigma_{n\ i}$, напряжения по формулам

$$\sigma_{n_i} = \gamma h_i \cos^2\beta_i - \frac{D_i}{\ell_i};$$
$$\tau_{сдв_i} = \frac{1}{2}\gamma h_i \sin 2\beta_i, \qquad (1)$$

где h_i – высота отдельного столбика, на которые разбита призма возможного обрушения; β_i – угол наклона основания столбика; D_I – сила гидродинамического давления в столбике; ℓ_i – длина основания расчетного блока;

• расчетная поверхность с отмеченными серединами оснований развертывается в горизонтальную прямую и в каждой отмеченной точке по оси ординат откладываются отрезки, соответствующие касательным сдвигающим напряжениям $\tau_{сдв}$, концы которых соединяют плавной кривой; площадь, ограниченная осью абсцисс и этой кривой, выражает сумму сдвигающих сил, действующих по расчетной поверхности;

• по графику зависимости $\tau = f(\sigma_n)$ отвальной массы при соответствующих

рассчитанных нормальных напряжениях определяют сопротивления сдвигу $\tau_{уд}$, значения которых также откладывают по оси ординат из середин оснований столбиков, а концы соединяют плавной линией; площадь этой эпюры принимают за сумму удерживающих сил;

• отношение суммы всех удерживающих сил к сумме всех сдвигающих сил по наиболее напряженной из всех расчетных поверхности принимают за коэффициент запаса устойчивости отвала:

$$n = \frac{\sum \tau_{уд}}{\sum \tau_{сдв}}. \qquad (2)$$

Рекомендуемый метод расчета параметров устойчивых отвалов по общему сопротивлению пород сдвигу имеет существенный недостаток, состоящий в том, что для установления надежных параметров отвала с назначенным коэффициентом запаса устойчивости требуется выполнить многократные поверочные расчеты и корректировку его параметров.

Кроме того, этот метод содержит погрешность в расчетах, обусловленную тем, что установление напряжений, определяющих удерживающие силы, производится без учета состояния отвальной массы на различных глубинах внутри отвала. При этом погрешность, оцениваемая по коэффициенту запаса устойчивости, как показали выполненные расчеты, занижается на 10-12 %.

Выявленные недостатки и погрешность метода расчета устойчивости откосов отвалов по касательным напряжениям свидетельствует о необходимости совершенствования применяемых расчетов. Ниже излагается разработанный автором и рекомендуемый к применению метод расчета параметров устойчивых отвалов, сложенных песчано-глинистыми породами, свободный от указанных недостатков и исключающий отмеченную погрешность расчета.

Последовательность выполнения расчета этим методом состоит в следующем:

1. Криволинейный график зависимости $\tau = f(\sigma_n)$ отвальной массы (паспорт прочности) песчано-глинистых пород поинтервально заменяется отрезками прямых линий, как показано на рис.1. Для практических расчетов достаточно выбрать 4-5 интервалов по оси σ. Каждый выбранный интервал будет характеризоваться своими показателями сопротивления сдвигу φ и C; для определения этих показателей достаточно отрезки прямых, соединяющих точки пересечения ординат концов интервалов нормальных напряжений с графиком (значения этих ординат равны значениям τ – сопротивляемости сдвигу смеси, соответствующим нормальным напряжениям σ_n на концах интервалов), продолжить до пересечения с осью ординат; значения отрезков, отсекаемых на оси ординат, будут искомыми сцеплениями C_i , а углы наклона отрезков прямых – искомыми углами φ_i. Так, например, на интервале нормальных напряжений 2,0 и 4,0 кг/см^2 сопротивляемость сдвигу отвальной массы будет характеризоваться следующими показателями: $\varphi_{2\text{-}4} = 17°$; $C_{2\text{-}4} = 4{,}0$ т/м^2 (рис.1).

2. По установленным на выделенных интервалах паспорта прочности отвальной массы характеристикам сопротивления сдвигу φ_i и C_i, используя график плоского откоса [3], производят расчеты и строят графики зависимости высоты отвала H от угла наклона α для каждого выделенного интервала (график *AB, СД, EF* и *GJ*, рис.2).

