

Выводы

1. Разработан аналитический метод расчета диаграмм *напряжение – деформация* при клиновой форме разрушения горных пород с использованием четырех показателей их свойств (k_n – предела сопротивления материала сдвигу, f и μ – коэффициентов контактного и внутреннего трения, E – модуля упругости), доступных для экспериментального определения в лабораториях производственных предприятий простыми техническими средствами.

2. Запредельные кривые диаграмм имеют сбросы напряжений, подтверждающиеся экспериментальными наблюдениями. В момент сброса возникают площадки в виде так называемого *зуба текучести*, образование которых мы объясняем переходом процесса разрушения с выпуклой линии скольжения на вогнутую, формирующих разный характер запредельных кривых. В средней части запредельные кривые имеют кривые упрочнения, не получившие пока теоретического обоснования. Мы это явление объясняем переходом процесса разрушения с выпуклой линии скольжения на вогнутую линию скольжения, характеризующуюся такой особенностью.

3. По максимальным и минимальным значениям нормальных напряжений запредельных кривых диаграмм могут быть определены значения пределов и остаточной прочности образцов, которые по значению равноценны получаемым по диаграммам *нормальное напряжение–продольная деформация*, получаемые на прессах. Сопоставление расчетных пределов прочности с экспериментальными данными подтвердило достоверность разработанного метода в пределах 82-85 %. Это позволит улучшить методы управления горным массивом, а также даст возможность повысить эффективность дезинтеграции горных пород и уменьшить при этом энергозатраты.

4. В перспективе планируется проверка метода при других формах разрушения (диагональной, продольной и взрывоподобной).

Список литературы

1. Васильев, Л.М. Аналитическое построение диаграмм «напряжение – деформация» образцов горных пород при их усеченно – клиновой форме разрушения / Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, О.А. Усов //Металлургическая и горнорудная промышленность, № 6, 2013 – С. 81 – 84.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1967. – 423 с.
3. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наук. думка, 1989. – 190 с.
4. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения// Разрушение. – М.: Мир, 1975, т. 2.– С. 336–520.
5. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. – М.: Недра, 1975. – 277 с.
6. Барон Л.И. Горно–техническое породоведение. –М.: Наука, 1977. – 324 с.

УДК 624.131.37:519.25

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯГКИХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД

*Е.А. Сдвижкова, А.С. Ковров, Т.В. Мнишенко, Национальный горный университет, Украина
Б.Р. Ракишев, Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К. Сатпаева, Казахстан*

В работе представлены результаты исследований физико-механических характеристик мягких вскрышных пород с использованием одноплоскостного срезного прибора П10-С. По результатам лабораторных испытаний пород построены статистические распределения изучаемых количественных признаков – угла внутреннего трения и сцепления.

Введение. Расчет устойчивости откосов породных отвалов классическими методами осуществляется на основе детерминированных прочностных показателей горных пород, слагающих прибортовой массив. Однако такой подход к определению параметров карьерных откосов уже несет в себе некоторую ошибку, связанную с тем, что установленные при помощи опытов и испытаний физико-механические характеристики пород носят статистический характер и являются оценками искомых параметров с вычисленной вероятностью. Их надежность обуславливает и точность расчета, так как прочностные характеристики являются входными параметрами для любого метода расчета. Расчетные характеристики берутся на основании статистической обработки результатов испытаний горных пород.

Физико-механические свойства пород изменчивы, зависят от большого количества различных факторов, среди которых трудно выделить доминирующий, поэтому для их оценки можно использовать нормальный закон распределения. Изменчивость сцепления и угла внутреннего трения обычно учитывают с помощью коэффициентов запаса, вводимых в определенные из испытаний показатели либо в общий коэффициент запаса устойчивости борта. Полученные таким образом значения называются расчетными характеристиками.

Использование методов теории вероятностей и математической статистики дает возможность более строго и научно обоснованно определить расчетные характеристики прибортового массива [1].

Формулировка целей. Статистико-вероятностное определение прочностных характеристик пород является основой для вероятностного способа расчета устойчивости откосов. Использование расчетных показателей характеристик, вычисленных с определенной надежностью, еще не означает, что и конечный результат, т.е. коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) или параметры устойчивых откосов, будет найден с той же надежностью. Это обусловлено другими факторами, в большей или меньшей степени действующих на устойчивость откоса. Природные, горно-технические, временные факторы обуславливающие устойчивость карьерных откосов, носят вероятностный характер, что вызывает необходимость применения вероятностных методов расчета.

В связи с этим возникает задача: определить надежность получаемого КЗУ или параметров устойчивого откоса (построить границы доверительного интервала с заданной вероятностью) на основе статистических характеристик распределения прочностных параметров массива, рассматривая КЗУ как функцию случайных коррелированных аргументов.

Целью данной работы является статистическая оценка физико-механических свойств мягких вскрышных пород Мотроновско-Анновского месторождения титано-циркониевых россыпных руд.

Определение физико-механических характеристик пород методом одноплоскостного среза. Мягкие вскрышные породы Мотроновско-Анновского россыпного месторождения представлены лессовидными и плотными красно-бурыми суглинками; красно-бурыми глинами четвертичного возраста; зеленовато-серыми глинами сарматского яруса; мелкозернистыми песками сарматского яруса; тонкозернистыми рудными песками полтавского яруса. Мощность вскрышных пород изменяется в пределах от 16 м до 70 м.

С целью выполнения серий экспериментальных испытаний на сдвиг на карьере Мотроновско-Анновского месторождения титано-циркониевых россыпных руд (г. Вольногорск) были отобраны образцы мягких вскрышных пород ненарушенного сложения на участках обрабатываемых уступов в соответствии с ДСТУ Б В.2. 1-8-2001 (ГОСТ 12071-2000) «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» [2].

Образцы верхних вскрышных пород, представленные бурыми, желто-бурыми и красно-бурыми суглинками, отбирались на участках уступов карьера, подвергшихся оползневому процессам. Размеры образцов 100x100x100 мм. Количество отобранных образцов – 3 для каждой литологической разности, отобранные в разных точках карьера.

Методика проведения большинства испытаний регламентирована ДСТУ Б В.2.1-4-96. (ГОСТ 12248-96) «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [3].

Определялись следующие характеристики: сопротивление пород срезу τ , угол внутреннего трения φ и удельное сцепление C . Для этих целей был использован одноплоскостной срезной прибор П10-С с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части касательной нагрузкой при одновременном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза (рис. 1).

Для испытаний использованы образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью.

Для определения сопротивления сдвигу использованы образцы в форме цилиндра диаметром 56 мм и высотой 20 мм, отобранные компрессионными гильзами. Образцы, отобранные в компрессионных гильзах перекадывались с обеих сторон листками фильтровальной бумаги и помещались в станину прибора. Испытания проводились без замачивания в расчете на природную влажность материала.