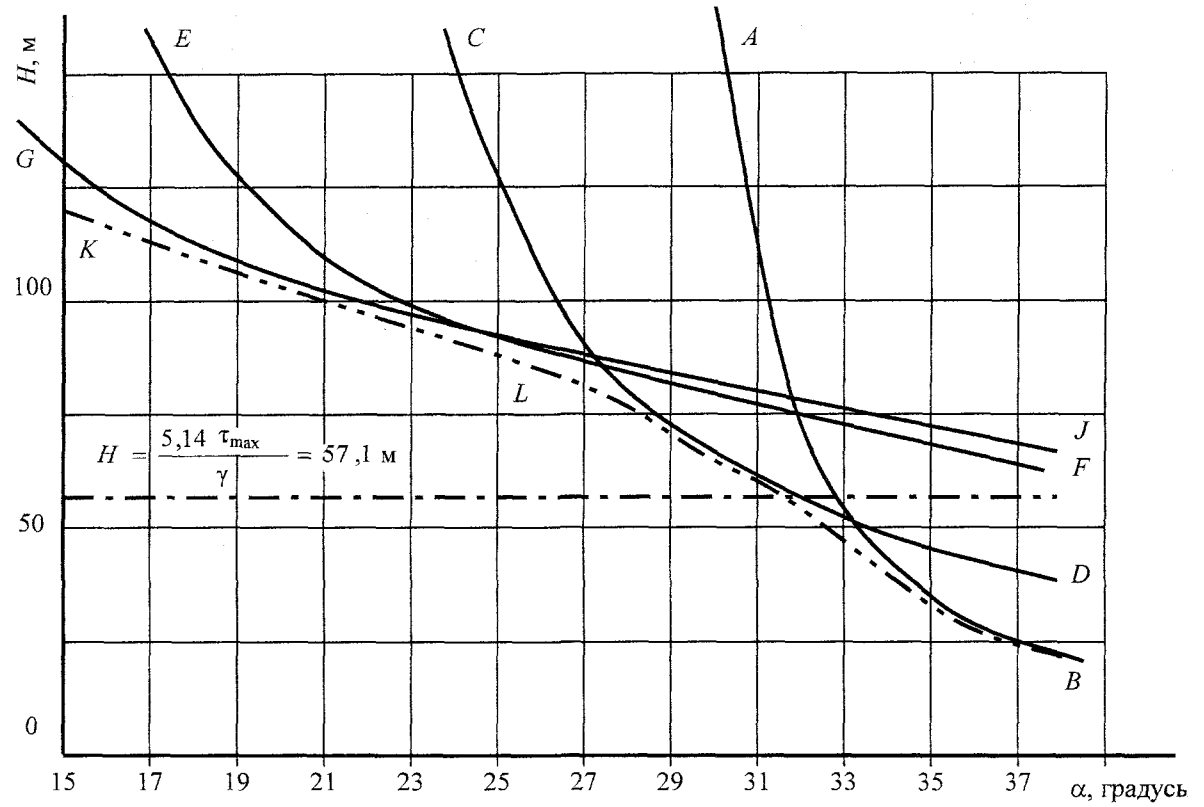


Рис.2. Зависимости высоты отвала H от угла наклона α для различных состоянии отвальной массы и огибающая кривая *KLB* предельной высоты отвала

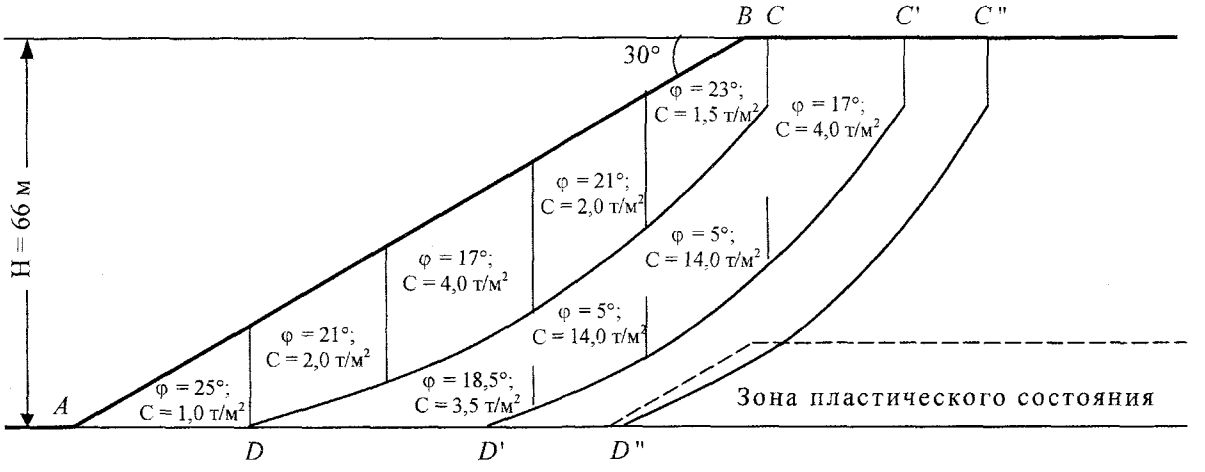


Рис.3. Пример поверочного расчета устойчивости отвала с параметрами (H = 66 м, α = 30°), установленными предлагаемым методом

3. Строят огибающую кривую *KLB* (рис.2) к графикам выделенных интервалов, отражающую искомую зависимость предельной высоты отвала от угла наклона: $H = f(\alpha)$.

Разработанный метод расчета устойчивости отвалов песчано-глинистых пород выгодно отличается от применяемого метода еще и тем, что позволяет получать не единичные отдельные значения высоты и угла наклона откоса, а зависимость высоты отвала на интересующем нас интервале от угла заоткоски отдельно-

го яруса или общего угла наклона многоярусного отвала.