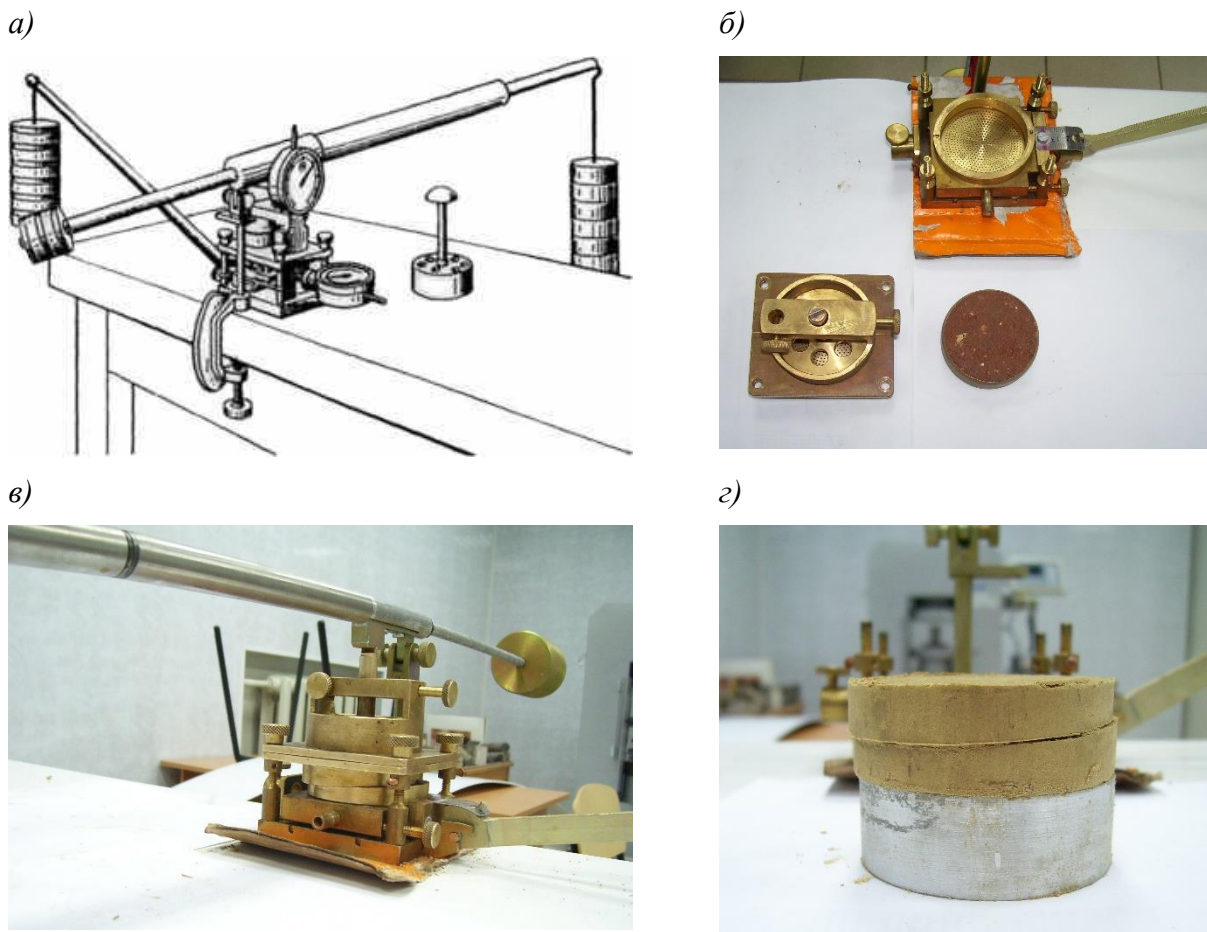


Рис. 1. Испытания образцов мягких вскрышных пород на сдвиг: а) общий вид прибора П10-С; б) подготовка образца к испытанию; в) нагружение модели; г) образец после испытания

Порядок выполнения эксперимента следующий. При помощи крепежного устройства нижняя часть прибора надежно закрепляется. На режущую заостренную часть гильзы надевается направляющий цилиндр приспособления для перемещения образцов грунта в прибор и при помощи поршня-выталкивателя образец грунта перемещается в прибор. По верхней и нижней плоскостям образца грунта предварительно прокладываются листки фильтровальной бумаги. Освобожденную от грунта гильзу снимают, устанавливают на место верхнюю часть прибора, плотно прижимают к поверхности грунта поршень и закрепляют его винтом.

К образцу прикладывают сначала вертикальную, сжимающую нагрузку, а потом горизонтальную, сдвигающую. Если испытание проводят только с целью получения показателей сопротивления сдвигу, то заданную расчетную величину вертикальной нагрузки прикладывают к испытываемому образцу сразу, в один прием, независимо от ее величины.

Каждую ступень вертикальной нагрузки выдерживают: при песчаных образцах грунта – не менее 5 мин; при глинистых образцах грунта – не менее 30 мин. Конечную ступень нагрузки выдерживают до условий стабилизации деформации сжатия. За условную стабилизацию деформации принимают величину сжатия, не превышающую 0,01 мм; для песчаных грунтов – за 30 мин; для супесей – за 3 ч; для суглинков и глин – за 12 ч.

По измеренным в процессе испытания значениям касательной и нормальной нагрузок вычисляют касательные и нормальные напряжения τ и σ , МПа, по формулам:

$$\tau = \frac{Q}{A}; \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где Q и F – соответственно касательная и нормальная силы к плоскости среза, кг, A – площадь среза, см².

На основании проведенных испытаний вычисляются основные параметры сдвига: угол внутреннего трения и сцепление. Результаты испытаний представляются в виде графика зависимости между давлением и сопротивлением сдвигу.

Удельные значения угла внутреннего трения φ и сцепления C при анализе не менее 3-х проб каждой литологической разности, вычислялись по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n \sum \tau_i \sigma_i - \sum \tau_i \sum \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}; \quad (3)$$

$$c = \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \tau_i \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \quad (4)$$

где τ_i – опытные значения сопротивления срезу, определенные при различных значениях σ_i и относящиеся к одному инженерно-геологическому элементу или отдельному монолиту грунта (при $n \geq 3$), n – число испытаний.

Построение статистического распределения изучаемых количественных признаков – угла внутреннего трения φ и сцепления C .

Полученные экспериментальным путем значения угла внутреннего трения φ и сцепления C со статистической точки зрения представляют собой выборки из генеральных совокупностей объектов, которым присущи указанные механические характеристики. Для систематизации и визуализации наблюдаемого необходимо построить статистическое распределение каждого изучаемого количественного признака: угла внутреннего трения и сцепления. С этой целью данные (значения каждого изучаемого признака X) группируются в интервальные ряды (табл. 1).

Таблица 1 – Вид интервального ряда для признака X

Интервалы с границами $x_{i-1} - x_i$,	1	2	.....	r
Длины интервалов	l_1	l_2	.....	l_r
Частоты	m_1	m_2	.....	m_r
Относительные частоты	w_1	w_2	.....	w_r
Середины интервалов	u_1	u_2	.....	u_r

Количество интервалов может быть выбрано произвольно, исходя из лучшей визуализации данных, либо определено по формуле [4]:

$$r = 1 + 3.21 \lg n, \quad (5)$$

где n – объем выборки.

Графическим изображением интервального ряда является гистограмма относительных частот, высоты которой определяются формулой

$$h_i = \frac{w_i}{l_i}, \quad i = 1, r, \quad (6)$$

Гистограммы относительных частот для исследуемых количественных признаков угла внутреннего трения и сцепления приведены на рис. 2 и 3.

Для каждого распределения получены статистические моменты (параметры распределения), оценивающие среднее значение и разброс:

- начальный момент первого порядка (выборочная средняя)

$$\bar{x}^* = \sum_{i=1}^r u_i \cdot w_i; \quad (7)$$

- центральный момент второго порядка (выборочная дисперсия)

$$D^* = \sum_{i=1}^r u_i^2 \cdot w_i - (\bar{x}^*)^2; \quad (8)$$

- исправленная дисперсия

$$S^2 = \frac{n}{n-1} \cdot D^*; \quad (9)$$

- среднее квадратическое отклонение (стандарт)