Выполненные поверочные расчеты подтвердили надежность разработанного метода. В таблице и на рис.3 приведены результаты поверочных расчетов устойчивости отвала с характеристиками отвальной массы, приведенными на рис.1, и с параметрами: $H = 66{,}0$ м и $\alpha = 30°$, снятыми с графика *KLB* (рис.2).

Результаты поверочных расчетов устойчивости отвалов с параметрами, установленными по методу автора

Параметры отвала		Расчетная поверхность	Расчетный коэффициент запаса устойчивости	
Высота, м	Угол наклона, град.		Метод алгебраического сложения сил	Метод многоугольника сил
66,0	30	*СДА*	0,95	1,00
		СД'А	0,96	1,02
		С'Д''А	1,01	1,11
87,0	25	Наиболее напряженная	0,95	1,03
100	20	Та же	0,96	1,02

Расчетный коэффициент запаса устойчивости по наиболее напряженной поверхности при расчете на предельное равновесие составил 1,00; расчетный коэффициент запаса устойчивости отвалов с предельными параметрами $H = 87{,}0$ м, $\alpha = 25°$ и $H = 100{,}0$ м, $\alpha = 20°$ соответственно не превысил 1,03 и 1,02 (см. таблицу).

Следует отметить, что при проведении поверочных расчетов учитывалось изменение прочностных свойств отвальной смеси с глубиной расположения ее в отвале.

Определение параметров, характеризующих сопротивляемость сдвигу отвальной смеси на различных глубинах отвала, заключалось в установлении угла внутреннего трения φ и сцепления C для средней глубины расположения основания каждого расчетного столбика, на которые разбивается призма обрушения при расчете методом алгебраического сложения сил, или каждого клина – при расчете методом многоугольника сил.

При этом для глубин концов оснований столбиков, ограниченных боковыми гранями, вычислялись напряжения $\sigma_{1i} = \gamma h_i$; по вычисленным напряжениям на паспорте прочности отвальной массы строили круги Мора, касательные к графику $\tau = f(\sigma_n)$; соединяли точки касания кругов Мора, построенных на напряжениях, вычисленных для концов оснований столбиков, прямыми линиями, продолжая их до пересечения с осью ординат. Наклоны этих прямых равны углам трения φ_i, а отсекаемые ими отрезки на оси ординат – сцеплениям C_i, характеризующим сопротивляемость сдвигу отвальной смеси на глубинах расположения оснований расчетных элементов (столбиков или блоков). В качестве примера на рис. 3 приведены параметры сопротивляемости сдвигу отвальной смеси, паспорт которой представлен на рис. 1, характеризующие ее состояние и прочностные свойства по расчетным поверхностям *СДА* и *С'Д'А*.

Если расчет напряжений σ_{1i_i} производить непосредственно для глубин се-

редин оснований элементарных столбиков, то после построения на паспорте прочности кругов Мора и установления величин $\sigma_{2i_i}, \sigma_{n_i}$ и τ_i, характеризующих предельное состояние отвальной массы, характеристики сопротивления сдвигу ее поинтервально могут быть вычислены аналитически по формулам

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_n}{2\tau}; \qquad (3)$$

$$C = \frac{\sigma_n(\sigma_1 + \sigma_2) - 2\sigma_1\sigma_2}{2\tau}. \qquad (4)$$

Заметим, что для исключения погрешности в расчетах методом касательных напряжений, связанной с неправильным учетом изменения свойств отвальной массы с глубиной, учет изменения свойств смеси и расчет этим методом должны осуществляться по вышеописанной схеме.

Относительно распространенной в инженерной практике формулы по ограничению высоты откоса для пластичных пород $H_{\text{пр}} = 5{,}14\,\tau_{\max}/\gamma$ [2], следует заметить, что для расчета предельной высоты отвала песчано-глинистой массы с изменяющимися характеристиками сопротивления сдвигу, как показали поверочные расчеты, она неприемлема: расчеты по ней приводят к существенному занижению высоты откоса отвала по сравнению с предельно допустимой высотой устойчивого откоса.

В заключение отметим, что разработанный метод расчета устойчивости откосов отвалов песчано-глинистых пород позволяет получить зависимость $H = f(\alpha)$ предельных параметров отвалов в необходимом интервале углов их заоткоски и исключает необходимость проведения поверочных расчетов и корректировки параметров. Предлагаемый метод может применяться также для расчета устойчивости откосов прибортовых массивов, сложенных пластичными породами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мочалов А.М.* Расчет устойчивости откосов плоского профиля в однородной среде // Тр. ВНИИ горн. геомех. и маркш. дела, 1976. Сб.100. С. 116-126.

2. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб, 1998. 208 с. (Минтопэнерго РФ. Гос. НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой науч. центр ВНИМИ).

3. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. М.: Госиздат, 1954. 274 с.