$$S = \sqrt{S^2}; \quad (10)$$

- относительная вариация

$$\eta^* = \frac{S}{\bar{x}^*}. \quad (11)$$

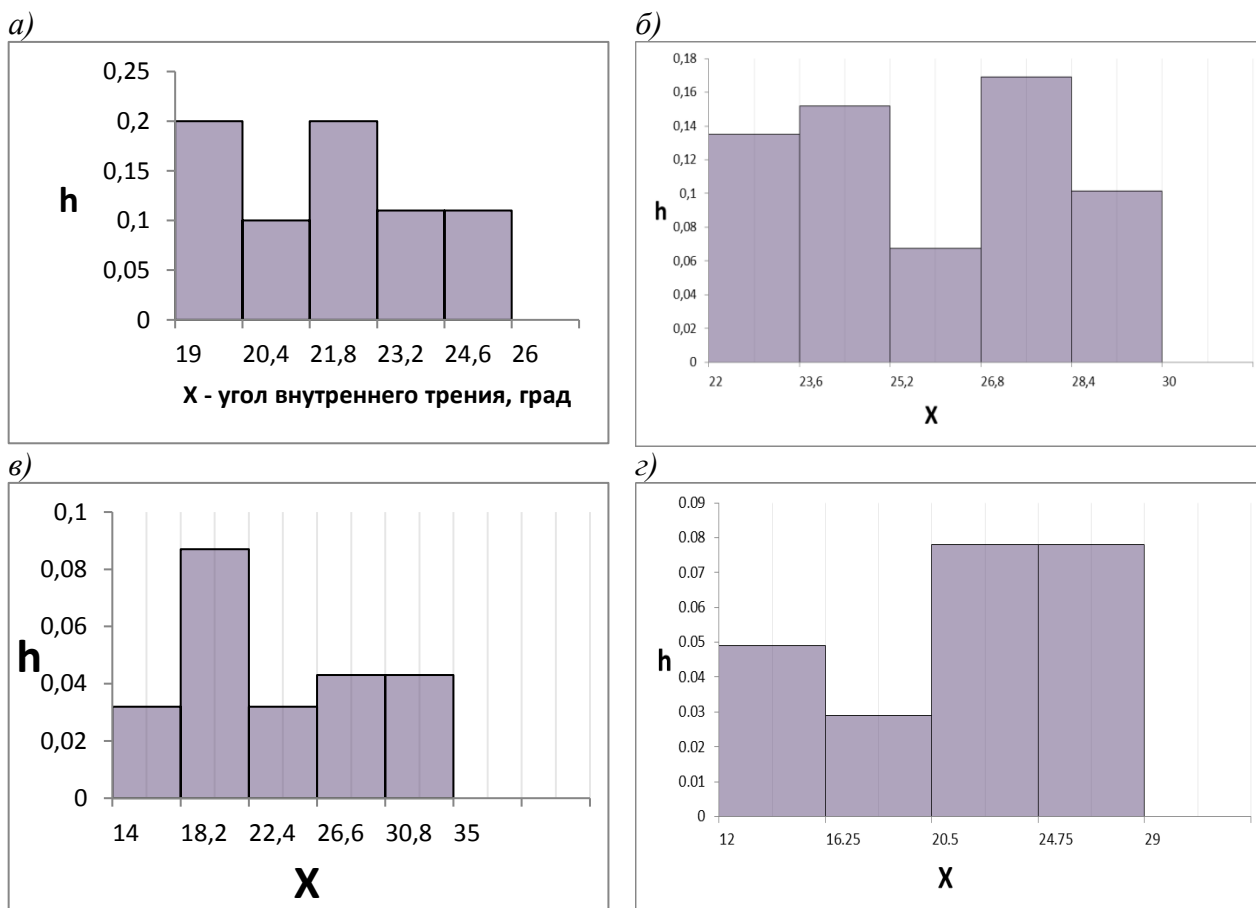


Рис. 1. Гистограммы частот для угла внутреннего трения: а) желто-бурые лессовые суглинки; б) темно-бурые суглинки; в) красно-бурые глины; г) серо-зеленые глины.

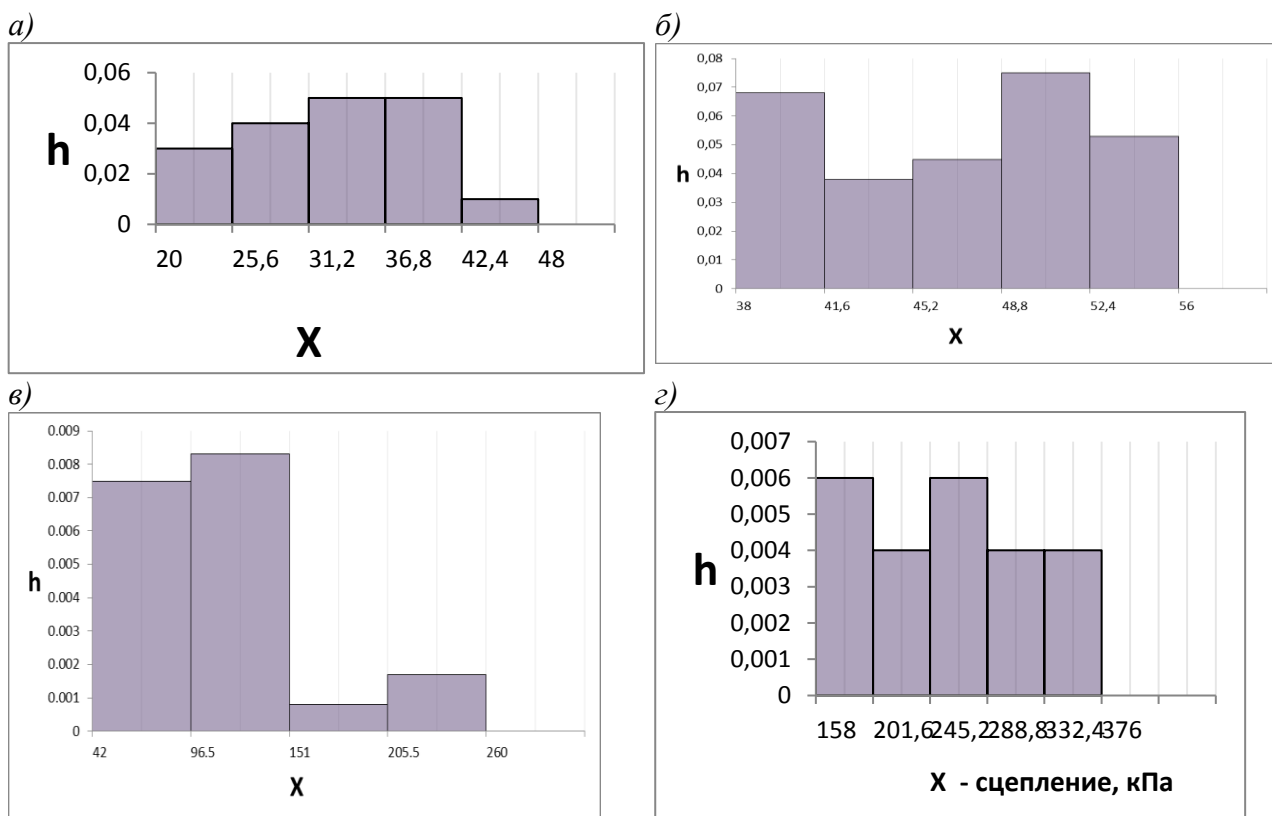


Рис. 2. Гистограммы частот для сцепления: а) желто-бурые лессовые суглинки; б) темно-бурые суглинки; в) красно-бурые глины; г) серо-зеленые глины.

Вычисленные значения статистических моментов сведены в таблицы 2 и 3.

Из анализа распределений угла внутреннего трения следует, что для суглинков вариация значений относительно среднего не превышает 10%, для глин вариация значений больше, но не превосходит 24%.

Разброс значений сцепления также невелик для суглинков, составляет 11–18%. Но значения сцепления, полученные на образцах глины, имеют значительный разброс. Вариация сцепления красно-бурой глины достигает 43%.

Таблица 2 – Параметры статистических распределений угла внутреннего трения φ

Порода	Параметры статистического распределения		
	\bar{x}^*	S	η^*
желто-бурые лессовые суглинки	22,15	1,97	0,09
темно-бурые суглинки	25,87	2,30	0,09
красно-бурые глины	24,08	5,78	0,24
серо-зеленые глины	21,74	4,85	0,22

Таблица 3 – Параметры статистических распределений сцепления C

Порода	Параметры статистического распределения		
	\bar{x}^*	S	η^*
желто-бурые лессовые суглинки	30,96	5,70	0,18
темно-бурые суглинки	47,09	5,33	0,11
красно-бурые глины	113,83	49,41	0,43
серо-зеленые глины	259,73	62,54	0,24

Как видно из гистограмм, для полученных статистических совокупностей характерно отсутствие интервалов, в которые значения изучаемых величин попадают с наибольшей частотой. В основном, и угол внутреннего трения и сцепление с одинаковой частотой принимают значения из разных интервалов равной длины. Например, гистограмма величин сцепления, полученных для серо-зеленой глины показывает, что с одинаковой частотой сцепление принимает значение и в наименьшем интервале (158–201 кПа) и в наибольшем интервале (332–376 кПа), и в интервале, содержащем среднюю выборочную (259,7 кПа). Следует отметить, что попытка увеличить при обработке данных число интервалов не изменила общей картины. Вид гистограммы не свидетельствует в пользу нормального распределения, которое чаще всего используется в качестве статистической модели механических характеристик. В грубом приближении можно предположить, что распределение изучаемых количественных признаков близко к равномерному закону.

Гипотеза о том или ином теоретическом распределении важна с точки зрения учета изменчивости изучаемого количественного признака. В частности, при моделировании механических процессов, развивающихся в грунтах под действием различных природных и техногенных факторов, важен учет разброса основных характеристик, определяющих устойчивость грунтовых склонов – сцепления и угла внутреннего трения. Использование в расчетах только среднего значения механической характеристики без рассмотрения крайних значений может привести к грубым ошибкам при проектировании объектов. Одним из способов учета изменчивости исходных данных является выполнение многовариантных расчетов с вариацией входных параметров в пределах установленного разброса. В частности, при использовании современных численных методов возможно проведение вычислительного эксперимента, в рамках которого исходные данные – значения механических свойств грунтов могут генерироваться как случайные числа в соответствии с установленным законом распределения этих свойств [5].

Выводы. В работе представлены результаты исследований физико-механических характеристик мягких вскрышных пород Мотроновско-Анновского месторождения титано-циркониевых россыпных руд. С целью выполнения серий экспериментальных испытаний на сдвиг на карьере были отобраны образцы мягких вскрышных пород ненарушенной структуры размерами 100x100x100 мм. В лабораторных условиях выполнена серия испытаний образцов пород на одноплоскостном срезном приборе П10-С с целью определения физико-механических характеристик: сопротивления пород срезу τ , угла внутреннего трения φ и сцепления C .

По результатам лабораторных испытаний пород построены статистические распределения изучаемых количественных признаков – угла внутреннего трения φ и сцепления C .

Из анализа распределений угла внутреннего трения следует, что для суглинков вариация значений относительно среднего не превышает 10%, для глин вариация значений больше, но не превосходит 24%. Разброс значений сцепления также невелик для суглинков, составляет 11–18%. Но значения сцепления, полученные на образцах глины, имеют значительный разброс. Вариация сцепления красно-бурой глины достигает 43%.

Вид гистограмм не свидетельствует в пользу нормального распределения, которое чаще всего используется в качестве статистической модели механических характеристик горных пород. В грубом приближении можно предположить, что распределение изучаемых количественных признаков близко к равномерному закону.

Список литературы

1. Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. – 683 с.
2. Грунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків: ДСТУ Б В.2. 1-8-2001 (ГОСТ 12071-2000). – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2002. – 54 с.
3. Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості: ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 96 с.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М., Высш.шк., 2003. – 479 с.
5. Babets D., Kirichenko Ye, Sdvizhkova O. Numerical modeling rocks properties random distribution in the geomechanical problems // Scientific bulletin of the National Mining University №6. – Dnipropetrovsk, 2008 – P 47-49.